

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| **Profesionālās izglītības kompetences centrs RĪGAS VALSTS TEHNIKUMS** |

**ELEKTROTEHNIKA**

**Rīga 2012**

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| **Profesionālās izglītības kompetences centrs RĪGAS VALSTS TEHNIKUMS** |

**Vladimirs Meļņikovs**

# ELEKTROTEHNIKA

**LEKCIJU KONSPEKTS**

**Rīga 2012**

Priekšvārds.

Mācību līdzeklis „Elektrotehnika” paredzēts Rīgas Valsts tehnikuma Enerģētikas specialitātes izglītojamiem. Lekciju konspekts „Elektrotehnika” ir pamatamācību līdzeklis, kasnodrošina visa mācību priekšmeta programmas obligātā satura apguvi. Mācību grāmatā iekļauti mācību priekšmeta programmas apguvei nepieciešamie elementi:

1. mācību priekšmeta obligātais saturs: elektriskais lauks; līdzstrāvas elektriskās ķēdes; magnētiskais lauks; elektromagnētiskā indukcija; kapacitāte, kondensatori; maiņstrāvas elektriskās ķēdes; trīsfāzu maiņstrāva; nesinusoidālas strāvas; pārejas procesi elektriskajās ķēdes;

2. uzdevumi zināšanu un prasmju nostiprināšanai, attieksmju veidošanai;

3. uzdevumi radošas darbības veicināšanai;

Mācību līdzekļa saturs kopumā atbilst Profesija standartos PS 0198 noteiktajiem galvenajiem mērķiem un uzdevumiem;

Mācību līdzekļa saturs atbilst profesionālās izglītības programmas „Enerģētika” un mācību priekšmeta „Elektrotehnika un elektriskie mērījumi” programmas mērķiem un uzdevumiem, lai izglītojamajiem nodrošinātu mācību priekšmeta standarta un Profesijas standartā noteikto kompetenču apguvi.

Nepārtraukti aug vajadzība pēc kvalificētu elektrotehniķu kadriem. Lai apgūtu tehniku, kļūtu par radošu darbinieku, jāiemācās zinātņu pamati, konkrēti runājot, - teorētiskās elektrotehnikas pamati.

Lekciju konspektu sastādīja Dr.Ph. V.Meļņikovs.

376 lapaspuses, 445 ilustrācijas, 18 tabulas, 20 bibliogrāfiskie nosaukumi.

**Saturs**

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | Anotācija | | | | 3 | |
|  | Saturs | | | | 4 | |
|  | Ievads | | | | 9 | |
| 1. | Elektriskais lauks | | | | 10 | |
|  | 1.1. | Elektriskie lādiņi un elektriskais lauks | | | 10 | |
|  |  | 1.1.1. | | Elektriskās mijiedarbības un elektrisko lādiņu atklāšana | 10 | |
|  |  | 1.1.2. | | Vielas elektriskā struktūra. Elementārlādiņš | 10 | |
|  |  | 1.1.3. | | Elektriskā lādiņa nezūdamības likums | 10 | |
|  |  | 1.1.4. | | Kulona likums | 11 | |
|  |  | 1.1.5. | | Elektriskā lauka intensitāte | 11 | |
|  |  | 1.1.6. | | Punktveida lādiņa elektriskā lauka intensitāte | 12 | |
|  |  | 1.1.7. | | Elektrisko lauku intensitāšu saskaitīšana. Superpozīcijas princips | 12 | |
|  |  | 1.1.8. | | Elektriskā lauka intensitātes līnijas. Lauka grafiskais attēlojums | 12 | |
|  |  | 1.1.9. | | Elektriskā lauka intensitātes plūsma. Gausa teorēma | 13 | |
|  |  | 1.1.10. | | Elektriskais lauks dielektriķī | 14 | |
|  |  | 1.1.11. | | Elektrisko lauku piemēri | 17 | |
|  | 1.2. | Elektriskā lauka darbs un potenciāls | | | 19 |
|  |  | 1.2.1. | | Homogēna elektriskā lauka darbs | 19 |
|  |  | 1.2.2. | | Lādiņa potenciālā enerģija elektriskajā laukā | 20 |
|  |  | 1.2.3. | | Elektriskā lauka potenciāls. Spriegums | 20 |
|  |  | 1.2.4. | | Ekvipotenciālās līnijas un virsmas | 22 |
|  |  | 1.2.5. | | Vadītāji. Vadītāju virsmas potenciāls | 23 |
|  |  | 1.2.6. | | Zemes elektriskais lauks | 24 |
|  |  | 1.2.7. | | Vadītāju elektrostatiskā iezemēšana | 24 |
| 2. | Līdzstrāvas elektriskās ķēdes | | | | 25 | |
|  | 2.1. | Pamatjēdzieni | | | 25 | |
|  | 2.2. | Elektriskā ķēde un tā elementi | | | 30 | |
|  | 2.3. | Nesazarota elektriskā ķēde | | | 35 | |
|  | 2.4. | Elektriskās ķēdes raksturīgie darba režīmi | | | 37 | |
|  | 2.5. | Elektriskās strāvas darbs un jauda | | | 41 | |
|  | 2.6. | Vadu šķērsgriezuma izvēle pēc pieļaujamā sprieguma zuduma | | | 44 | |
|  | 2.7. | Enerģijas patērētāju (rezistoru) virknes slēgums | | | 46 | |
|  | 2.8. | Sazarota elektriskā ķēde. Kirhofa likumi | | | 48 | |
|  | 2.9. | Sazarotas elektriskās ķēdes ar vienu avotu. Paralēlais slēgums | | | 49 | |
|  | 2.10. | Sazarotas elektriskās ķēdes ar vienu avotu. Jauktais slēgums | | | 51 | |
|  | 2.11. | Pretestību trīsstūra slēguma pārveidošana ekvivalentā zvaigznes slēgumā un otādi | | | 57 | |
|  | 2.12. | Nesazarotu elektrisko ķēžu aprēķināšana ar Kirhofa līkumu palīdzību | | | 60 | |
|  | 2.13. | Līdzstrāvas enerģijas avoti | | | 62 | |
|  |  | 2.13.1. | | Elektriska strāva elektrolītos | 62 | |
|  |  | 2.13.2. | | Galvaniskie (primārie) elementi | 63 | |
|  |  | 2.13.3. | | Akumulatori (sekundārie elementi) | 66 | |
|  |  | 2.13.4. | | Saules baterija | 69 | |
|  | 2.14. | EDS (barošanas) avotu slēgumi | | | 71 | |
|  | 2.15. | Sazarotu elektrisko ķēžu aprēķināšana ar Kirhofa likumu palīdzību | | | 74 | |
|  | 2.16. | Kontūru strāvu metode | | | 77 | |
|  | 2.17. | Mezglu sprieguma metode | | | 80 | |
|  | 2.18. | Superpozīcijas metode | | | 82 | |
|  | 2.19. | Ekvivalentā ģeneratora metode. Divpols | | | 84 | |
|  | 2.20. | Četrpols | | | 88 | |
|  | 2.21. | Četrpola konstantes | | | 89 | |
|  | 2.22. | Četrpola konstantu aprēķināšana | | | 90 | |
|  | 2.23. | Četrpola pārbaude | | | 91 | |
|  | 2.24. | Elektriskās strāvas siltumdarbība | | | 92 | |
|  | 2.25. | Vadu šķērsgriezuma izvēle, ievērojot pieļaujamo silšanu | | | 92 | |
| 3. | Līdzstrāvas nelineārās ķēdes | | | | 96 | |
|  | 3.1. | Elektriskās ķēdes nelineārie elementi | | | 96 | |
|  | 3.2. | Nelineāru ķēžu grafiska aprēķināšana | | | 98 | |
|  | 3.3. | Nelineāru ķēžu grafoanalītiska aprēķināšana | | | 101 | |
| 4. | Magnētiskās ķēdes | | | | 104 | |
|  | 4.1. | Elektriskās strāvas magnētiskais lauks | | | 104 | |
|  | 4.2. | Magnētiskā indukcija | | | 106 | |
|  | 4.3. | Magnētiskā plūsma | | | 107 | |
|  | 4.4. | Magnētiskā lauka spēku darbs | | | 108 | |
|  | 4.5. | Strāvas kontūra pārvietošanās darbs | | | 110 | |
|  | 4.6. | Elektromagnētiskā indukcija | | | 111 | |
|  | 4.7. | Plūsmas saķēdējums | | | 112 | |
|  | 4.8. | Elektromagnētiskās indukcijas elektrodzinējspēks | | | 114 | |
|  | 4.9. | Mehāniskās enerģijas pārveidošana elektriskajā enerģijā | | | 115 | |
|  | 4.10. | Elektriskās enerģijas pārveidošana mehāniskajā enerģijā | | | 116 | |
|  | 4.11. | Elektrodzinēji | | | 117 | |
|  | 4.12. | Virpuļstrāvas | | | 118 | |
|  | 4.13. | Magnētiskā lauka intensitāte | | | 119 | |
|  | 4.14. | Magnētiskais moments un magnētiskais spriegums | | | 120 | |
|  | 4.15. | Pilnās strāvas likums | | | 121 | |
|  | 4.16. | Taisna strāvas vada magnētiskais lauks | | | 122 | |
|  | 4.17. | Divu paralēlu strāvas vadu magnētiskais lauks | | | 124 | |
|  | 4.18. | Koaksiāla kabeļa magnētiskais lauks | | | 126 | |
|  | 4.19. | Gredzenveida spoles (toroīda) magnētiskais lauks | | | 127 | |
|  | 4.20. | Feromagnētisko materiālu pamatīpašības | | | 130 | |
|  | 4.21. | Feromagnētiskie materiāli | | | 133 | |
|  | 4.22. | Nesazarotu magnētisko ķēžu aprēķini | | | 135 | |
|  | 4.23. | Oma likums magnētiskajai ķēdei | | | 137 | |
|  | 4.24. | Sazarotu magnētisko ķēžu aprēķini | | | 143 | |
|  | 4.25. | Magnētiskās ķēdes ar pastāvīgajiem magnētiem | | | 145 | |
|  | 4.26. | Pašindukcija. Induktivitāte | | | 147 | |
|  | 4.27. | Savstarpējā indukcija | | | 148 | |
|  | 4.28. | Divvadu līnijas induktivitāte | | | 150 | |
|  | 4.29. | Magnētiskā lauka enerģija | | | 151 | |
|  | 4.30. | Magnētiskā lauka enerģijas blīvums | | | 152 | |
|  | 4.31. | Elektromagnēti | | | 153 | |
|  | 4.32. | Savstarpējā induktivitāte | | | 154 | |
|  | 4.33. | Induktīvi saistītu kontūru magnētiskā lauka enerģija | | | 155 | |
|  | 4.34. | Savstarpējās indukcijas elektrodzinējspēks | | | 156 | |
|  | 4.35. | Kontūru magnētiska saite | | | 156 | |
| 5. | Elektriskās ķēdes ar kondensatoriem | | | | 158 | |
|  | 5.1. | Elektriska kapacitāte. Kondensatori | | | 158 | |
|  | 5.2. | Kondensatoru uzbūve | | | 159 | |
|  | 5.3. | Kondensatoru slēgumi | | | 163 | |
|  | 5.4. | Plakans kondensators | | | 164 | |
|  | 5.5. | Plakans kondensators ar divslāņu dielektriķi | | | 165 | |
|  | 5.6. | Cilindrisks kondensators | | | 166 | |
|  | 5.7. | Divvadu līnijas kapacitāte | | | 168 | |
|  | 5.8. | Kondensatora uzlādes strāva | | | 169 | |
|  | 5.9. | Elektriska lauka enerģija | | | 171 | |
|  | 5.10. | Elektriskā lauka enerģijas blīvums | | | 172 | |
|  | 5.11. | Kondensatora izlāde caur pretestību | | | 173 | |
|  | 5.12. | Dielektriķis elektriskajā laukā | | | 175 | |
|  | 5.13. | Gāze elektriskajā laukā | | | 178 | |
|  | 5.14. | Elektriskā izolācijā | | | 180 | |
|  | 5.15. | Elektroizolācijas materiāli | | | 181 | |
| 6. | Sinusoidālas maiņstrāvas ķēdes | | | | 185 | |
|  | 6.1. | Pamatjēdzieni. Sinusoidāla EDS iegūšana | | | 185 | |
|  | 6.2. | Maiņstrāvas frekvence | | | 187 | |
|  | 6.3. | Maiņstrāvas un maiņsprieguma vidējās vērtības | | | 189 | |
|  | 6.4. | Maiņstrāvas un maiņsprieguma efektīvās vērtības | | | 190 | |
|  | 6.5. | Fāze. Fāzu nobīde | | | 191 | |
|  | 6.6. | Sinusoidālu lielumu grafiskais attēls | | | 193 | |
|  | 6.7. | Sinusoidālu lielumu saskaitīšana | | | 195 | |
|  | 6.8. | Maiņstrāvas ķēžu īpatnības | | | 199 | |
|  | 6.9. | Maiņstrāvas ķēde ar aktīvo pretestību | | | 200 | |
|  | 6.10. | Virsmas efekts | | | 202 | |
|  | 6.11. | Maiņstrāvas ķēde ar induktivitāti | | | 204 | |
|  | 6.12. | Maiņstrāvas ķēde ar kapacitāti | | | 207 | |
|  | 6.13. | Maiņstrāvas ķēde ar aktīvo pretestību un induktivitāti | | | 210 | |
|  | 6.14. | Maiņstrāvas ķēde ar aktīvo pretestību un kapacitāti | | | 217 | |
|  | 6.15. | Maiņstrāvas ķēde ar virknē slēgtu aktīvo pretestību, induktivitāti un kapacitāti | | | 222 | |
|  | 6.16. | Virknes slēguma vispārīgs gadījums | | | 226 | |
|  | 6.17. | Spriegumu rezonanse | | | 230 | |
|  | 6.18. | Rezonanses līknes | | | 232 | |
| 7. | Sazarotas elektriskās maiņstrāvu ķēdes | | | | 234 | |
|  | 7.1. | Aprēķins sazarotai ķēdei ar strāvu komponentu metodi | | | 234 | |
|  | 7.2. | Vadītspēju metode | | | 239 | |
|  | 7.3. | Paralēlslēguma vispārīgs gadījums | | | 244 | |
|  | 7.4. | Maiņstrāvas ķēdes jauktais slēgums | | | 245 | |
|  | 7.5. | Kondensators ar zudumiem | | | 248 | |
|  | 7.6. | Strāvu rezonanse | | | 250 | |
|  | 7.7. | Strāvu rezonanse kontūrā bez zudumiem | | | 254 | |
|  | 7.8. | Jaudas koeficients un tā nozīme | | | 255 | |
|  | 7.9. | Aktīvā un reaktīvā enerģija | | | 258 | |
| 8. | Simboliskā metode | | | | 259 | |
|  | 8.1. | Pamatjēdzieni | | | 259 | |
|  | 8.2. | Strāvas, spriegumi un pretestības simboliskā formā | | | 262 | |
|  | 8.3. | Oma likums simboliskā formā | | | 264 | |
|  | 8.4. | Kirhofa likumi simboliskā formā | | | 264 | |
|  | 8.5. | Maiņstrāvas jauda simboliskā formā | | | 265 | |
|  | 8.6. | Ķēdes ar virknē slēgtām pretestībām | | | 266 | |
|  | 8.7. | Ķēdes ar paralēli slēgtām pretestībām | | | 271 | |
|  | 8.8. | Sazarotu maiņstrāvas ķēdes jauktais slēgums | | | 274 | |
|  | 8.9. | Sarežģītas maiņstrāvas ķēdes | | | 277 | |
| 9. | Trīsfāzu strāvas ķēdes | | | | 279 | |
|  | 9.1. | Trīsfāzu sistēma | | | 279 | |
|  | 9.2. | Simetriska trīsfāzu EDS iegūšana | | | 279 | |
|  | 9.3. | Zvaigznes slēgums | | | 282 | |
|  | 9.4. | Patērētāju slēgums zvaigznē | | | 284 | |
|  | 9.5. | Trīsfāzu ķēdes jaudas | | | 286 | |
|  | 9.6. | Nullvada nozīme nesimetriskas slodzes zvaigznes slēgumā | | | 287 | |
|  | 9.7. | Trīsvadu sistēma | | | 293 | |
|  |  | 9.7.1. | Zvaigznē slēgts simetrisks patērētājs bez neitrāles vada | | 293 | |
|  |  | 9.7.2. | Zvaigznē slēgts nesimetrisks patērētājs bez neitrāles vada | | 295 | |
|  |  | 9.7.3. | Avārijas režīmi trīsvadu sistēma | | 296 | |
|  | 9.8. | Trīsstūra slēgums | | | 306 | |
|  |  | 9.8.1. | Ģeneratora slēgums trīsstūrī | | 306 | |
|  |  | 9.8.2. | Patērētāju slēgums trīsstūrī | | 307 | |
|  | 9.9. | Trīsstūra pārveidošana zvaigznē | | | 312 | |
|  | 9.10. | Rotējošais magnētiskais lauks | | | 314 | |
|  | 9.11. | Rotējošā magnētiskā lauka griešanās ātrums | | | 317 | |
|  | 9.12. | Asinhronā dzinēja uzbūve un darbības princips | | | 318 | |
|  | 9.13. | Fāzu secība | | | 321 | |
|  | 9.14. | Nesimetriskas trīsfāzu sistēmas simetriskas komponentes | | | 323 | |
| 10. | Nesinusoidālas strāvas | | | | 326 | |
|  | 10.1. | Pamatjēdzieni | | | 326 | |
|  | 10.2. | Periodisko līkņu veidi | | | 328 | |
|  | 10.3. | Nesinusoidālas strāvas un spriegumi elektriskajās ķēdes | | | 331 | |
|  | 10.4. | Nesinusoidālas strāvas un spriegumi aprēķins | | | 332 | |
|  | 10.5. | Nesinusoidālas strāvas un spriegumi efektīvās vērtības | | | 336 | |
|  | 10.6. | Nesinusoidālas strāvas jauda | | | 337 | |
|  | 10.7. | Periodisko līkņu sadalīšana harmoniskajās komponentes | | | 338 | |
|  | 10.8 | Spriegumu un strāvu rezonanses nesinusoidālu strāvu ķēdes | | | 343 | |
|  | 10.9. | Filtri | | | 344 | |
|  | 10.10. | Augstākās harmoniskas trīsfāzu strāvas ķēdē | | | 346 | |
|  |  | 10.10.1. | | Augstāko harmonisku īpašības trīsfāžu ķēdes | 346 | |
|  |  | 10.10.2. | | Zvaigznes slēgums bez neitrālā vada | 347 | |
|  |  | 10.10.3. | | Zvaigznes slēgums, četrvadu sistēma | 349 | |
|  |  | 10.10.4. | | Trīsstūra slēgums | 350 | |
|  | 10.11. | Strāva, spriegums un magnētiskā plūsma ķēdē ar tēraudu | | | 353 | |
|  | 10.12. | Magnetizējošās strāvas līknes konstruēšana | | | 354 | |
|  | 10.13. | Jauda | | | 355 | |
| 11. | Pārējas process lineārās ķēdēs | | | | 356 | |
|  | 11.1. | Pārējas procesi un komutācijas likumi | | | 356 | |
|  | 11.2. | Ķēdes ar pretestību *R* un induktivitāti *L* (spoles) pieslēgšana līdzspriegumam | | | 357 | |
|  | 11.3. | Līdzstrāvas ķēdes ar induktivitāti *L* pārtraukšana | | | 359 | |
|  | 11.4. | Līdzstrāvas ķēdes posma ar pretestību *R* un induktivitāti *L* saslēgšana īsi | | | 361 | |
|  | 11.5. | Ķēdes ar pretestību *R* un kapacitāti *C* pieslēgšana līdzspriegumam | | | 365 | |
|  | 11.6. | Kondensatora izlādēšanas caur pretestību R | | | 367 | |
|  | 11.7. | Kondensatora izlāde caur spoli (svārstību kontūrs) | | | 372 | |
|  | 11.8 | Strāvas un sprieguma maiņas likums svārstību kontūrā | | | 373 | |
|  | 11.9. | Pašsvārstību periods un frekvence | | | 373 | |
|  | 11.10. | Rimstošās svārstības | | | 374 | |
|  | 11.11. | Spoles pieslēgšana sinusoidālam spriegumam | | | 375 | |
|  |  | | | |  | |
|  | Literatūras saraksts | | | | 376 | |

**IEVADS**

Elektrotehnika ir zinātnes un tehnikas nozare, kas saistīta ar elektromagnētisko parādību praktisku izmantošanu. Mūsdienu tautas saimniecībā svarīga nozīme ir elektrotehnikas nozarei, ko sauc par elektroenerģētiku. Tā aplūko jautājumus, kas saistās ar elektroener­ģijas iegūšanu, tās pārvadīšanu lielos attālumos un sadalīšanu starp patērētājiem.

Elektroenerģija ir mūsdienu tautas saimniecības galvenā ener­ģētiskā bāze. Tās ražošanas nemitīgu pieaugumu var nodrošināt, ce­ļot lieljaudas elektrostacijas.

Elektrostacija ir liels rūpniecības uzņēmums, kura produkcijai — elektroenerģijai — salīdzinājumā ar citu rūpniecības uzņēmumu pro­dukciju ir tā īpatnība, ka viss elektroenerģijas ražošanas, pārvades un patēriņa process notiek sekundes daļās. Tāds momentāns ražo­šanas un patēriņa raksturs piešķir elektroenerģētiskajai rūpniecībai tikai tai piemītošas tehniskās un ekonomiskās īpatnības. Elektrosta­cijas produkciju — elektroenerģiju — lielos daudzumos nevar uz­krāt, to var pārveidot tikai citos enerģijas veidos, piemēram, ūdens potenciālajā enerģijā — augstu izvietotās ūdenskrātuvēs; siltuma po­tenciālajā enerģijā, kas uzkrāta (akumulēta) ar karsto ūdeni, u. tml.

Elektroenerģijas izmantošanas kāpinājums ražošanā nozīmē darba ražīguma pieaugumu. Turklāt katras produkcijas vienības pašizmaksa ir jo mazāka, jo vairāk tās ražošanā tiek iz­mantota elektriskā enerģija salīdzinājumā ar citiem enerģijas vei­diem. Tāpēc līdz ar produkcijas ražošanas pieaugumu vēl straujāk jāpieaug elektroenerģijas iegūšanai. Elektroenerģijas ieviešanu visu veidu produkcijas ražošanā un procesos, kas saistīti ar iedzīvotāju apkalpošanu, sauc par elektrifikāciju. Enerģētisko resursu daļu, kas tiek patērēta elektroenerģijas ražošanai, sauc par enerģētiskās bilances elektrifikācijas koeficientu.

Elektroenerģija ir ne tikai varena ražošanas speķu sastāvdaļa, bet tā aptver dzīves visdažādākās jomas. Šo elektrības no­zīmi nosaka elektriskās enerģijas un elektromagnētisko procesu raksturīgās īpatnības.

1. Izmantojot elektrisko enerģiju, var realizēt visdažādākos procesus — mehāniskos, akustiskos, termiskos, ķīmiskos, optis­kos u.c. Pie tam šo procesu ierīces un sistēmas ir samērā vienkār­šas un tām ir augsts lietderības koeficients. Šī iespējamo procesu daudzveidība arī nosaka elektroenerģijas daudzveidīgo izmanto­šanu.

2. Elektrisko enerģiju var samērā vienkārši un ar maziem zu­dumiem pārvadīt lielos attālumos no avota līdz patērētājam.

3. Elektriskā enerģija, enerģijas impulsi izplatās ar ļoti lielu ātrumu — ar gaismas izplatīšanās ātrumu c = 3·108m/s. Pie tam enerģija var ne tikai plūst pa elektriskās strāvas vadiem, bet arī izplatīties brīvu elektromagnētisko viļņu veidā, kuri nav saistīti ar vadiem.

4. Elektromagnētisko procesu vadīšanas, kontroles un mērīšanas ierīcēm ir liela jutība un maza inerce, pie tam elektromagnētis­kos impulsus var pastiprināt.

Šo elektrības īpašību izmantošanas rezultātā izveidojās atse­višķas tehnikas nozares — elektrotehnika, radiotehnika, elektro­nika, telekomunikācijas tehnika, elektropiedziņa, mehanotronika un automātika.

Dabiski, ka, pat vienkārši iepazīstoties ar moderno tehniku, ir labi jāapgūst zinātņu pamati un it īpaši viena no svarīgākajām zinātnēm mūsdienu tehnikā – elektrotehnika.

**1. NODAĻA**

**ELEKTRISKAIS LAUKS**

**1.1. ELEKTRISKIE LĀDIŅI UN ELEKTRISKAIS LAUKS**

**1.1.1. ELEKTRISKĀS MIJIEDARBĪBAS UN ELEKTRISKO LĀDIŅU**

**ATKLĀŠANA**

Ķermeņu elektrizācijas parādības atklātas tālā senatnē. Stāsta, ka jau pirms 20 gadsimtiem grieķu filozofs Taless novērojis saberzēta dzintara spēju pie­vilkt vieglus priekšmetus. Sistemātiski «elektrības spēku» novērojumi aizsākti renesanses laikā, bet pirmās kvalitatīvās elektrisko parādību likumsakarības konstatētas tikai 18. gadsimtā. Nozīmīgi bija amerikāņu fiziķa Bendžamina Franklina pētījumi. B. Franklins atklāja divu veidu elektrību (elektriskos lādi­ņus). Noskaidrojās, ka, berzējot divus ķermeņus, tie uzlādējas ar pretēju zīmju lādiņiem. Izteicieniem «pozitīvs elektriskais lādiņš» un «negatīvs elek­triskais lādiņš» ir relatīva nozīme, — tie ir norunāti. Tā, piemēram, stikls uzlādējas pozitīvi, bet sveķi — negatīvi. Ja ķermeņiem ir vienādzīmju elektris­kie lādiņi, ķermeņi atgrūžas, bet, ja pretēju zīmju lādiņi, tad ķermeņi pievelkas. Jau 18. gadsimtā noskaidrojās, ka «elektrību» nevar patvaļīgi radīt vai iznī­cināt. Katrā elektroneitrālā ķermenī vienādā daudzumā ir pretēju zīmju lādiņi. Ja ķermenis, to berzējot, karsējot vai tam pieskaroties, iegūst vienas zīmes elektrisko lādiņu, tad kāds cits ķermenis zaudē tikpat lielu pretējas zīmes lādiņu. Elektrisko lādiņu nezūdamību eksperimentāli pierādīja Maikls Faradejs (Anglija) 19. gs. 30. gados. Tad arī kļuva skaidrs, ka elektriskais lādiņš ir vielas daļiņu neatņemama īpašība. Tomēr elektrisko lādiņu un elektrisko spēku loma vielas uzbūvē galīgi noskaidrojās tikai 19. gs. beigās, pēc tam, kad tika atklāts elektrons (elementārdaļiņa) — negatīva elektriskā lādiņa mazākās porcijas nesējs. Viens no pirmajiem elektrona pastāvēšanu teorētiski pamatoja Džozefs Džons Tomsons (Anglija).

**1.1.2. VIELAS ELEKTRISKĀ STRUKTŪRA. ELEMENTĀRLĀDIŅŠ**

Vielas ir diskrētas, tās sastāv no atomiem. Atoms ir elektroneit­rālā daļiņa, kas sastāv no kodola un elektronu apvalka. Kodola lādiņu q uzskata par pozitīvu (q > 0), bet elektrona lādiņu — par negatīvu (q < 0). Elektrona lādiņa absolūtā vērtība (modulis)  ir elektriskā lādiņa mazākā porcija. To 1911. gadā precīzā eksperimentā konstatēja amerikāņu fiziķis Roberts Endrjūss Milikens. Elektriskā lādiņa SI vienība ir kulons (C). SI vienībās elektrona lādiņa vērtība e ≈ 1,6∙10-19 C. Tikpat liela pēc absolūtas vērtības — pozitīva elektriskā lādiņa nesējs ir kodoldaļiņa pro­tons *qp = e*. Viela kopumā ir elektroneitrāla. Tas nozīmē, ka pre­tēju zīmju lādiņi tajā parasti savstarpēji kompensējas. Ķermenis uzlādējas pozitīvi vai negatīvi elektrizējoties. Ja elektrizācijas procesā ķermenis iegūst daļiņas — pozitīvus vai negatīvus lādiņnesējus, tad rodas attiecīgās zīmes elektriskā lādiņa pārpalikums, bet, ja tas lādiņnesējus zaudē, tad rodas attiecīgās zīmes lādiņa iztrūkums.

**1.1.3. ELEKTRISKĀ LĀDIŅA NEZŪDAMĪBAS LIKUMS**

No apkārtējiem ķermeņiem izolētas sistēmas kopējais elektriskais lādiņš laikā nemainās — to nevar patvaļīgi radīt vai iznīcināt. Šis apgalvojums ir elektriskā lādiņa nezūdamības likums: elektriskie lādiņi nezūd un nerodas, tie tikai pāriet no viena ķermeņa uz otru vai pārvietojas ķermeņa iekšienē. Ja sis­tēma sastāv no vairākiem ķermeņiem, kuru kopējais elektriskais lādiņš *q = q*1 + *q*2 +… + *qn*, tad no elektriskā lādiņa nezūdamības likuma izriet, ka

*q* = const (1.1)

jeb

. (1.2)

Ķermeņu mijiedarbībā to elektriskie lādiņi var pārkārtoties, bet tikai tā, lai saglabātos sistēmas kopējais lādiņš *q*. Lādiņa nezūdamības likums ir univer­sāls likums, un dabā nav sastopami izņēmumi no tā. Tas ir spēkā visās elementārdaļiņu reakcijās, kā arī ķermeņu elektriskās uzlā­dēšanās un polarizēšanās procesos.

**1.1.4. KULONA LIKUMS.**

Ja attālums *r* starp diviem elektriski lādētiem ķermeņiem ir ievē­rojami lielāks par ķermeņu izmēriem, tad ķermeņus var uzskatīt par punktveida lādiņiem. Punktveida lādiņi savstarpēji iedarbojas. Mijiedarbības spēku, kas pielikts katram no tiem, nosaka Kulona likums (1.1. att.). Šo likumu, kurš ir analoģisks Ņūtona vispa­saules gravitācijas likumam, Saris Ogistēns Kulons (Francija) precīzā eksperimentā konstatēja 1785. gadā, lai gan jau dažus gadus iepriekš Henrijs Kevendišs (Anglija) to bija pierādījis. Taču H. Kevendiša darbs nebija plaši pazīstams. Saskaņā ar Ku­lona likumu *mijiedarbības spēki darbojas pa taisni, uz kuras atrodas lādiņu centri. Vienādzīmju lādiņi atgrūžas, pretēju zīmju lādiņi pievelkas.* Ja lādiņi atrodas *vakuumā*, tad elektriskā spēka jeb Kulona spēka vektora modulis ir proporcionāls abu lādiņu rei­zinājumam un apgriezti proporcionāls to savstarpējā attāluma kvadrātam:

 (1.3)

kur  - proporcionalitātes koeficients

*ε*0 — elektriskā konstante. Elektriskās konstantes SI vienība ir farads uz metru (F/m) jeb kulons kvadrātā uz ņūtonu reiz kvadrātmetrs (C2/(N∙m2)). Šajās vienībās *ε*0 = 8,85∙10-12 F/m.

Proporcionalitātes koeficients *k* skaitliski vienāds ar spēku, ar kādu divi 1 kulonu lieli lādiņi vakuumā savstarpēji iedarbojas viens uz otru 1 m attālumā. Tas ir vienāds ar

 (1.4)

|  |  |
| --- | --- |
| 1.1. att. | 1.2. att. |

**1.1.5. ELEKTRISKĀ LAUKA INTENSITĀTE**

Ap elektriski lādētu ķermeni vai elementārdaļiņu pastāv elektris­kais lauks. Elektrisko lauku katrā telpas punktā raksturo elek­triskā lauka intensitātes vektors  jeb vienkārši elektriskā lauka intensitāte. Elektriskā lauka intensitāte ir Kulona spēks , kas pielikts vienu kulonu lielam pozitīvam punktveida lādiņam (1.2. att.). Nosakot elektriskā lauka intensitāti  ar vienības lādiņu *q*0 = l C, iegūst, ka

 (1.5)

Elektriskā lauka intensitātes SI vienība ir volts uz metru (V/m). Saskaņā ar elektriskā lauka intensitātes definīciju  un tātad 

Elektrisko lādiņu — *lādētu ķermeni, ap kuru pastāv elektriskais lauks, sauc par elektriska lauka avotu.*

Ja elektriskā lauka avoti ir nekustīgi lādiņi, tad šādu lauku sauc par *elektrostatisku lauku*.

**1.1.6. PUNKTVEIDA LĀDIŅA ELEKTRISKĀ LAUKA INTENSITĀTE**

Punktveida lādiņa elektriskā lauka intensitāti *Ε* vakuumā var noteikt, iz­mantojot Kulona likumu. Ja lauka avots — lādiņš *q* atrodas ko­ordinātu sistēmas sākumpunktā, bet vienības lādiņš *q*0 novietots attāluma *r* no tā (1.2. att.), tad lādiņam *q*0 pielikts Kulona spēks

 (1.6)

un elektriskā lauka intensitāte

 (1.7)

Pozitīva lādiņa *q*+ > 0 elektriskā lauka intensitātes vektors  katrā punktā ir vērsts radiālā virzienā projām no lādiņa, bet negatīva lādiņa q- < 0 intensitātes vektors vērsts virzienā uz to (1.3. att.). Punktveida lādiņa elektriskā lauka intensitāte samazinās apgriezti proporcionāli attāluma kvadrātam līdz lādiņam, un elektriskais lauks ir sfēriski simet­risks.

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

1.3. att.

**1.1.7. Elektrisko lauku intensitāšu saskaitīšana. Superpozīcijas princips**

Ja elektriskos laukus rada vairāki avoti, piemēram, divi elektriski lādēti ķermeņi, to lauki

|  |  |
| --- | --- |
| 1.4. att. | telpā pārklājas. Rezultējošā elektriskā lauka intensitāti katrā telpas punktā atrod, saskaitot visu avotu elektrisko lauku intensi­tāšu vektorus. Tā, piemēram, divu avotu *q*1 un *q*2 elektriskā lauka intensitāte  (1.4. att.).  Elektrisko lauku intensitāšu saskaitīšanas likums ir elektrisko lauku superpozīcijas princips. To ērti lietot vairāku lādiņu sistēmas elek­triskā lauka intensitātes noteik­šanai. |

**1.1.8. ELEKTRISKĀ LAUKA INTENSITĀTES LĪNIJAS.**

**LAUKA GRAFISKAIS ATTĒLOJUMS**

Elektrisko lauku telpā ap lādiņiem uzskatami var attēlot ar elek­triskā lauka intensitātes līnijām. Intensitātes līnija ir iedomāta līkne, kuras pieskares vektors katrā tās punktā ir vērsts elektriska lauka intensitātes vektora virzienā. Pieņem, ka intensitātes lī­niju biežums — līniju skaits, kuras šķērso tam perpendikulā­ras virsmas vienības laukumu, ir proporcionāls intensitātes vek­tora modulim. Tad intensitātes līniju sablīvēšanās liecina par elektriskā lauka intensitātes palielināšanos, bet līniju izretināšanās — par intensitātes samazināšanos. Elektriskais lauks, kas pastāv telpā ap diviem nekustīgiem punktveida lādiņiem, parādīts 1.5. attēlā, elektriskais lauks telpā starp pozitīvu punktveida lādiņu un negatīvi lādētu plakni — 1.6. attēla. Intensitātes līnijām parasti norāda arī virzienu —  virzienu, tās vienmēr sākas pozitīvajos lādiņos un satek negatīvajos lādiņos.

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

1.5. att.

|  |  |
| --- | --- |
| 1.6. att. | Šāds līniju virziens izriet no tā, ka spēks, kas darbojas uz po­zitīvo vienības lādiņu, vienmēr vērsts virzienā no lauka avota pozitīvā lādiņa uz lauka avota negatīvo lādiņu 1.6. att. |

**1.1.9. ELEKTRISKĀ LAUKA INTENSITĀTES PLŪSMA, GAUSA TEORĒMA**

Ja elektriskā lauka intensitātes līnijas šķērso virsmu, tad saka, ka tas «plūst» caur to. Intensitātes līniju skaitu, kuras šķērso tām perpendikulāru iedomātu virsmu, sauc par elektriskā lauka intensitātes plūsmu. Caur laukuma elementu Δ*S*, kas perpendiku­lārs intensitātes līnijām, plūsma Δ*N* = *E*Δ*S*. Ja laukuma Δ*S* nor­māle ar intensitātes vektoru veido leņķi *α* (1.7. att.), tad caur šo laukumu iet plūsma Δ*N* = *E*Δ*S* cos*α*.

Elektriskajam laukam ir pareiza Gausa teorēma: *lādiņa q elek­triskā lauka intensitātes plūsma N caur slēgtu virsmu, kas aptver lādiņu, nav atkarīga no virsmas veida un ir proporcionāla vir­smas ietvertajam kopējam lādiņam q*. Tātad

 (1.8)

Gausa teorēmu viegli pārbaudīt punktveida lādiņa laukam, ja lādiņu aptver ar sfēriski simetrisku virsmu (1.8. att.). Elektriskā lauka intensitāte visos sfēras virsmas punktos ir konstanta un vektors  vērsts perpendikulāri virsmai. Tādēļ intensitātes plūsma caur sfēras virsmu ir šāda: *N = ES*, kur *S* — sfēras virsmas lau­kums. Tā kā  un *S* = 4*πr*2, tad 

|  |  |
| --- | --- |
| 1.7. att. | 1.8. att. |

**1.1.10. ELEKTRISKAIS LAUKS DIELEKTRIĶĪ**

Dielektriķi ir vielas, kurām salīdzinājumā ar vadītājiem ir maza īpatnējā elektrovadītspēja. Šī iemesla dēļ dielektriķi vāji vada elektrisko strāvu. Dielektriķi — nejonizētas gāzes, šķidrumi vai cietvielas — ievietoti elektrostatiskajā lauka, to pavājina. Ja lā­dēta ķermeņa elektriskā lauka intensitāte vakuumā ir *E*0, tad di­elektriķī tā samazinās *εr* reizes, tātad intensitāte dielektriķī

 (1.9)

Bezdimensionālais lielums *εr* ≥ 1 ir vides relatīvā dielektriskā caurlaidība. Dažādām vielām relatīvā dielektriskā caurlai­dība mainās plašās robežās un ir atkarīga no temperatūras, spie­diena u. c. vielas stāvokļa parametriem. Vakuumam *εr* = 1, sausam gaisam 0°C temperatūrā un normālā spiedienā *εr* = 1,00057 (pa­rasti pieņem, ka arī gaisam *εr* ≈ 1). Speciāli sintezētam kondensa­toru keramikām *εr* vērtība var sasniegt vairākus tūkstošus (1.1. tab.).

Elektriskā spēka jeb Kulona spēka vektora modulis šajā gadījumā atkarīgs arī no vides, kurā atrodas abi lādiņi

 jeb  (1.10)

1.1. tabula

**VIELAS RELATĪVĀ DIELEKTRISKĀ CAURLAIDĪBA, JA TEMPERATŪRA**

**20 ... 25 °C**

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **Viela** | ***εr*** | **Viela** | ***εr*** |
| Dzintars  Ebonīts  Elektroizolācijas gumija  Eļļa (kondensatoru,  transformatoru)  Getinakss  Glicerīns  Kausēts kvarcs | 2,8  2,7... 3,0  2,5 ... 5,0  2,1 ... 2,3  7,0... 8,0  42,4  3,7 | Kondensatoru keramika  Polietilēns  Tekstolīts  Titāna stikls  Ūdens  Gaiss (0 °C; 760 mm Hg) Hēlijs (0°C; 760 mm Hg) | 30... 3000  2,3  8,0  11,0  78,3  1,0057  1,000068 |

Lielumu *ε* = *ε*0 *εr*, kur *ε*0 — elektriskā konstante, sauc par vides absolūto dielektrisko caurlaidību.

Ja vakuumā punktveida lādiņa *q* elektriska lauka intensitāte  tad, lādiņam atrodoties kādā vidē,  jeb .

Elektriskā lauka inten­sitātes samazināšanās dielektriķī ir saistīta ar vielas polarizēšanos.

Praktiskos aprēķinos vairāk izmanto formulu

 (1.11)

**1.1. *piemērs.*** Ar cik lielu spēku savstarpēji iedarbojas *q*1 = 5∙10-6 C un *q*2 = 1,6∙10-5 C lielie lādiņi, kas novietoti gaisā (*εr* = 1) 6 cm attālumā viens no otra (1.9. att.)?

Atrisinājums.



|  |  |
| --- | --- |
| 1.9. att. Vienādu zīmju lādiņu mijiedarbība. | 1.10. att. 1.2. piemēram. |

**1.2. *piemērs.*** Uz punktveida lādiņu *q*1 = 2·10-7 C darbojas spēks *F* = 0,1 N. Noteikt, cik lielā attālumā no *q*1 atrodas lādiņš *q*2 = 4,5·10-7 C. Abi lādiņi atrodas gaisā (1.10. att.).

Atrisinājums.

Pārveidojot Kulona likumu izteiksmi iegūstam



Ievērojot, ka *ε*0 = 8,85·10-12 F/m un *εr* = 1, iegūstam



**1.4. *piemērs*.** Punktos A, B un C novietoti trīs lādiņi (1.11. att.). Ar cik lielu spēku lādiņi *q*1 un *q*3 iedarbojas uz lādiņu *q*2, ja apkartēja vide ir gaiss? Aprēķiniet rezultējošā spēka lielumu un virzienu, kas iedarbojas uz lādiņu *q*2.

|  |
| --- |
| 1.11. att. |

Atrisinājums.

1. Lādiņš *q*1 iedarbojas uz lādiņu *q*2 ar spēku



2. Lādiņš *q*3 iedarbojas uz lādiņu *q*2 ar spēku



3. Rezultējošais spēks, kas iedarbojas uz lādiņu *q*2

*F = F*32 – *F*12 = 0,6 – 0,2 = 0,4 N.

Rezultējošais spēks vērsts lādiņa *q*1 virzienā.

*Piezīme*. Aprēķinu ceļā, izmantojot Kulona likuma formulu, jānosaka tikai spēks *F*12, ar kādu *q*1 iedarbojas uz *q*2. Tā kā *q*3 = 3 *q*1 un *r*1 = *r*2, tad *F*32 = 3 *F*12.

***1.5. piemērs.*** Gaisā 10 cm attālumā viens no otra atrodas divi punktveida lādiņi *q*1=4·10-11 C un *q*2 = 6·10-11 C. Aprēķināt lauka intensitāti punktā D, ja perpendikuls DC, kas vilkts pret taisni AB (1.4. att.), dala to uz pusēm un vienlīdzīgs pusei no tās garuma, t.i., AC = CB = DC.

Atrisinājums.

Aprēķinām attālumu no punkta D līdz punktveida lādiņam *q*1

|  |  |
| --- | --- |
| Attālums no punkta D līdz punktveida lādiņam *q*2  *R*2 = *R*1 = 7,071 cm  Pirmā punktveida lādiņa elektriskā lauka intensitāte punktā D    Tā kā *q*2 = 1,5·*q*1 un *R*2 = *R*1, tad otrā punktveida lādiņa lauka intensitāte punktā D | 1.12. att. 1.5. piemēram |

*E*2 = 1,5·*E*1 = 1,5·72 = 108 V/m.

Elektriskā lauka rezultējošā intensitāte punktā D vispārīgā gadījumā



Mūsu piemērā vektori un veido viens ar otru 900 leņķi (1.12. att.), tāpēc



**1.5. *piemērs***. Aprēķiniet elektriskā lauka intensitāte *E* vidus punktā starp lādiņiem *q*1 = 2∙10-7 C un *q*2 = 6∙10-7 C, ja apkartēja vide ir gaiss. Attālums starp lādiņiem ir 50 cm. Kāds ir rezultējošā elektriskā lauka intensitātes vektora virziens?

Risinājums.

1. Pierakstiet uzdevuma dotos lielumus SI sistēma.

|  |  |
| --- | --- |
| 1.13. att. | 2. Grafiskais attēls. Ievietojot viduspunktā vienību lādiņu (meģinājuma lādiņu) *q*0 = 1 C (1.13. att.). Šajā gadījuma elektriskā lauka intensitāte skaitliski vienāda ar Kulona spēku.  3. Ja nav lādiņa *q*2, tad viduspunktā elektriskā lauka intensitāte |



un vektora virziens prom no lādiņa *q*1.

4. Ja nav lādiņa *q*1, tad viduspunktā elektriskā lauka intensitāte



un vektora virziens prom no lādiņa *q*2.

5. Rezultējošā elektriskā lauka intensitāte

*E = E*2 – *E*1 = 86400 – 28800 = 57600 V/m

un rezultējošais spēks vērsts lādiņa *q*1 virzienā.

**1.1.11. ELEKTRISKO LAUKU PIEMĒRI**

Apskatīsim dažus elektrisko lauku piemērus.

1. Bezgalīgas, pa virsmu vienmērīgi uzlādētas plaknes elek­triskais lauks.

Pieņemsim, ka elektriskais lādiņš *q* vienmērīgi izvietots uz plaknes. Tad virsmas laukuma elementa Δ*S* lādiņš Δ*q* = σΔ*S*, kur σ — virsmas laukuma vienības lādiņš jeb virsmas lādiņa blīvums. No simetrijas apsvērumiem iegūst, ka elektriskā lauka intensitāte visos uzlādētajai plaknei paralēlu bezgalīgu plakņu punktos ir vienāda un vektors  — perpendikulārs šīm plaknēm. Intensitātes  vektora moduļa aprēķināšanai lieto Gausa teorēmu. Pieņemsim, ka uzlādēto plakni šķērso tai perpendikulārs taisns cilindrs, kura pamata laukums ir Δ*S* (1.14. att.). Cilindra ierobežotais virsmas lādiņš Δ*q* = *σ*Δ*S* un elektriska lauka intensitātes plūsma caur cilindra virsmu *N =*2*E*Δ*S*. Saskaņā ar Gausa teorēmu plūsma un, salīdzinot šīs izteiksmes, iegūst, ka

 (1.12)

Uzlādētas bezgalīgas plaknes elektriskā lauka intensitāte nav atkarīga no attāluma līdz plaknei, tā proporcionāla virsmas lādiņa blīvumam *σ*. Šādu elektrisko lauku sauc par homogēnu lauku.

|  |
| --- |
| 1.14. att. |

Ja uzlādēta plakne atrodas dielektriskā vidē, tad

 (1.13)

kur *ε* - absolūtā dielektriskā caurlaidība. Ja plaknes lādiņš ir pozitīvs (*σ*+ > 0), intensitātes  līnijas vērstas projām no plaknes, ja ne­gatīvs (*σ*— < 0), — virzienā uz plakni.

2. Pa virsmu vienmērīgi uzlādētas sfēras elektriskais lauks. Ja sfērai, kuras rādiuss ir *r*0, pievadīts lādiņš *q*, tad uz sfēras virsmas lādiņa blīvums  Sfēras ārpusē attālumā *r* ≥ *r*0 no tās centra elektriskā lauka intensitāte

 (1.14)

jeb

 (1.15)

(Elektriskā lauka intensitātes aprēķināšanai tāpat izmanto Gausa teorēmu.) Vienmērīgi uzlādētas sfēras ārpusē elektriskais lauks ir tāds pats kā sfēras centrā novietota punktveida lādiņa lauks. Līdzīgu rezultātu iegūst arī no simetrijas apsvērumiem. Jebkurā punktā uzlādētas sfēras iekšienē, kad *r < r*0, elektriska lauka intensitāte *E* = 0. Šis secinājums ir vispārīgs: jebkurā ga­dījumā elektroneitrālā tilpuma, kuru ietver lādēta virsma, elek­triskā lauka nav (1.15. att.). Šo īpašību izmanto elektrisko lauku ekranēšanai.

|  |  |
| --- | --- |
| 1.15. att. | 1.16. att. |

3. Divu vienmērīgi uzlādētu bezgalīgu paralēlu plakņu elek­triskais lauks (1.16. att.).

Vairāku plakņu radītā lauka intensitātes aprēķināšanai iz­manto superpozīcijas principu. Divām plaknēm  kur  un  katras plaknes lauka intensitāte. Ja plaknēm ir vienādi pēc absolūtās vērtības, bet pretēju zīmju lādiņi (virsmas lādiņu blīvumi , tad telpā starp plaknēm elektriskā lauka intensitāte ir divreiz lielāka nekā vienas plaknes laukam, proti,  jeb

 (1.16)

Šajā gadījumā ārpus plakņu norobežotā tilpuma elektriskā lauka nav, jo  Ja tur­pretī plakņu lādiņu zīmes ir vienādas, tad ir otrādi — starp plaknēm *E* = 0, bet ārpusē

. (1.17)

4. **Plakans kondensators**. Divas plates ar vienādiem pēc absolūtās vērtības, bet pretēju zīmju lādiņiem veido pla­kanu kondensatoru.

Starp plakana kondensatora platēm elektriskā laukā intensitāte ir tieši proporcionāla elektrisko lādiņu virsmas blīvumam (apzīmējums σ). Aplūkojam vienas plakanā kondensatora plates laukumu S (1.17. att.). Šī laukuma lādiņš

*q = σS*.

|  |  |
| --- | --- |
| 1.17. att. | 1.18. att. Plakana kondensatora elek­triskais lauks. |

Apvelkam ap lādiņu *q* noslēgtu virsmu (1.17. attēlā tā paradīta ar pārtrauktu līniju). Saskaņā ar Gausa teorēmu intensitātes vektora plūsma caur noslēgtu virsmu ir



bet, ievērojot, ka homogenā laukā

*N = ES*,

iegūstam



no kurienes lauka intensitāte starp plakana kondensatora platēm ir

 (1.18)

Ja plates ir galīgas, tad praktiski lauks ir homogens tikai tādā gadījumā, ja attālums starp platēm ir mazs, salīdzi­not ar to lineārajiem izmē­riem. Plašu malās lauks vien­mēr ir nehomogens. Plakana kondensatora elektriskais lauks paradīts 1.18. attēlā.

**1.2. ELEKTRISKĀ LAUKA DARBS UN POTENCIĀLS**

**1.2.1. HOMOGĒNA ELEKTRISKĀ LAUKA DARBS**

Ja elektriskajā laukāatrodas punktveida lādiņš *q*, tad uz šo lādiņu darbojas elektriskais spēks  Lādiņam pārvietojoties par kādu attālumu , spēka jeb elektriskā lauka elementārs darbs , kur *α* — leņķis starp pārvietojuma vektoru un elektriska lauka intensitātes vektoru (1.19. att.). Tā kā  — pārvietojuma  projekcija elektriskā lauka intensitātes vektora virziena, tad . No šīs izteiksmes izriet, ka, lādiņam pārvietojoties elektriskajā laukā no punkta 1 uz punktu 2, elektriskā lauka darbs ir atkarīgs no attāluma , kuru lādiņš noiet intensitātes līniju virzienā vai tām pretējā virzienā:

*A = qEd*. (1.19)

Elektriskā lauka darba formula ir analoģiska smaguma speķa darba formulai *A = mgh*, kur *h* — augstumu starpība (1.20. att.). Tāpat ka smaguma spēks arī elektriskais (Kulona) spēks ir potenciāls spēks. Tādēļ nekustīgu lādiņu elektriskais lauks ir potenciāls lauks.

Elektriskā lauka darbs ir pozitīvs (*A* > 0), ja pozitīvs lādiņš (*q* > 0) pārvietojas lauka intensitātes līniju virzienā (projekcija *d* > 0) vai negatīvs lādiņš (*q* < 0) — pretēji tām (projekcija *d* < 0). Pozitīvs darbs šajā gadījuma nozīmē to, ka elektriskais lauks paātrina lādiņa kustību. Tā rezultātā palielinās lādiņa kinētiskā enerģija. Lauka darbs ir negatīvs (*A* < 0), ja pozitīvs lādiņš kus­tas pretēji lauka intensitātes līnijām vai negatīvs lādiņš — inten­sitātes līniju virzienā. Tad elektriskais lauks bremzē lādiņa kus­tību un lādiņa kinētiskā enerģija samazinās. Lādiņam pārvieto­joties perpendikulāri intensitātes līnijām, elektriskā lauka darbs *A* = 0.

|  |  |
| --- | --- |
| 1.19. att. | 1.20. att. |

**1.2.2. LĀDIŅA POTEN­CIĀLĀ ENERĢIJA ELEKTRISKAJĀ LAUKĀ**

Lādiņam elektriskajā laukā ir potenciālā enerģija *W*. Potenci­ālās enerģijas izmaiņa, lādiņam pārvietojoties no lauka kāda punkta 1 līdz punktam 2, ir vie­nāda ar elektriskā spēka (saka arī elektriskā lauka) darbu šajā pārvietojumā: *A*12 = Δ*W = W*1 — *W*2. Par lādiņa potenciālās enerģijas nulles līmeni var pie­ņemt tā potenciālo enerģiju jeb­kurā elektriskā lauka punkta. Ja elektriskais lauks pastāv galīga telpā un tātad bezgalība *E∞* = 0, par potenciālās enerģijas at­skaites sākumpunktu izraugās bezgalīgi tālu punktu, pieņemot *W∞ =* 0. Šādā gadījuma, lādiņam pārvietojoties no bezgalības uz lauka punktu *P*, tiek pastrā­dāts darbs *A = W∞ - WP* un lādiņa potenciāla enerģija punkta *Ρ* ir *WP =* —*A*.

|  |  |
| --- | --- |
| 1.21. att. | Ja elektrisko lauku rada pozitīvi lādēts ķermenis, tad pozitīvs punktveida lādiņš *q*0 pārvietojoties no bezgalības, kustas pretēji lauka intensitātes līnijām. Tāpēc lauka pastrādātais darbs *Α* ir negatīvs un lādiņš iegūst pozitīvu potenciālo enerģiju *W* (1.21. att.). Lādiņam *q*0 atrodoties attāluma *r* no vienmērīgi lā­dētas sfēras vai lodes centra (sfēras vai lodes rādiuss *r*0 ≤ *r*), tā potenciālā enerģija  (1.20)  kur *q* — lauka avota lādiņš. |

**1.2.3. ELEKTRISKĀ LAUKA POTENCIĀLS. SPRIEGUMS**

Elektriskā lauka potenciālu starpība

 (1.21)

starp diviem lauka punktiem 1 un 2 ir darbs *Α*12, kuru pastrādā elektriskais lauks, ja starp šiem punktiem pārvietojas pozitīvs vienības lādiņš. Savukārt darbs *A*12 ir vienāds ar lādiņa *q*0 potenciālās enerģijas izmaiņu Δ*W* un

 (1.22)

Elektriskā lauka potenciālu starpību sauc arī par spriegumu *U*12 starp dotajiem lauka punktiem. Pie­mēram, lādiņš *q*0 pārvietojas starp divām paralēlām vienmērīgi uzlādētām plaknēm, kuras atrodas attālumā *d* viena no otras. Plaknēm ir pretēju zīmju, bet vienādi pēc absolūtās vērtības lā­diņi. Elektriskā lauka darbs

*A = q*0*Ed* jeb  (1.23)

Tātad spriegums starp plaknēm

 (1.24

Ja pozitīvu vienības lādiņu pārvieto no bezgalības uz lauka punktu *P*, tad elektriskā lauka darbs

 (1.25)

Funkciju *φΡ* sauc par elektriskā lauka potenciālu punktā *P*. Saskaņā ar šo definīciju punktveida lādiņa vai vienmērīgi uzlādētas sfēras elektriskā lauka potenciāls attālumā *r* no lādiņa vai sfēras centra ārpus tās ir

 (1.26)

kur *q* — lauka avota lādiņš.

Zinot elektriskā lauka potenciālu, jebkuram lādiņam *q*0, kurš atrodas šajā laukā, potenciālo enerģiju aprēķina pēc formulas

*W = q*0*φP*. (1.27)

Potenciāla un sprieguma SI vienība ir volts (V). Spriegums ir vienāds ar 1 V, ja, pārvietojot 1 С lielu pozitīvu lādiņu, elektriskā lauka darbs ir 1 J.

Ja elektrisko lauku rada nevis viens, bet gan vairāki punktveida ladiņi, tad potenciāls patvaļīgā punktā ir vienlīdzīgs potenciālu algebriskai summai

*φ = φ*1 + *φ*2 + … (1.28)

***1.6. piemērs.*** Aprēķināt potenciālu punktā D (1.4. piemērā).

Lādiņa q1 radītā lauka potenciāls punktā D ir



Tā kā

*q*2 = 1,5·*φ*1 = 1,5·5,1 = 7,6 V.

Summārais punkta D potenciāls

*φ =* *φ*1 + *φ*2 = 5,1 + 7,6 = 12,7 V

***1.4. piemērs.*** Pārvietojot lādiņu *q* = 2·10-4 C elektriskajā laukā, veikts darbs *A* = 0,4 J. Aprēķināt spriegumu starp pārvietojuma sākuma un beigu punktu.

Atrisinājums.



**ELEKTRONVOLTS.** Dažkārt elektriskā lauka darbu un lādiņa potenciālo enerģiju (kā arī enerģiju vispār) mēra speciālās vienībās — elektronvoltos (eV). Lieto arī šīs vienības daudzkārtņus: kiloelektronvoltu (1 keV = 103 eV), megaelektronvoltu (1 MeV = 106 eV) u. c. vie­nības. Elektronvolts ir elementārlādiņa  potenciālā enerģija, kuru tas iegūst, pārvietojoties starp diviem elektriskā lauka pun­ktiem, starp kuriem pastāv 1 V liela potenciālu starpība — sprie­gums U = l V. Elektronvolts nav SI vienība, 1 eV = 1,6∙10-19 J un 1 J = 6,24∙1018 eV. Atomfizikā, kodolfizikā un vielas uzbūves teorijā šī vienība ir ērta tad, ja tiek pētīta atsevišķu elementār­daļiņu kustība un mijiedarbība.

**1.2.4. EKVIPOTENCIĀLĀS LĪNIJAS UN VIRSMAS**

Virsmu, kuras visos punktos elektriskā lauka potenciāls *φ* = const, sauc par ekvipotenciālu virsmu. Katrai potenciāla *φ* vērtībai at­bilst noteikta ekvipotenciālā virsma. Ja lādiņš kustas pa kādu trajektoriju, kas atrodas uz ekvipotenciālās virsmas, tad tā poten­ciālā enerģija nemainās un elektriskā lauka darbs *A* = 0. Tas nozīme, ka elektriska lauka intensitātes  līnijas ir perpendikulāras jebkurai ekvipotenciālajai virsmai un tātad veido intensitātes līnijām ortogonālu virsmu saimi. Punktveida lādiņa vai vienmērīgi lādētas sfēras elektriska lauka ekvipotenciālās virsmas ir kon­centriskas sfēras, kuru centra ir lauka avots. Lādētas plaknes elektriska lauka ekvipotenciālās virsmas ir lādiņu plaknei paralē­las plaknes. Attēlojot elektrisko lauku plaknē, ekvipotenciālās lī­nijas veido intensitātes līnijām ortogonālu līniju saimi. Dažas raksturīgas elektriskā lauka intensitātes līniju un ekvipotenciālo līniju saimes redzamas 1.22., 1.23. un 1.24. attēlā.

|  |
| --- |
| 1.22. att. |

|  |
| --- |
| 1.23. att. |

Ekvipotenciālās līnijas zīmē tā, lai attālums starp divām blakus līnijām atbilstu izraudzītajai potenciālu starpībai, piemēram, 1 V. Vienmērīgi lādētas plaknes vai lādētas sfēras virsma pati ir ekvipotenciāla virsma, jo uz tās *φ* = const.

|  |
| --- |
| 1.24. att. |

**1.2.5. VADĪTĀJI. VADĪTĀJU VIRSMAS POTENCIĀLS**

Vielas, kas spēj uzkrāt brīvus elektriskos lādiņus, ir vadītāji. Vadītajam pievadītie lādiņi novietojas tikai uz tā virsmas un vadī­tajā iekšienē nekompensētu elektrisko lādiņu nav. Elektrostatiskā lauka intensitāte  jebkurā punktā vadītāja iekšienē ir vienāda ar nulli. (Šo apgalvojumu pamato Gausa teorēma.) Lauks pastāv tikai telpā ārpus vadītāja (vakuumā vai dielektriķī), un to rada virsmas lādiņi. Vadītāja virsmas punktos elektrostatiskā lauka intensitātes vektors ir orientēts perpendikulāri pret virsmu (1.25. att.) un virsmas lādiņi nepārvietojas. Šie divi fakti ir savstarpēji saistīti. Patiešām, ja pieņem, ka elektriskā lauka intensitāte kādā pun*ktā nav perpendikulāra pret virsmu,* tad vektoram  ir no nulles at­šķirīga projekcija virsmas pie­skares virzienā. Tas nozīmē, ka lādiņiem, kas atrodas uz vir­smas, ir pielikts elektriskais spēks un lādiņi pa virsmu pār­vietojas. Pārvietošanās izbei­dzas, līdzko lādiņi novietojas tā, ka lauka intensitātes vektors ir perpendikulārs pret virsmu. Iestājas elektrostatiskais līdz­svars.

|  |  |
| --- | --- |
| 1.25. att. | Lādiņi izvietojas līdzsvara stāvoklī ļoti ātri. Pēc tam kad ir iestājies līdzsvars, elektriskā lauka darbs lādiņu pārvietošanā ir vienāds ar nulli. Tas savukārt nozīmē to, ka vadītāja virsma ir ekvipotenciāla virsma, proti, uz vadītāja virsmas neatkarīgi no tas veida potenciāls *φ = φ*0 = const. Savienojot vairākus vadītājus, to virsmu potenciāli izlī­dzinās un vadītāju sistēmas virsma kļūst par vienu ekvipotenciālu virsmu (1.26. att.). |

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

1.26. att.

**1.2.6. ZEMES ELEKTRISKAIS LAUKS**

Zeme ir samērā labs elektrības vadītājs, un ap to atmosfērā pastāv Zemes elektriskais lauks. Mērījumi parāda, ka Zeme ir uzlādēta negatīvi. Tās kopējo elektrisko lādiņu novērtē aptuveni 6∙105 C. Atmosfēra ap Zemi visumā uzlā­dēta pozitīvi. Pozitīvais lādiņš pastāvīgi noplūst uz Zemi un tās negatīvo lādiņu nepārtraukti samazina. Tā kā tas tomēr tikpat kā nemainās, tad jāpa­stāv procesiem, kas Zemes lādiņu atjauno. Jādomā, ka šādi procesi norisinās arī negaisa laikā, jo katrs zibens spēriens Zemei pievada vidēji 20... 30 С lielu elektrisko lādiņu.

Zemes virsmas potenciālu parasti pieņem par potenciāla atskaites līmeni un uzskata, ka *φz* = 0. Elektriskā lauka intensitāte Zemes virsmas tiešā tuvumā vidēji ir 130 V/m, lai gan atkarībā no atmosfēras apstākļiem, reljefa, ģeolo­ģiskajām īpatnībām tā lokāli var būtiski mainīties. Cilvēka auguma augstumā Zemes elektriskā lauka potenciālu starpība vidēji ir aptuveni 200 V, bet starp Zemes virsmu un atmosfēras augšējiem slāņiem potenciālu starpība sasniedz 400 000 V.

**1.2.7. VADĪTĀJU ELEKTROSTATISKĀ IEZEMĒŠANA**

Ja lādētu vadītāju savieno ar Zemi (iezemē), vadītāja un Zemes potenciāli izlīdzinās. Zemes lielo izmēru dēļ tās potenciāls tikpat kā nemainās, bet visu iezemēto vadītāju potenciāls kļūst vienāds ar *φz* = 0. Iezemējot vadītāju, tā virsmas lādiņš noplūst Zemē. Tā iespējams samazināt vai novērst traucējošus elektriskos laukus, kuri lielu virsmas lādiņu koncentrācijas gadījumā var pat kļūt par nelaimes cēloni. Lādiņiem uzkrājoties uz virsmām, it sevišķi uz virsmu asumiem, var notikt gaisa vai kāda cita dielektriķa caursišana elektriskās dzirksteles veidā. Tādēļ iekārtu metāla korpusi, kustošās detaļas mašīnās elektrostatiski jāiezemē. Tas ir viens no nepieciešamajiem drošības pasākumiem t. s. statiskās elektrības novēršanai.

**2. NODAĻA**

**LĪDZSTRĀVAS ĶĒDES**

**2.1. PAMATJĒDZIENI**

**Elektriskais potenciāls un spriegums**. Elektrisko lauku katrā tā punktā raksturo ar vektoriālu lielumu — elektriskā lauka intensitāti, ko apzīmē ar *ε*, un ar skalāru lielumu — elektrisko potenciālu, ko apzīmē ar *φ*.

Elektrisko lauku, kura visos punktos lauka intensitātei ir viena un tā pati skaitliskā vērtība un virziens, sauc par homogēnu (viendabīgu) elektrisko lauku.

Elektriskais potenciāls lauka dotajā punktā vienāds ar šajā punktā novietotā pozitīvā vienības lādiņa potenciālo enerģiju.

Potenciālu starpību starp diviem punktiem sauc par elek­trisko spriegumu un apzīmē ar *U*:

*U* = *φ* 1 - *φ* 2, (2.1)

kur *φ* 1 un *φ* 2 — potenciāli lauka punktos 1 un 2.

Tā kā potenciālu starpība starp elektriskā lauka punktiem 1 un 2 vienāda ar darbu, ko veic lauka spēki, pārvietojot pozitīvu vienības lādiņu no punkta 1 uz punktu 2, tad spriegums

 (2.2)

kur *A*12 — darbs lādiņa *q* pārvietošanai no punkta 1 uz punktu 2. Starptautiskajā mērvienību sistēmā (SI) darbu mēra džou­los (J), lādiņu jeb elektrības daudzumu kulonos (C) un spriegumu voltos (V):



Lielāka sprieguma vienība ir kilovolts: 1 kV=103 V, bet mazā­kas vienības ir milivolts un mikrovolts: 1 mV = 10-3 V un 1 μV = 10-6 V.

Elektrisko lauku uzskatāmi var attēlot ar spēka līnijām. Homogēna elektriskā lauka intensitāte skaitliski vienāda ar spriegumu uz lauka spēka līnijas garuma vienību:

 (2.3)

Elektriskā lauka intensitātes mērvienība SI sistēmā ir volts uz metru:



**Elektriskā strāva.** Brīvie elektroni metāla vadītājā un joni elektrolītā atrodas haotiskā kustībā (2.1. att.). Elektrības vidējais daudzums, kas tādā gadījumā izplūst caur vadītāja šķērsgriezuma laukumu, ir vienāds ar nulli.

Ja vadītāja galiem pievada spriegumu, uz uzlādētajām daļiņām iedarbosies vadītāja virzienā vērsti elektriskā lauka spēki un daļiņu haotiskās kustības ātrumi summējas ar lauka spēku virzienā vērsto ātruma komponenti (2.2. att.). Tādā gadījumā caur jebkuru vadītāja šķērsgriezuma laukumu izplūst noteikts elektrības daudzums, t.i., vadītājā rodas elektriskā strāva. Elektriskā strāva ir elektriskās enerģijas pārnesēja, un tādēļ tā ir nozīmīgākā fizikālā parādība elektro­tehnikā. Elektrisko strāvu uztur elektriskais lauks.

*Elektriskā strāva ir elektriskā lauka iedarbībā orientēta elek­trisko lādiņu plūsma.*

Vadītājos strāvu veido vai nu vienas zīmes lādētu daļiņu orientēta plūsma, piem., brīvo elektronu plūsma metālos, vai arī lādētu abu zīmju daļiņu orientētas plūsmas pretējos virzienos: elektrolītos elektriskā lauka spēku iedarbība pretējos virzienos pārvietojas pozitīvie un negatīvie joni, jonizēta gāze — abu zīmju joni un elektroni.

**Strāvas virziens.** Par strāvas virzienu vadītāja pieņemts pozitīvo lādiņu pār­vietošanās virziens, kas ir pretējs elektronu kustības virzienam.

|  |  |
| --- | --- |
| 2.1. att. Brīvo elektronu haotiska kustība  materiālā. | 2.2. att. Elektronu orientēta plūsma elektriskajā laukā |

**Strāvas stiprums**. Elektrisko strāvu kvantitatīvi raksturo ar strāvas stip­rumu, ko apzīmē ar *I*.

Strāvas stiprums skaitliski vienāds ar elektrības daudzumu (lādiņu), kas 1 sekundē izplūst caur vadītāja šķērsgriezuma lau­kumu.

Elektrisko strāvu, kuras virziens un skaitliska vērtība nemai­nās, sauc par *1īdzstrāvu*.

Saskaņā ar definīciju līdzstrāvas stiprums vadītājā

 (2.4)

kur *q* — elektrības daudzums, kas *t* sekundēs vienmērīgi izplūst caur vadītāja šķērsgriezuma laukumu.

Ja elektriskā strāva vadītājā nepārtraukti mainās, tad strāvas momentānā vērtība

 (2.5)

un t sekundēs caur vadītāja šķērsgriezuma laukumu izplūst elek­trības daudzums

 (2.6)

Mazākas strāvas vienības ir miliampērs un mikroampērs: 1 mA = 10-3 A un 1μA = 10-6 A, bet lielāka strāvas vienība ir kiloampērs: 1 kA = 103 A.

**Oma likums, elektriskā pre­testība un elektriskā vadītspēja**. Strāvas vadītāja elektrisko noslogojumu raksturo ar vekto­riālu lielumu — strāvas blī­vumu, ko apzīmē ar *δ*.

Ja strāva *I* vienmērīgi sa­dalās pa vadītājā šķērsgrie­zuma laukumu *S*, kas perpendi­kulārs strāvas plūšanas virzie­nam (2.3. att.), tad

 (2.7)

t. i., strāvas blīvums skaitliski vienāds ar strāvu, kas plūst caur vadītāja šķērsgriezuma laukuma vienību.

Strāvas blīvuma vienība SI sistēma ir ampērs uz kvadrātmetru (A/m2). Praksē tomēr strāvas blīvumu mēra ampēros uz kvadrātmilimetru:



Strāvas blīvuma vektors δ versts elektriska lauka intensitātes vektora *ε* virzienā. Vadītājā ar *S* = const arī *δ* = const.

Ja homogēna vadītāja ar nemainīgu šķērsgriezuma laukumu *S* galos 1 un 2 (2.3. att.) uztur dažādus potenciālus *φ*1 un *φ*2 resp. vadītāja galiem 1 un 2 pievieno spriegumu *U = φ*1 - *φ*2, tad vadītājā pastāv homogēns elektriskais lauks (*ε* = const), kas vadītajā uztur elektrisko strāvu *I*.

|  |
| --- |
| 2.3. att. Homogens (viendabīgs) cilindrisks vadītājs. |

Strāvas blīvums δ ir tieši proporcionāls elektriskā lauka inten­sitātei *ε* vadītājā:

*δ = γ∙ε*, (2.8)

kur *γ* — vadītāja materiāla īpatnējā elektriskā vadīt­spēja.

Ievietojot izteiksmē (2.8) izteiksmes (2.3) un (2.7), dabu, ka

.

Tad strāva vadītājā

 (2.9)

Apzīmējot

  (2.10)

un nosaucot to par vadītāja elektrisko pretestību, dabū Oma likuma izteiksmi vadītājam ar nemainīgu šķērsgriezuma laukumu nemainīgā temperatūrā:

 (2.11)

t. i., strāva vadītājā ir tieši proporcionāla vadītājam pievienotajam spriegumam un apgriezti proporcionāla vadītāja pretestībai.

Pretestības mērvienība SI sistēmā ir oms (Ω). Saskaņā ar izteiksmi (2.11) vadītāja pretestība ir viens oms, ja vadītāja ga­liem pievienotais 1V spriegums uztur tajā 1A stipru strāvu:



Lielākas pretestības vienības ir kilooms (kΩ) un megaoms (MΩ):

1 kΩ = 103 Ω un 1 MΩ = 106 Ω.

**Īpatnēja pretestība**. Īpatnējās vadītspējas *γ* apgriezto lielumu sauc par īpatnējo pretestību un apzīmē ar *ρ*:

 (2.12)

Dotā metāla īpatnējā pretestība ir šī metāla 1 m gara vada ar šķērsgriezuma laukumu 1 mm2 pretestība 20°C temperatūrā.

Metāla vadītāja pretestība dotajā temperatūrā ir atkarīga no vadītāja garuma, šķērsgriezuma laukuma un vadītāja materiāla elektriskajām īpašībām:

 (2.13)

kur *l* — vadītajā garums, m;

S — vadītāja šķērsgriezuma laukums, m2;

*ρ* — vadītāja materiāla īpatnējā pretestība, Ω∙m.

Metāla vadītāja pretestība izsaka arī ka Gāzu, elektrolītu un dielektriķu īpatnējo pretestību izsaka omcentimetros (Ω∙cm): 1 Ω∙cm = 10-2 Ω∙m.

Katra vadītāja materiāla īpatnējā pretestība un līdz ar to arī vadītāja pretestība ir atkarīga no dažādiem faktoriem: tempera­tūras, mehāniskajām deformācijām u. c. Šo faktoru ietekmi — visbiežāk pretestības atkarību no temperatūras — plaši izmanto mērīšanas tehnikā un automātikā.

**Elektriskās pretestības atkarība no temperatūras**. Nelielā temperatūras intervālā (daži simti °C) vadītāja pre­testību ar pietiekamu precizitāti var aprēķināt pēc šādas aptuvenas izteiksmes:

*R = R*0 [1 + *α*(*θ – θ*0)], (2.14)

kur *R* — vadītāja pretestība temperatūrā - θ 0C;

*R*0 — vadītāja pretestība temperatūrā θ 0 = 20°C;

*α* — pretestības temperatūras koeficients, kas skaitliski ir vienāds ar pretestības relatīvo izmaiņu, vadītāja temperatūrai pieaugot par 1 °C. Dažu vadītāju materiālu īpatnējo pretestību un temperatūras koeficientu skaitliskās vērtības dotas 2.1. tabulā.

Metāliem temperatūras koeficients ir pozitīvs, t. i., metālam sasilstot, tā pretestība palielinās. Grafītam un elektrolītiem tem­peratūras koeficients ir negatīvs, t. i., paaugstinot temperatūru, to pretestība samazinās,

Piekausējumi ievērojami palielina metālu īpatnējo pretestību un samazina temperatūras koeficientu.

Pēc formulas (2.14) var noteikt vada (mašīnas tinuma temperatūru *θ*2. Šādā nolūkā izmēra pretestību *R*2 un, zinot *R*1, *α* un *θ*1, temperatūru *θ*2 aprēķina pēc formulas



Formula iegūta , pārveidojot formulu (2.14).

2.1. tabula

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Materiāls** | **Īpatnējā pretestība *ρ*, Ω·mm2/m, ja temperatūra 20°C** | **Pretestības temperatū­ras koefi­cients *α*, deg-1** | **Materiāls** | **Īpatnējā pretestība *ρ*, Ω·mm2/m, ja temperatūra 20°C** | **Pretestības temperatū­ras koefi­cients *α*, deg-1** |
| Sudrabs | 0,0162 | 0,004 | Manganīns | 0,42—0,50 | 0,00003—0,00006 |
| Varš | 0,0175 | 0,004 |
| Alumīnijs | 0,0295 | 0,004 | Konstantāns | 0,45—0,52 | 0,000003—0,000005 |
| Bronza | 0,02—0,05 | 0,004 |
| Volframs | 0,0503 | 0,0048 | Čuguns | 0,5 | 0,001 |
| Misiņš | 0,07—0,08 | 0,002 | Nihroms | 1,02—1,27 | 0,00014 |
| Platīns | 0,1 | 0,0035 | Fehrals | 1,26—1,35 | 0,00005—0,00018 |
| Tērauds | 0,135 | 0,006 | Ogle | 10 | - 0,0005 |

***2.1. piemērs.*** Noteikt gaisa elektropārvades līnijas pretestību, ja vara vada šķērsgriezuma laukums *S* = 16 mm2, garums *l* = 200 m (ja temperatūra ir 0 un 200C).

*Atrisinājums.*

Tā kā formulā



*ρ* dots temperatūrai *Ө*1 = 200C (*ρ*1 = 0,0175 Ω·mm2/m), tad ievietojot divvadu līnijas garumu 2*l* un *S* vērtības, iegūstam



Vada pretestību temperatūrai *Ө*2 = 00C var aprēķināt pēc formulas



***2.2. piemērs.*** Temperatūrā *Ө*1 = 200C elektrodzinēja vara vadu tinuma pretestība *R*1 = 2,4 Ω. Pēc dzinēja divu stundu darbības šī tinuma pretestība *R*2 = 2,8 Ω. Noteikt dzinēja tinuma temperatūru pēc divu stundu darbības.

*Atrisinājums.*

Temperatūru *Ө*2 aprēķina pēc formulas (2.6)



***2.3. piemērs.*** Atrast sprieguma kritumu vara stieplē, kuras garums 200 m, diametrs 1,2 mm, ja strāvas stiprums, kas plūst stieplē ir 5 A. Vara īpatnējā pretestība *ρ* = 1,7·10-8 Ω·m.

*Risinājuma plāns.*

1. Pierakstiet uzdevuma dotos lielumus un izsakiet tos SI sistēmā

*l*  = 200 m = 2·103 m.

*d* = 1,2 mm = 0,0012 m = 1,2·10-3 m.

*I* = 5 A.

*ρ* = 1,7·10-8 Ω·m.

2. Izvēlēties formulu, kas nepieciešama sprieguma aprēķināšanai – Oma likums *I = U/R*. Izsakiet no šīs formulas sprieguma kritumu *U*

*U = I·R*.

3. Sprieguma aprēķināšanai jāzina strāvas stiprums *I* (tas uzdevumā ir dots) un pretestība *R* (tiešā veidā uzdevumā nav dota).

4. Izvēlēties formulu pretestības aprēķināšanai



5. Tagad redzam, ka visi lielumi uzdevumā ir doti, izņemot vadītāja šķērsgriezuma laukumu *S*. To var aprēķināt pēc formulas



6. Aprēķiniet stieples pretestību



7. Skaitliski aprēķiniet sprieguma kritumu *U*

*U = I·R* = 5·3 = 15 V.

***2.4. piemērs.*** Nihroma vadam, kura šķērsgriezuma laukums *S* = 0,55 mm2 pielikts 6 V liels spriegums. Cik garam jābūt vadam, lai pa to plūstu 0,1 A stipra strāva? (nihromam *ρ* = 1,1 Ω·mm2/m pie 200C).

*Risinājuma plāns.*

1. Pierakstiet uzdevuma dotos lielumus un izsakiet tos SI sistēmā

*S* = 0,55 mm2 = 0,55·10-6 m2.

U = 6 V.

I = 0,1 A.

ρ = 1,1 Ω·mm2/m = 1,1 μΩ·m = 1,1·10-6 Ω·m.

2. No Oma likuma ķēdes posmam izsakiet pretestību un aprēķiniet to



3. No formulas pretestības aprēķināšanai izsakiet vada garumu



Dažos gadījumos aprēķinos izdevīgi lietot pretestības ap­griezto lielumu, ko sauc par vadītspēju un apzīmē ar *G*:



Vadītspējas mērvienība SI sistēma ir sīmenss (S):



Izmantojot izteiksmi (2.15), Oma likuma izteiksmi (2.11) va­dītajam, kam pievienots spriegums *U*, var uzrakstīt arī šādi:

*I = UG*. (2.16)

**2.2. ELEKTRISKĀ ĶĒDE UN TĀ ELEMENTI**

Lai iegūtu elektrisko strāvu, jāizveido elektriskā ķēdi.

Ja patērētāju ar vadiem pievieno enerģijas avotam, izveidojas noslēgts kontūrs, ko sauc par elektrisko ķēdi.

Visas elektriskās ķēdes var iedalīt šādās:

1. līdzstrāvas, maiņstrāvas (vienfāzes un trīsfāžu);

2. nesazarotas un sazarotas;

3. ķēdes ar vienu vai vairākiem barošanas avotiem:

* vienkārša ķēde (ar vienu barošanas avotu);
* sarežģīta ķēde (ar vairākiem barošanas avotiem dažādos zaros);

4. lineāras un nelineāras ķēdes.

Elektriskās ķēdes, kurās plūst līdzstrāva, sauc par līdzstrā­vas ķēdēm.

Elektriskās ķēdes grafisko attēlu (ķēdes elementus attēlojot ar pieņemtiem apzīmējumiem) sauc par elektriskās ķēdes shēmu. Piemēram, elektriskās enerģijas avotu elektriskajās shē­mās attēlo ar apli, patērētāju (elektrisko pretestību) — ar taisn­stūri utt. (sk. 2.2. tabulu).

Par elektriskās ķēdes elementu sauc ķēdes iekārtu (objektu), kurā noris noteikti ķēdes elektromagnētiskie procesi.

Elektriskās ķēdes pamatelementi ir elektriskās enerģi­jas avots (galvaniskais elements, termoelements, ģenerators u. c.), elektriskās enerģijas patērētājs (kvēlspul­dze, elektriskā sildierīce, elektrodzinējs u. c.) un savienojo­šie vadi.

Elektrisko ķēžu galvenie elementi ir enerģijas avoti un enerģijas patērētāji (elektriskās enerģijas saņēmēji). Enerģijas avoti pārveido mehānisko, ķīmisko, siltuma jeb cita veida enerģiju elektriskajā enerģija, turpretī patērētāji pārveido elektrisko enerģiju siltumā, mehāniskajā jeb cita veida enerģija. Enerģijas patērētāju sauc arī par slodzi.

2.2. tabula

**Elektriskajās shēmās lietojamie pieņemtie grafiskie apzīmējumi**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **Nosaukums** | **Apzīmējums** | **Izmēri** |
| Elektriskās ķēdes vads, kabelis, kopne |  |  |
| Elektrolīnija (ar uzrādītu vadu skaitu) |  |  |
| Elektrolīnija (ar uzrādītu vadu skaitu) |  |  |
| Elektrisks savienojums |  |  |
| Neizjaucams savienojums |  | контакт разборного соединения |
| Izjaucams savienojums |  |  |
| Neregulējama pretestība (rezistors R = const) |  | резистор |
| Neregulējama pretestība ar nozarojumiem |  |  |
| Regulējama pretestība, vispārīgais apzīmējums |  |  |
| Regulējama pretestība, pārtraucot ķēdi |  |  |
| Regulējama pretestība, nepārtraucot ķēdi |  |  |
| Nelineāra pretestība |  |  |
| Induktivitāte (spole), vispārīgais apzīmējums |  | катушка индуктивности, обмотка |
| Kondensators, vispārīgais apzīmējums |  | конденсатор постоянной емкости |
| Polārais kondensators |  |  |
| Maiņkondensators |  |  |
| Saslēdzējkontakts (vispārīgais apzīmējums) |  | контакт замыкающий |
| EDS avots, vispārīgais apzīmējums |  |  |
|  |  |
| Galvaniskais (primārais) elements vai akumulators |  | элемент гальванический или аккумуляторный |
| Vienpola un divpola slēdzis |  |  |
| Kvēlspuldze |  | лампа накаливания |
| Rādošs sprieguma mērītājs, voltmetrs |  |  |
| Rādošs strāvas mērītājs, ampērmetrs |  |  |
| Vatmetrs |  |  |
| Kūstošais drošinātājs |  | предохранитель |
| Stators  Elektriskā mašīna (vispārīgais apzīmējums) |  |  |
| Rotors |  |  |
| Neitrālvads. N vads |  |  |
| Aizsargvads. PE vads |  |  |
| Aizsargneitrālvads. PEN vads |  |  |
| Līnija ar trim fāzes vadiem, neitrālvadu un aizsargvadu |  |  |

Katram ķēdes elementam ir noteiktu spaiļu (izvadu) skaits, kuras to saista ar citiem šīs pašas ķēdes elementiem. Atkarībā no elementa spaiļu skaita tos iedala divpolu un daudzpolu (trīspolu, četrpolu utt.) elementos.

Līdzstrāvas elektriskās ķēdes galvenokārt satur tikai divpolu elementus – rezistorus un enerģijas avotus.

***Rezistors*** ir ķēdes elements, kas tieši paredzēts tā elektriskās pretestības izmantošanai ķēdē un kuru ieslēdz elektriskajā ķēdē, lai ierobežotu vai samazinātu tās strāvu.

*Rezistors* ([latīņu](http://lv.wikipedia.org/wiki/Lat%C4%AB%C5%86u_valoda): resistere - pretoties) ir pasīvais elements, kam piemīt aktīvā (omiskā)  [pretestība](http://lv.wikipedia.org/wiki/Elektrisk%C4%81_pretest%C4%ABba) un kas paredzēts vēlamās pretestības iegūšanai elektriskajā ķēdē, lai pārdalītu un regulētu elektrisko enerģiju starp shēmas elementiem vajadzīgās  [strāvas](http://lv.wikipedia.org/wiki/Str%C4%81va) vai [sprieguma](http://lv.wikipedia.org/wiki/Spriegums) vērtības iegūšanai. Rezistorus bieži dēvē vienkārši par pretestībām, kas nav korekti, jo [pretestība](http://lv.wikipedia.org/wiki/Pretest%C4%ABba) ir rezistora galvenā īpašība. Rezistori mēdz būt ar pastāvīgu pretestības vērtību vai arī ar maināmu vērtību ([maiņrezistori](http://lv.wikipedia.org/w/index.php?title=Mai%C5%86rezistors&action=edit&redlink=1) jeb potenciometri un [reostati](http://lv.wikipedia.org/w/index.php?title=Reostats&action=edit&redlink=1)).

### Pretestība*.* Rezistora svarīgākais raksturlielums ir tā elektriskā pretestība. Pretestības pamatmērvienība ir [oms](http://lv.wikipedia.org/wiki/Oms). Parasti praksē lietojamo rezistoru pretestība ir no 1 oma līdz 10 megaomiem. Dažādu speciālu rezistoru pretestība var būt no oma daļām līdz desmitiem un simtiem gigaomu un pat teraomiem. Lai iegūtu lielāku pretestību, var [saslēgt virknē](http://lv.wikipedia.org/w/index.php?title=Virknes_sl%C4%93gums&action=edit&redlink=1) vairākus rezistorus. Pretestības vērtību, kas apzīmēta (iekodēta) uz rezistora korpusa, sauc par nominālo pretestību. Dažādu tipu rezistoriem var būt dažāda lieluma pielaide nominālajai pretestībai.

### Jauda. Rezistora nominālā jauda ir lielākā [jauda](http://lv.wikipedia.org/wiki/Jauda), kuru rezistors var ilgstoši izkliedēt, saglabājot savus parametrus noteiktajās robežās (t.i. nepārkarstot). Praksē lietojamiem rezistoriem jauda var būt no 0,01 līdz 500 [vatiem](http://lv.wikipedia.org/wiki/Vats). Parasti, jo jaudīgāks ir rezistors, jo lielāki ir tā izmēri.

### Robežspriegums*.* Robežspriegums ir maksimālais pieļaujamais elektriskā  [sprieguma](http://lv.wikipedia.org/wiki/Spriegums)  kritums uz rezistora. Ja to pārsniedz, var notikt caursite starp atsevišķām rezistora daļām. Šis spriegums var būt atkarīgs no atmosfēras spiediena.

### Temperatūras koeficients.

### Paštrokšņi. Rezistoru paštrokšņi (nevēlamas haotiskas pretestības izmaiņas, kas ietekmē sprieguma kritumu uz rezistora) sastāv no siltuma trokšņiem un strāvas trokšņiem. Siltuma troksnis ir atkarīgs no pretestības vērtības un rezistora temperatūras. Strāvas trokšņi rodas, strāvai plūstot caur rezistoru; tie raksturīgi rezistoriem, kas nav veidoti no stieples.

### Induktivitāte un kapacitāte. Rezistora [induktivitāte](http://lv.wikipedia.org/wiki/Induktivit%C4%81te) un [kapacitāte](http://lv.wikipedia.org/wiki/Kapacit%C4%81te) ir raksturlielumi, kas nosaka rezistora spēju strādāt pie augstām [frekvencēm](http://lv.wikipedia.org/wiki/Frekvence). Rezistora kapacitāte sastāv no paša rezistora kapacitātes un tā izvadu kapacitātes. Induktivitāti nosaka rezistīvā elementa garums, korpusa izmēri, izvadu ģeometrija. Vislielākā induktivitāte un kapacitāte mēdz būt stieples rezistoriem, tādēļ tos nevar izmantot pie augstām frekvencēm. Stieples rezistora induktivitāti var samazināt, izmantojot speciālus uztīšanas veidus ([bifilārais tinums](http://lv.wikipedia.org/w/index.php?title=Bifil%C4%81rais_tinums&action=edit&redlink=1)).

## Rezistoru tipi. Rezistorus klasificē galvenokārt pēc rezistīvā elementa veida, jo no tā atkarīgi tā galvenie parametri.

* Stieples rezistori (izgatavo no [konstantāna](http://lv.wikipedia.org/w/index.php?title=Konstant%C4%81ns&action=edit&redlink=1), [nihroma](http://lv.wikipedia.org/wiki/Nihroms), [nikelīna](http://lv.wikipedia.org/w/index.php?title=Nikel%C4%ABns&action=edit&redlink=1) vai citu augstomīgu sakausējumu stieples)
* Metāla folijas rezistori
* Masas vai plēves rezistori
  + Plānas plēves rezistori
    - Metāldielektriskie rezistori
    - Metāloksīda rezistori
    - Metalizētie rezistori
    - [Oglekļa](http://lv.wikipedia.org/wiki/Ogleklis) rezistori
    - Boroglekļa rezistori
  + Biezas plēves rezistori
    - Lakas-plēves rezistori
    - Kermeta (keramiskie-metāliskie) rezistori
    - Strāvu vadošas [plastmasas](http://lv.wikipedia.org/wiki/Plastmasa) rezistori
  + Masas rezistori
    - Rezistori ar organisku [dielektriķi](http://lv.wikipedia.org/wiki/Dielektri%C4%B7is)
    - Rezistori ar neorganisku [dielektriķi](http://lv.wikipedia.org/wiki/Dielektri%C4%B7is)

Pēc pretestības pielaides rezistorus iedala vispārīgas nozīmes, precīzos un sevišķi precīzos rezistoros. Vispārīgas nozīmes rezistoriem pielaide var būt 20%, 10% vai 5%, bet sevišķi precīziem rezistoriem tā var sasniegt pat 0,0005%. Jo precīzāks ir rezistors, jo stabilākiem jābūt visiem tā parametriem.

Pēc aizsardzības no ārējiem faktoriem rezistori iedalās neizolētos, izolētos, hermetizētos un vakuuma rezistoros.

Bez tam mūsdienās ir lietojami dažādi speciāli rezistori.

* Augstsprieguma rezistori (paredzēti darbam pie lieliem spriegumiem - līdz desmitiem kilovoltu)
* Lielas pretestības rezistori (mazjaudīgi, paredzēti vāju strāvu ķēdēm)
* [Termorezistori](http://lv.wikipedia.org/w/index.php?title=Termorezistors&action=edit&redlink=1)
* [Fotorezistori](http://lv.wikipedia.org/w/index.php?title=Fotorezistors&action=edit&redlink=1)

Rezistorus plaši izmanto gandrīz visās [elektrotehnikas](http://lv.wikipedia.org/wiki/Elektrotehnika) un [elektronikas](http://lv.wikipedia.org/wiki/Elektronika) jomās. Kopā ar [kondensatoriem](http://lv.wikipedia.org/wiki/Kondensators) un [induktivitātes spolēm](http://lv.wikipedia.org/wiki/Spole) tie veido elektriskās ķēdes, kuru īpašības ir atkarīgas no [frekvences](http://lv.wikipedia.org/wiki/Frekvence) ([svārstību kontūri](http://lv.wikipedia.org/wiki/Sv%C4%81rst%C4%ABbu_kont%C5%ABrs), filtri, impulsu formētāji, [atgriezeniskās saites](http://lv.wikipedia.org/w/index.php?title=Atgriezenisk%C4%81_saite&action=edit&redlink=1)). Rezistorus lieto kā [šuntus](http://lv.wikipedia.org/w/index.php?title=%C5%A0unts&action=edit&redlink=1), sprieguma dalītājus, aktīvo elementu slodzes, enerģijas absorbētājus. Precīzos rezistorus izmanto mēraparātos, automātikas sistēmās, skaitļošanas iekārtās. Augstfrekvences rezistorus pielieto augstfrekvences ķēdēs, kabeļos, [viļņvados](http://lv.wikipedia.org/w/index.php?title=Vi%C4%BC%C5%86vads&action=edit&redlink=1), jo tiem ir sevišķi maza kapacitāte un induktivitāte.

Plaša pielietojuma rezistori pamatā iedalās 2 lielās grupās - oglekļa (carbon) un metāla plēvīšu (metal film) rezistoros. Oglekļa rezistori parasti ir pelēkā, bēšā, vai zaļā krāsā; tie ir ļoti lēti. Metāla plēvīšu rezistori parasti ir sarkanā vai gaišzilā krāsā, un tie ir daudz kvalitatīvāki un stabilāki.

**Pretestības vērtību un pielaidi** mūsdienu standarta rezistoriem var noteikt pēc krāsu tabulas 2.3.

Tātad uz katra rezistora korpusa ir 4 vai 5 krāsaini gredzeni, no kuriem pirmie 2 vai 3 nosaka vērtību, nākamais - reizinātāju (skaitļa 10 pakāpi, ar kuru jāreizina vērtība) Rezultātu tad vienmēr iegūst omos. Tabulā ir mazliet savādāk, rezultātu iegūst arī kilo- un megaomos, bet tam nav principiālas atšķirības.

**1000 Ω = 1 KΩ; 1000 KΩ = 1 MΩ**

Pēdējā gredzena krāsa nosaka pielaidi. Parasti ir zelta vai sudraba, kas atbilst 5% vai 10% pielaidei. Pēdējais gredzens no pārējiem vienmēr atdalīts ar atstarpi.  
Izņēmums: gadās rezistori, kuriem ir pavisam tikai 3 gredzeni, nobīdīti vienā malā. Tādiem pielaide būs 20%.

**Nominālu skala** nav brīvi izvēlēta, tā atbilst standartiem E6-E192. Piemēram, rezistori ar 20% pielaidi atbilstoši skalai E6 tiek ražoti ar sekojošiem nomināliem: 1 - 1.5 - 2.2 - 3.3 - 4.4 - 6.8. Tālāk seko: 10, 15, 22, 33, utt.

Internetā ir sastopami grafiskie online, ar tiem ļoti ērti noteikt parametrus pēc krāsu kodiem.

Vēl ir sastopami arī **vecā standarta** rezistori ar uzdrukātu nominālu un pielaidi, pamatā NVS ražojumi. Šai gadījumā uzraksts satur 4-5 elementus: 2 vai 3 cipari nosaka nominālu, nākamais ir burts E vai R (omi), K (kiloomi) vai M (megaomi) - tas izpilda decimālā punkta lomu. Pēdējais ir burts, kurš norāda uz pielaidi; visbiežāk tas ir A =5%, B =10%, C =20%.

Piemēri: 47EB = 47 Ohm, 10% pielaide

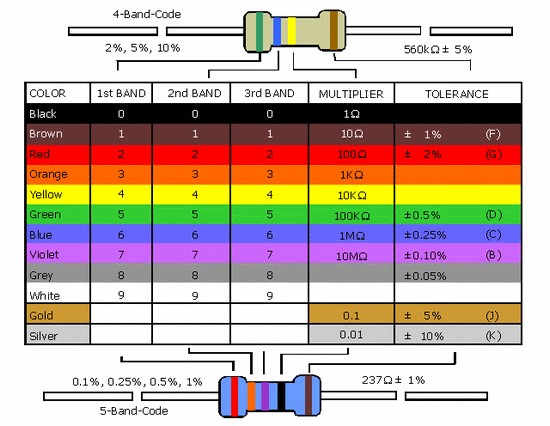
K47A = 0.47 KOhm jeb 470 Ohm, 5% pielaide

4K7C = 4.7 KOhm, 20% pielaide

M47B = 0.47 MOhm jeb 470 KOhm, 10% pielaide

Čip-, jeb bezvadu, jeb miniatūrie **SMD-rezistori** - tos lieto datoros, mobilajos telefonos, utml. Tiem parasti nomināls uzdrukāts un sastāv no 3-4 cipariem, no kuriem pēdējais ir reizinātājs.

2.3. tabula



Piemēri: 221 = 22 x 101 = 22 x 10 = 220 Ohm;

680 = 68 x 100 = 68 x 1 = 68 Ohm;

332 = 33 x 102 = 33 x 100 = 3300 Ohm = 3.3 KOhm

**Rezistoru maksimāla jauda** parasti netiek norādīta uz korpusa, tā nosakāma pēc standartizētā korpusa izmēriem. Visbiežāk tiek lietoti 1/8W - 2W izstrādājumi. Pemēram 1/4W rezistora izmēri būs d=2.2x6.2 mm (bez izvadiem).

Vēl ir arī citi rezistoru tipi: maiņrezistori, pieregulēšanas rezistori (trimmeri), foto- un termorezistori utt.

**2.3. NESAZAROTA ELEKTRISKĀ ĶĒDE**

Visvienkāršāko elektrisko ķēdi, kas sastāv tikai no minētajiem trīs pamatelementiem, kuri veido vienu kontūru, sauc par nesazarotu jeb vienkāršu elektrisko ķēdi (2.4. att.).

Elektriskā ķēde sastāv no ārējās ķēdes, kuru veido savienojošie vadi un patērētais, un iekšējās ķēdes – elektroenerģijas avota.

Noslēgtā elektriskā ķēdē plūst strāva I, ko uztur elektriskās enerģijas avots, atdodot elektrisko enerģiju patērētājam. Strāvas plūšana ķēdē saistīta ar nepārtrauktiem enerģijas pārveidošanās procesiem katrā ķēdes elementā. Avotā elektriskajā enerģijā pār­veidojas kāda neelektriska enerģijas forma, piem., ģeneratoros — mehāniskā enerģija, galvaniskajos elementos — ķīmiskā enerģija, fotoelementos — gaismas enerģija, termoelementos — siltums utt. Patērētājā notiek pretējs process — elektriskā enerģija pār­veidojas kādā neelektriskā enerģijas formā: elektrodzinējos — me­hāniskajā, akumulatoros — ķīmiskajā, gaismas avotos — gaismas enerģijā un siltumā utt.

Arējā ķēdē strāva plūst no avota spailes ar augstāku poten­ciālu φ1 uz spaili ar zemāku potenciālu φ2, t. i., no « + » spailes uz « —» spaili, bet avotā — no « —» spailes uz « + » spaili (EDS virzienā).

|  |
| --- |
| 2.4. att. Nesazarotas elektriskas ķēdes shēma |

***Elektrodzinējspēks***. Elektriskās enerģijas avotu raksturo tā elektrodzinējspēks (saīsināti — EDS) E, kas rodas, kādai neelektriskas ener­ģijas formai avotā pārveidojoties elektriskajā enerģijā.

Avota EDS noslēgtā ķēdē rada elektrisko lauku un tādējādi starp ķēdes atsevišķu posmu galiem uztur noteiktas potenciālu starpības jeb spriegumus.

Elektrodzinējspēks E skaitliski vienāds ar avota spaiļu poten­ciālu starpību jeb avota spriegumu *U*, ja avota ārējā ķēde pār­traukta (*I* = 0):

*E = φ*1 *– φ*2 *= U.*

Elektrodzinējspēku, tāpat kā spriegumu, mēra voltos.

Avota EDS darbības virziens avotā ir no « — » spailes uz « + » spaili; shēmā to parāda ar bultiņu (2.4. att.).

Noslēgtā ķēdē avota EDS uztur strāvu EDS darbības virzienā.

Ārējai ķēdei pievienotā sprieguma *U* virzienu shēmā arī pa­rāda ar bultiņu — no avota « + » spailes uz « —» spaili, jo strāva *I* ārējā ķēdē plūst tai pievienotā sprieguma *U* virzienā.

**Oma likums pilnai ķēdei**. Ja ķēdes posmā ar pretestību *R* plūst strāva *I*, tad no izteik­smes (2.11) spriegums starp posma galiem

*U = IR*. (2.17)

Ķēdes posma strāvas un šī posma pretestības reizinājumu sauc par sprieguma kritumu dotajā posma.

Tādējādi *IR* ir sprieguma kritums ārējā ķēdē (avota spriegums *U*) un *IR*0 — sprieguma kritums avotā, kur *R* un *R*0 ir ārējās ķē­des un avota iekšējā pretestība (2.4. att.).

No Oma likuma izteiksmes noslēgtai ķēdei ar EDS avotu

 (2.18)

avota EDS

*E = IR + IR*0 = *U + IR*0

un avota spriegums

*U = E - IR*0. (2.19)

Tātad, ja EDS avotam pievienota ārējā ķēde (*I* > 0), tad avota spriegums *U* vienmēr ir mazāks nekā avota EDS par sprieguma kritumu avotā. Jo lielāka ķēdes strāva *I* (ja *E* = const) un jo lielāka avota iekšējā pretestība *R*0, jo mazāks ir avota spriegums *U*, salīdzinājumā ar *E*. Tikai tad, kad *I* = 0, arī *IR*0 = 0 un *U = E*.

**EDS avota ārēja raksturlīkne.** EDS avota sprieguma atkarība no ķēdes strāvas parādīta 2.5. attēlā. Lineārās sakarības *U* = *f*(*I*) grafisko attēlu sauc par avota *ārējo raksturlīkni*. *UN* un *IN* ir avota nominālais spriegums un nominālā strāva (sk. 2.5. att.).

**Lineāra elementa (rezistora) voltampēru raksturlīkne.** Sakarības *I = f*(*U*) grafisko attēlu, kas parāda ķēdes elementam caurplūstošas strāvas atkarību no tam pievienotā sprieguma sauc par to voltampēru raksturlīkni.

Elektriskās ķēdes lineāra elementa voltampēru raksturlīkne *I = f*(*U*) ir taisne, kas iet caur koordinātu sākumu (2.6. att.) un grafiski attēlo Oma likumu ķēdes posmam ar nemainīgu pretestību.

|  |  |
| --- | --- |
| 2.5. att. EDS avota ārējā raksturlīkne. | 2.6. att. Lineāra elementa voltampēru raksturlīkne |

Raksturlīknes slīpuma leņķis α pret ordinātu asi ir atkarīgs no elementa pretestības R



kur *mU, mI, mR* – sprieguma, strāvas un pretestības mērogi.

**2.4. ELEKTRISKĀS ĶĒDES RAKSTURĪGIE DARBA REŽĪMI**

Elektriskajai ķēdei un tās elementiem ir četri raksturīgi darba režīmi: nominālais, tukšgaitas, īsslēguma un saskaņotais režīms.

*Nominālajā* (normālajā) režīmā elektriskajā ķēdē ieslēgtie avoti un patērētāji darbojas tad, kad šo ķēdes elementu spriegumi, strāvas un jaudas atbilst tām vērtībām, kādām tos iz­gatavojušas rūpnīcas. Nominālais režīms atbilst optimālajiem darba apstākļiem, tādēļ iekārta šajā režīmā var ilgi darboties bez bojājumiem, turklāt tās darbība ir ļoti ekonomiska.

Elektriskās enerģijas avotu un patērētāju nominālie elektriskie lielumi — nominālais spriegums *UN*, nominālā strāva *IN* un no­minālā jauda *PN* — parasti norādīti to tehniskajās pasēs; elektris­kajām mašīnām un aparātiem tie doti ari uz speciālas korpusam piestiprinātas uzrakstu plāksnītes.

Nominālais spriegums *UN* ir katras elektriskās ietaises pamatlielums, jo no tā skaitliskās vērtības atkarīgs ietaises konstruk­tīvais izveidojums un elektriskā izolācija. Sprieguma nominālās vērtības nosaka valsts standarts. Līdzstrāvas patērētāju nominālie spriegumi parasti ir 110, 220 vai 440 V.

Elektriskās mašīnas vai aparāta nominālā strāva *IN* ir tā mak­simālā ilgstošā strāva, kura mašīnas vai aparāta vadu elektroizolācijas temperatūru paceļ līdz izolācijai pieļaujamai robežai.

Ģeneratora nominālā jauda *PN* ir maksimālā lietderīgā jauda, ko ģenerators atdod ārējai ķēdei nominālajā darba režīmā.

Dzinēja nominālā jauda *PN* ir maksimālā lietderīgā jauda, ko nominālajā darba režīmā atdod dzinēja vārpsta.

Ja līdzstrāvas ķēdē izmaiņas režīms (t.i., spriegumi un strāvas), tam var būt divi cēloni: avota EDS izmaiņa vai ķēdes pretestības izmaiņa. Piemēram, ja ķēdē ar vienu avotu izmainās šī avota EDS, tad visas strāvas un spriegumi pieaug vai samazinās proporcionāli tam. Biežāk sastopamas tādas režīma izmaiņas, ko izsauc patērētāju pretestības izmaiņa visai plašās robežās.

Aplūkosim gadījumu, kad līdzstrāvas ķēdē ir patērētājas (slodze) ar mainīgu pretestību.

2.7. att. *a* shēmā abi elektriskās ķēdes parametri *E* un *R*1 ir konstanti. Maināmā slodzes pretestība apzīmēta ar *R*2. 2.7. att. *b* parādīta shēma elektriskās ķēdes režīmu eksperimentālai pētīšanai. Atšķirība no iepriekšējas shēmas: EDS avots aizvietots ar līdzvērtīgu spriegumu *U = E*.

|  |  |
| --- | --- |
| ***a*** | ***b*** |

2.7. att. *a* – elektriskā ķēde ar slodzi *R*2; *b* – EDS aizstāts ar spriegumu *U*

Dažādus režīmus iegūst, patērētāja pretestību *R*2 mainot no bezgalībai līdz nullei (0 ≤ *R*2 < ∞). Abiem galējiem režīmiem ir nosaukumi (sk. 2.9. att. *a*).

***Tukšgaitas režīms***. Avota *tukšgaitas režīma* ārēja ķēde ir pārtraukta, t. i., patērētāji ir atvienoti no avota. Tā kā pārtrauktas arējās ķēdes pretestība praktiski ir bezgalīgi liela (*R = ∞*), tad ķēdes strāva *I =* 0 un sprieguma kritums avota *I∙R*0 = 0. Saskaņa ar iz­teiksmi (2.19)

*U = U*0 = *E*,

t. i., tukšgaitas režīmā avota spriegums *U*0 (tukšgaitas spriegums) ir vienāds ar avota elektrodzinējspēku *E*.

Tukšgaitas režīmā avota elektrodzinējspēku *E* var izmērīt ar voltmetru (2.8. att.). Tomēr mērīšanas rezultāts ir aptuvens, jo, avotam pieslēdzot voltmetru, ķēdē plūst strāva *Iv*, kuras vērtība ir atkarīga no voltmetra iekšējās pretestības *Rv*. Tādēļ sprieguma kritums avotā *IvR*0 > 0 un voltmetra uzradītais spriegums *U < E*.

|  |  |
| --- | --- |
| 2.8. att. Avota EDS mērī­šana ar voltmetru | Tikai tad, ja *Iv* = 0, t. i., ja *Rv = ∞*, *U = E*. Tādejādi mērīšanas re­zultātu kvalitāti nosaka attiecība *RV*/*R*0, —jo lielāka voltmetra iekšējā pretestība, jo voltmetra uzrādītais sprie­gums *U* mazāk atšķirsies no *E* vērtības.  Avota EDS precīzi var noteikt ar kompensācijas metodi vai ar elektrostatisko voltmetru, kuram praktiski *Rv* = =∞. |

***Īsslēguma režīms***. Vislielāko strāvas vērtību iegūst, samazinot slodzes pretestību *R*2 līdz nullei. Šo režīmu sauc par īsslēguma režīmu, un strāvu – par īsslēguma strāvu *Iīs = U/R*1.

Atradīsim, kā, mainot ķēdes darba režīmu no tukšgaitas līdz īsslēgumam, mainās spriegumi un jaudas ķēdē, pievēršot vērību šādiem jautājumiem:

1. kā mainās spriegums uz patērētāja *UBC* (2.9. att. *b*) ?

2. kurā režīmā patērētāja izdalīsies vislielākā jauda?

3. kā mainās ķēdes lietderības koeficients?

Visos grafikos 2.9. att. uz abscisu ass būs stāva *I* diapazonā no nulles līdz īsslēguma strāvas vērtībai.

***Spriegumu atkarība no strāvas***. 2.7. att. *b* shēma ir sprieguma dalītājas ar vienu maināmu pretestību *R*2. Aplūkosim trīs sakarības, kas raksturo spriegumus:

|  |  |
| --- | --- |
| ***a*** | ***b*** |

2.9. att. Spriegumu un jaudu grafiki atkarība no režīma.

*UAB = R*1*I*, *UBC = R*2*I*, *UBC = U – UAB*.

Pirmā no tām nozīmē, ka spriegums *UAB* uz konstantās pretestības *R*1 ir proporcionāls strāvai – tā grafiks aug lineāri līdz ar strāvu.

Otrā izteiksme nav ērta analīzei, jo tajā abi lielumi (*R*2 un *I*) ir mainīgi, turpretī trešā sakarība atļauj viegli atrast spriegumu *UBC*, kā divu zināmo spriegumu starpību. Starp citu, šāda situācija būs sastopama bieži: ja kādu spriegumu nevar atrast, izmantojot Oma likumu, paliek iespēja izmantot spriegumu vienādojumu.

Spriegumu grafiki atkarībā no strāvas redzami 2.9. att. *a*. Pievērsiet uzmanību sprieguma *UBC* grafikam: *pieaugot strāvai, spriegums uz maināmas slodzes pretestības samazinās*. Šāda tendence novērojama, slogojot jebkuru līdzstrāvas avotu.

Īpašs nosaukums dots vēl vienam režīmam ( skat. 2.9. att. *a*): *saskaņotais režīms*. To iegūst, ja abas sprieguma dalītāja pretestības ir vienādas: *R*2 = *R*1. Kopējā pretestība (*R*1 + *R*2) tad ir 2 reizes lielāka nekā īsslēguma režīmā, tāpēc strāva ir 2 reizes mazāka par īsslēguma strāvu. Spriegums *U* sadalās divās vienādās daļās. Arī abu rezistoru patērētās jaudas saskaņotajā režīmā ir vienādas. Ar ko šis režīms ievērojams – redzēsim, analizējot jaudu grafikus.

***Jaudu atkarība no strāvas***. Jaudas 2.9. att. *b* shēmā raksturo šādas sakarības:

*P = U∙I*, *PAB* = *R*1∙*I*2, *PBC* = *R*2∙*I*2, *PBC* = *P – PAB*.

Pirmā no tām ir taisnes vienādojums, jo tajā U = const. Tas nozīme, ka kopējā patērētā jauda, pieaugot slodzes strāvai, pieaug lineāri.

No otrās izteiksmes redzams, ka jaudai *PAB* kas izdalās nemainīgajā pretestībā *R*1, grafiks ir parabola. Tukšgaitā arī šī jauda vienāda ar nulli. Otro šīs parabolas punktu atrodam saskaņotajā režīmā: katra no pretestībām patērē pusi no kopējās jaudas *P*. Trešais parabolas punkts: īsslēguma režīmā *R*2 = 0, tāpēc *PAB = P*. Jaudas zudumi pretestībā *R*1 pieaug proporcionāli strāvas kvadrātam.

Jaudas *PBC* grafika raksturu novērtēsim izmantojot ceturto no izteiksmēm. No 2.9. att. *b* grafika saprotams, kāpēc saskaņotajam režīmam ir īpašs nosaukums: *saskaņotajā režīmā maināmajā slodzes pretestībā izdalītā jauda sasniedz maksimumu*. Strāvas vērtību, pie kuras lietderīgā jauda sasniedz maksimālo vērtību, var atrast arī analītiski, pielīdzinot nullei jaudas izteiksmes atvasinājumu pēc strāvas:



no kurienes



Redzam, ka šī strāvas vērtība ir puse no īsslēguma strāvas – tātad tiešām saskaņotajā režīmā.

***Lietderības koeficienta atkarība no strāvas***. Ja shēmas uzdevums ir piegādāt enerģiju slodzes pretestībai, tad tās lietderības koeficients *η* ir slodzes patērētās jaudas attiecība pret kopējo jaudu. Pārveidojot, iegūstam



|  |  |
| --- | --- |
| 2.10. att. Lietderības koeficienta grafiks. | Tā kā *U* = const, tad lietderības koeficienta grafiks ir līdzīgs sprieguma *UBC* grafikam. Mērogu atradīsim, zinot, ka saskaņotajā režīmā lietderīgā jauda ir tieši puse no kopējās.  Grafiks 2.10. att. rāda, ka *tuvojoties tukšgaitas režīmam lietderības koeficients tuvojas 100 % vērtībai*.  Un otrādi, palielinot slodzes strāvu, jaudas zudumi pieaug un lietderības koeficients samazinās līdz pat nullei īsslēguma režīmā.  Iegūtos rezultātus var attiecināt uz jebkuru līdzstrāvas ķēdi, kurā ir maināma slodze, jo ikvienu šādu ķēdi var aprakstīt ar šo aizvietošanas shēmu (2.7. att.): aktīvs divpols ar maināmu slodzes pretestību *R*2. |

*Piemērs*: līdzstrāvas pārvades līnija – tad spriegums *U* nozīmē spriegumu līnijas sākumā, *UBC* – spriegumu līnijas beigās, *UAB* – sprieguma kritumu līnijā, *R*1 – pārvades līnijas pretestību, *PAB* – jaudas zudumus līnijā, *PBC* – slodzes pretestībā izdalīto jaudu.

*Otrs piemērs*: iegūtos secinājumus var attiecināt uz līdzstrāvas avotu (piemēram, līdzstrāvas ģeneratoru vai akumulatoru bateriju), uzskatot, ka *U* attēlo avota EDS, *UBC* – spriegumu uz avota spailēm, bet *R*1 – avota iekšējo pretestību.

Šos rezultātus izmanto arī, saskaņojot elektronikas shēmu divas pakāpes, lai no vienas nākošajai pievadītu vajadzīgo spriegumu vai jaudu: tādā gadījumā *U* – iepriekšējās pakāpes EDS, *R*1 – tās izejas pretestība, *UBC* – spriegums nākošās pakāpes ieejā, bet *R*2 – nākošas pakāpes ieejas pretestība, utt.

Jautājumā par visizdevīgāko režīmu viennozīmīga atbilde nav iespējama. Piemēram, enerģētikā – lielu jaudu gadījumā – noteicošais ir lietderības koeficients, un darba režīmi jāizvēlas daudz tuvāk tukšgaitai nekā saskaņotajam režīmam (punkts 1 lietderības koeficienta grafikā 2.10. att.) – ļoti tālu no īsslēguma režīma. Šādu režīmu iegūst, ja, piemēram, avota pretestība *R*1 ir daudzkārt mazāka par slodzes pretestību *R*2. Šo režīmu sauc par nominālo (normālo) režīmu.

Nelielas jaudas ķēdēs – piemēram, automātikā vai radiotehnikā – bieži vien ir nepieciešams nodot no vienas shēmas daļas otrā maksimāli iespējamo jaudu, nerēķinoties ar zudumiem – tad izvēlas režīmu saskaņotā režīma rajonā (2.10. att. – punkts 2).

Īsslēguma režīms parasti iestājas bojātas vadu izolā­cijas dēļ, kad saskaras vadu metāla dzīslas (2.11. att.). Arī ne­pareizi saslēgta elektriskā ķēde var būt īsslēguma cēlonis. Īsslē­guma režīms bieži vien rodas arī tad, kad neievēro elektrisko ietaišu ekspluatācijas noteikumus. Tādēļ, lai izvairītos no avāri­jām, stingri jāievēro pastāvošas elektrisko ietaišu montāžas un ekspluatācijas normas un noteikumi.

Īsslēguma režīms ir avārijas režīms: īsslēguma strāvas *Ik* iz­dalītais siltums ļoti ātri sakarsē vadus, tādēļ aizdegas to izolācija (sākums ugunsgrēkam!), uz strāvu vadošajām ietaises daļām var iedarboties visai lieli elektrodinamiski spēki, kas iekārtu var me­hāniski daļēji sagraut, utt.

Lai izvairītos no bojājumiem, ko rada īsslēguma strāvas, elek­triskajās ķēdēs ieslēdz speciālas aizsargierīces — kustošos drošinātājus vai automātus, kas īsslēguma gadījumā praktiski mo­mentāni pārtrauc īsslēguma strāvas ķēdi.

Lai elektrisko enerģiju pārvadītu iespējami ekonomiski, t. i., lai enerģijas zudumi pārvades līnijā būtu iespējami mazi, praksē parasti līnijas vadu pretestība 2*Rv* nepārsniedz 3—5% no patē­rētāja pretestības *R* (2.11. att.).

|  |  |
| --- | --- |
|  | 2.11. att. Īsslēgums starp elektriskās ķē­des punktiem *5* un *6.* |

Ķēdes strāva darba režīmā



Ja ir īsslēgums starp patērētāju spailēm, tad īsslēguma strāva

 (2.20)

un tā 20—30 un vairāk reižu pārsniedz ķēdes darba strāvu.

Jo tuvāk avotam ir īsslēguma vieta, jo mazāka ir īsi slēgtā kontūra 1—5—6—2—1 pretestība un jo lielāka ir īsslēguma strāva *Ik*. Īsslēguma strāva sasniedz maksimālo vērtību *Ikm* tad, kad īsslēgums ir starp avota spailēm 1 un 2 (praktiski — spailes ir savstarpēji savienotas ar vadītāju, kam liels šķērsgriezuma lau­kums), jo šajā gadījumā īsi slēgtās ķēdes ārējā pretestība prak­tiski ir vienāda ar nulli (*Rk* = 0), un īsslēguma strāvas vērtību nosaka tikai avota iekšējā pretestība *R*0:

 (2.21)

Tā kā īsslēguma vietā *Rk* = 0, tad arī sprieguma kritums tajā *Uk = Ik∙Rk* = 0.

**2.5. ELEKTRISKĀS STRĀVAS DARBS UN JAUDA**

Elektrisko strāvu vadītājā uztur elektriskais lauks, kuru rada vadītājam pievienotais spriegums *U*.

Noteiksim darbu, ko homogēnā vadītājā veic elektriskā lauka spēki, pārvietojot lādiņu q no vadītāja šķēluma 1 līdz šķēlumam 2 (2.12. att.).

Ja vadītāja šķērsgriezuma laukums ir nemainīgs (*S* = const), tad elektriskais lauks vadītājā ir homogēns (*ε* = const) un saskaņā ar izteiksmi (2.2) lā­diņa *q* pārvietošanas darbs, ko parasti sauc par strā­vas darbu,

*A = q∙U*, (2.22)

kur *U = φ*1 – *φ*2 — vadītāja posma 1—2 spriegums. No izteiksmes (2.4)

*q = I∙t*. (2.23)

|  |
| --- |
| 2.12. att. Homogens vadītājs ar nemainīgu šķērsgriezuma laukumu. |

Tad *t* sekundēs vadītāja posmā ar spriegumu *U* strāvas *I* veiktais darbs vai tā veikšanai patērēta (izdalītā) elek­triskā enerģija *W* ir

*A = W = U∙I∙t*. (2.24)

Ja *U* = const un *I* = const, tad strāvas darbs laika vienībā ir vienāds ar strāvas jaudu, ko apzīmē ar *P*:

*P = U∙I*. (2.25)

Darba mērvienība SI sistēmā ir džouls (J):

[A] = [U]∙[I]∙[t] = V∙A∙s = J (voltampērsekunde).

Džouls ir darbs, ko 1 sekundē veic 1 A stipra strāva ķēdes posmā ar spriegumu 1 V.

Jaudas vienība ir vats (W):

[P] = [U]∙[I] = V∙A = W.

No izteiksmēm (2.24) un (2.25) secinām, ka  vai 1 J = 1 W∙1 s (vatsekunde).

Vats ir maza jaudas vienība, taču radiotehnikā jaudu mēra pat vata daļās. Elektroenerģētikā lieto lielākas jaudas vienības — kilovatus (kW) un megavatus (MW):

1 kW = 103 W un 1 MW = 106 W

un arī lielākas darba (enerģijas) vienības — vatstundas (W∙h) un kilovatstundas (kW∙h): 1 W∙h = 3600 J un 1 kW∙h = 3,6∙106 J.

Izmantojot Oma likuma izteiksmi ķēdes posmam, kura pretestība ir *R*, strāvas jaudas un enerģijas (darba) aprēķināšanai dabū dažādas izteiksmes:

 (2.26)

 (2.27)

Šīs jaudas un enerģijas izteiksmes var izmantot jebkuram ķēdē ieslēgtam patērētājam, jebkuram ķēdes posmam, kā arī visai no­slēgtajai ķēdei. EDS avota attīstīto jaudu *Pav* un visai ķēdei laika posmā t atdoto enerģiju *Wav* aprēķina pēc šādām izteiksmēm:

*Pav = EI*, (2.28)

*Wav = EIt*. (2.29)

Lielumu

*P*0 = *U*0*I*

sauc par avota zudumu jaudu

**EDS avota lietderības koeficients.** EDS avota lietderības koeficients ir atdotas lietderīgas jaudas *P* un EDS avota (ģeneratora) jaudas *Pav* attiecība



Ja jaudu izteiksim caur strāvu un pretestību, tad varam rakstīt



Atbrīvojas izteiksmē no *I*2, varam iegūt



Lietderības koeficients ir atkarīgs no attiecības starp ārējo un iekšējo pretestībām.

***2.5. piemērs.*** Dotajai elektriskajai ķēdei (2.13. att.) aprēķināt *I, U, U*0*, Wav, W, W*0*, Pav, P, P*0, *η.* EDS avota elektrodzinējspēks *E* = 1 kV, avota iekšēja pretestība *R*0 = 10 Ω, ārējas ķēdes pretestība *R* = 90 Ω, strāvas plūšanas laiks *t* = 10 min. Pārbaudīt enerģiju un jaudu bilanci ķēdē.

|  |  |
| --- | --- |
| Dotie lielumi SI sistēmā:  *E* = 1 kV = 1000 V;  *R*0 = 10 Ω;  *R* = 90 Ω;  *t* = 10 min = 600 s.  Atrisinājums.  1. Strāvas stiprums | 2.13. att. Shēma 2.5. piemēram |



2. Sprieguma kritumi ārēja ķēdē un avotā

*U = I·R* = 10·90 = 900 V,

*U0 = I·R0* = 10·10 = 100 V.

3. Elektriskās strāvas enerģija (1 kWh = 3,6·106 J = 3,6 MJ)

*Wav = E·I·t* = 1000·10·600 = 6·106 J = 6 MJ = 1,67 kWh,

*W = U·I·t* = 900·10·600 = 5,4·106 J = 5,5 MJ = 1,5 kWh,

*W0 = U0·I·t* = 100·10·600 = 0,6·106 J = 0,6 MJ = 0,17 kWh.

Enerģijas bilance

*Wav = W + W*0, 6 MJ = (5,4 + 0,6) MJ, 6 MJ = 6 MJ.

Enerģijas bilance pastāv.

4. Elektriskās strāvas jauda

*Pav = E·I =* 1000·10 = 10000 W = 10 kW,

*P = U·I =* 900·10 = 9000 W = 9 kW,

*P*0 *= U*0*·I =* 100·10 = 1000 W = 1 kW.

Jaudas bilance

*Pav = P + P*0; 10 kW = (9 + 1 ) kW, 10 kW = 10 kW.

Jaudu bilance pastāv.

5. Lietderības koeficients



***2.6. piemērs***. Elektriskā iekārta veselu mēnesi darbojas katru dienu pa 5 stundām. Par patērēto enerģiju samaksa *N* = 10,5 Ls. Cik lielu enerģijas daudzumu patērēja elektriskā iekārta un kāda ir tas jauda, ja maksas tarifs *k* = 0,07 Ls/kWh.

Atrisinājums.

1. Patērēta enerģija



2. Elektriskas iekārtas jauda



**2.6. VADU ŠĶĒRSGRIEZUMA IZVĒLE PĒC PIEĻAUJAMĀ**

**SPRIEGUMA ZUDUMA**

Ja patērētāju vai patērētāju grupu ar diviem līnijas vadiem pievieno avotam (2.14. att.), tad spriegums līnijas beigās *U*2 ir vienmēr mazāks par spriegumu līnijas sākumā *U*1.

|  |
| --- |
| 2.14. att. Elektriskās enerģijas pārvades shēma |

Noslēgtā ķēdē šie spriegumi atšķiras tādēļ, ka, strāvai plūs­tot pa vadiem, katrā vadā rodas sprieguma kritums

Δ*Uv = IRv*,

kur *Rv* — viena līnijas vada pretestība.

Kopējo sprieguma kritumu abos līnijas vados sauc par sprie­guma zudumu līnijā:

Δ*U* = 2*IRv*. (2.30)

Tādējādi starpība starp spriegumu līnijas sākumā *U*1 un sprie­gumu līnijas beigās *U*2 ir sprieguma zudums līnijas vados:

Δ*U = U*1 *– U*2*.* (2.31)

No izteiksmēm (2.30) un (2.31) seko, ka

2*IRv = U*1 – *U*2

un spriegums līnijas beigās

*U*2 = *U*1 – 2*IRv*. (2.32)

Tātad, ja *U*1 = const, patērētājam pievadītais spriegums *U*2 ir jo mazāks, jo lielāka līnijas strāva un jo lielāka līnijas vadu pre­testība. Vienīgi tukšgaitas režīmā (*I* = 0) spriegums *U*2 = *U*1.

Tā kā līnijas viena vada pretestība



tad sprieguma zudums līnijā

 (2.33)

Tādējādi sprieguma zudums līnijā, kurā plūst strāva *I*, ir at­karīgs no vadu šķērsgriezuma laukuma un materiāla.

Sprieguma zudumu vados izsaka procentos no patērētāja no­minālā sprieguma Un:

 (2.34)

Darba laikā līnijas strāva *I* parasti mainās, un tādēļ mainās arī sprieguma zudums līnijā Δ*U*. Bet patērētājiem, lai nodroši­nātu to normālu darbību, jāsaņem spriegums *U*2 = *U*1 – Δ*U*, kas iespējami maz atšķiras no nominālā sprieguma *UN*. Tādēļ līnijas vados pieļaujamie sprieguma zudumi nedrīkst pārsniegt patērē­tājiem pieļaujamās sprieguma svārstības.

Rūpniecības uzņēmumu elektriskajos tīklos starp avotu (trans­formatoru) un attālāko patērētāju pieļauj šādus sprieguma zu­dumus: iekštelpu apgaismes tīklos līdz 2,5% un spēka tīklos (elektrodzinējiem u. c.) līdz 5% no patērētāja nominālā sprieguma.

Ja zināma līnijas strāva *I* un pieļaujamais sprieguma zudums vados Δ*U* %, tad no izteiksmes (2.33) var atrast vajadzīgo vada šķērsgriezuma laukumu:



vai

 (2.35)

kur *P*2 = *UN∙I* — patērētāja vai patērētāju grupas jauda, kW.

Tā kā vadu šķērsgriezuma laukums (īsāk — šķērsgriezums) ir normēts, tad pēc iegūtās S vērtības no vadu normēto šķērsgrie­zumu tabulas (sk. 2.4. tab.) izvēlas tuvāko lielāko vada šķērs­griezumu.

No izteiksmes (2.35) secināms, ka vadu šķērsgriezumu var ievērojami samazināt un tā ietaupīt vadu materiālu, ja izvēlas lielāku *UN* vērtību.

Elektriskās enerģijas pārvades līnijas lietderības koeficients *η* ir līnijas atdotās jaudas *P*2 attiecība pret līnijai pievadīto jaudu *P*1:

 (2.36)

Lietderības koeficienta skaitliskā vērtība ir atkarīga no sprie­guma zuduma līnijā: jo lielāks Δ*U*, jo zemāks līnijas lietderības koeficients.

Ja līnijas vados pieļauj 2—5% lielu sprieguma zudumu, tad līnijas lietderības koeficients *η* = =98—95%.

Jaudas zudums līnijā ir tieši proporcionāls līnijas strāvas kvad­rātam un apgriezti proporcionāls līnijas vadu šķērsgriezumam:

 (2.37)

***2.7. piemērs*.** Telpu apgaismo kvēlspuldzes ar *P*2 = 4,4 kW lielu kopējo jaudu. Apakšstacijas transformatora spaiļu spriegums ir *U*1 = 230 V. Attālums no apakšstacijas līdz telpai, kur atrodas spuldzes, ir *l* = 80 m. Aprēķināt alumīnija vadu šķērsgriezumu, kas nodrošina spuldzēm spriegumu ne mazāku par 220 V. Alumīnija vadiem īpatnēja vadītspēja γ = 32 m/Ω·mm2.

Risinājums.

1. Pieļaujamais sprieguma zudums

Δ*U* = *U*1 – *U*2 = 230 – 220 = 10 V.

2. Slodzes strāva vados



3. Ievērojot, ka gaisvadu līnijai izmanto alumīnija vadus (γ = 32 m/Ω·mm2), aprēķinām nepieciešamo šķērsgriezumu



Tuvākais standartizētais šķērsgriezums *Sfakt* = 10 mm2. Tātad izvēlām kailvadu AC-10.

4. Pārbaudām silšanu vadam ar izvēlēto šķērsgriezumu *Sfakt* = 10 mm2. Pēc 2.4. tabulas pieļaujamā slodzes strāva vadam AC-10 ir *Ipieļ* = 80 A.

Slodzes strāva vados ir daudz mazāka par pieļaujamo strāvu (*I* = 20 A < *Ipieļ* = 80 A).

2.4. tabula

**Gaisvadu līniju kailvadu pieļaujamā slodze attiecībā uz silšanu**

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **Alumīnija vadi** | | **Tēraudalumīnija vadi** | |
| **marka** | **pieļaujamā strāva, A** | **marka** | **pieļaujamā strāva, A** |
| A-16 | 105 | AC-10 | 80 |
| A-25 | 135 | AC-16 | 105 |
| A-35 | 170 | AC-25 | 130 |
| A-50 | 215 | AC-35 | 175 |
| A-70 | 265 | AC-50 | 210 |
| A-95 | 320 | AC-70 | 265 |
| A-120 | 375 | AC-95 | 330 |
| A-150 | 440 | AC-120 | 380 |
| A-185 | 500 | AC-150 | 445 |
| A-240 | 590 | AC-185 | 510 |
| A-300 | 680 | AC-240 | 610 |

**2.7. Enerģijas patērētāju (rezistoru) virknes slēgums**

Līdzstrāvas ķēdes ar vienu avotu aprēķina, izmantojot ekvivalentos pārveidojumus. Shēmu pakāpeniski vienkāršo, kamēr iegūst viegli aprēķināmu shēmu. Tajā atrod visu strāvu un spriegumu vērtības. Pēc tam rezultātus pakāpeniski pārnes atpakaļ uz sākotnējo shēmu, ievērojot, ka visi pārveidojumi ir ekvivalenti – tātad katrām divām tuvākajām shēmām ir kopēja nepārveidota daļā. Uz jautājumu, ko uzskatīt par viegli aprēķināmu shēmu, atbilde ir pavisam konkrēta: shēma tālāk nav jāvienkāršo, ja iegūts kāds no šādiem diviem shēmas tipiem: 1. virknes slēgums, 2. shēma, kurā ir tikai 2 mezgli, t.i., shēma, kas satur tikai paralēlos zarus.

Ja vairāki patērētāji vai pretestības ir saslēgti tā, kā parādīts 2.15. attēlā (cits aiz cita bez sazarojumiem un ir pieslēgti strāvas avotam), tad tajos plūst vienāda strāva. Šādu vadītāju slēgumu sauc par virknes slēgumu.

Sprieguma kritumi (zudumi) rezistoros:

*U*1 = *IR*1; *U*2 = *IR*2; *U*3 = *IR*3.

|  |  |
| --- | --- |
|  | 2.15. att. Rezistoru virknes slēgums. |

Tā kā strāva visos ķēdes posmos ir vienāda, spriegumi šajos posmos ir proporcionāli rezistoru pretestībām, t. i.,

 un  (2.38)

Atsevišķos posmos patērētās jaudas:

*P*1 *= U*1*I; P*2 *= U*2*I; P*3 *= U*3*I*.

Saskaņā ar enerģijas ne­zūdamības likumu visas ķē­des jauda ir vienāda ar atse­višķo posmu jaudu summu:

*P = P*1 *+ P*2 *+ P*3 *= I(U*1 *+ U*2 *+ U*3*) = IU*.

Tātad ķēdes spaiļu spriegums ir vienāds ar ķēdes posmu spriegumu summu:

*U = U*1 *+ U*2*+U*3. (2.39).

Ja dala izteiksmes (2.39) katru locekli ar strāvu *I*, iegūst



vai

*R = R*1 *+ R*2 *+ R*3. (2.40)

Elektriskās ķēdes pretestību *R* sauc par *kopējo (ekvivalento) ķē­des pretestību*, t. i., par tādu pretestību, ar kuru aiz­vietojot visas pretestības, neizmainīta sprieguma gadī­jumā iegūst tāda paša stipruma strāvu.

Tādējādi *ķēdē, kas izveidota no virknē saslēgtiem pos­miem, kopējā pretestība ir vienāda ar visu rezistoru pretestību summu*.

Virknes slēguma piemērs ir vadi ar tiem galā pieslēgtu enerģijas patērētāju; ja tramvaja tīkla spriegums *Ut* = 600 V un kvēlspuldzes nominālais spriegums *Usp* = 120 V, virknē saslēdz 5 spuldzes 

***2.8. piemērs***. Noteikt, kādās robežās var regulēt strāvas stiprumu ķēde ar spriegumu *U* = =220 V, ja tajā virknē savienoti elektrodzinēja ierosmes tinums ar pretestību *R*1= 44 Ω un reostats, kura pretestību *R*2 var izmainīt robežas no 0 līdz 176 Ω (2.16. att.).

|  |  |
| --- | --- |
|  | 2.16. att. Elektriskā shēma 2.8. piemēram |

Ķēdes kopējā pretestība

*R = R*1 *+ R*2.

Ja *R*2 = 0, ķēdes strāva



Ja *R*2 = 176 Ω, ķēdes strāva



***2.9. piemērs***. Elektriskā ķēdē (2.17. att. a) akumulatoru baterijas EDS *E* = 37,5 V, tas iekšēja pretestība *R*0 = 0,6 Ω. Enerģijas patērētāji ir rezistori ar pretestībām *R*1 = 2,4 Ω, *R*2 = 4,8 Ω un *R*3 = =7,2 Ω. Aprēķināt strāvu ķēdē, spriegumus uz akumulatoru baterijas, kā arī enerģijas avota jaudu, tā lietderības koeficientu un visu patērētāju jaudas.

Atrisinājums.

1. Strāvas aprēķins. Nesazarotā ķēdē strāvu var aprēķināt pēc Oma likuma pilnai ķēdei



kur *Rekv = R*1 *+ R*2 *+ R*3 = 2,4 + 4,8 + 7,2 = 14,4 Ω un strāva ķēdē

****

|  |  |
| --- | --- |
| ***a*** | ***b*** |

2.17 att. Elektriskā shēma 2.9. piemēram: *a* - principiāla elektriskā shēma; *b* – vienkāršota shēma

2. EDS avota spaiļu spriegums. Šo spriegumu var izteikt arī no Oma likuma pilnai ķēdei

*IRekv = E – IR*0.

Kreisā puse *IRekv* = *U* = 2,5∙14,4 = 36 V ir vienāda ar spriegumu uz pretestības *Rekv* un vienlaikus ar spriegumu uz enerģijas avota spailēm.

Šo pašu spriegumu izsaka arī vienādojuma labā puse, t.i., EDS *E* un sprieguma krituma *IR*0 = *U*0 starpība

*E = IR*0 = 37,5 – 2,5∙0,6 = 36 V = *U*.

Tātad *spriegumu uz enerģijas avota spailēm var izteikt vai nu kā EDS un iekšēja sprieguma krituma starpība, vai arī kā ķēdes strāvas un ārējā posma kopējās pretestības reizinājumu.*

3. Jaudas bilances sastādīšana. Enerģijas avots attīsta jaudu

*Pav = EI* = 37,5∙2,5 = 93,75 W.

Daļa šis jaudas *P*0 = *U*0*I* = 1,5∙2,5 = 3,75 W tiek patērēta avota iekšienē; tātad avots atdod arējā ķēdē jaudu

*P – Pav* = 93,75 – 3,75 = 90 W.

(Šo jaudu var noteikt arī pēc izteiksmes *P = UI* = 36∙2,5 = 90 W).

Avota atdotā jauda *P* sadalās pa pretestībām *R*1, *R*2 un *R*3

*P*1 *= U*1*I* = 6∙2,5 = 15 W jeb šī pati jauda *P*1 *= I*2*R*1 = (2,5)2∙2,4 = 15 W.

*P*2 *= I*2*R*2 = (2,5)2∙4,8 = 30 W

*P*3 *= I*2*R*3 = (2,5)2∙7,2 = 45 W

No enerģijas nezūdamības likuma izriet, ka avota atdota jauda ir vienāda ar patērētāju jaudu summu, t.i., pastāv jaudu bilance

*P* = 90 W

un

*P*1 *+ P*2 *+ P*3 = 15 + 30 + 45 = 90 W.

Jaudu bilance var izmantot elektrisko ķēžu aprēķina pareizības pārbaudei.

4. Lietderības koeficients. Zinot jaudas *P* un *Pav*, nosakām enerģijas avota lietderības koeficientu



**2.8. SAZAROTA ELEKTRISKĀ ĶĒDE. KIRHOFA LIKUMI**

Praksē sastopamās elektriskās ķēdes parasti ir visai kompli­cētas: tās ietver vienu vai vairākus EDS avotus un ļoti daudz patērētāju — elektrisko pretestību. Tādas elektriskās ķēdes sauc par sazarotām jeb saliktām ķēdēm.

Projektējot kādu elektrisko ietaisi, piem., apgaismes ietaisi, galvenais uzdevums ir izvēlēties pareizus, darba strāvām atbilsto­šus vadu šķērsgriezumus. Tādēļ aprēķināt sazarotu elektrisko ķēdi parasti nozīmē noteikt strāvas sazarotās ķēdes atsevišķos posmos, izmantojot zināmās ķēdē ieslēgto elementu pretestību un avotu elektrodzinējspēku vērtības.

2.18. attēlā parādīta sazarotas elektriskās ķēdes shēma ar tri­jiem EDS avotiem, pie tam avoti ar elektrodzinējspēkiem *E*1 un *E*2 darbojas ģeneratora režīmā, bet avots ar elektrodzinējspēku *E*3 — patērētāja režīmā (piemēram, uzpildīšanai pieslēgta akumu­latoru baterija).

|  |
| --- |
| 2.18. att. Sazarotas elektriskās ķēdes shēma |

Sazarotas elektriskās ķēdes sastāvdaļas ir šādas:

*mezgls* — ķēdes punkts, kurā savienoti vismaz 3 vadi jeb zari, piem., punkti A, B, C, D;

*zars* — ķēdes posms starp diviem mezgliem (ar vienu un to pašu strāvu), piem., B—M—K—A, A—C, A—B utt.;

*kontūrs* — noslēgta elektriskā ķēde, ko veido divi vai vairāki virknē slēgti zari, piem., K—A—B—M—K, K—M— S—M—K utt.

Elektrisko ķēžu shēmas mezglus apzīmē ar lielajiem burtiem vai ar cipariem.

Zarus vai kontūrus ar EDS avotiem (piem., zars A—B) sauc par aktīviem, bet zarus vai kontūrus bez EDS avota — par pa­sīviem (piem., zars A—C).

Sazarotas elektriskās ķēdes ar diviem vai vairākiem EDS avo­tiem nevar aprēķināt tikai ar Oma likuma palīdzību; šādu ķēžu aprēķiniem jāizmanto Kirhofa likumi.

Pirmais Kirhofa likums attiecas uz sazarotas ķēdes mezglu un ietver faktu, ka nevienā sazarotās ķēdes mezglā neuz­krājas lādiņi: *sazarotas ķēdes mezglā strāvu algebriskā summa ir vienāda ar nulli*, t. i.,

*ΣI* = 0. (2.41)

Mezglā ieplūstošās strāvas parasti pieņem par pozitīvām, bet no mezgla aizplūstošās — par negatīvām. Tad pirmā Kirhofa likuma izteiksmi mezglam C (2.18. att.) var uzrakstīt šādi:

*I*2 – *I*3 – *I*4 – *I*5 = 0.

Pirmā Kirhofa likuma izteiksmi bieži vien raksta tā, ka mez­glā ieplūstošo strāvu summa atrodas vienādojuma vienā pusē, bet aizplūstošo strāvu summa — vienādojuma otrā pusē. Piem., mez­glam C:

*I*2 = *I*3 + *I*4 + *I*5 .

Otrais Kirhofa likums attiecas, uz sazarotas ķēdes kontūru un izsaka sakarību starp kontūrā ieslēgtajiem EDS, strā­vām kontūra zaros un šo zaru pretestībām: *kontūrā ieslēgto EDS algebriskā summa ir vienāda ar sprieguma kritumu šī kontūra zaros algebrisko summu*, t. i.,

Σ*R* = Σ*IR*. (2.42)

Kirhofa likumi ir pamatā visām sazaroto ķēžu aprēķinu me­todēm.

Izšķir sazarotas ķēdes ar vienu EDS avotu un sazarotas ķē­des ar vairākiem EDS avotiem.

**2.9. SAZAROTAS ELEKTRISKĀS ĶĒDES AR VIENU AVOTU.**

**PARALĒLAIS SLĒGUMS**

Visvienkāršāk aprēķināma sazarota ķēde ar rezistoru (patērētāju) paralēlo slēgumu un vienu EDS avotu. Tālāk dotajās shēmās bieži vien EDS avots nav parādīts, bet tā vietā dots ķēdei pievienotais sprie­gums *U* = const, kuru var uzskatīt par tāda avota EDS, kam iek­šējo pretestību *R*0 var neņemt vērā (tad *IR*0 = 0 un *U = E*).

Ja dots sazarotai ķēdei pievienotais spriegums *U* un visu zaru pretestības (savienojošo vadu pretestības neņem vērā) un jāatrod visas zaru strāvas (2.18. att.), tad sazarotās ķēdes shēmu vispirms vienkāršo, t. i., atrod ekvivalentās pretestības atse­višķām paralēli slēgto pretestību grupām un pēc tam — visas ķēdes ekvivalento pretestību *Rekv*.

Par *ekvivalento pretestību* sauc tādu pretestību, kura, ieslēgta aizvietojamās pretestību grupas vietā, neizmaina strāvu un sprie­gumu sadalījumu ķēdes pārējos zaros.

Strāvu virzienus ķēdes shēmas zaros parāda atbilstoši ķēdes spaiļu polaritātei.

Par pretestību *paralēlo slēgumu* sauc slē­gumu (2.19. att.), kurā diviem elektriskās ķēdes punktiem pieslēgtās pretestības izveido sazarojumu ar paralēliem zariem. Tādējādi paralēlajā slēgumā katras pretestības viena spaile ir pieslēgta vienam mezglam, bet otra spaile — otram mezglam.

|  |  |
| --- | --- |
|  | 2.19. att. Rezistoru paralēlais slēgums |

Tā kā katrā pretestībā spriegums ir vienāds ar sprie­gumu *U* starp mezgliem,

*U = U*1 *= U*2 *= U3* (2.43)

vai, izsakot spriegumus ar attie­cīgo strāvu un pretestību reizinā­jumiem, var rakstīt

*U = I*1*R*1 *= I*2*R*2 *= I*3*R*3,

no kurienes

 un  (2.44)

t. i., strāvas zaros sadalās apgriez­ti proporcionāli zaru pretestībām.

Pēc pirmā Kirhofa likuma,

*I = I*1 *+ I*2 *+ I*3

vai, izsakot strāvas ar spriegumu un attiecīgo pretestību attiecībām, iegūst  

no kurienes pēc saīsināšanas

 (2.45)

vai

*G = G*1 *+ G*2 *+ G*3.

Pretestību *R* sauc par kopējo jeb ekvivalento ķēdes pretestību, bet *G* — par kopējo jeb ek­vivalento ķēdes vadītspēju.

No formulas (2.45) izriet, ka pretestību paralēlajā slē­gumā ķēdes ekvivalentā vadītspēja ir vienāda ar zaru va­dītspēju summu.

Pēc formulas (2.45) var noteikt sazarotas ķēdes ekvivalento pretestību. Piemēram, triju zaru gadījuma, vienā­dojot vienādojuma (2.45) labās puses saucēju, iegūst



no kurienes ķēdes ekvivalentā pretestība

 (2.46)

Ja zaru pretestības ir vienādas (*R*1 *= R*2 *= R*3),



Ja sazarojumam ir *n* paralēlo zaru ar vienādām pretestībām *R*1 sazarojuma ekvivalentā pretestība

 (2.47)

Ekvivalento pretestību sazarojumam, kas sastāv no diviem paralēliem zariem, saskaņā ar vienādojumu (2.45) nosaka pēc formulas

 (2.48)

Lielākā daļa elektroenerģijas patērētāju, to skaitā kvēlspuldzes, sildaparāti, dzinēji, ir paredzēti darbībai ar nemainīgu nominālo spriegumu. Šādus patērētājus vis­biežāk saslēdz paralēli, jo tādā slēgumā tie darbojas ar nominālo spriegumu un katra patērētāja darbības režīms praktiski nav atkarīgs no pārējo patērētāju darbības re­žīma.

**2.10. piemērs**. Līnijai ar spriegumu *U* = 220 V pieslēgts vienfāzes elektrodzinējs, kura jauda *P*1 = 3,3 kW, un elektriskā krāsns ar jaudu *P*2 = 2,64 kW. Noteikt līnijas strāvu.

Dzinēja strāva



Elektriskās krāsns strāva



Līnijas strāva

*I* = *I*1 + *I*2 = 15 + 12 = 37 (A).

**2.11. piemērs**. Noteikt kvēlspuldzes pretestību, ja tās jauda *Psp* = 100 W un spriegums *U* = 220 y. Noteikt divdesmit šādu para­lēli saslēgtu spuldžu pretestību.

Tā kā jauda



kvēlspuldzes pretestība



Divdesmit paralēli saslēgtu spuldžu kopējā pretestība



**2.10. SAZAROTAS ELEKTRISKĀS ĶĒDES AR VIENU AVOTU.**

**JAUKTAIS SLĒGUMS**

Par jauktu slēgumu sauc virknes un paralēlo rezistoru (patērētāju) slēgumu jeb ķēdes posmu slēgumu, kur katrs no tiem var būt izveidots no virknē vai paralēli saslēgtām pretestībām (2.20. att.).

Paralēli slēgto pretestību grupas pretestības *R*2, *R*3 un *R*4 ir viens un tas pats sprieguma kritums *UCD*. Saskaņā, ar Oma likumu ķēdes posmam šo zaru strāvas

 (a)

Ķēdes nesazarotā posma strāvu *I* atrod no pirmā Kirhofa likuma izteiksmes ķēdes mezglam C:

*I = I*2 + *I*3 + *I*4. (b)

Ja paralēli slēgto pretestību *R*2, *R*3 un *R*4 ekvivalento pretestību apzīmē ar *RCD*, tad strāva

 (c)

No izteiksmēm (a), (b) un (c) izriet, ka



no kurienes



vai

*GCD = G*2 *+ G*3 *+ G*4,

t. i., paralēli slēgtu pretestību ekvivalentā vadītspēja ir vienāda ar atsevišķo paralēlo zaru vadītspēju summu:

*G = G*1 *+ G*2 *+ G*3 *+ … + Gn*. (2.49)

Triju paralēli slēgto pretestību *R*2, *R*3 un *R*4 ekvivalentā pretes­tība

 (2.50)

|  |  |
| --- | --- |
|  | 2.20. att. Sazarotas ķēdes shēma ar pretestību jaukto slēgumu. |

Divām paralēli slēgtajām pretestībām *R*6 un *R*7 ekvivalento pretestību *RKM* atrod pēc izteiksmes



no kuras

 (2.51)

Sazarotās ķēdes shēmā (2.20. att.) paralēli slēgto pretestību grupas aizvietojot ar tām ekvivalentām pretestībām *RCD* un *RKM*, iegūst aprēķināmajai ķēdei ekvivalentu piecu pre­testību virknes slēgumu (2.21. att. *a*).

Tā kā pretestību virknes slēguma ekvivalentā pretestība ir vienāda ar sa­slēgto pretestību summu:

*R = R*1 *+ R*2 *+ R*3 *+ … + Rn*, (2.52)

tad aplūkojamās ķēdes ekvivalentā pre­testība

*Rekv = R*1 *+ R*CD *+ R*5 *+ R*KM *+ R*8.

|  |  |
| --- | --- |
| ***a*** | ***b*** |

2.21. att. Sazarotas ķēdes (2.19. att.) ekvivalentās shē­mas.

2.21. attēlā *b* parādīta dotas saza­rotās ķēdes (2.20. att.) ekvivalentā shēma. No šīs ekvivalentas shēmas izriet, ka nesazarotā posma strāva



Tad sprieguma kritumi paralēli slēgto pretestību grupās

*UCD = IRCD* un *UKM = IRKM*,

un paralēli slēgto zaru strāvas



Izdalot savstarpēji strāvu *I*6 un *I*7 izteiksmes, dabū, ka



t. i., paralēli slēgto zaru strāvas ir apgriezti proporcionālas šo zaru pretestībām.

Ja paralēli saslēgtas *n* vienādas pretestības *R*, tad to ekviva­lentā pretestība

 (2.53)

un strāva katrā zarā

 (2.54)

kur *I* — strāva ķēdes nesazarotajā posmā.

***2.12. piemērs***. 2.22. attēlā parādītai shēmai doti visi pre­testību lielumi *R*1 = 20 Ω, *R*2 = =400 Ω, *R*3 = 100 Ω, un spriegums *U* = 200 V. Aprēķināt strāvas visās pretestības un ķēdes kopējo jaudu. Risinājumu pārbaudīt ar Kirhofa likumu un jaudu bilances vie­nādojuma palīdzību.

|  |  |
| --- | --- |
| ***a*** | ***b*** |

2.22. att. Piemērs ar shēmas ekvivalentu pārveidojumu.

Atrisinājums.

1. Pārveidojam shēmu, aizstājot elementu *R*2 un *R*3 paralēlo slēgumu ar ekvivalento pretestību *R*23:



Izveidojas shēma (2.22. att. *b*) kurā ir tikai virknes slēgums. Tālāk tā vairs nav jāpārveido.

Aplūkojot abas shēmas, ievērosim, ka to kopēja, nepārveidotā daļa ir – avots ar spriegumu *U*, rezistors *R*1 ar strāvu *I*1. kā arī punkti A un B, starp kuriem abās shēmās ir viens un tas pats spriegums *UAB*.

2. Aprēķinām tos lielumus, kurus pārnesīsim atpakaļ uz pirmo shēmu:



*UAB = R*23*∙I*1 = 80∙2 = 160 V.

*U*1 *= U – UAB* = 200 – 160 = 40 V.

3. Tagad arī pirmajā shēmā spriegums *UAB* ir zināms. Tas atļauj aprēķināt strāvas posma AB:



Pārbaude pēc 1. Kirhofa likuma *I*1 *= I*2 *+I*3, 2 A = (0,4 + 1,6) A.

4. Jaudu bilance. Pievadīta (avota) jauda

*P = U∙I*3 = 200∙2 = 400 W.

Patērētās jaudas

*P*1 *= U*1*∙I*1 = 40∙2 = 80 W.

*P*2 *= U*2*∙I*2 = *UAB∙I*2 = 160∙0,4 = 64 W.

*P*3 *= U*3*∙I*3 = *UAB∙I*3 = 160∙1,6 = 256 W.

Pārbaude *P = P*1 *+ P*2 *+P*3, 400 W = (80 + 64 + 256) W. Jaudu bilance pastāv.

Nekad neaizmirstiet iegūtos rezultātus pārbaudīt – to izdara, shēmai uzrakstot vienādojumos:

*U = - E*, *U = RI*, *U = U*1 *+ UAB*, Σ*I* = 0.

|  |  |
| --- | --- |
| ***2.13. piemērs.*** 2.23. attēlā parādītai shēmai doti visi pre­testību lielumi *R*1 = 3 Ω, *R*2 = 10 Ω, *R*3 = 15 Ω, *R*5 = 12, *R*6 = 4 Ω, *R*4 = 3 Ω, *R*7 = 2 Ω un spriegums *UAB* = 80 V. Slēdzis S ir ieslēgts. Aprēķināt strāvas visās pretestības un ķēdes kopējo jaudu. Risinājumu pārbaudīt ar Kirhofa likumu un jaudu bilances vie­nādojuma palīdzību. Kā izmainīsies ķēdes kopējā strāva, at­slēdzot slēdzi S? | 2.23. att. |

Atrisinājums.

1. Ar bultiņām apzīmē katrai pretestībai caurplūstošo strāvu (2.23. att.).

2. Posma CD kopēja pretestība



no šejienes



3. Posma DE kopējs pretestība



4. Ķēdes kopējā pretestība.



5. Ķēdes kopējā strāva



6. Posma CD spriegums



7. Sazarojuma CD strāvas







8. Pārbauda risinājumu pēc l. Kirhofa likuma



vai 10 A = (2 + 1,33 + 6,67) A, tātad 10 A = 10 A.

9. Posma DE sprieguma



1. Sazarojuma DE strāvas





11. Pārbauda risinājumu pēc l. Kirhofa likuma



vai 10 A = (2,5 + 7,5) A. Tātad 10 A = 10 A.

12. Pārbauda risinājumu pēc 2. Kirhofa likuma



vai 

un 80 A = (10∙3 + 10∙2 + 10∙3) A, tātad 80 A = 80 A.

13. Pārbauda risinājumu, lietojot jaudu bilances vienādojumu



vai ,

80∙10 W = (102∙3 + 22∙10 + 1,332∙15 + 6,672∙3 + 2,52∙12 + 7,52∙4) W,

tātad 800 W = 800 W.

Uzdevums atrisināts pareizi.

14. Patērētā elektroenerģija

*W = P∙t* = 800∙5 = 4000 Wh = 4 kWh

15. Izslēdzot slēdzi S, ķēde papildinās ar virknē slēgtu pretestību R7 = 2 Ω un ķēdes kopēja pretestība kļūst lielāka



Bet strāva ķēdē samazinās

A.

|  |  |
| --- | --- |
| ***2.14. piemērs.*** 2.24. attēlā parādītajai shēmai doti visi pretestību lielumi *R*1 = *R*2 = 1 Ω, *R*3 = 6 Ω, *R*5 = *R*6 = 1 Ω, *R*4 = *R*7 = 6 Ω, *R*8 = 10 Ω, *R*9 = 5 Ω, *R*10 = 10 Ω un spriegums *U* = 120 V.  Aprēķināt strāvas un spriegumus visās pretestībās, ķēdes kopējo jaudu, elektroenerģiju, kuru patērē ķēdē 8 stundās. Risinājumu pārbaudīt ar Kirhofa likumu un jaudu bilances vienādojuma palīdzību.  A t r i s i n ā j u m s.  1. Ekvivalentā pretestība starp mezgliem 1 un 4:    2. Ekvivalentā pretestība starp mezgliem 1 un 3: | 2.24. att. |



3. Ekvivalentā pretestība starp mezgliem 1 un 2:



4. Ķēdes kopējā (ekvivalentā) pretestība



5. Ķēdes kopējā strāva

 A.

6. Posma 1-2 spriegums. Saskaņā ar 2. Kirhofa likumu

V.

7. Posma 1-3 spriegums

V.

8. Strāva zarā ar pretestību R3 (posmā 1-2):

A.

9. Strāva zarā ar pretestībām R5 un R6 (posmā 2-3):

A.

10. Strāva zarā ar pretestību R4 (posmā 1-3):

A.

11. Strāva zarā ar pretestību R7 (posmā 3-4):

A.

12. Posma 1-4 spriegums:

A.

13. Strāva zarā ar pretestību R8:

A.

14. Strāva zarā ar pretestībām R9 un R10:

A.

15. Jaudu bilance



vai



tātad 2880 W = 2880 W.

Uzdevums atrisināts pareizi.

16. Patērētā elektroenerģija

 kWh

**2.11. PRETESTĪBU TRĪSSTŪRA SLĒGUMA PĀRVEIDOŠANA EKVIVALENTĀ ZVAIGZNES SLĒGUMĀ UN OTRĀDI**

Sazarotās ķēdēs ar vienu vai vairākiem EDS avotiem dažas pretestības bieži ir saslēgtas zvaigznē vai trīsstūrī. Lai tādu sa­zarotu ķēdi ar vienu EDS avotu varētu aprēķināt, lietojot jau iz­tirzāto metodi, ķēdes shēma jāpārveido — jāiegūst ekvivalents pretestību jauktais slēgums, t. i., viens vai vairāki pretestību trīs­stūra slēgumi jāaizstāj ar ekvivalentiem pretestību zvaigznes slē­gumiem (vai otrādi).

Pretestību trīsstūra un zvaigznes slēgumi ir ekvivalenti, ja, aizstājot vienu slēgumu ar otru, strāvas un spriegumi ķēdes pā­rējos zaros nemainās.

Pieņemsim, ka sazarotas ķēdes pretestības *RAB*, *RBC* un *RCA* sa­slēgtas trīsstūrī (2.25. att. *a*), kura mezgli A, B un C ar trim va­diem pievienoti ķēdes pārējiem elementiem.

Lai šo pretestību trīsstūra slēgumu varētu aizvietot ar ekviva­lentu pretestību zvaigznes slēgumu (2.25. att. b), jāaprēķina zvaig­znes slēguma zaru pretestības *RA*, *RB* un *RC*.

|  |  |
| --- | --- |
| ***a*** | ***b*** |

2.25. att. Pretestību trīsstūra slēguma (*a*) un tam ekvivalentā pretestību zvaigznes slēguma (*b*) shēmas.

Ekvivalencei starp pretestību trīsstūra un zvaigznes slēgu­miem jāsaglabājas jebkurā darba režīmā, tātad arī gadījumā, ja pārtrūkst vienam mezglam, piem., mezglam A, pievienotais vads (*IA* = 0).

Tādā gadījumā strāvas *IB = IC* abos slēgumos ir vienādas. Pēc slēgumu ekvivalences noteikuma spriegumiem starp mezgliem B un C abos slēgumos jābūt vienādiem:

*UBC*Y *= UBC*Δ.

Tādējādi arī abu slēgumu ekvivalentās pretestības starp mez­gliem B un C būs vienādas:

*RBC*Y *= RBC*Δ.

Ja *IA* = 0, tad pretestību trīsstūra slēgumā strāva *IB = IC* sa­dalās pa diviem paralēliem zariem, kuru ekvivalentā pretestība



Pretestību zvaigznes slēgumā starp mezgliem B un C ieslēgtas tikai divas virknē savienotas pretestības *RB* un *RC*, kuru ekviva­lentā pretestība

*RBC*Y *= RB + RC.*

Tā kā pēc abu slēgumu ekvivalences noteikuma *RBC*Y *= RBC*Δ, tad

 (*a*)

Līdzīgā veidā dabū izteiksmes

 (*b*)

 (*c*)

Ja atrisina vienādojumu (*a*), (*b*) un (*c*) sistēmu attiecībā pret pretestībām *RA*, *RB* un *RC*, tad iegūst šādas izteiksmes ekvivalentā zvaigznes slēguma zaru pretestību aprēķināšanai pēc dotajām trīsstūra slēguma pretestībām:



 (2.55)



Ja no vienādojumu (*a*), (*b*) un (*c*) sistēmas izsaka trīsstūra slēguma pretestības *RAB*, *RBC* un *RCA* ar ekvivalentā zvaigznes slē­guma zaru pretestībām *RA*, *RB* un *RC*, tad dabū izteiksmes trīsstūra slē­guma pretestību aprēķināšanai:



 (2.56)



Ar vienu vai otru pārveidojumu daudzos gadījumos no komplicētām shēmām iegūst pretestību jaukto slēgumu. Protams, paskaidrotos pār­ veidojumus var izmantot tikai pasīviem zariem.

2.26. attēlā *a* paradīto shēmu vienkāršo, pretestību *RA*, *RB* un *RC* zvaigznes slēgumu aizvietojot ar ekvivalentu pretestību trīsstūra slēgumu (2.26. att. *b*); vienkāršotajā shēmā pretestības saslēgtas jauktā slēgumā.

***2.15. piemērs*.** Aprēķināt strāvas, kādas plūst pretestību mērtilta ķēdē at­sevišķos zaros (2.27. att.), ja *E* = 2,2 V; *R*1 *=*10 Ω; *R*2 = 30 Ω**;***R*3 = 60 Ω; *R*4 = 4Ω; *R*5 **=** 22 Ω.

Atrisinājums.

Šajā ķēdē vienu no trijstūriem (*ABD*) vai *CBD)* var aizstāt ar zvaigzni, stipri vienkāršojot shēmu. Aizstājam, piemēram, trijstūrī *ABD,* kura malas veido pretestības *R*1, *R*2 un *R*3, ar zvaigzni, kuras staru pretestības apzīmējam ar *RA, RB, RD.*

|  |  |
| --- | --- |
| ***a*** | ***b*** |

2.26. att. Pretestību zvaigznes slēguma (a) aizvietošana ar ek­vivalentu pretestību trīsstūra

slēgumu (b).

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| 2.27. att. Shēma 2.15. piemēram. | 2.28. att. Pārveidota shēma 2.15. piemēram |

Sarežģītas ķēdes vietā, kuras aprēķinam nepieciešams sastādīt sešus vie­nādojumus saskaņā ar Kirhofa likumiem, iegūstam vienkāršu jauktu slēgumu (2.28. att.). Šajā ķēdē viegli aprēķināt strāvas *I*, *I*4un *I*5.

Aprēķinām zvaigznes staros slēgtās pretestības:







Visas ķēdes kopējā pretestība ir

**

Strāva ķēdes nesazarotajā daļā



Strāva paralēlajos zaros:

;



Lai noteiktu pārējās strāvas, iepriekš jāaprēķina viens no spriegumiem starp ekvivalentās zvaigznes virsotnēm. Tā kā

*UBC = φB – φC = I*4 *R*4 *=* 0,16·4 = 0,64 V;

*UDC = φD – φC = I5 R5 =* 0,04·22 = 0,88 V.

Tad, pieņemot punkta C potenciālu vienlīdzīgu nullei (*φC = 0)*, iegūstam

*U* = *φB; U = φD;*

Spriegums starp virsotnēm D un B ir

*UDB =* *φD – φB = UDC – UBC =* 0,88 – 0,64 = 0,24 V.

Tagad pēc sākotnējās shēmas (2.27. att.) aprēķinām strāvas atlikušajos posmos:



*I*2 *= I*3 *+ I*5 *=* 0,044 A;

*I*1 *= I*4 *– I*3 *=* 0,156A.

**2.12. Nesazarotu elektrisko ķēžu aprēķināšana ar Kirhofa līkumu palīdzību**

***Pretslēgums***. Pieņemam, ka ķēde sastāv no diviem patērētājiem ar pretestībām *R*1 un *R*2 un diviem EDS avotiem, kuru iekšējās pretestības ir *R*01 un *R*02. un kuru EDS virzieni ir pretēji (2.29. att. a). Vadu pretestību te un arī turpmāk neievērojam, ja speciāli netiks aizrādīts pretējais.

Pieņemam, ka kontūra ACDB apejas virziens vērsts pulksteņa rādītāja kustības virzienā. Saskaņā ar otro Kirhofa likumu: kontūrā ieslēgto EDS algebriskā summa ir vienāda ar sprieguma kritumu algebrisko summu šī kontūrā

*E*1 *– E*2 *= I∙R*01 *+ I∙R*02 *+ I∙R*1 *+ I∙R*2

Un strāva elektriskā ķēdē ir



|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| ***a*** | ***b*** | ***c*** |

2.29. att. Elektriskā ķēde ar diviem EDS avotiem pretslēguma gadījumā (*a*) un

aizvietošanas shēma, ja *E*2 = 0 (*b*) un *E*1 = 0 (*c*)

Acīm redzot elektriskā strāva rodas tikai tad, ja *E*1 ≠ *E*2. Ja *E*1 > *E*2, tad strāva ķēdē plūst pulksteņa rādītāja kustības virzienā, kas sakrīt ar EDS *E*1 virzienu, bet ir pretējs EDS *E*2 virzienam. Elektrodzinējspēks *E*2 kas vērsts strāvai pretējā virzienā sauc par pret-EDS. Avots ar pret-EDS darbojas enerģijas patērētāja režīmā. Avots ar EDS *E*1 darbojas ģeneratora režīma.

Strāvu šādā ķēdē var aprēķināt izmantojot arī superpozīcijas principu. Saskaņā ar šo principu strāva ķēdē ir vienlīdzīga to strāvu algebriskajai summai, kādos rastos ķēdē, ja EDS avoti darbotos pēc kārtas atsevišķi un visu ķēdes posmu pretestības ir nemainīgas.

Pieņemam, ka ķēdē darbojas tikai *E*1 (2.29. att. *b*). Šajā gadījumā strāva



plūst pulksteņa rādītāja kustības virzienā. Ja ķēdē darbojas tikai *E*2 (2.29. att. c), tad strāva ķēdē



plūst pretī pulksteņa rādītāja kustības virzienam.

Aplūkojamā gadījumā strāva ķēdē ir



***Līdzslēgums***. Līdzslēgumā gadījumā EDS virzieni sakrīt ar strāvas virzienu ķēdē (2.30. att.). Saskaņā ar otro Kirhofa likumu

*E*1 *+ E*2 *= I∙R*01 *+ I∙R*02 *+ I∙R*1 *+ I∙R*2.

|  |  |
| --- | --- |
|  | 2.30. att. Elektriskā ķēde ar diviem EDS avotiem līdzslēgumā režīmā |

Un strāva elektriskā ķēdē ir



EDS avoti darbojas ģeneratora režīmā.

***2.16. piemērs***. Aprēķināt strāvas stiprumu ķēdē, kas parādīta 2.31. att. *a* un 2.31. att. *b*, ja *E*1 = 1,9 V, *E*2 = 1,3 V, *R*1 = 2 Ω, *R*2 = 3 Ω. EDS avotu iekšējās pretestības vienādas ar nulli (*R*01 *= R*02 = 0).

|  |  |
| --- | --- |
| ***a*** | ***b*** |

2.31. att. 2.16. piemērā aplūkota elektriskā ķēde.

Atrisinājums.

1. Izvēlamies patvaļīgi kontūra apejas virzienu pulksteņa rādītāja kustības virzienā. Otra Kirhofa likuma vienādojums

*- E*1 *+ E*2 *= IR*1 *+ IR*2.

Strāva elektriskā ķēdē ir



Mīnuss zīme norāda, ka izvēlētais strāvas virziens ir pretējs faktiskajam strāvas virzienam. Tātad EDS *E*2 vērsts strāvai pretējā virzienā un darbojas patērētāja režīmā.

2. Izvēlamies patvaļīgi kontūra apejas virzienu pulksteņa rādītāja kustības virzienā. Otra Kirhofa likuma vienādojums

*E*1 *+ E*2 *= IR*1 *+ IR*2.

Strāva elektriskā ķēdē ir



EDS avoti darbojas ģeneratora režīmā.

**2.13. Līdzstrāvas enerģijas avoti**

**2.13.1. Elektriska strāva elektrolītos**

Otrā veida vadītāji, kuriem piemīt jonu vadītspēja, ir skābju, sāļu un sārmu šķīdumi, kā arī daži izkausēti sāļi. Vielu šķīdumus vai kausējumus, kas daļēji vai pilnīgi sa­stāv no joniem, sauc par elektrolītiem. Ūdeņraža un metālu molekulas izveido pozitīvus jonus, bet nemetālisko atlikumu molekulas — negatīvus jo­nus.

Pievadīsim barošanas avota spriegumu diviem elek­trolītā iegremdētiem elektrodiem (2-1. att.). Tādā gadī­jumā no anoda uz katodu vērstajā elektriskajā laukā po­zitīvie joni pārvietosies lauka virzienā uz katodu, bet ne­gatīvie joni laukam pretējā virzienā uz anodu. Šādu jonu kustību elektrolītā sauc par jonu strāvu.

Elektrolīta negatīvie joni nokļūst uz anoda un atdod tam pārpalikuma elektronus, kuri pārvietojas tālāk pa ķēdi. Pozitīvie joni nokļūst uz katoda un savienojas tur ar brīvajiem elektroniem, kas pienāk no ķēdes. Šādi procesi pie elektrodiem ir saistīti ar ķīmisku pārvēršanos, kurā pie elektrodiem izdalās elektrolīta sastāvdaļas.

Saskaņā ar Faradeja li­kumu *pie katoda izdalītais, vielas daudzums m ir propor­cionāls elektrības daudzumam, kas izplūst caur elektrolītu*, t. i.,

*m = cQ = cIt*. (2.57)

Proporcionalitātes koeficientu *c* sauc par elektro­ķīmisko ekvivalentu, un tas ir vienāds ar miligra­mos izteiktu vielas masu, kuru uz katoda izdala vienu kulonu liels elektriskais lādiņš.

|  |  |
| --- | --- |
|  | 2.32. 2.1. att. Strāva elektrolītā. |

Vielas elektroķīmiskais ekvivalents ir vienāds ar vie­las atommasu A, kas dalīta ar tās valenci *n* un konstantu skaitli 96 500. Tādējādi elektroķīmiskais ekvivalents



Dažādām vielām elektroķīmiskā ekvivalenta vērtības ir dažādas, piemēram, varam 0,329 mg/C sudrabam 1,118 mg/C.

Procesu, kurā uz elektrodiem izdalās elektrolīta sastāv­daļas, ja elektrolītā plūst strāva, sauc par *elektrolīzi*.

Elektrolīzi plaši lieto tīru metālu, to skaitā arī vara ieguvei.

Lai elektrolītiski attīrītu (rafinētu) varu, vannā, kas piepildīta ar elektrolītu — vara vitriola šķīdinājumu, pa­skābinātu ar sērskābi —, iegremdē plānas vara plāk­snes — katodus. Elektrolīzes procesā uz vara plāksnēm nosēžas elektrolītiskais varš. Par anodu, kas izšķīst elek­trolītā, lieto atkvēlinātas melnā vara plates.

*Galvanοplastika*, kuru 1804. gadā atklāja aka­dēmiķis B. Jakobi, ir metāla nosēšanās process uz metāla vai nemetāliskiem izstrādājumiem. To lieto, izgatavojot reljefus nospiedumus, tipogrāfijas klišejas un iespiežot attēlus (sk. 17. nodaļu).

*Galvanostēģija* — metāla izstrādājuma pārklā­šanas process ar cita metāla slāni, lai novērstu koroziju vai ari iegūtu skaistu izstrādājuma izskatu (hromēšana, niķelēšana).

Elektroķīmiskā pulēšana — viena no progre­sīvākām metālu virsmas apstrādes metodēm. Pēc šīs me­todes izšķīdina metāla nelīdzenumus, tādā veidā iegūstot spoguļgludu virsmu.

Elektrificētos dzelzceļos par atpakaļvirziena vadu iz­manto sliedes. Ja sliedēs ir ievērojams sprieguma kri­tums, dažos to posmos strāva nozarojas un plūst pa paralēliem ceļiem, piemēram, pa dzelzceļa zona zeme novie­totiem cauruļu vadiem.

Vietas, kurās strāva izplūst no caurulēm, lai pa zemi nokļūtu sliedēs, var aplūkot kā elektrolītiskās vannas anodus. Tās var sadalīties un ātri kļūt nederīgas.

**2.13.2. Galvaniskie (primārie) elementi**

Ķīmiskos strāvas jeb barošanas avotus, kuros notiek neatgriezenisks ķīmiskās enerģijas pārveidošanās process elektroenerģijā, sauc par galvaniskajiem vai primārajiem elementiem.

Vienkāršāko Voltas galvanisko elementu (2-2. att.) iz­veido divi elektrodi — cinka un vara, kas iegremdēti ar ūdeni atšķaidītā sērskābē. Daļa šīs skābes molekulu ūdenī sadalās pozitīvos (2H) un negatīvos (S04) jonos. Iedarbojoties ķīmiskajiem spēkiem, cinka elektrods iz­šķīst elektrolītā. Pozitīvie cinka joni pāriet šķīdumā un, savienojoties ar negatīvajiem (S04) joniem, izveido neit­rālas cinka sulfīda (ZnS04) molekulas. Pozitīvie ūdeņ­raža joni uzlādē elektrolītu pozitīvi. Cinka elektrods uz­lādējas negatīvi. Rezultātā robežslānī starp cinku un elektrolītu rodas potenciālu starpība un izveidojas no elektrolīta uz cinka elektrodu vērsts elektriskais lauks. Lauka spēki kavē pozitīvajiem cinka joniem pāriet elek­trolītā. Kad elektriskā lauka un ķīmiskie spēki kļūst vie­nādi, cinka šķīšana elektrolītā izbeidzas. Vara elektrods elektrolītā maz šķīst, un tā elektroni neitralizējas ar daļu no pozitīvajiem (OH) joniem, tādēļ vara elektrods iegūst pozitīvu potenciālu, kas maz atšķiras no elektrolīta poten­ciāla. Elementa elektrodzinējspēks (EDS) ir vienāds ar vara un cinka elektrodu potenciālu starpību — spriegumu starp elektrodiem, ja elementam nav pieslēgta ārējā ķēde. Voltas elementa elektrodzinējspēks ir apmēram 1,1 V, un tas darbojas strāvas virzienā no negatīvā elektroda uz pozitīvo elektrodu (spaili).

Pieslēgsim ar slēdzi S elementa spailēm ārējo ķēdi (2.33. att.). Tādā gadījumā EDS ķēdē rada strāvu, pie tam ķēdes ārējā posma elektroni pārvietosies no negatīvas spai­les uz pozitīvo spaili.

Strāva samazina elektrodu lādiņus, tāpēc elektriskais lauks kļūsi vājāks un izzūd elektrisko un ķīmisko spēku līdzsvars. Pēdējiem iedarbojoties, uz elektrolītu pāriet jauni cinka joni, bet ūdeņraža joni savienojas ar vara elektroda brīvajiem elektroniem un pārvēršas par neitrā­lām ūdeņraža molekulām. Vara elektrods pārklājas ar strāvu slikti vadošu ūdeņraža pūslīšu slāni, kas to atdala no elektrolīta. Šādu parādību sauc par elementa *polarizāciju.* Tā samazina elementa EDS un palielina iekšējo pretestību. Pola­rizāciju novērš ar depolarizatoriem — vielām, kas viegli atdod skābekli, piemēram, mangāna per- oksīdu. Depolarizatora skābeklis savienojumā ar ūdeņradi izveido ūdeni, un ap elektrodu nerodas strāvu slikti vadošais ūdeņraža slānis.

|  |  |
| --- | --- |
| 2.33. att. Voltas elements un tā ieslēgšanas  shēma. |  |

Galvaniskos elementus izmanto mūsdienās visos mobilajos telefonos, kabatas datoros un citās portatīvajās ierīcēs. Tādus barošanas avotus visbiežāk sauc par baterijām. Izmanto četrus dažādus bateriju veidus:

* niķeļa kadmija (NI-CD),
* niķeļa metāla hidroksīda (Ni-MH),
* litija jonu (Li-Ion),
* litija polimēra(Li-Pol).

Pirmo divu elementu trūkums ir atmiņas efekts, kura cēlonis - īpaši virsmas lādiņi. To lādēšanas ierīce izprot kā papildinājumu līdz pilnai uzlādei - tādēļ pārtrauc lādēšanu. To dažkārt izdodas likvidēt ar palielas strāvas izlādi, tūdaļ gan uzlādējot ierīci no jauna. Abi pēdējie akumulatoru veidi ir salīdzinoši dārgāki, bet tās satur indīgas, kaitīgas vielas un tālab pēc galīgas iztukšošanas būtu vēlama to atpakaļatdošana.

**Ni-CD Baterijas**. Tehnoloģija, kā var izgatavot niķeļa kadmija bateriju tika izveidota 1899 g., bet pilnība šā veida baterija tika pilnveidota līdz 1947.gadam, tad arī tika izgatavots hermētiskais niķeļa-kadmija barošanas elements, kas plaši tiek izmantots arī mūsdienās. Ni-Cd baterijas raksturojas ar enerģētisko blīvumu 40-60 W·h/kg, nodrošina 1000-1500 pārlādēšanas ciklus, izlādes ātrums ne vairāk par 20% mēnesī. Vel nedaudz gadus atpakaļ varēja teikt, ka 90% pārnēsajamās aparatūras stāvēja tieši šādi akumulatori, jo pārējie nebija pietekoši attīstīti, vai arī pārāk dārgi maksāja. Iespējams, ka niķeļa kadmija baterijas vēl ilgu laiku skaitīsies pašas izdevīgākās, jo tām ir zema cena un to ilgdarbība ir pietekoši liela. Tie var strādāt lielā temperatūru diapazonā, kā arī tie ir izturīgāki par citiem.

Baterija sastāv no viena vai vairākiem galvaniskajiem elementiem. Tās ir elektroķīmiskas ierīces, kas pārvērš ķīmisko enerģiju elektriskajā enerģijā. Visi galvaniskie elementi sastāv no diviem elektrodiem, elektrolīta un apvalka. Ni-CD baterijai pozitīvais elektrods (anods) satur niķeļa hidrooksīdu NiOOH ar grafīta pulveri (5-8 %). Parasti tāda tipa baterijas sauc par ruļļu tipa baterijām, jo elektrodi sarullēti cilindriski ar sadalīšanas slāni un ievietoti metāla korpusā (2.3. att.). Baterijām ar ļoti mazviskozu elektrolītu ir arī separators (inerts porains izolators), kas novērš elektrodu saskaršanos. Maza baterija parasti satur tikai vienu galvanisko elementu, bet liela un jaudīga baterija var saturēt sešus galvaniskos elementus. Elementa iekšienē elektrolīts reaģē ar elektrodiem, izraisot elektronu pārvietošanos caur elektrolītu no viena elektroda uz otru. Viens elektrods kļūst pozitīvi lādēts, bet otrs negatīvi. Elektrodi veido elementu pozitīvo un negatīvo spaili. Baterijas darbības laikā elektrodi sairst, to ķīmiskā enerģija pārvēršas elektroenerģijā. Baterijām, izlādējoties elektrodi daļēji izšķīst elektrolītā, pēc tam pieliekot spriegumu pretējā virzienā, reakciju var pagriezt pretējā virzienā un tādejādi akumulatoru var uzlādēt. Parastajām baterijām šis process vai nu nav iespējams nemaz, vai arī atjaunotā ietilpība ir daudz mazāka par sākotnējo.

Galvaniskā elementa spriegums ir atkarīgs no elektrodu un elektrolīta ķīmiskā sastāva. Ietilpība ir atkarība no reaģējošo vielu masas. Maksimālā strāva ir atkarīga no elektrodu virsmas laukuma.

Elementu trūkums ir atmiņas efekts, kura cēlonis - īpaši virsmas lādiņi. To lādēšanas ierīce izprot kā papildinājumu līdz pilnai uzlādei - tādēļ pārtrauc lādēšanu. To dažkārt izdodas likvidēt ar palielas strāvas izlādi, tūdaļ gan uzlādējot ierīci no jauna. Viņi arī kaitīgi videi.

|  |  |
| --- | --- |
| 2.34. 2.3. att. Ni-Cd baterijas uzbūve :  1 – pozitīvais kontakts; 2 – pozitīvais elektrods;  3 – separators; 4 – negatīvais elektrods; 5 – negatīvais kontakts. | 2.35. att. Li-Ion baterija: 1 – katods; 2 – katodu kontakts; 3 – blīvums; 4 - aizsardzības vārsts;  5 – izolators; 6 - starpsiena; 7 – vāciņš; 8 – separators; 9 – anodu ietvere; 10 – anods. |

**Ni-MH Baterijas.** Plašāk tiek izmantotas niķeļa metālhidroksīda baterijas. Enerģētiskais blīvumu sastāda līdz 75 W·h/kg, kapacitāte apmēram lielāka par 30% salīdzinājumā ar Ni-Cd baterijām. Bet viņi dārgāki par 20% un darba mūžs mazāks – tikai 500 pārlādēšanas ciklus. Tos var sastapt telefonos jau no 1990. gada.

Šīs baterijas daudz vieglākas par Ni-CD, kā arī mazāka izmēra. Tas nevar tik viegli sabojāt kā Ni-CD. Arī videi tās nav tik kaitīgas.

Pie trūkumiem pieskaitāms tās lielais pašizlādēšanās koeficients (no 15% nedēļā līdz 30% mēnesī). Šo bateriju nekādā gadījumā nedrīkst lādēt ilgāk par 2 dienām un jāizmanto speciālo uzlādes ierīci.

**Li-Ion Baterijas**. Pirmie mēģinājumi radīt LI-Ion bateriju notika 1912.gadā, bet tikai 1970.gada parādījās pirmie komerciālie piedāvājumi. Diemžēl baterijas lielu atsaucību neieguva, jo nereti notika nelieli sprādzieni un ugunsgrēki Li-Ion bateriju dēļ. Uzlādēs laikā viņas karsa, kusa, kā arī notika ķīmiskas reakcijas starp to elementiem. Mūsdienās šīs problēmas ir atrisinātas.

LI-Ion baterijas raksturojas ar enerģētisko blīvumu 100 V·h/kg, nodrošina 300-500 pārlādēšanas ciklus, izlādes ātrums ne vairāk par 3-5% mēnesī, pēc tam samazinās līdz 1-3% mēnesī un papildu vadības shēma patērē aptuveni 3%. Galvenās šīs baterijas priekšrocības, protams, ir tās neliels izmērs, svars, kā arī tās mazais pašizlādēšanās koeficients un nav atmiņa efekta.

Galvenais tās trūkums tagad ir – augsta cena. Tas ir saistīts ar to, ka katrs baterijas elements satur atsevišķu shēmu, kas kontrolē uzlādēs procesu (strāvu, laiku, temperatūru).

**LI-Pol baterijas** ir ļoti mazas, vieglas, kā arī tās var pieņemt jebkuru formu (netradicionālu). LI-Pol baterijas raksturojas ar lielo enerģētisko blīvumu ~ 160 V·h/kg, nodrošina 1000 pārlādēšanas ciklus, izlādes ātrums ne vairāk par 10% mēnesī.

LI-Pol baterijas sastāv no sekcijām vai stekiem (2.36. att.). Katrā sekcijā ir trīs elektrodi un separators, kas darbojas ka elektrolīts un ka saistviela. Tā ka darba viela ir želeja no polimera un elektrolīta maisījumu, tad šķidruma noplūde nav iespējama. Vienas sekcijas biezums ap 0,6 mm. Atkarība no steka daudzumu var iegūt baterijas ar dažādu kapacitāti.   
Tādējādi telefonu var padarīt vel mazāku, jo bateriju var izveidot tā, lai tas aizņemtu visu telefonā brīvo vietu.

Li-Pol akumulatorus jau izmanto mobilajos tālruņos, kas deva iespēju samazināt to masu. Ieguvums ir arī Li-Pol akumulatoru iespējami dažādie ģeometriskie izmēri. Tagad projektētājiem nav vairs jārēķinās ar noteiktas formas tilpumu.

|  |  |
| --- | --- |
| ***a*** | **2.36. att. Li-Polimers baterija:**  *a* – sekcija; *b* – šūna; 1 - elektrodi; 2 – separators; 3 - polimeru - alumīnija plēve. |
| ***b*** |

2.5. tabula

**Bateriju salīdzinājums**

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **Parametrs** | **Elektroķīmiskā shēma** | | | |
| **Ni-Cd** | **Ni-MH** | **Li-Ion** | **Li-Pol** |
| Enerģētiskais blīvums, W·h/kg | 40-60 | 60-80 | 100 | 150-200 |
| Pārlādēšanas ciklu skaits | 1000 | 500 | 500 | 1000 |
| Minimālais uzlādēšanas laiks, h. | 1-1.5 | 2-4 | 2-4 | 2-4 |
| Izlādes ātrums mēnesī, % | 20 | 30 | 10 | 10 |
| Baterijas viena elementa spriegums, V | 1,25 | 1,25 | 3,6 | 2,7 |

Ele­menta izmantošanas laikā lielāko pieļaujamo strāvu sauc par elementa *nominālo izlādes strāvu*. Elektrī­bas daudzumu, kuru var iegūt no elementa tā darbības laika, sauc par *elementa kapacitāti*. Kapacitāti mēra ampērstundās: 1 A·h = 3600 A·s = 3600 C.

**2.13.3. Akumulatori (sekundārie elementi)**

Ķīmiskos strāvas jeb barošanas avotus, kuru darba­spējas pēc izlādes var atjaunot, tos uzlādējot, t. i., caurlaižot strāvu virzienā, kas ir pretējs izlādes strāvas vir­zienam, sauc par akumulatoriem vai sekundā­rajiem elementiem.

Akumulatoru uzlādējot, tam pievadītā elektriskā enerģija pārvēršas ķīmiskajā enerģijā un tādā veidā tiek uzglabāta. Pieslēdzot akumulatoram patērētāju, notiek pretējs process - ķīmiskā enerģija pārvēršas elektroenerģijā. Galvenie raksturojošie lielumi akumulatoram ir spriegums uz tā spailēm un elektriskā ietilpība, ko mēra ampērstundās. Ja uz akumulatora ir atzīme 40 A·h, tas nozīmē 40 ampērstundas, un, izlādējot ar 40 ampēru lielu strāvu, tas darbosies vienu stundu (40 x 1 = 40). Izlādējot ar 10 ampēru strāvu, akumulators darbosies četras stundas (10 x 4 = 40). Parasti izšķiras divas pamatgrupas — svina akumulatori un niķeļa — kadmija akumulatori. Akumulatoru baterijas ir aizliegts izmest sadzīves atkritumiem paredzētā miskastē. Tās ir jānodod noteiktos nodošanas punktos.

Pēc konstruktīvā izveidojuma ķīmiskie strāvas avoti var būt dažādi, bet galvenos vilcienos akumulatori, tāpat kā galvaniskie elementi, ir izveidoti no diviem elektro­diem — pirmā veida vadītājiem, kas atdalīti ar elektro­lītu — otrā veida vadītāju.

Pašreiz visvairāk lieto svina jeb skābes akumulatorus un kadmija-niķeļa, dzelzs-niķeļa jeb sārma akumulatorus.

Svina (skābes) akumulatori (2.37. att.). Šo akumulatoru būtiskākā sastāvdaļa ir svina plates vai elektrodi, kas ievietotas vairākās sekcijās, kuras ir pildītas ar elektrolītu (elektriski vadošu šķidrumu) parasti atšķaidītu sērskābi. Pozitīvās plates ir svina oksīds (PbO2), bet negatīvās plates ir porains svins. Vienas pilnīgi uzlādētas sekcijas spriegums bez slodzes ir 2,1 volts, ko parasti noapaļo uz 2 V. Šo spriegumu arī sauc par elektrodzinējspēku (EDS). Ja virknē ir saslēgtas sešas sekcijas (var saukt arī par cellēm), tad šīs akumulatoru baterijas EDS ir 12 V. Bez tam akumulatora sekcijā ir arī separatori — skābju izturīgas un šķidruma caurlaidīgas starpsieniņas, kas savstarpēji atdala pretējos polus.

|  |
| --- |
|  |

2.37. att. Skābes akumu­lators: 1 – austiņa; 2 – pozitīva elektroda režģis; 3 – pozitīvais elektrods; 4 – pozitīvais elektrods ar separatoru; 5 – negatīva elektroda režģis; 6 – negatīvais elektrods; 7 – pozitīvā elektroda bloks; 8 - negatīvā elektroda bloks; 9 – barete; 10 – salikts elektrodu bloks; 11 – ventilācijas caurums; 12 – rokturis; 13 – spailes.

Ārējā tvertne parasti ir no plastmasas. Separators netraucē brīvo elektronu plūsmu no “-“ plates uz “+” plati. Ja akumulators ir izlādējies, elektronu plūsma apstājas un potenciāli izlīdzinās. Pilnīgi uzlādēta elektrolīta blīvums ir 1,28 g/cm3,bet gandrīz izlādēta 1,18 g/cm3. Pilnīgi izlādēt akumulatoru nav vēlams. Elektrolīta blīvumu pārbauda ar speciālu blīvuma mērītāju, kas uzrāda, cik daudz darba procesā ir samazinājusies sērskābes koncentrācija, svina oksīdam platēs pārvēršoties svina sulfātā.

Svina akumulatoru no sešām sekcijām var uzlādēt līdz 14,4 V. Vienlaikus ir svarīgi, lai uzlādējošās strāvas lielums nekad nepārsniegtu 1/3 no uzrādītajām ampērstundām. Tā, piemēram, akumulatoram ar atzīmi 75 A·h uzlādēšanas strāva nedrīkst pārsniegt 75/3 = 25 A. Akumulatora jauda var būt ļoti plašā diapazonā, jo tos lieto gan smagajām mašīnām, gan motocikliem kā startera baterijas, gan elektronikā — piemēram, datoriem. Firmas akumulatorus piegādā gan sausi uzlādētus, gan arī jau ar iepildītu elektrolītu. Ilgāk var uzglabāt sausi uzlādētus akumulatorus.

Izmanto četrus dažādus akumulatoru veidus:

1. Akumulatori ar šķidro elektrolītu (2.38. att.). Vienu grupu no tādiem akumulatoriem izgatavo apkalpojama varianta – akumulatora sūnas apgādāti ar korķiem (2.39. att.). Otras grupas akumulatorus izgatavo bez tādiem korķiem.

2. Akumulatori ar drošības vārstu VRLA (Valve Regulated Lead Acid Battery). Šūnas korķus šajā gadījumā nevar izskrūvēt. Tādus akumulatorus drīkst uzlādēt ar spriegumu ne lielāku par 14,4 V.

3. Akumulatori ar želeja tipa elektrolītu. Elektrolītam ka piedevu izmanto silīcijskābe kas pārvērš to želeja tipu elektrolītu. Pēc gāzes novadīšanas principa šie akumulatori pieder pie VRLA tipa.

4. Akumulatori AGM(Absorbent-Glass-Mat-Battery) tipa. Tā sauc akumulatorus ar elektrolīta iesūcināšanu un noturēšanu speciāla stikla vates (stiklamata) paklājā. Stiklamati izpilda arī separatora funkcijas. Pēc gāzes novadīšanas principa šie akumulatori arī pieder pie VRLA tipa.

|  |  |
| --- | --- |
| 2.38. att. Akumulators ar šķidro elektrolītu:  1 – ventilācijas caurums; 2 ventilācijas kanāls; 3 – šūnas korķis | 2.39. att. Akumulatora šūnas korķis:  1 – korķis; 2 – blīvējuma gredzens. |

**Akumulatoru marķējums** (2.40. att.).

|  |  |
| --- | --- |
|  | 2.40. att. Akumulatoru marķējums: 1- nominālais spriegums; 2 – aukstā nogroduma strāva (ток холодной прокрутки); 3 – izgatavotājfirmas normatīvi; 4 – nomināla kapacitāte (Ah); 5 – atbilstība standartiem (NE – Eiropas standarts; SAE – ASV standarts; DIN vācu standarts); 6 – numurs pēc izgatavotājfirmas kataloga. |

Uzlādēts akumulators ar pieslēgtu patērētāju darbojas kā barošanas avots; tādu akumulatora darbības režīmu sauc par izlādi.

Izlādes laikā svina dioksīds un metāliskais svins pār­vēršas sērskābajā svina savienojumā (PbS04) un izdalās ūdens, tāpēc elektrolīta koncentrācija, vadītspēja un aku­mulatora EDS samazinās.

Uzlādēs laikā notiek pretēja virziena reakcija.

Akumulatoru izlādējot, tā spriegums sākumā ātri sa­mazinās no 2,1-2,2 V līdz 2 V, bet pēc tam lēni — līdz 1,8 V. Izlāde ar zemāku spriegumu nav pieļaujama, jo tad bojā­jas akumulators.

Akumulatora uzlādēs strāvas virziens ir pretējs tā iz­lādes strāvas virzienam, tāpēc uzlādēs avota pozitīvā (plusa) spaile ir jāpieslēdz akumulatora plusa spailei, bet akumulatora mīnusa spaile — avota katodam. Uzlā­dēs laikā akumulatora spriegums ātri pieaug līdz 2,2 V un pēc tam lēni — līdz 2,3 V. Uzlādēs procesa beigas sāk izdalīties ūdeņradis, kas pūslīšu veidā paceļas līdz elektrolīta vir­smai (akumulatora vārīšanās). Šajā laikā akumulators sasniedz 2,6—2,7 V, un uzlādē ir jāpārtrauc.

Elektrības daudzumu, kuru var iegūt no uzlādēta aku­mulatora, sauc par tā kapacitāti. To mēra ampērstundās.

Akumulatora izlādes laikā atdotā elektrības daudzuma attiecību pret uzlādēs laikā pievadīto elektrības daudzumu sauc par *atdeves koeficientu*:



Svina akumulatoram atdeves koeficients ir 0,9—0,95.

Izlādes laikā no akumulatora iegūtās enerģijas *Wizl* attiecību pret uzlādēs laikā patērēto enerģiju *Wuzl* sauc par *lietderības koeficientu*:



Svina akumulatoram lietderības koeficients ir 0,75—0,8.

Nepareiza svina akumulatora ekspluatācijā samazina tā kapacitāti. Akumulators ir jātīra un jānovērš spaiļu oksidēšanās, pārklājot tās ar plānu speciālas pastas kār­tiņu. Ne retāk par vienu reizi dekādē ir jāpārbauda elek­trolīta līmeņa augstums un akumulatora uzlādēs stāvok­lis. Akumulators periodiski ir jāuzlādē, jo nedrīkst to gla­bāt neuzlādētu.

Nepareiza akumulatora uzlādē, nepilnīga uzlādē, neuzlādēta akumulatora glabāšana, elektrolīta līmeņa pazemi­nāšanās un liels elektrolīta blīvums ir akumulatora sulfatizācijas — tā bojāšanās cēlonis, kuras gadījumā smalkie svina sulfāta kristāli pārveidojas nešķīstošos ķīmiskos sa­vienojumos, kas nepiedalās akumulatora darbībā.

**Sārma akumulatori.** Sārma akumulatorus veido divi plašu bloki, kas ievietoti ar elektrolītu piepildītā slēgtā tērauda vai plastmasas traukā (2.41. att.).

|  |  |
| --- | --- |
| ***a*** | ***b c*** |

2.41. att. Sārma akumulators: *a, b* — kopskats; *c* — plates

Sārma akumulatoru elektrodi ir niķelēti tērauda rāmīši, kuros ievieto plakanas taisnstūra formas kārbiņas, kas izgata­votas no perforēta skārda lentas. Kārbiņas piepilda ar aktīvo masu. Kadmija-niķeļa elementā pozitīvās plates ak­tīvo masu veido niķeļa hidroksīds Ni(OH)3, bet negatī­vās — porainais kadmijs. Dzelzs-niķeļa elementā pozitī­vās plates aktīvo masu veido niķeļa hidroksīds, bet negatīvās plates — porainā dzelzs.

Par elektrolītu lieto 21% kodīgā kālija (KOH) vai ko­dīgā nātrija (NaOH) šķīdumu ūdenī.

Izlādes laikā trīsvērtīgais niķeļa hidroksīds pārvēršas par divvērtīgo niķeļa hidroksīdu, bet porainā dzelzs (kad­mijs) — par divvērtīgo dzelzs (kadmija) hidroksīdu. Uz­lādēs laikā reakcija notiek pretējā virzienā. Uzlādētā aku­mulatora EDS ir 1,4 V.

Izlādes laikā spriegums ātri samazinās no 1,4 V līdz 1,3 V, bet pēc tam lēni — līdz 1,15 V, un pēc tam izlāde ir jāpārtrauc. Uzlādēs laikā spriegums 1,15 V, ātri pieau­dzis līdz 1,75 V, nedaudz krīt, bet pēc tam lēni pieaug līdz 1,85 V.

Iekšējā pretestība sarma akumulatoriem ir ievērojami lielāka nekā skābes akumulatoriem, tāpēc, no vienas pu­ses, tiem ir zemāks lietderības koeficients — 0,5—0,6, bet, no otras puses, — tos mazāk ietekmē īsslēgums.

Sārma akumulatoriem salīdzinājumā ar svina akumu­latoriem ir liela mehāniskā izturība, mazāks svars un vienkāršāka apkope.

**2.13.4. Saules baterija**

Saules baterija ir pusvadītāju fotoelektroniskais ģenerātors. Saules baterijas ļauj saules enerģiju tieši pārveidot elektroenerģijā. Saules gaismas vietā var izmantot arī citu gaismu, kurai ir līdzīgs viļņa garums. Šim elektroenerģijas ieguves veidam nākotnē ir liels potenciāls. Saules baterijas tik tagad ir progresējušas līdz tādam līmenim, lai varētu apgādāt māju ar elektrību, kas iegūta no saules staru enerģijas. Protams, iegādājoties šādu elektroenerģijas apgādes veidu savai mājai, par elektrību nebūs jāmaksā. Vienīgais saules bateriju trūkums, ka saules baterijas ir diezgan dārgas, taču baterijas Latvijas apstākļos atmaksājas aptuveni 20 gadu laikā.

Saules bateriju darbības princips Saules baterijas pamatelements ir pusvadītāju doide Apgaismojot p-n pāreju ar īso viļņu garumu gaismu, uz p-n pārejas rodas sprieguma starpība, tā var uzturēt strāvu noslēgtā ķēdē un ražot enerģiju. Daudzveidīgajās parastajās diodēs p-n pāreju cenšas izveidot pēc iespējas mazos izmēros un ievietot gaismas necaurlaidīgajā korpusā. Toties fotodiodēs, un saules baterijās kā to paveidā, p-n pārejas izmērus maksimalizēt pat līdz dažiem metriem, pusvadītāju materiālu pārklāj ar gaismas caurlaidīgu aizsargslāni.

Mazāko fo­togalvanisko vienību, kas tiek izmantota elektroenerģi­jas ražošanā, sauc arī par saules šūnu *(solar cell),* kas ir saules enerģētisko ie­kārtu (bateriju) pamatelements. Vienkāršu saules bate­riju elementa shēmu skat. 2.42. attēlā.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| ***a*** | ***b*** | ***c*** |

2.42. att. Fotogalvaniskais elements (šūna): *a* – šūnas uzbūve; *b*, *c* – dažādas formas šūnas; 1 – ieejas kontakts; 2 – potenciālais barjeras *р+* 0,2 μ; 3 – *р* slānis 250-400 μ; 4 – *n* slānis 0,2-1,0 μ; 5 – pretatstarošanas pārklājums; 6 – virskontakts; 7 – izejas kontakts; 8 – aizmugures metāliskais kontakts.

Fotogalvaniskais elements arī šūna *(photogalvanic cell)* tiek izgatavota no pusvadītāja materiāla, kas spēj tieši pārveidot saules enerģiju elektriskajā. Patlaban vis­plašāk izmantotais materiāls ir silīcijs, pusvadītājs, kurš visvairāk atrodams SiO2 - silīcija dioksīda veidā, smilšu sastāvā un tiek izmantots elektronikā pusvadītāju un mikroshēmu izgatavošanā. Ir monokristāliskas, polikristāliskas un amorfa silīcija fotogalvaniskās šūnas, kas savstarpēji atšķiras pēc silīcija atomu struktūras, kā arī pēc elektroenerģijas ražošanas lietderības koeficien­ta. Bez silīcija fotogalvanisko šūnu izgatavošanai tiek izmantoti arī citi materiāli - plāni vara, indija, diselenīda un kadmija telurīda pārklājumi. Šūna ģenerē 0,5 V spriegumu, jauda apmēram 3 – 4 W.

No visām 2000. gadā saražotajām fotogalvaniskajām šūnām 79,9 % bija monokristāliskas vai polikristāliskas. Izskaidro­jums tam ir salīdzinoši augstāks lietderības koeficients, taču arī sarežģītāks un dārgāks izgatavošanas process. Šūnu lietderības koeficients var sasniegt pat 30 % (t.i., šūna pār­veido elektris­kajā enerģija 30% absorbē­tā saules sta­rojuma), taču parasti tas ir 15-20 %.

36, 48 vai 72 šūnas savieno virknē lai izveidotu saules baterijas moduli (2.43. att.) ar spriegumu tukšgaitā no 16 līdz 44,6 V, darba režīmā no 14 V līdz 35 V ar slodzes strāva no 4,5 A līdz 5 A un minimālo jaudu 75 – 166 W (maksimālā jauda 80 – 175 W).

Saules fotogalvaniskās sistēmas *(Photovoltaic systems)* veido virknē vai paralēli saslēgti saules bateri­ju paneļi.

Līdzstrāvas fotoelektriskājā sistēmā ietilpst saules modulis, vadības bloks, akumulatora baterija, maiņstrāvas sistēmā papildus atrodams arī līdzstrāvas pār­veidotājs (inverters) maiņstrāvā.

Šādas enerģijas 1 kWh varētu izmaksāt ap 0,30 Ls. Tāpēc to lieto vietās, kur nav pieejama elektroenerģija no elektriskajiem tīkliem. Dienvidu zemēs tās kopā ar akumulatoru izmanto ārējam apgaismojumam.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| ***a*** | ***b*** | 2.43. att. Saules baterijas modulis no 36 šūnām: *a* – saules baterijas moduli kopskats (jauda 75 W), *b* – saules moduļa principiāla elektriskā shēma |

**2.14. EDS (barošanas) avotu slēgumi.**

Ja patērētāja nominālais spriegums un strāvas ir lielāki par attiecīgajiem barošanas avota lielumiem, tad barošanas avots saslēdz kopējam darbam virknē, paralēli vai jauktā slēgumā, izveidojot elementu baterijas.

***Virknes slēgums***. Virknes slēgumu lieto tad, ja patērētāja spriegums ir lielākas par katra elementa elektrodzinējspēku *E*0, bet patērētāja nomināla strāva nepārsniedz elementa izlādes strāvu (2.44. att.).

Virknes saslēdzamo elementu skaitu nosaka pēc attiecības



Visu elementu elektrodzinējspēkiem jādarbojas vienā virzienā. To panāk, savienojot elementa „ - ” spaili ar otra elementu „ + ” spaili. Tad Baterijas EDS

*E = n∙E*0. (2.57)

|  |  |
| --- | --- |
|  | 2.44. att. Barošanas avotu virknes slēguma shēma. |

Baterijas iekšējā pretestība

*Rb = n∙R*0. (2.58)

Strāva ķēde



Ķēdes spaiļu spriegums

*U = n∙E*0 – *I∙n∙R*0 = *n∙* (*E*0 – *I∙R*0) = *n∙* (*E*0 – *U*0).

Baterijas izlādes strāva vienāda ar viena elementa izlādes strāvu.

***Paralēlais slēgums***. Barošanas avotu paralēlo slēgumu (2.45. att.) lieto gadījumā, kad patērētāja strāva *I* ir lielāka par elementa izlādes strāvu *Iizl.*, bet patērētāja spriegums *U* ir vienāds ar elementa spriegumu, t.i., *U = E*0.

|  |  |
| --- | --- |
| ***a*** | ***b*** |

2.45. att. Barošanas avotu (*a*) un saules moduļu (*b)* paralēlo slēguma shēma: 1 – saules modulis,

2 - drošinātājs, 3 - blokdiode.

Ļoti svarīgi šajā gadījumā ir prasība, lai visu paralēli saslēdzamo barošanas avotu EDS un iekšējas pretestības būtu vienādas. Pretējā gadījumā barošanas avoti ar mazāko EDS var darboties ka strāvas patērētāji, bet avoti ar mazāku iekšējo pretestību tiek vairāk noslogoti un līdz ar to ātrāk izlādējas.

Saules modulēs jāaizsarga ar bloka diodēm un drošinātājiem (2.45. att. b). Slodzes strāva atrodas diapazonā 13,5 – 15 A. Slodzes spriegums 15-17 V.

Paralēli saslēdzamo elementu skaitu *m* nosaka pēc formulas



Baterijas EDS šai gadījumā ir vienlīdzīgs elementa EDS:

*E = E*0. (2.59)

Baterijas iekšēja pretestība

 (2.60)

Strāva ķēdē



Ķēdes spaiļu spriegums



Baterijas izlādes strāva

*Ib.izl.* = *m∙Iizl.*.

***Jauktais slēgums***. Jaukto (grupas) slēgumu lieto, kad nepieciešams iegūt gan lielāku spriegumu, gan strāvu, nekā spēj dot viens elements (2.46. att.).

Saslēdzamo elementu skaitu nosaka pēc formulām:

 - virknē slēgto elementu skaits,

 - paralēlo zaru skaits.

Baterijas EDS

*Eb = n∙E*0. (2.61)

|  |  |
| --- | --- |
| ***a*** | ***b*** |

2.46. att. Barošanas avotu (*a*) un saules elementu (*b*) jauktā slēguma shēma: 1 – saules baterija;

2 – panelis, 3 – modulis, 4 – šūna; 5 – drošinātājs; 6 – blokdiode.

Baterijas iekšēja pretestība

 (2.62)

Strāva ķēdē



Ķēdes spaiļu spriegums



kur - kopējais sprieguma kritums uz elementu iekšējās pretestības.

Baterijas izlādes strāva

*I = m∙Iizl.*.

***2.17. piemērs***. Noteikt akumulatoru skaitu (*E*0 = 2 V, *Iizl.* = 8 A) un izvēlēties slēguma veidu avārijas apgaismošanas barošanai. Visu lampu kopjauda 2,2 kW, spriegums 110 V.

Atrisinājums.

1. Aprēķinam patērētāja strāvu



2. Paralēlo zaru skaits



Izvēlamies *m* = 3.

3. Katrā grupā jāsavieno *n* elementu (neievērojot iekšējos sprieguma kritumus akumulatoros)



Tātad kopējais akumulatoru skaits

*N = n∙m* = 55∙3 = 165.

***2.18. piemērs***. Mājokļa apgaismojuma tīklu ar spriegumu 12 V un jaudu 150 W baro no akumulatora baterijas uzlādētai līdz 80 A·h. Apgaismojumu ieslēdz katra vakara uz 4 stundām. Aprēķināt fotogalvanisko enerģētisko sistēmu lai uzlādētu akumulatoru bateriju.

Atrisinājums.

1. Lai uzlādētu akumulatoru bateriju līdz 12V saules sistēmu jāaprēķina vismaz uz spriegumu 14 V. Saules šūnas nominālais spriegums *U*0 = *E*0 = 0,5 V. Tātad virknes slēgumā jāsavieno *n* elementu



2. Aprēķinam patērētāja strāvu



3. Aprēķinam paralēlo zaru skaits



4. Kopējais šūnu skaits

*N = n∙m* = 28∙3 = 84.

5. Saules sistēmas maksimāla jauda, ja šūnas jauda aptuveni *P*0 = 3 W

*Psaul = N· P*0 = 84·3 = 252 W.

6. Saules šūnas izmēri ir 12,5 x 12,5 cm un vienas šūnas laukums ir S0 =156,25 cm2. Saules sistēmas kopējais laukums *S = N· S*0 = 84·156,25 = 13125 cm2 = 1,31 m2. Saules baterijas nominālais spriegums 14 V, nomināla strāva katrā zarā 5 A, nomināla kopējā strāva 15 A.

7. Pārbaude.

Apgaismojuma sistēma patērē vakarā *W = I·t* = 12,5·4 = 50 A·h.

Saules baterija 4 stundas dienas laika var saražot enerģijas daudzumu *Wsaul = Isaul·t* = 15·4 = 60 A·h.

*Secinājums*. Aprēķināta saules baterija var uzlādēt akumulatoru bateriju, ja darba laiks sastāda vismaz 4 stundas dienā.

**2.15. SAZAROTU ELEKTRISKO ĶĒŽU APRĒĶINĀŠANA AR KIRHOFA**

**LIKUMU PALĪDZĪBU**

Kirhofa likumus, kā arī citas tālāk iztirzātās metodes, lieto tādu sazarotu elektrisko ķēžu aprēķināšanā, kurās ir divi vai vai­rāki EDS avoti.

Iztirzāsim aprēķina gaitu sazarotai ķēdei ar diviem EDS avotiem (2.47. att.), iz­mantojot Kirhofa likumus. Pieņemsim, ka ir zināmas zaru pretestības, avotu elektrodzinējspēki *E*1 un *E*2 un to virzieni, bet jāaprēķina visu zaru strāvas. Savienojošo vadu niecīgās pretestības ne­ņemam vērā, bet EDS avotu iekšējās pretestības ir jau pieskaitītas attiecīgo zaru pretestībām.

Lai sazarotai elektriskajai ķēdei uzrakstītu Kirhofa likumu izteiksmes, tad vispirms

1. patvaļīgi jāizvēlas un jāiezīmē shēmā strāvu virzieni ķēdes visos zaros, izņemot strāvām, kuru skaitliskās vērtības un virzieni doti;
2. shēmā jāiezīmē ķēdē ieslēgto avotu doto EDS virzieni; ja avotu EDS jāaprēķina, tad EDS virzienus izvēlas patva­ļīgi;
3. patvaļīgi jāizvēlas un jāiezīmē shēmā katra aprēķinam iz­vēlētā kontūra apejas virziens.

2.47. attēlā dotās shēmas kontūru I, II un III apejas virziens sakrīt ar pulksteņa rādītāja kustības virzienu.

Rakstot otrā Kirhofa likuma izteiksmi kontūram, kontūra zaru strāvas un EDS, kuru virzieni sakrīt ar kontūra pieņemto apejas virzienu, pieņem par pozitīviem, bet kontūra pārējās strā­vas un EDS — par negatīviem.

Ja sazarotai ķēdei jāaprēķina m nezināmie — dotajā gadījumā sešas nezināmas strāvas (*m* = 6, t. i., tik, cik ķēdei zaru), tad, izmantojot abus Kirhofa likumus, jāsastāda vienādojumu sis­tēma ar m neatkarīgiem vienādojumiem.

|  |
| --- |
| 2.47. att. Sazarotas elektriskās ķēdes shēma ar diviem EDS avotiem |

2.47. attēlā parādītajai sazarotajai ķēdei ir *k* = 4 mezgli, un pirmā Kirhofa likuma izteiksmes tiem ir šādas:

mezglam A: *I*1 + *I*6 – *I*4 = 0,

mezglam B: *I*4 – *I*2 – *I*5 = 0, (k-1) neatkarīgi vienādojumi

mezglam C: *I*5 – *I*3 – *I*6 = 0,

mezglam D: *I*2 + *I*3 – *I*1 = 0

Saskaitot pirmo triju vienādojumu kreisās un labās puses, dabū ceturto vienādojumu, kurš tātad nav neatkarīgs vienādojums un tādēļ aprēķinam nav derīgs.

Tādējādi pēc pirmā Kirhofa likuma sastādāmo vienādojumu skaits ir par vienu mazāks nekā sazarotās ķēdes mezglu skaits (jāsastāda k - 1 vienādojumi).

Trūkstošos m—(k—l) vienādojumus sastāda, izmantojot otro Kirhofa likumu. Tikai jāievēro, lai katrs nākošais kontūrs, ku­ram sastāda vienādojumu, ietvertu kaut vienu zaru, kas neietilpst kontūros, kuriem jau ir uzrakstīti vienādojumi (lai vienādojumi būtu neatkarīgi).

Tātad 2.47. attēlā dotajai shēmai jāsastāda k —1 = 3 vienādojumi pēc pirmā Kirhofa likuma un m — (k — 1) = 3 vienādojumi pēc otrā Kirhofa likuma, kurus sastādām kontūriem *I*, II un III (var iz­mantot arī citus kontūrus):

kontūram I: *E*1 – *E*2 = *I*1*R*1 + *I*4*R*4 + *I*2*R*2,

kontūram II: *E*2 = *I*5*R*5 + *I*3*R*3 – *I*2*R*2, (2.63)

kontūram I: 0 = – *I*4*R*4 – *I*5*R*5 – *I*6*R*6,

Atrisinot šo sešu vienādojumu sistēmu, atrod nezināmās zaru strāvas vai arī jebkurus citus sešus nezināmus lielumus (EDS, pretestības), ja ķēdes pārējie lielumi doti.

Ja kāda aprēķinātā strāva (vai nezināmais EDS) ir ar « —» zīmi, tad tas nozīmē, ka patiesais strāvas (vai EDS) virziens ir pretējs shēmā pieņemtajam strāvas (vai EDS) virzienam.

Aprēķināto rezultātu pareizību pārbauda, sastādot jaudu bilanci dotajai ķēdei:

Σ*RI* = Σ*I*2*R*, (2.64)

kur Σ*RI* — dotās ķēdes visu EDS avotu jaudu algebriskā summa;

Σ*I*2*R* — dotās ķēdes visu pretestību patērēto jaudu summa.

Ja patiesais strāvas virziens avotā sakrīt ar avota EDS pa­tieso virzienu, tad avota jauda ir pozitīva. Bet, ja avota *E* un *I* virzieni pretēji, tad avota jauda ir negatīva, i. i., šis avots patērē jaudu (piem., uzpildīšanai pieslēgts akumulators).

Ar Kirhofa likumu palīdzību var aprēķināt jebkuru sazarotu ķēdi ar jebkuru avotu skaitu (ja iespējams, shēma iepriekš jā­vienkāršo). Taču, ja ķēdei ir daudz zaru, tad jāatrisina vienādojumu sistēma ar visai lielu vienādojumu skaitu; tas saistīts ar ievērojamām grūtībām un lielu laika patēriņu.

Tāpēc, pamatojoties uz Kirhofa likumiem, ir izveidotas vēl citas, mazāk darbietilpīgas sazarotu ķēžu aprēķina metodes: kon­tūru strāvu, superpozīcijas un mezglu sprieguma metodes.

***2.19. piemērs.*** Sazarotai elektriskai ķēdei (2.48. att.) ar diviem EDS avotiem sastādīt vienādojumus konkrētai ķēdei, izmantojot abus Kirhofa likumus.

2.48. att. parādītajā shēmā doti avotu EDS *E*1 = 100 V, *E*2 = 120 V ar iekšējam pretestībām *R*01 = 0,2 Ω un *R*02 = 0,4 Ω, pretestību vērtības: *R*1 = 9,8 Ω, *R*2 = 19,6 Ω, *R*3 = 20 Ω.

Aprēķināt visas strāvas (*I*1, *I*2, *I*3) un sastādīt jaudu bilanci.

Atrisinājums.

|  |  |
| --- | --- |
| *Nezināmo strāvu skaita noteikšana un strāvu virzienu izvēle*. Kā zināms, katrā nesazarotā ķēdes posmā (zarā) strāvai ir viena un tā pati vērtība visā posma garumā. Aplūkojamā ķēdē (2.48. att.) mezgliem A un B pievienoti trīs zari : BCDA ar strāvu *I*1, BA ar strāvu *I*2, BFGA ar strāvu *I*3. *Tātad atšķirīgo strāvu skaits ir vienāds ar elektriskās ķēdes zaru skaitu.* | 2.48. att. Shēma 2.18. piemēram |

Sākumā strāvu virzienus (pozitīvos) izvēlas brīviun, ievērojot pieņemtos virzienus, sastāda vienādoju­mus. Šos vienādojumus atrisina un pēc algebriskajām zīmēm nosaka strāvu patiesos virzienus. Strāvas, kuru patiesie virzieni ir pretēji pieņemtajiem, izsaka negatīvi skaitļi.

Mūsu gadījumā jau iepriekš var pateikt, ka ne visi izraudzītie strāvu virzieni (nepārtrauktās bultiņas 2.48. att.) sakrīt ar patiesa­jiem, jo visas strāvas nevar plūst uz mezglu *A.* Acīmredzot viena vai divas strāvas būs ar mīnusa zīmi.

*Vienādojumu sastādīšana pēc Kirhofa* liku­miem. Mūsu uzdevumā ir trīs nezināmas strāvas *I*1,  *I*2, *I*3 ,kuru noteikšanai sastādām trīs vienādojumus.

Sākam ar vienādojumiem pēc pirmā Kirhofa likuma, jo tie ir vienkāršāki. Ķēdei ar *q* mezgliem var sastādīt *q* *-* 1neatkarīgus vie­nādojumus; vienam (jebkuram) ķēdes mezglam vienādojumu var nestādīt, jo tas izriet no iepriekšējiem.

2.48. attēla ķēdē ir divi mezgli. Tādēļ pēc pirmā Kirhofa likuma sastādām vienu vienādojumu, piemēram, mezglam *A:*

*I*1 + *I*2 + *I*3 = 0. (2.65)

Divus trūkstošos vienādojumus sastādām pēc otrā Kirhofa likuma, šai nolūkā izvēloties, piemēram, kontūrus *BAGFB* un *CDGFC* (lai vienādojumi būtu neatkarīgi, katrā nākamajā kontūrā jābūt vienam jaunam zaram, kura nav iepriekšējā kontūrā).

Pieņemot katra kontūra apiešanas virzienu pulksteņa rādītāju kustības virzienā un ņemot vērā zīmju likumu, iegūstam

*E*1 – *E*2 = *I*1∙R01 + *I*1∙*R*1 – *I*2∙*R*2 – *I*2∙*R*02; (2.66)

*E*2 = *I*2∙*R*02 + *I*2∙*R*2 – *I*3∙*R*3 . (2.67)

*Strāvu aprēķins*. Vienādojumus (2.66) un (2.67) ievietojot pretestību un EDS vērtības, iegūstam

*I*1 + *I*2 + *I*3 = 0; (2.68)

– 20 = 10*I*1 – 20*I*2 ; (2.69)

120 = 20*I*2 – 20*I*3 . (2.70)

Tātad strāvu aprēķins reducējas uz trīs vienādojumu (2.68) – (2.70) sistēmas ar trīs nezināmajiem atrisināšanu. Šai nolūkā, piemēram, no vienādojuma (2.68) izsakām strāvu *I*1 un ievietojam tās vērtību vienādojumā (2.69):

- 20 = - 10(*I*2 + *I*3) - 20*I*2 ;

Savelkot līdzīgos locekļus, iegūstam

20 = 30*I*2 + 10*I*3. (2.71)

Ir iegūti divi vienādojumi (2.70) un (2.71) ar diviem nezināmajiem *I*2 un *I*3.

Pareizinot vienādojumu (2.71) ar 2 un pieskaitot to vienādojumam (2.70), iegūstam

160 = 20*I*2 + 60*I*2,

no kurienes *I*2 = 2 A.

Ievietojot strāvas *I*2 vērtību vienādojumā (2.71), iegūstam

20 = 30∙2 + 10*I*3,

no kurienes *I*3 = - 4 A.

Strāvu *I*1 nosakām no vienādojuma (2.68):

*I*1 = - *I*2 - *I*3 = - 2 + 4 = 2 A.

Strāvām *I*2 un *I*3 ir pozitīva vērtība, bet *I*3 – negatīva vērtība, tātad pirmo divu strāvu virzieni ir izraudzīti pareizi, bet strāvas *I*3 virziens – nepareizi. Strāvas *I*3 patiesais virziens 2.48. attēlā ir pretējs. Pie tam mezglam A pieplūstošo strāvu summa *I*1 + *I*2 = 2 + 2 = 4 A ir vienāda ar aizplūstošo strāvu *I*3 = 4 A.

**2.16. KONTŪRU STRĀVU METODE**

Tā ir viena no populārākajām metodēm, ko lieto tādu sazarotu ķēžu aprēķināšanā, kurās ir vairāk nekā divi mezgli (*k* > 2).

Metodes galvenā priekšrocība ir tā, ka te jāatrisina vienādo­jumu sistēma, kurā ir par (*k*—1) vienādojumiem mazāk nekā klasiskajai Kirhofa likumu metodei, t. i., jāatrisina tikai *m*—(*k*—1) vienādojumi, kurus sastāda, pamatojoties uz otro Kirh­ofa likumu.

Saskaņā ar šo metodi sazarota ķēde tiek uzskatīta par sav­starpēji saskarošos kontūru kopumu, un tiek pieņemts, ka katrā kontūrā plūst patvaļīgi izvēlētā virzienā tikai viena strāva, ko sauc par kontūra strāvu.

Metodes analīzei izmantosim 2.47. attēlā doto shēmu, kura sa­stāv tikai no trim kontūriem I, II un III, kas savā starpā saska­ras. Daži sazarotās ķēdes zari ir kopēji diviem blakus kontūriem, piem., zari ar *R* 2, *R* 4 un *R* 5, bet citi veido kontūru ārējos zarus, piem., zari ar *R* 1  *R* 3 un *R* 6.

Iekams sāk ķēdes aprēķināšanu, shēmā iezīmē patvaļīgi izvē­lētos zaru strāvu virzienus.

Par kontūra strāvas virzienu un tās skaitlisko vērtību ir iz­devīgi pieņemt kontūra ārējā zara strāvas virzienu un vērtību, t.i.,

*I*I = *I*1, *I*II = *I*3 un *I*III = *I*6, (*a*)

kur *I*I, *I*II un *I*III ir kontūra strāvas kontūros I, II un III.

Kontūra strāvas virziens ir arī kontūra apejas virziens.

Jebkuru divu blakus kontūru kopējā zara patiesā strāva ir vie­nāda ar abu kontūru strāvu algebrisko summu:

*I*2 = *I*I – *I*II,

*I*4 = *I*I + *I*III, (*b*)

*I*5 = *I*II + IIII.

Šīs kopējo zaru strāvu izteiksmes ievieto pēc otrā Kirhofa likuma kontūriem I, II un III sastādītajos vienādojumos (2.63):

kontūram I: *E*1 – *E*2 = *I*1*R*1 + (*I*I + *I*III)*R*4 + (*I*I – *I*II)*R*2,

kontūram II: *E*2 = (*I*II + *I*III)*R*5 + *I*3*R*3 – (*I*I – *I*II)*R*2,

kontūram I: 0 = (*I*I + *I*III)*R*4 + (*I*II + *I*III)*R*5 + *I*6*R*6,

Ārējo zaru strāvas *I*1, *I*3 un *I*6 izsakot ar kontūru strāvām (izteiksme *a*) un pēc tam pārveidojot vienādojumus, dabū, ka

kontūram I: *E*1 – *E*2 = *I*I(*R*1 + *R*2 + *R*4) – *I*II*R*2 + *I*III*R*4,

kontūram II: *E*2 = *I*II (*R*2 + *R*3 + *R*5) – *I*I*R*2 + *I*III*R*5, (2.72)

kontūram I: 0 = *I*III(*R*4 + *R*5 + *R*6) + *I*I*R*4 + *I*II*R*5,

Vienādojumos (2.72) iekavās esošo pretestību summa ir katra kontūra zaru kopējā pretestība. No izteiksmēm (2.72) secināms, ka katra kontūra EDS algebriskā summa ir vienāda ar kontūra strāvas un šī kontūra kopējās pretestības reizinājuma un visu blakus kontūru strāvu un kontūriem kopējo zaru pretestību reizi­nājumu algebrisko summu.

Tā kā kontūru strāvas vienmēr ir pozitīvas, bet vienādojumos spriegumu kritumi kontūru kopējos zaros ir ar « + » un « —» zī­mēm, tad blakus kontūru kopējo zaru pretestības uzskata par kon­tūru strāvu algebriskiem reizinātājiem, t. i., divu kontūru kopējā zara pretestību pieņem par pozitīvu, ja kontūru strāvas šajā pre­testībā ir vērstas vienā virzienā; pretestību pieņem par negatīvu, ja kontūru strāvas pretestībā ir vērstas pretējos virzienos.

Lai kontūriem I, II un III uzrakstīto vienādojumu sistēmu (2.72) varētu izteikt vispārīgā veidā, tad kontūriem kopējo zaru pretestībām pievieno divciparu indeksus, ar kuriem norāda, starp kuriem kontūriem ieslēgta pretestība:

*R*12 *= R*21 *= R*2*,*

*R*13 *= R*31 *= R*4*,*

*R*23 *= R*32 *= R*5*.*

Atsevišķo kontūru pretestības apzīmē šādi:

*R*11 *= R*1 *+ R*2 *+ R*4*,*

*R*22 *= R*2 *+ R*3 *+ R*5*,*

*R*33 *= R*4 *+ R*5 *+ R*6*.*

Kontūrā ieslēgto EDS algebrisko summu, ko sauc par kon­tūra EDS, arī apzīmē ar vienu burtu, kam indekss ir kontūra numurs:

*E*I *= E*1 *– E*2*, E*II *= E*2*, E*II = 0.

Kontūra strāvas virzienā vērstajiem EDS, tos summējot, pie­vieno « + » zīmi, pārējiem — « —» zīmi.

Tad, lietojot pieņemtos apzīmējumus, vienādojumu sistēmu (2.72) vispārīgā veidā var uzrakstīt šādi:

*E*I = *R*11*I*I + *R*12*I*II + *R*13*I*III,

*E*II = *R*21*I*I + *R*22*I*II + *R*23*I*III, (2.73)

*E*III *= R*31*I*I *+ R*32*III + R*33*I*III*.*

Atrisinot šo triju vienādojumu sistēmu, atrod kontūru strāvas II, III un IIII. Reizē ar to ir atrastas dotās ķēdes ārējo zaru strā­vas *I*1, *I*3 un *I*6 (sk. izteiksme *a*). Strāvas kontūriem kopējos zaros *I*2, *I*4 un *I*5 aprēķina pēc izteiksmēm (*b*).

Tādējādi, sazarotas ķēdes aprēķinam izmantojot kontūru strāvu metodi, jāsastāda tikai tik vienādojumu, no cik atsevišķiem kontūriem izveidota sazarotā ķēde. Tā, piemēram, ja sazarotā ķēde «salikta» no *n* kontūriem, tad, šādu ķēdi aprēķinot, jāsastāda vienādojumu sistēma ar n vienādojumiem:

*E*I = *R*11*I*I + *R*12*I*II + *R*13*I*III + … + *R*1*nIn*,

*E*II = *R*21*I*I + *R*22*I*II + *R*23*I*III + … + *R*2*nIn*, (2.74)

*……………………………………………..,*

*E*III *= Rn*1*I*I *+ Rn*2*III + Rn*3*I*III + … + *RnnIn*.

No vienādojumu sistēmas kontūru strāvas parasti aprēķina ar determinantu palīdzību. Tad k-tā kontūra strāva



kur sistēmas determinants

*R*11*R*12*R*13 *… R*1*n*

Δ *= R*21*R*22*R*23 *… R*2*n .*

*………………….*

*Rn*1*Rn*2*Rn*3 *… Rnn*

Determinantu Δk aprēķina no determinanta Δ, ja k-tās kolon­nas pretestību vietā ievieto vienādojumu sistēmas (2.74) kreiso pusi (*E*I, *E*II, ...,*E*n).

Piemēram, 2.35. attēlā dotās shēmas kontūra strāva kontūra II



kur

*R*11*R*12*R*13 *R*11*E*I  *R*13

Δ = *R*21*R*22*R*23 un ΔII = *R*21*E*II *R*23 .

*R*31*R*32*R*33 *R*31*E*III*R*33

Aprēķinot sazarotas ķēdes, vienādojumu sistēmu var pat ne­rakstīt, bet tieši sastādīt determinantu izteiksmes.

***2.20. piemērs***. 2.49. attēlā ķēdei, kuras aprēķins iepriekšējā iedalījumā veikts pēc Kirhofa vienādojumu metodes, aprēķināt visas strāvas, lietojot kontūrstrāvu metodi, ja ķēdes parametri paliek tie paši: *E*1 = 100 V, *E*2 = 120 V ar iekšējam pretestībām *R*01 = 0,2 Ω un *R*02 = 0,4 Ω, pretestību vērtības: *R*1 = 9,8 Ω, *R*2 = 19,6 Ω, *R*3 = 20 Ω.

|  |  |
| --- | --- |
| Uzdevuma risinājums.  *Kontūrstrāvas un to saistība ar zaru strāvām*. Dotajā ķēdē (2.49. att.) var saskatīt divas kontūros (DABCD un AGFBA) un pieņemt tām kontūrstrāvas atbilstoši *I*11 un *I*22.  No ķēdes shēmas ir skaidrs, ka ārējos zaros (DC un GF) kon­tūrstrāvas sakrīt ar zaru strāvām, t. i., *I*1 = *I*11 un *I*3 = *I*22. Shēmas iekšējā zarā (2.49. att. zars AB) strāvu *I*2 nosaka | 2.49. att. Kontūrstrāvas ķēde ar trim zariem |

kontūrstrāvu star­pība, t. i., *I*2 = *I*22 – *I*11 (šeit ņemts vērā, ka strāva *I*2 plūst strāvas *I*22 virzienā un pretī strāvai *I*11). Tādējādi aplūkojamā ķēdē trīs zaru strāvas var izteikt ar divām kontūrstrāvām.

*Kontūru ekvivalento pretestību un kontūru kopīgo pretestību noteikšana*. Kontūra visu pretestību summu sauc par tā ekvivalento pretestību. Kontūrām DABCD (2.49. att.) ekvivalentā pretestība ir *R*11 = *R*01 + *R*1 + *R*02 + *R*2 = 0,2 + 9,8 + 0,4 + 19,6 = 30 Ω, kontū­rām AGFBA — *R*22 = *R*02 + *R*2 + *R*3 = 0,4 + 19,6 + 20 = 40 Ω.

Divu kontūru kopīgā zara (AB 2.49. att.) pretestību sauc par to kopīgo pretestību. Pirmajam kontūrām to apzīmē ar *R*l2, otrajam — ar *R*21. Tā kā *R*2 +*R*02 un *R*21 ir viena un tā paša zara pretestības, tad acīmredzot *R*12 = *R*21. Mūsu gadījumā *R*12 = *R*21 = (*R*02 + *R*2) =20 Ω.

*Kontūru vienādojumu sastādīšana un strāvu aprēķins*. Sastādām vienādojumu (pēc otrā Kirhofa likuma) kon­tūrām BCDAB:

*E*1 - *E*2 = (*R*01 + *R*1)∙*I*11 – (*R*02 +*R*2)∙(*I*22 – *I*11).

Sagrupējot strāvas *I*11 un *I*22 saturošos vienādojuma locekļus, iegūs­tam

*E*1 - *E*2 = (*R*01 + *R*1 + *R*02 +*R*2)∙*I*11 - (*R*02 +*R*2)∙*I*22.

Šajā vienādojumā sprieguma kritumu algebriskā summa ir iz­teikta ar aplūkojamā kontūra strāvas *I*11 un tā ekvivalentās pretestības *R*11 reizinājumu un ar otrā kontūra strāvas *I*22 un abu kontūru kopīgās pretestības *R*12 reizinājumu, t. i.,

*E*1 - *E*2 = *R*11∙*I*11 – *R*12∙*I*22.

Analogi sastādām vienādojumu kontūram AGFBA:

*E*2 = *R*22∙*I*22 – *R*21∙*I*11.

Ievietojot pretestību un EDS vērtības, iegūstam

- 20 = 30*I*11 – 20*I*22.

120 = – 20*I*11 + 40*I*22.

Tādējādi kontūrstrāvu *I*11 un *I*22 aprēķins reducējas uz divu vienādojumu sistēmas atrisināšanu.

Pareizinot pirmo vienādojumu ar 2 un pieskaitot tā locekļus otrajam vienādojumam, iegūstam

120 – 40 = 60 *I*11 – 20 *I*11 – 40 *I*22 + 40 *I*22 ,

no kurienes

40*I*11 = 80 jeb *I*11 = 2 A.

Ievietojot vērtību kontūra otrajā vienādojumā, atrodam



Izmantojot iepriekš uzrakstītās attiecības starp kontūrstrāvām un zaru strāvām, iegūstam zaru strāvu vērtības: *I*1 = 2 A; *I*3 = 4 A; *I*2 = *I*22 – *I*11 = 4 – 2 = 2 A.

*Jaudu aprēķins*. Sastādīsim jaudu bilanci piemērā aprēķinātajai shēmai. Vispirms konstatējam, ka avota (ģeneratora) režīmā darbojas EDS *E*1 un *E*2. Tiešām *E*1 un *I*1, *E*2 un *I*2 bultiņu virziens sakrīt.

Avota (ģeneratora) jauda

*P*avotu = *E*1· *I*1 + *E*2· *I*2 = 100·2 + 120·2 = 200 + 240 = 440 W.

Patērētāji ir visi rezistīvie elementi un avotu iekšējās pretestības. Kopēja patērētā jauda



Patērētā jauda ir vienāda ar ģenerēto jaudu, tātad aprēķins izdarīts pareizi.

**2.17. MEZGLU SPRIEGUMA METODE**

Šī metode ir visizdevīgākā tādu sazarotu ķēžu aprēķināšanai, kurās ir tikai divi mezgli (vai arī tādu ekvivalentu shēmu ar di­viem mezgliem aprēķināšanai, kuras iegūst, pārveidojot doto shēmu).

Lietojot mezglu sprieguma metodi, vispirms aprēķina ķēdes mezglu spriegumu, t.i., spriegumu starp ķēdes mezgliem. 2.50. attēlā parādītajai ķēdei ar četriem paralēliem zariem, no kuriem trīs aktīvi, bet viens pasīvs, dotas elektrodzinējspēku *E*1, *E*2 un *E*3 skaitliskās vērtības un virzieni un zaru pretestības *R* 1, *R* 2, *R* 3 un *R* 4, kuram pieskaitītas arī avotu iekšējās pretestības.

Pieņem, ka visām zaru strā­vām ir viens un tas pats (po­zitīvais) virziens, piemēram, no mezgla B uz mezglu A. Sa­skaņā ar to EDS *E*3 ir negatīvs. Mezglu spriegums *UAB* ir vienāds ar

jebkura paralēlā zara EDS un atbilstošā zara sprieguma krituma starpību:

*UAB = E*1 – *I*1*R*1 = *E*2 – *I*2*R*2 = – *E*3 – *I*3*R*3 = – *I*4*R*4,

no kurienes izriet, ka strāvas paralēlajos zaros









|  |  |
| --- | --- |
|  | 2.50. att. Sazarota elektriskā ķēde ar diviem  mezgliem. |

kur *G* 1, *G* 2, *G* 3 un *G* 4 paralēlo zaru vadītspējas, vai vispārīgā veidā

 (2.75)

Pirmā Kirhofa likuma izteiksmē ķēdes mezglam A

*I*1 + *I*2 + *I*3 + *I*4 =0

strāvas *I*1, *I*2, *I*3 un *I*4 aizstājot ar attiecīgajām strāvu izteiksmēm un vienādojumu pārveidojot, dabū izteiksmi mezglu sprieguma aprēķināšanai:



Sazarotai ķēdei ar *n* paralēliem zariem mezglu spriegums

 (2.76)

kur *m* — aktīvo zaru skaits sazarotajā ķēdē.

Kad mezglu spriegums *Uab* atrasts, tad pēc izteiksmes (2.75) aprēķina katra paralēlā zara strāvu.

***2.21. piemērs***. *Mezglu sprieguma aprēķins*. 2.48. attēlā ķēdei aprēķināt visas strāvas, lietojot *mezglu sprieguma* metodi, ja ķēdes parametri paliek tie paši: *E*1 = 100 V, *E*2 = 120 V ar iekšējam pretestībām *R*01 = 0,2 Ω un *R*02 = 0,4 Ω, pretestību vērtības: *R*1 = 9,8 Ω, *R*2 = 19,6 Ω, *R*3 = 20 Ω. Shēma (2.48. att.) ir divi mezgli (A un B). Spriegumu starp tiem atrodam, izmantojot formulu:



*Strāvu pozitīvo virzienu izvēle*. Aplūkojamā ķēdē ir trīs zari ar strāvām *I*1, *I*2 un *I*3, kuru virzieni pirms ķēdes aprēķina nav zināmi, tādēļ to pozitīvie virzieni jāizvēlas brīvi, piemēram no mezgla B uz mezglu A.

*Strāvu aprēķins*. 2.48. attēlā pieņemtie strāvu virzieni sakrīt ar EDS darbības virzieniem. Šādā gadījumā mezglu spriegums jeb spriegums uz EDS saturoša zara izvadiem ir vienāds ar starpību starp avota EDS un sprieguma kritumu zara pretestība

*UAB = E*1 *– I*1*(R*01*+* R1*) = E*2 *– I*2*(R*02 *+ R*2*) = 0 – I*3*R*3,

no kurienes







Mīnusa zīme strāvai *I*3 nozīme, ka tās patiesais virziens ir pretējs shēmā parādītajam.

Iegūto rezultātu pārbaudei var izmantot pirmo Kirhofa likumu. Uzrakstām to mezglam A un pārliecināmies, ka aprēķina rezultāti saskan ar to

*I*1 + *I*2 + *I*3 = 2 + 2 + (- 4) = 0.

Tādējādi uzdevums ir atrisināts pareizi.

*Jaudu aprēķins*. Sastādīsim jaudu bilanci piemērā aprēķinātajai shēmai. Vispirms konstatējam, ka avota (ģeneratora) režīmā darbojas EDS *E*1 un *E*2. Tiešām *E*1 un *I*1, *E*2 un *I*2 bultiņu virziens sakrīt.

Avota (ģeneratora) jauda

*P*avotu = *E*1· *I*1 + *E*2· *I*2 = 100·2 + 120·2 = 200 + 240 = 440 W.

Patērētāji ir visi rezistīvie elementi un avotu iekšējās pretestības. Kopēja patērētā jauda



Patērētā jauda ir vienāda ar ģenerēto jaudu, tātad aprēķins izdarīts pareizi.

**2.18. SUPERPOZĪCIJAS METODE**

Superpozīcijas metode pamatojas uz superpozīcijas principu: strāva jebkurā sazarotas ķēdes zarā ir vienāda ar to strāvu algebrisko summu, ko attiecīgajā ķēdes zarā rada katrs EDS atsevišķi, neatkarīgi no pārējiem.

Tādēļ aprēķina gaitā vis­pirms atrod tā sauktās par­ciālās strāvas, kuras ķēdes katrā zarā uzturētu katrs EDS avots atsevišķi.

2.51. attēlā *a* parādītajai ķē­dei ar diviem EDS avotiem zaru strāvas (to virzienus iepriekš izvēlas patvaļīgi) ar superpozīcijas metodi aprēķina šādi.

1. Pieņem, ka ķēdes EDS *E*2 = 0 un ka ķēdē darbojas tikai EDS *E*1, bet visas pretestības, ieskaitot avotu iekšējās pretes­tības, paliek bez izmaiņām (2.51. att. *b*). Parciālās strāvas *I'*1, *I'*2 un *I'*3 aprēķina kā zaru strāvas pretestību jauktajā slē­gumā ar vienu avotu:



|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| ***a*** | ***b*** | ***c*** |

2.51. att. Sazarotas ķēdes (*a*) shēmas (*b, c*) aprēķinam ar su­perpozīcijas metodi.

2. Pieņem, ka ķēdes EDS *E*1 = 0 un ka ķēdē darbojas tikai EDS *E*2 (2.51. att. *c*). Šīs ķēdes parciālās strāvas



3. Aprēķina ķēdes zaru patiesās strāvas, algebriski summējot attiecīgo zaru parciālās strāvas:



Saskaņā ar superpozīcijas principu katra zara parciālo strāvu skaits un aprēķināmo shēmu skaits vienmēr ir vienāds ar avotu skaitu dotajā sazarotajā ķēdē.

Superpozīcijas metodi ķēžu aprēķināšanai tomēr lieto ļoti reti, jo parciālās strāvas, kuras ķēdes zarā ir pretēji vērstas, ir daudz­kārt lielākas par zara patieso strāvu, tādēļ neliela parciālo strāvu relatīvā kļūda bieži rada nepieļaujami lielu zara strāvas atšķirību no tās patiesās vērtības. Ķēdēm ar vairākiem avotiem šī metode ir visai darbietilpīga.

Bet superpozīcijas metode ir ļoti noderīga sazarotas ķēdes darbības analīzei, piemēram, lai noteiktu, kā mainās strāvas sadalī­jums ķēdes zaros, ja izmaina viena EDS skaitlisko vērtību.

Superpozīcijas metodi nevar lietot nelineārām ķēdēm.

***2.22. piemērs.*** *Superpozīcijas metodes izmantošana* 2.48. *attēla dotajai ķēdei*. Pēc superpozīcijas metodes strāvu jebkura ķēdes posmā aplūko kā atsevišķu EDS radīto parciālo strāvu algebrisku summu. Mūsu gadījumā, pirmkārt, jānosaka EDS *E*1 radītās parciālās strāvas, ja neeksistē EDS *E*2, t.i., jāaprēķina vienkārša 2.52 att. ķēde; otrkārt, jāatrod EDS *E*2 radītās parciālās strāvas, ja neeksistē EDS *E*1, t.i., jāaprēķina vienkārša 2.53. attēla ķēde; Treškārt, algebriski jāsaskaita šo divu ķēžu parciālās strāvas.

|  |  |
| --- | --- |
| 2.52. att. Viena EDS izslēgšana no sarežģītas ķēdes | 2.53. att. Otra EDS izslēgšana no sarežģītas ķēdes |

Tātad, lietojot superpozīcijas metodi, vienas sarežģītas ķēdes ar vairākiem enerģijas avotiem (2.48. att.) aprēķinu var aizstāt ar vairāku (dotajā gadījumā divu) tādu ķēžu aprēķinu, kurās katrā ir viens enerģijas avots.

*Parciālo strāvu aprēķins*.

Pieņem, kā ķēdes EDS *E*2 = 0 un ka ķēdē darbojas tikai EDS *E*1, bet visas pretestības, paliek bez izmaiņām (2.52. att.). Parciālās strāvas *I’*1, *I’*2 un *I’*3 aprēķina kā zaru strāvas pretestību jauktajā slēgumā ar vienu avotu:







2.2. Pieņem, ka ķēdes EDS *E*1 = 0 un ka ķēde darbojas tikai EDS *E*2 (2.53. att.). Šīs ķēdes parciālās strāvas:







2.3. Aprēķina ķēdes zaru patiesās strāvas, algebriski summējot attiecīgo zaru parciālās strāvas:



Mīnusa zīme strāvai *I*3 nozīme, ka tās patiesais virziens ir pretējs shēmā parādītajam (2.48. att.).

Iegūto rezultātu pārbaudei var izmantot pirmo Kirhofa likumu. Uzrakstām to mezglam A un pārliecināmies, ka aprēķina rezultāti saskan ar to

*I*1 + *I*2 + *I*3 = 2 + 2 + (-4) = 0.

Tādējādi uzdevums ir atrisināts pareizi.

5. *Jaudu aprēķins*. Sastādīsim jaudu bilanci piemērā aprēķinātajai shēmai. Vispirms konstatējam, ka avota (ģeneratora) režīmā darbojas EDS *E*1 un *E*2. Tiešām *E*1 un *I*1, *E*2 un *I*2 bultiņu virziens sakrīt.

Avota (ģeneratora) jauda

*P*avotu = *E*1· *I*1 + *E*2· *I*2 = 100·2 + 120·2 = 200 + 240 = 440 W.

Patērētāji ir visi rezistīvie elementi un avotu iekšējās pretestības. Kopēja patērētā jauda



Patērētā jauda ir vienāda ar ģenerēto jaudu, tātad aprēķins izdarīts pareizi.

**2.19. EKVIVALENTĀ ĢENERATORA METODE. DIVPOLS**

Šī metode ir vislietderīgākā tad, kad sazarotai elektriskajai ķēdei jāatrod tikai viena zara strāvas, ja mainās šī zara pretes­tība.

Metodes būtība ir tāda, ka dotās sazarotās ķēdes visu EDS avotu iedarbību uz ķēdes pētāmo zaru aizstāj ar ekvivalento ģeneratoru un atrod tā EDS un iekšējo pretestību.

Pieņemsim, ka 2.54. attēlā *a* parādītajai ķēdei jāatrod, kā mai­nās zara strāva *I*2, mainoties šī zara pretestībai *R*2, citiem vār­diem,— jāatrod sakarība *I*2 = *f* (*R*2).

Neatkarīgi no ķēdes struktūras un komplicētības izdalām tikai ķēdes pētāmo zaru, bet visu pārējo shēmu apzīmējam ar taisn­stūri, kura spailēm *A* un *B* pievienojam pētāmo zaru (2.54. att. *b*).

Shēmas daļu, kas apzīmēta ar taisnstūri un divām spailēm, attiecībā pret izdalīto zaru ar pretestību *R*2 sauc par d i v p o l u.

Tātad divpols ir kādas shēmas vispārināts apzīmējums. Vis­pārīgā gadījumā divpolā atrodas vismaz viens EDS avots.

Divpolu ar EDS avotu sauc par aktīvu divpolu (apzīmē ar *a*). Divpola iekšējo pretestību, t.i., pretestību starp tā spailēm *A* un *B* sauc par divpola ieejas pretestību un apzīmē ar *R*1.

Pieņemsim, ka no divpola spailes A (2.55. att. *a*) atvienota pretestība *R*2. Tad *I*2 = 0, un tādēļ spriegumu starp divpola spai­lēm A un C sauc par divpola tukšgaitas spriegumu *U*0.

Pēc strāvas *I*2 virziena (2.54. att. *b*) var secināt, ka spailes A *φA > φC* potenciāls ir augstāks nekā spailes B potenciāls (*φA > φB*), un tādēļ *U*0 = *φA* - *φC*.

|  |  |
| --- | --- |
| ***a*** | ***b*** |

2.54. att. Sazarota ķēde ar pētāmo zaru *R*2 (*a*) un tai ekvivalenta shēma ar aktīvu divpolu (*b*).

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| ***a*** | ***b*** | ***c*** |

2.55. att. Aktīvs divpols ar pētāmo zaru *R*2.

Ja starp spailēm C un B ieslēdz tādu EDS avotu, kura elektrodzinējspēks *E*1 ir skaitliski vienāds ar divpola tukšgaitas sprie­gumu *U*0 un tam pretēji vērsts (2.55. att. *b*), tad potenciāli *φA = φC* un, savienojot spailes A un C, zarā *R*2 strāva neplūst (*I*2 = 0). Bet, ja divpolam pieslēgtajā zarā strāva *I*2 = 0, tad tas nozīmē, ka zarā ieslēgtais elektrodzinējspēks *E*1 kompensē divpola elektro­dzinējspēka *E* darbību uz zara pretestību *R*2.

Lai divpolam pieslēgtajā, zarā ar pretestību *R*2 uzturētu pa­tieso strāvu *I*2, tad šajā zarā jāieslēdz vēl viens avots, kura elektrodzinējspēks *E*2 = *E*1 = *U*0, bet virziens pretējs elektrodzinējspēka *E*1 virzienam (2.55. att. *c*). Tā kā virknē slēgto avotu elektrodzinējspēki *E*1 un *E*2 viens otru kompensē (to iekšējās pretestības vienādas ar nulli), tad zarā ar *R*2 tiešām plūdīs sākotnējā virziena un lieluma strāva *I*2.

Bet, tā kā divpola elektrodzinējspēka *E* darbību zarā *R*2 kom­pensē elektrodzinējspēka *E*1 darbība, tad šos abus EDS turpmāk var atmest, t. i., aktīvu divpolu a var aizvietot ar pasīvu div­polu *p* (divpols bez EDS) un izdalītajā zarā ieslēgtu elektrodzinējspēku *E*2 (2.56. att. *a*).

Pasīvs divpols ir elektriskās enerģijas patērētājs, un to rak­sturo tikai ieejas pretestība *R*1.

Tādu elektrodzinējspēka *E*2 = *U*0 un pretestības *R*1 kopumu var uzskatīt par ekvivalentu ģeneratoru, kura elektrodzinējspēks *E*2 = *U*0 un iekšējā pretestība ir *R*1 (2.56. att. *b*).

Tādējādi attiecībā pret izdalīto zaru *R*2 visu pārējo shēmu var aizvietot ar ekvivalento ģeneratoru.

Tad meklējamo sakarību *I*2 = *f*(*R*2) izsaka Oma likuma izteiksme noslēgtai ķēdei ar EDS avotu, kura iekšējā pre­testība ir *R*1 un ārējās ķēdes pretestība

 vai  (2.77)

|  |  |
| --- | --- |
| ***a*** | ***b*** |

2.56. att. Shēma ar pasīvu divpolu (*a*) un shēma ar ekvivalento ģeneratoru (*b*).

Zara strāvas *I*2 atrašanai jāzina ek­vivalentā ģeneratora tukšgaitas sprie­gums *U*0 un iekšējā pretestība *R*1.

Šos lielumus var noteikt eksperimen­tāli, ja pētāmā ķēde ir pieejama. Sprie­gumu *U*0 izmēra ar spailēm A un B pievienotu voltmetru ekvivalentā ģene­ratora tukšgaitas režīmā (pretestība *E*2 atslēgta), bet iekšējo pretestību *R*1 at­rod ekvivalentā ģeneratora īsslēguma režīmā: spailēm A un B pieslēdz ampērmetru ar ļoti mazu pretestību (*R*2 = 0) un no tā nolasa īsslēguma strāvu *I*k. Saskaņā ar izteiksmi (2.71) īsslē­guma režīmā



un



Tādēļ iztirzāto aprēķina metodi sauc arī par tukšgaitas un īsslēguma metodi.

Ekvivalentā ģeneratora *U*0 = *E*2 un *R*1 var noteikt arī analītiski, ja dota sazarotās ķēdes shēma.

Tā, piemēram, 2.54. attēlā *a* parādītajai sazarotajai ķēdei, ja pretestība *R*2 atvienota, spriegumu *U*0 var izteikt ar sprieguma kri­tumu pretestībā *R*1 t. i.,

*U*0 *= I*1*R*1.

Tā kā



tad



Pretestība *R*1 dotajā shēmā ir ekvivalentā pretestība starp divpola spailēm A un B:



***2.23. piemērs.*** Nosakām strāvu zarā AB (rezistorā *R*2), izmantojot *ekvivalentā ģeneratora metodi*. Šī metode ir ērta elektrisko lielumu (strāvas, sprieguma, jaudas u.c.) noteikšanai sarežģītas ķēdes vienā zarā. Metodes priekšrocības salīdzinājumā ar citām metodēm īpaši izpaužas tad, ja pētāmā zara pretestības mainās (mainīga slodze).

*Ekvivalentās shēmas sastādīšana*. Aplūkojamo ķēdi (2.48. att.) attiecībā pret mezgliem var sadalīt divās daļās (2.57. att.): pētāmais zars ar pretestību *R*3 (sauksim to par shēmas ārējo daļu) un visa pārējā ķēde (sauksim to par shēmas iekšējo daļu).

Abas shēmas daļas 2.57. attēlā savienotas ar svītrlīnijām AG un BF (katra līnija pieder vienam mezglam).

Saskaņā ar teorēmu par ekvivalento EDS avotu visu shēmas iekšējo daļu var aizstāt ar vienu barošanas avotu, kura EDS ir *Eekv* un pretestība – *Rekv* (2.57. att. zars ADCB). Veicot šādu aizvietošanu, 2.48. attēla sākuma shēma pārveidojas vienkāršā nesazarotā ķēdē (2.58. att.), kuras aprēķins lielas grūtības nesagādā.

|  |  |
| --- | --- |
| 2.57. att. Ķēdes sadalīšana iekšēja un ārējā daļa. | 2.58. att. Pārveidota ķēde ar ekvivalento  EDS avotu. |

*Ekvivalentā EDS avota parametru aprēķins*. Ekvivalentā EDS avota EDS *Eekv* ir vienāds ar spriegumu uz ķēdes iekšējās daļas izvadiem, ja ārējā ķēdes daļa ir atslēgta (tukšgaitas režīms) (2.57. att.). Mūsu uzdevumā tas nozīmē, ka ekvivalentais EDS *Eekv* ir vienāds ar spriegumu starp shēmas punktiem A un B tukšgaitas režīmā *Eekv* = *UAB* = *E*2 *– (R*02 *+ R*2*)∙I* vai *Eekv* = *UAB* = - *E*1 *– (R*01 *+ R*1*)∙I*, kur *I* – strāva kontūrā ADCBA (2.57. att.). Tā kā pretestība *R*3 ir atslēgta, tad strāvu *I* aprēķinām, izmantojot otro Kirhofa likumu



bet *Eekv* = *E*2 *– (R*02 *+ R*2*)∙I* = 120 - 20∙0,67 = 106,6 V. Šis EDS *Eekv* ārējā ķēdē darbojas no punkta A uz punktu B, kas arī ievērots 2.58. attēlā.

Tālāk nosakām ekvivalentā avota iekšējo pretestību *Rekv*. Šai nolūkā izslēdzam visu shēmas iekšējās daļas EDS darbību, t.i., EDS *E*1 un *E*2 darbību (2.57. att.), un atrodam shēmas ekvivalento (kopējo) pretestību, ja attiecībā pret izvadiem (2.57. att. punkti A un B) ir tukšgaitas režīms:



Ekvivalentajā shēma (2.58. att.) strāva



*Strāvas un pretestības sakarības I3(R3) noteikšana*.



Izmantojot iegūto vienādojumu mēs varam aprēķināt strāvas vairākām *R*3/*R*ekv un *R*3 vērtībām (2.6. tab.). Rezultāti rāda, ka strāva, pieaugot *R*3, samazinās pēc hiperbolas likuma (2.59. att.).

*Jaudas un pretestības sakarības noteikšana*. Zinot strāvu *I*3 un pretestību *R*3 (2.6. tab.), aprēķinām slodzes jaudu  un konstruējam tās grafiku (2.59. att.). Lielākās jaudas režīms ārējā ķēdē *Pmax* (2.47. att.) ir tad, ja *R*3 = *Rekv*.

Lietderības koeficienta un pretestības sakarības noteikšana.



2.6. tabula

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| ***R*3/*Rekv*** | 0 | 0,5 | 1,0 | 1,5 | 2 | 2,5 | 3 | 3,5 | 4 | 4,5 | 5 |
| ***R*3, Ω** | 0 | 3,335 | 6,67 | 10 | 13,34 | 16,68 | 20,01 | 23,34 | 26,68 | 30,02 | 33,35 |
| ***I*3, A** | 16 | 10,67 | 8 | 6,4 | 5,33 | 4,57 | 4 | 3,56 | 3,2 | 2,91 | 2,67 |
| ***P*, W** | 0 | 379,7 | 426,9 | 409,8 | 379,0 | 348,3 | 320,2 | 295,9 | 273,2 | 254,2 | 237,8 |
| ***η*, %** | 0 | 0,33 | 0,5 | 0,6 | 0,67 | 0,714 | 0,75 | 0,78 | 0,8 | 0,82 | 0,83 |

Aprēķinām lietderības koeficientu raksturīgajiem režīmiem:

ja *R*3 = 0,  ja *R*3 = *Rekv*,  jeb 50 %;

ja *R*3 = ∞,  jeb 100 %.

|  |
| --- |
| 2.59. att. Jaudas, strāvas *I*3 un lietderības koeficienta *η* grafiska atkarība no ārējās ķēdes  pretestības *R*3 un avota ekvivalentās iekšējās pretestības *Rekv* attiecības. |

Tādējādi lietderības koeficients palielinās, pieaugot attiecībai *R*3/*Rekv*, un maksimālo vērtību (100 %) teorētiski sasniedz tukšgaitas režīmā.

**2.20. ČETRPOLS**

Par četrpolu sauc shēmas daļu, kas satur divus spaiļu pārus. Apzīmējam elektriskās ķēdes tās spailes, kurām pieslēdz enerģijas avotu, ar 1' —1",bet spailes, kurām pieslēdz patērētāju, ar 2' — 2".Elektriskās ķēdes posmu ar dīvām ieejas (1'—1") un divām izejas spailēm (2' — 2")sauc par *četrpolu* (2.60. att.); ja četrpola nav enerģijas avota, tad to pieņemts saukt par *pasīvu* četrpolu. Tātad visvienkāršākie pasīvie četrpoli ir līnijas vadi, trīskontaktu reostats utt.

Ja ķēdes starpposms ir sarežģītāks (ja tajā ir jebkurš pretestību skaits), to var aizstāt ar ekvivalentu četrpolu, kurā pretestības savienotas zvaigzne (T-veida ekvivalentā shēma, 2.61. att.) vai trijstūrī (П-veida ek­vivalentā shēma, 2.62. att.).

Atrodam pamatsakarības (četrpola vienādojumus) starp spriegumu *U1* uz ieejas spailēm, strāvu *I*1ieejas kontūrā un spriegumu *U*2 uz izejas spailēm un strāvu *I2* izejas kontūrā (2.60. att.).

|  |
| --- |
|  |

2.60. att. Četrpols.

|  |  |
| --- | --- |
| 2.61. att. *T* - veida ekvivalenta shēma | 2.62. att. Π- veida ekvivalentā shēma |

Jebkura pasīva četrpola elektrisko shēmu pakāpeniski pārveidojot, to var reducēt līdz tā saucamai „T” veida (2.61. att.) vai „Π” veida shēmai (2.62. att.).

T-veida ķēdē, kurā trīs pretestības savienotas zvaigznē (2.61. att.), strāva četrpola ieejas kontūrā

*I1* = *I*2 + *I*0 = *I*2+ (*U*2 + *I*2 *R2*)

Spriegums uz ieejas spailēm:



Apzīmējot

 (2.78)

iegūstam meklētos četrpola vienādojumus:

*U1 = AU2 + - BI2;*  (2.79)

*I1 = CU2 + DI2;*

Π-veida ķēdē ar trim pretestībām, kas savienotas trīsstūrī (2.62 att.),



**

t. i., apzīmējot



iegūstam atkal vienādojumus (2.79).

**2.21. ČETRPOLA KONSTANTES**

Lielumus *A, B, C* un *D* sauc par *četrpola konstantēm*. Četrpola konstantes *A* un *D* ir nenosaukti skaitļi, konstantei *B* ir pretestības dimensija, bet konstantei C — vadītspējas dimensija. Starp četrpola konstantēm pastāv sakarība

*AD — BC* = 1.(2.80).

Tiešām, aprēķinot, piemēram, T-veida ķēdei pirmo reizinājumu



un otro reizinājumu



pārliecināmies, ka

*AD=*1*+BC* jeb *AD* - *BC =*1.

Ja četrpola ieejas un izejas spailes apmaina vietām, t. i., sprie­gumu *U*2pievada spailēm 2' — 2", kuras tagad ir ieejas spailes, un izejas spailes 1' — 1"noslēdz caur to pašu pretestību *R,* tad četrpola vienādojumi, kā rāda aprēķins, uzrakstāmi šādi (strāvu virzieni ir pretēji sākotnējiem):

*U*2 *= DU*1 *+ BI*1; (2.81)  
 *I*2 *= CU*1 + *AI*1.

Salīdzinot šos vienādojumus ar vienādojumiem (2.79), var kon­statēt, ka konstantes *A* un *D* ar apmainījušās vietām.

Četrpolu sauc par *simetrisku*, ja, mainot vietām spailes 1' — 1"un spailes 2' — 2",ieejas un izejas spriegums un strāva nemainās. Lai šie lielumi nemainītos, simetriska četrpola konstan­tēm *A* un D jābūt vienādām!

*A=D;*

ja *A* = *D,* četrpola vienādojumi nemainās, apmainot vietām ieejas un izejas spailes.

Tā kā ikvienu starpposmu (četrpolu), kurā pretestību skaits ir jebkurš, var aizstāt ar T-veida vai Π-veida ekvivalento ķēdi, tad iegūtās sakarības starp *U1, I1, U2* un *I2* ir vispārīgas, t. i., tās ir pareizas jebkuram pasīvam četrpolam.

**2.22. ČETRPOLA KONSTANTU APRĒĶINĀŠANA**

Apzīmējam spriegumu starp spailēm 1'—1" tukšgaitā (t. i., ja izejas spailes ir atslēgtas) ar 6%, bet strāvu ieejas kontūrā ar *I10*  (2.63. att.). Četrpola vienādojumi tukšgaitā (*I*2 = 0):

*U10 = AU2 + BI2 = AU2;*

*I10 = CU2 + DI2 = CU2.*

|  |  |
| --- | --- |
| 2.63. att. Tukšgaitas mērījuma shēma | 2.64. att. Īsslēguma mērījuma shēma |

Īsslēguma gadījumā (spailes 2' — 2"noslēgtas īsi, 2.64. att.) četrpola vienādojumi ir šādi (*U2* = 0):

*Ulk = AU2 + BI2 = BI2;*

*Ilk =CU2 + DL2 = DI2.*

Izmantojot šos divus mērījumus no ieejas spaiļu puses, rakstām

 (2.82)

Apmainot vietām ieejas un izejas spailes un atceroties, ka konstantes *A* un *D* mainās vietām, iegūstam no vienādojumiem (2.81) divas papildu sakarības:



Izvēloties jebkuras trīs no šīm sakarībām (ceturtā ir trīs pārējo sekas) un ievērojot sakarību *AD — BC=* l, var aprēķināt četrpola konstantes *A, B, C* un *D.*

Piemēram,



no kurienes

 (2.83)

Kad aprēķināta konstante C, viegli iegūt pārējās:

 (2.84)

Izmantojot iegūtās *A*, *B, C* un *D* vērtības, var aprēķināt, pie­mēram [ar formulu (3-55) palīdzību], T-veida ekvivalentās ķēdes parametrus:

 (2.85)

**2.23. ČETRPOLA PĀRBAUDE**

Pārbaudot četrpolus, ir jāuzzina *U1* un *I1* ja patērētāja darba režīms, t. i., lielumi *U2* un *I*2, ir dots. Var izrādīties, ka pārbaudē nepieciešams barošanas avots ar ļoti lielu jaudu (ja izejas jauda *P2=U2I2* ir liela).

Grūtību nav, ja četrpolu pārbauda ar tukšgaitas un īsslēguma mērījumiem. Sājos režīmos izejas jauda praktiski ir vienlīdzīga nullei (tā ir vienāda ar mēraparātu jaudu), bet barošanas avota jaudu nosaka zudumi četrpola.

Tukšgaitas režīmā (2.65. att.) spriegumam uz spailēm 2' — 2" jābūt vienādam ar doto vērtību *U*2, ko konstatē ar voltmetru *PV*2. Šai nolūkā ar ieejas ķēdē ieslēgtām regulējošām iekārtām ieregulē spriegumu ieejā *U*10.

|  |
| --- |
|  |

2.65. att. Tukšgaitas mērījuma shēma četrpola pārbaudei.

Īsslēguma režīmā (2.66. att.) ieejas spriegumam *U*1*k* jābūt tik lielam, lai izejas ķēdē plūstu dotā strāva I2, ko ieregulē sa­skaņā ar ampērmetra A2 rādījumiem.

Ieejas spriegums tukšgaitas režīmā (*I*2 *=* 0)

*U*10 *= AU*2. (2.86)

Strāva ieejas ķēde

*I*10 *= CU*2. (2.87)

Ieejas spriegums īsslēguma režīmā *(U2 = 0)*

*Ulk=BI2.* (2.88)

|  |
| --- |
|  |

2.66. att. Īsslēguma mērījuma shēma četrpola pārbaudei.

Strāva ieejas ķēdē

*I*l*k = DI*2. (2.89)  
 Tātad no tukšgaitas un īsslēguma mērījumu rezultātiem izriet,

*U*1 *= AU*2 *+ B I*2= *U*10 + *U*1*k*  (2.90)

*I*1 *= C U*2 *+ D I*2 *= I*10 *+ I*l*k,* (2.91)

t.i., dotajā patērētāja darba režīmā *U*1 un *I*1 aprēķina, izmantojot četrpola tukšgaitas un īsslēguma režīma superpozīcijas principu.

**2.24. ELEKTRISKĀS STRĀVAS SILTUMDARBĪBA**

Katrs vadītājs, pa kuru plūst elektriskā strāva, sasilst, jo strāva tajā izdala siltumu. Strāvas siltumdarbība izpaužas rak­sturīga elektriskās enerģijas īpašība — tās spēja tieši pārveidoties siltumā.

Saskaņā ar Džoula—Lenca likumu nemainīga strāva *I* vadī­tājā ar pretestību *R* omi *t* sekundēs izdala siltuma daudzumu *Qt* (J):

*Qt = I*2*∙R∙t.* (2.92)

Elektriskās strāvas siltumdarbībai ir ļoti liela nozīme elektro­enerģētikā, jo daudzas tehnikas nozares — elektriskā apgaisme, elektriskā metināšana, metālu termiskā apstrāde, kā arī sadzīvē un rūpniecībā izmantojamās sildierīces un metālu kausēšanas iekārtas, elektronu un jonu aparāti — pilnīgi vai daļēji bāzējas uz strāvas siltumdarbību. Elektriskajai apgaismei lieto elektriskās kvēlspul­dzes ar jaudas diapazonu 15—1500 W.

Kvēlspuldze sastāv no stikla balona, kurā ievietots volframa kvēldiegs (volframa kušanas temperatūra 3370 °C). Lai novērstu kvēldiega oksidēšanos, no balona izsūknē gaisu. Kvēlspuldzēm ar jaudu virs 40 W balonus piepilda ar inertu gāzi (kriptonu, argonu, slāpekli), kas ievērojami aizkavē volframa kvēldiega iz­tvaikošanu darba temperatūrā. Kvēldiega temperatūra vakuumspuldzēs sasniedz 2400°C, bet ar inertu gāzi pildītajās — līdz 2900 °C. Kvēlspuldzēm raksturīgs ļoti zems gaismas lietderības koeficients (kvēlspuldzes izstarotās gaismas jaudas attiecība pret pievadīto jaudu) — ap 3%; normālais nepārtraukta darba ilgums — 1000 stundas.

Atkarībā no tā, kā iegūst strāvas izdalīto siltumu metālu sametināšanai, izšķir kontaktmetināšanu un loka metināšanu.

Kontaktmetināšanā savienojamo detaļu saskares vietu sakarsē tai caurplūstošā strāva līdz plastiskam stāvoklim, jo saskarvietai ir relatīvi liela pārejas pretestība, kurā strāva izdala ievērojamu siltuma daudzumu. Ja detaļas mehāniski saspiež, to plastiskās saskarvietas sametinās.

Kontaktmetināšanas veidi ir sadurmetināšana, punktmetināšana un šuves metināšana.

**2.25. VADU ŠĶĒRSGRIEZUMA IZVĒLE, IEVĒROJOT**

**PIEĻAUJAMO SILŠANU**

Elektriskās enerģijas pārvades līnijās un elektrisko mašīnu un aparātu tinumos elektriskās strāvas izdalītais siltums ir ne­vēlams, jo tas var bojāt vadu izolāciju. Tādēļ enerģijas pārvades līnijā pieļaujamais sprieguma zudums Δ*U*% ir nepietiekams kri­tērijs līnijas vadu šķērsgriezuma laukuma izvēlei, un vadu šķērs­griezums jāizvēlas, ievērojot vadiem resp. vadu izolācijai pieļau­jamās temperatūras. Tādējādi sprieguma zuduma aprēķinam parasti ir tikai pārbaudes raksturs, izņemot apgaismes tīklu aprē­ķinus.

Strāvas siltumdarbībai homogēnā vadītājā var izsekot, izejot no sekojošiem apsvērumiem.

Vadītājā ar pretestību *R* plūstošā strāva *I* = const katrā se­kundē izdala siltuma daudzumu Q (J/s):

*Q = I*2*R*. (2.93)

Daļa šī siltuma uzkrājas vadītājā un paaugstina tā tempera­tūru, bet pārējo siltuma daudzumu vadītājs atdod apkārtējai videi.

Vadītājā uzkrātais siltuma daudzums *QU*, kas vadītāja tem­peratūru paceļ par *τ* grādiem, ir tieši proporcionāls vadītāja siltuma ietilpībai *C* (J/K-1):

*QU = C∙ τ*. (2.94)

Vadītāja virstemperatūra

*τ = θ – θ*0. (2.95)

kur *θ* — vadītāja temperatūra;

*θ*0 — apkārtējās vides temperatūra.

Siltuma daudzums *Qa*, ko vadītāja virsma katrā sekundē atdod apkārtējai videi, ir proporcionāls vadītāja virstemperatūrai *τ* un vadītāja virsmas laukumam *Sv*:

*Qa = αSvτ* (2.96)

kur *α* — siltuma pārejas koeficients no vadītāja vir­smas uz apkārtējo vidi.

Vadītāja virstemperatūru *τ* pēc t sekundēm no momenta, kad vadītājā sāk plūst strāva *I* = const, var aprēķināt pēc sakarības

 (2.97)

kur *T* — vadītāja silšanas laika konstante:

 (2.98)

Redzam, ka vadītāja virstemperatūra *τ* pieaug pēc eksponenciālas likumsakarības (2.67. att.), kamēr iestājas stacionārs temperatūras režīms. To raksturo stacionāra virstemperatūra *τS = τ max* = const, kuru teorētiski sasniedz bezgalīgi ilgā laika (*t* = ∞), bet praktiski — laika sprīdī *t ≈* 4*T* (kļūda ne­pārsniedz 2%). Stacionārā tem­peratūras režīmā vadītājā uz­krātais siltuma daudzums vairs nepieaug (*θ* = const), jo tad visu strāvas izdalīto siltumu vadītājs atdod apkārtējai videi (*Q = Qa*.). No izteiksmes (2.97) dabū, ka vadītāja maksimālā (stacio­nārā) virstemperatūra

 (2.99)

Cilindriskas formas kailvadiem ar garumu *l*, diametru *d* un šķērsgriezuma laukumu S stacionārā temperatūras režīmā sa­skaņa ar izteiksmēm (2.92) un (2.95)

*I*2*R* = *αSv τmax* vai 

un

 (2.100)

t. i., vada stacionārā virstemperatūra ir tieši proporcionāla strā­vas kvadrātam un ir atkarīga no vada materiāla, šķērsgriezuma un dzesēšanas apstākļiem.

Izolētiem vadiem pieļaujamo *τ max* un pieļaujamo temperatūru *θmax* ierobežo vadu izolācijas materiāla siltumizturība, bet kailvadiem un vadstieņiem— savienojuma vietu kontakta drošība. Tā vadiem un kabeļiem ar gumijas izolāciju ilgstoši pieļaujamā maksimālā temperatūra ir 55°C, kailvadiem un vadstieņiem 70 °C un kabeļiem ar papīra izolāciju 80 °C.

|  |  |
| --- | --- |
|  | 2.67. att. Homogēna vadītāja silšanas līkne. |

No izteiksmes (2.100) var atrast cilindriskas formas vada mi­nimālo diametru, kāds no silšanas viedokļa nepieciešams izvēlētā materiāla (γ) vadam ilgstošai strāvas *I* = const pārvadīšanai no­teiktos dzesēšanas apstākļos (α) ar zināmu ilgstoši pieļaujamo virstemperatūru (*τ max*):

 (2.101)

Tomēr praktiskai vadu šķērsgriezuma izvēlei izteiksme (2.101) nav piemērota, jo vadu dzesēšanas apstākļi ir ļoti dažādi.

Praksē vadu šķērsgriezumu, ievērojot vadiem pieļaujamo silšanu, izvēlas no īpašām tabulām, kurās dotas dažādu vadītāju (izolētu vadu, kailvadu, kabeļu) normētajiem šķērsgriezumiem ilgstoši pieļaujamās maksimālās (normētās) strā­vas *Ipieļ*. Šo strāvu vērtības iegūtas eksperimentāli.

Atkarībā no tā, kur un kā novieto (montē) vadus, ir jāizvē­las videi un novietojumam piemērota vadu marka.

Vadu un kabeļu šķērsgriezumus pēc silšanas izvēlas no tabu­lām atbilstoši aprēķinātajai darba strāvai *Id* tā, lai

*Ipieļ ≥ Id*. (2.102)

Piemēram, ja darba strāvai *Id* = 24 A jāizvēlas divu tērauda caurulē ievietojamu viendzīslas alumīnija vadu šķērsgriezums S, tad no 2.7. tabulas dabū, ka *S* = 4 mm2, kam ilgstoši pieļaujamā strāva *Ipieļ* = 28 A > *Id* = 24 A.

2.7. tabula

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **Vada**  **šķērsgriezums, mm2** | **Ilgstoši pieļaujamā strāva ampēros vara/alumīnija vadiem** | | | |
| **Atklāti**  **novietoti vadi** | **Vadi caurulē** | | |
| **divi viendzīslas** | **trīs viendzīslas** | **četri viendzīslas** |
| 0,5 | 11/— | — | — | — |
| 0,75 | 15/— | — | — | — |
| 1,0 | 17/— | 16/— | 15/— | 14/— |
| 1,5 | 23/— | 19/— | 17/— | 16/— |
| 2,5 | 30/24 | 27/20 | 25/19 | 25/19 |
| 4 | 41/32 | 38/28 | 35/28 | 30/23 |
| 6 | 50/39 | 46/36 | 42/32 | 40/30 |

Pēc pieļaujamās silšanas izvēlēta vada šķērsgriezuma derī­gumu pārbauda, aprēķinot vada šķērsgriezumu arī pēc pieļaujamā sprieguma zuduma. Ja pēdējais šķērsgriezums iznāk lielāks par pirmo, tad vada šķērsgriezums jāizvēlas pēc pieļaujamā sprie­guma zuduma.

Pēc tam izvēlas kūstošā drošinātāja ieliktņa nominālo strāvu *Idr* atbilstoši patērētāja raksturam.

Beidzot vēl jāpārbauda pēc izteiksmes (2.103), vai izvēlētais drošinātāja ieliktnis (*Idr*) aizsargā vadu ar izvēlēto šķērsgriezumu (*Ipieļ*):

*Ipieļ ≥ K*0*Idr*, (2.103)

kur *K*0 —aizsardzības atbilstības koeficients.

Ja šis noteikums netiek izpildīts, tad, jāizvēlas tuvākā lielākā normētā šķērsgriezuma vads.

Spēka un apgaismes tīkliem ražošanas telpās *K*0 = 0,33, vadiem ar gumijas vai siltumizturības ziņā līdzīgu izolāciju dzīvojamās, sabiedriskās, dienesta un tml. telpās *K*0 = 1,25, kabeļiem ar papīra izolāciju jebkurās telpās *K*0 = 1.

**3. NODAĻA**

**LĪDZSTRĀVAS NELINEĀRĀS ĶĒDES**

**3.1. ELEKTRISKĀS ĶĒDES NELINEĀRIE ELEMENTI**

Elektriskās ķēdes elementu, kura pretestība *R* nav atkarīga no caurplūstošās strāvas *I* vai tam pievienotā sprieguma *U*, sauc par lineāru elementu. Saskaņā ar Oma likumu strāva lineārā elementā ir tieši proporcionāla tā spriegumam, jo *R* = const.

Sakarības *I = f*(*U*) grafisko attēlu, kas parāda ķēdes elemen­tam caurplūstošās strāvas atkarību no tam pievienotā sprieguma, sauc par voltampēru raksturlīkni.

Elektriskās ķēdes lineāra elementa voltampēru raksturlīkne *I = f*(*U*) ir taisne, kas iet caur koordinātu sākumu (3.1. att.) un grafiski attēlo Oma likumu ķēdes posmam ar nemainīgu pretes­tību.

Raksturlīknes slīpuma leņķis a pret ordinātu asi ir atkarīgs no elementa pretestības r:



kur *mU*, *mI*, *mR* — sprieguma, strāvas un pretestības mērogi.

Elektriskās ķēdes, kuras sastāv tikai no lineāriem elementiem, sauc par lineārām ķēdēm.

|  |
| --- |
| 3.1. att. Lineāra elementa voltampēru raksturlīkne. |

Līdzstrāvas lineārās ķēdes aprēķina ana­lītiski, izmantojot Oma un Kirhofa likumus, kā tas paskaidrots otrajā nodaļā.

Patiesībā lineāru elektrisko ķēžu nav, jo, mainoties strāvai, mainās vadītāja tempe­ratūra un tātad arī vadītāja pretestība. Taču daudzos gadījumos atsevišķo ķēdes ele­mentu pretestību izmaiņas ir tik niecīgas, ka šos ķēdes elementus var uzskatīt par lineā­riem (piemēram, šunti, papildpretestības u. c).

Praksē tomēr ļoti bieži sastopami tādi elektrisko ķēžu elementi, kuru pretestība ir jūtami atkarīga no caurplūstošās strāvas vai pievienotā sprieguma. Tādus ķēdes elementus sauc par neli­neāriem, jo tiem sakarība *I = f*(*U*) ir nelineāra. Elektriskās ķēdes ar vienu vai vairākiem nelineāriem elementiem sauc par nelineārām ķēdēm. Šo ķēžu aprēķināšanai nevar lietot Oma likumu un otro Kirhofa likumu.

Nelineāros elementus — elektronu lampas, pusvadītāju taisngriežus, jonu aparātus, stabilizatorus, magnētiskos pastiprinātā­jus u. c. — ļoti plaši izmanto dažādās tehnikas nozarēs.

Pazīstamākais nelineārais elements ir kvēlspuldze, kurā plūs­tošā strāva kvēldiega temperatūru un pretestību izmaina visai plašā intervālā. Kvēlspuldžu voltampēru raksturlīknes parādītas 3.2. attēlā: *a* — kvēlspuldzei ar metāla kvēldiegu, kam ir pozitīvs pretestības temperatūras koeficients *αρ >* 0, un *b* — ar ogles kvēldiegu (pretestības temperatūras koeficients ir negatīvs *αρ* < 0). Raksturlīk­nes ir vienādas abiem strāvas virzieniem (tās ir simetriskas pret koordinātu asīm).

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| ***a*** | ***b*** | ***c*** | ***d*** |

3.2. att. Nelineāru elementu simetriskas voltampēru raksturlīknes.

Temperatūras mērīšanai un automātiskai regulēšanai, paze­mināta spiediena noteikšanai, strāvas laika releju izga­tauvošanai, kā arī gāzes sastāva nepārtrauktai konstatēšanai lieto termorezistorus, kuru darbības pamatā ir pretestības atkarība no temperatūras. Termorezistorus izgatavo no materiāliem kā ar pozitīvu *αρ* (3.2. att. c), tā ar negatīvu *αρ*.

Teorētiskā voltampēru raksturlīkne termorezistoram konstantā temperatūrā ir lineāra. Praktiski raksturlīknes uzņemšanas laikā rezistors caurplūstošās strāvas dēļ sa­silst, tā pretestība samazinās un līkne kļūst izteikti ne­lineāra. Termorezistora temperatūra atkarīga no izdalītā siltuma daudzuma, tādēļ līknes stāvoklis at­karīgs ne tikai no strāvas, bet arī no sprieguma paaug­stināšanas ātruma. Spriegumu paaugstinot lēnāk, termo­rezistora pretestība samazinās vairāk.

Varistora voltampēru raksturlīkne ir ļoti nelineāra un pilnīgi simetriska pretējiem strāvas virzieniem (3.2. att. *d*). Strāvas *I* nelineāro atkarību no sprieguma *U* apraksta vienādojums

*I = kUβ*,

kur *k* — koeficients, kas atkarīgs no materiāla īpašībām un varistora izmēriem;

*β* — nelinearitātes koeficients, kura skaitliskā vērtība var sasniegt 7.

Varistora voltampēru raksturlīkne nav izskaidrojama ar pusvadītāju vispārīgām īpašībām, bet tikai ar varis­tora materiāla īpatnējo sastāvu un struktūru. Starp atse­višķiem silīcija karbīda kristāliskajiem graudiņiem mate­riālā atrodas biezākas vai plānākas saistvielas vai oksīda kārtiņas. Strāva varistora plūst pa daudzām kristālisko graudiņu ķēdītēm, kurās kontaktpretestība starp graudi­ņiem ir relatīvi maza. Paaugstinot spriegumu, kontakt­pretestība starp atsevišķiem graudiņiem samazinās gan elektronu emisijas, gan kontaktlaukumiņu mikrosasilšanas, gan izolācijas kārtiņu caursites rezultātā. Tādēļ pie­aug strāva šajās ķēdītēs, kā arī palielinās paralēlo ķēdīšu skaits, pa kurām plūst strāva. Pazeminot pieslēgto sprie­gumu, kontaktpretestība atkal palielinās, tādēļ varistora pretestība atgūst sākotnējo vērtību.

Pēc izmantošanas veida izšķir augstsprieguma un zemsprieguma varistorus.

Augstsprieguma varistorus lieto elektroenerģijas pār­vades līniju aizsardzībai pret pārspriegumu. Šim nolūkam, izmanto keramiskā korpusā iemontētus vilīta diskus. Nor­mālā līnijas darba režīmā vilīta pārsprieguma novadītāja pretestība ir ļoti liela un strāva tajā niecīga. Ja līnijā rodas pārspriegums, novadītāja pretestība strauji sama­zinās, un atpildes strāva caur novadītāju aizplūst zemē. Pēc tam, spriegumam pazeminoties, pārsprieguma nova­dītāja pretestība atkal atgūst nominālo vērtību.

Zemsprieguma varistorus, kuru darba spriegums ir 3…200 V, lieto radiotehnikas un automātikas shēmās, kā arī skaitļošanas tehnikā. Šos varistorus izgatavo no tirīta vai letina. Varistoru darba temperatūra parasti ir -50...+ 80°C.

Pusvadītāju diodes, tuneļdiodes un dinistora voltampēru raksturlīknes raksturlīkne parādītas 3.3. attēlā.

Izšķir simetriskas un nesimetriskas (attiecībā pret koordinātu asīm) nelineāru elementu voltampēru raksturlīknes.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| ***a*** | ***b*** | ***c*** |

3.3. att. Nelineāru elementu nesimetriskas voltampēru raksturlīknes (*a* – diode,

*b* -tuneļdiode, *c* – dinistors).

Nelineāriem elementiem ar simetriskām voltampēru rakstur­līknēm (3.2. att.) pretestības jebkurai strāvas vērtībai nav atka­rīgas no strāvas virziena. Tādus nelineārus elementus izmanto kā līdzstrāvas, tā arī maiņstrāvas ķēdēs.

Nelineāriem elementiem ar nesimetriskām voltampēru rakstur­līknēm (3.3. att.) pretestības ir atkarīgas no strāvas virziena. Šāda rakstura nelineārus elementus lieto maiņstrāvas ķēdēs. Šīs grupas nelineāros elementus — elektronu un pusvadītāju diodes, dažādus jonu aparātus — plaši izmanto maiņstrāvas taisngriešanai, t. i., maiņstrāvas pārveidošanai līdzstrāvā.

**3.2. NELINEĀRU ĶĒZU GRAFISKA APRĒĶINĀŠANA**

Līdzstrāvas nelineārās ķēdes var aprēķināt grafiski vai grafoanalītiski.

Grafiskajā aprēķinā izmanto ķēdes elementu voltampēru raksturlīknes, kuras parasti ir dotas (vai ērti iegūstamas). Grafiskā metode ir visai vienkārša, un tās lietošanu neierobežo nelineāro elementu voltampēru raksturlīkņu forma.

Zemāk iztirzāti paņēmieni, kā grafiski aprēķināmas raksturī­gas nelineāras ķēdes ar vienu avotu.

Nelineāra ķēde ar virknē slēgtu nelineāru un lineāru elementu (3.4. att. *a*). Ķēdes strāvu *I*, ja dots ķēdei pievienotais spriegums *U*, lineārā elementa pretestība *R* un nelineārā elementa voltampēru raksturlīkne *I = f*(*U*1), atrod šādi.

Tā kā spriegums uz nelineāro elementu

*U*1 *= U – U*2 *= U – IR*,

tad ķēdes strāvas izteiksmes

 (3.1)

grafiskais attēls ir taisne, kas krusto koordinātu asis punktos *K* un *M* (3.4. att. *b*). Punktu *K* un *M* koordinātes atrod, ja izteik­smē (3.1) ievieto sprieguma *U*1 robežvērtības:

ja *U*1 = 0, tad 

un ja *U*1 = *U*, tad *I* = 0.

Tajā pašā koordinātu plaknē mērogā iezīmējot arī nelineārā elementa voltampēru raksturlīkni *I = f*(*U*1), dabū līknes un taisnes krustpunktu *N*, kas raksturo vienīgo iespējamo ķēdes režīmu. Tā­tad punkta *N* ordināta *ND* izvēlētajā mērogā attēlo ķēdes strāvu *I*. Nogrieznis *OD* izvēlētajā mērogā izsaka nelineārā elementa spaiļu spriegumu *U*1 un nogrieznis *DM* — lineārās pretestības spaiļu spriegumu *U*2.

Ja ķēdē ir vairākas lineāras pretestības, kuras saslēgtas virknē ar nelineāru elementu, tad vispirms aprēķina lineāro elementu ekvivalento pretestību, pēc tam atrod ķēdes strāvu, kā iepriekš paskaidrots.

|  |  |
| --- | --- |
| ***a*** | ***a*** |
| ***b*** | ***b*** |
| 3.4. att. Ķēdes strāvas *I* grafiska noteikšana (*b*) neli­neāra un lineāra elementa virknes slēgumam (*a*). | 3.5. att. Nelineāru elementu virknes slēgums (*a*) un tā gra­fiska aprēķināšana (*b*). |

Ja jāatrod ķēdei pievienojamais spriegums *U* dotās strāvas *I* uzturēšanai, tad vienā koordinātu plaknē vienādā mērogā iezīmē nelineārā elementa voltampēru raksturlīkni *I = f*1(*U*1) un lineārā elementa voltampēru raksturlīkni *I = f*2(*U*2), kas ir caur koordinātu sākumu virzīta taisne, un izdara virknes slēguma grafisko aprēķinu, kā paskaidrots tālāk.

Nelineāra ķēde ar diviem virknē slēgtiem nelineāriem elementiem (3.5. att. *a*). Dotās nelineāro elementu voltampēru raksturlīknes *I = f*1(*U*1) un *I = f*2(*U*2) vienādā mērogā iezīmē vienā koordinātu plaknē (3.5. att. *b*).

Tā kā pretestību virknes slēgumā strāva *I* abos elementos ir viena un tā pati un ķēdei pievienotais spriegums *U* vienāds ar ķēdes atsevišķo elementu spriegumu summu, t. i.,

*U = U*1 + *U*2,

tad visas ķēdes voltampēru raksturlīkni *I = f*(*U*) dabū, ja grafiski summē patvaļīgi izraudzītām strāvas *I* vērtībām atbilstošās *U*1 un *U*2 vērtības (3.5. att. *b*). Ar ķēdes raksturlīknes *I* = =*f*(*U*) pa­līdzību var grafiski atrisināt divējādus uzdevumus.

Ja dots spriegums *U*, tad, atliekot uz abscisu ass tā vērtību un velkot ordinātu asij paralēlu taisni, līdz tā krustojas ar līkni *I = f*(*U*), dabū punktu *K*, kura ordināte izsaka meklējamo ķēdes strāvu *I*; punktiem M un N atbilstošās abscisas vērtības atbilst ķēdes elementu spaiļu spriegumiem *U*1 un *U*2.

Ja dota ķēdes strāva *I*, tad, atliekot uz ordinātu ass tās vēr­tību un velkot abscisu asij paralēlu taisni, dabū krustpunktus *M*, *N*, *K* un reizē ar to— ķēdei nepieciešamo spriegumu *U*, kā arī paredzamos spriegumus *U*1 un *U*2.

Līdzīgi rīkojas arī tad, kad virknē saslēgti vairāki nelineāri elementi.

Nelineāra ķēde ar diviem paralēli slēgtiem nelineāriem elementiem (3.6. att. *a*). Nelineāro elementu dotās voltampēru raksturlīknes *I*1 = *f*1(*U*) un *I*2 = *f*2(*U*) vienādā mērogā iezīmē vienā koordinātu plaknē (3.6. att. *b*).

Tā kā pretestību paralēlajā slēgumā ķēdes abi zari pievie­noti vienam un tam pašam spriegumam U un strāva I ķēdes nesazarotajā posma vienāda ar abu zaru strāvu summu, t. i.,

*I = I*1 *+ I*2,

tad visas ķēdes voltampēru raksturlīkni *I = f*(*U*) iegūst, grafiski summējot patvaļīgi izraudzītām sprieguma *U* vērtībām atbilsto­šās zaru strāvu *I*1 un *I*2 vērtības (3.6. att. *b*).

|  |  |
| --- | --- |
| ***a*** | ***a*** |
| ***b*** | ***b*** |
| 3.6. att. Nelineāru elementu pa­ralēlais slēgums (*a*) un tā gra­fiska aprēķināšana (*b*). | 3.7. att. Nelineāru elementu jauk­tais slēgums (*a*) un tā grafiska aprēķināšana (*b*). |

Arī par paralēlo slēgumu var atrisināt divējādus uzdevumus.

Ja dots spriegums *U*, tad grafiski atrod strāvas *I*, *I*1 un *I*2: uz abscisu ass atliek sprieguma *U* vērtību un, velkot ordinātu asij paralēlu taisni, iegūst trīs krustpunktus *K*, *M* un *N*, kuru ordinātes ir spriegumam *U* atbilstošo strāvu *I*, *I*1 un *I*2 vērtības.

Ja dota vienas strāvas, piemēram, *I*1 vērtība, tad, atliekot to uz ordinātu ass un no šī punkta (*I*1) velkot abscisu asij paralēlu taisni, līdz tā krustojas ar līkni *I*1 = *f*1(*U*), punkta *M* abscisas vērtība izsaka spriegumu *U*, bet punktu *N* un *K* ordinātas atbilst strāvu *I*2 un *I* vērtībām.

Nelineāra ķēde ar nelineāru elementu jaukto slēgumu (3.7. att. *a*). Nelineāro elementu voltampēru raksturlīknes *I = f*1(*U*1), *I*2 = *f*2(*U*23) un *I*3 = *f*3(*U*23) vienādā mērogā iezīmē vienā koordinātu plaknē (3.7. att. *b*).

Tad grafiski atrod, kā mainās ķēdes nesazarotā posma strāva *I* atkarībā no sprieguma *U*23, t. i., konstruē paralēlo zaru voltampēru raksturlīkni *I* = *f*4(*U*23), saskaitot dažādām *U*23 vērtībām atbilsto­šās līkņu *I*2 = *f*2(*U*23) un *I*3 = *f*3(*U*23) ordinātas.

Pēc tam grafiski atrod visas ķēdes voltampēru raksturlīkni *I* = *f*(*U*), saskaitot virknē slēgto posmu voltampēru raksturlīknēm *I* = *f*1(*U*1) un *I* = *f*4(*U*23) dažādām strāvas *I* vērtībām atbilstošās spriegumu *U*1 un *U*23 vērtības.

Izmantojot visas piecas voltampēru raksturlīknes, pēc zināmā ķēdes sprieguma *U* var noteikt strāvu un spriegumu vērtības ķē­des atsevišķiem posmiem, kā arī pēc dotās strāvas *I* var noteikt spriegumus *U*, *U*1, *U*23 un strāvas *I*2 un *I*3.

**3.1. piemērs.** Virkne ar kvēlspuldzi ieslēgts reostats, kura pretestība ir 80 Ω*.* Aprēķināt strāvu un atsevišķo ķēdes posmu spriegumus, jatīkla spriegums ir 120 V, bet spuldzes voltampēru raksturlīkni var konstruēt pēc seko­jošiem datiem:

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| U, V | 0 | 20 | 40 | 60 | 80 | 100 | 120 |
| I, A | 0 | 0,1 | 0,25 | 0,45 | 0,7 | 1,0 | 1,25 |

Izmantojot tabulas datus, konstruējam spuldzes voltampēru raksturlīkni (3.8. att.).

|  |
| --- |
| 3.8. att. 3.1. piemēram. |

Pēc vienādojuma *Usp =U —IR* konstruējam grafiku, kas attēlo šo saka­rību. Ja *I = 0,* tad spriegums *Usp = U =* 120 V*.* Atliekot uz abscisu ass no­griezni *OA,* kas atbilst 120 *V,* atrodam punktu *A.* Ja *Usp* = 0, tad strāva *I* =  = 1,5 A. Atliekot nogriezni *OB,* kas atbilst 1,5 A,atrodam punktu *B.* Savienojot punktus *A* un *B* ar taisni, iegūstam meklējamo grafiku.

Krustpunkts *C* nosaka vienīgo iespējamo ķēdes režīmu. Punkta C ordināte attēlo strāvu, kurai aplūkojamā gadījumā skaitliskā vērtība ir *I* = 0,6 A*;* nogrieznis *OD* attēlo spriegumu uz spuldzes (*Usp* = 72 V); starpība starp kopējo spriegumu un spriegumu uz spuldzes, t. i., spriegums uzreostata, ir *Ur* = 48 V.

**3.3. NELINEĀRU ĶĒŽU GRAFOANALĪTISKA APRĒĶINĀŠANA**

Nelineāru ķēdi var aprēķināt grafoanalītiski tikai tad, kad tās nelineāro elementu voltampēru raksturlīkņu posmus noteiktā sprieguma vai strāvas izmaiņas in­tervālā var atvietot ar taisnes nogriežņiem, saglabājot pie­tiekamu precizitāti. Tādu atvietošanu sauc par voltam­pēru raksturlīknes linearizāciju (iztaisnošanu).

Grafoanalītiskajā aprēķinā doto nelineāro ķēdi atvieto ar ekvivalentu lineāru ķēdi,

3.9. un 3.10. attēlos mērogā (*mU*, *mI*) parādītas divu da­žādu nelineāru elementu volt­ampēru raksturlīknes: pret sprieguma asi ieliekta voltam­pēru raksturlīkne (3.9. att. *a*) un pret sprieguma asi izliekta voltampēru raksturlīkne (3.10. att. *a*).

Nelineāru elementu katram voltampēru raksturlīknes punktam atbilstošā režīmā raksturo statiskā pretestība *Rst*, kas skaitliski ir vienāda ar sprieguma un strāvas attiecību izvēlētajam raksturlīknes punktam:

 (3.2)

Palielinot spriegumu, nelineāram elementam ar ieliektu voltampēru raksturlīkni (3.9. att. a) statiskā pretestība samazinās, bet elementam ar izliektu voltampēru raksturlīkni (3.10. att. a) statiskā pretestība pieaug.

Nelineāra elementa dinamiskā pretestība rdin skait­liski vienāda ar sprieguma bezgalīgi maza pieauguma attiecību pret bezgalīgi mazu strāvas pieaugumu izvēlētajā voltampēru raksturlīknes punktā:

 (3.3)

|  |  |
| --- | --- |
| ***a*** | ***b*** |
| ***c*** |

3.9. att. Voltampēru raksturlīkne (a) un ekvivalentā shēma (c) nelineāram elementam (b), kura pretestība sama­zinās, palielinot spriegumu U.

Nelineāra elementa dinamiskā pretestība rdin skait­liski vienāda ar sprieguma bezgalīgi maza pieauguma attiecību pret bezgalīgi mazu strāvas pieaugumu izvēlētajā voltampēru raksturlīknes punktā:

 (3.4)

Lineāram elementam *Rdin.= Rst* = const.

|  |  |
| --- | --- |
| ***a*** | ***b*** |
| ***c*** |

3.10. att. Voltampēru raksturlīkne (a) un ekvivalentā shēma (c) nelineāram elementam (*b*),

kura pretestība pieaug, palielinot spriegumu *U*.

Ja nelineāra elementa voltampēru raksturlīknes posmu *AB* (3.9. un 3.10. att. *a*) var linearizēt, t. i., atvietot ar taisnes no­griezni *AB*, tad nelineārā elementa dinamiskā pretestība šajā lineārajā posmā ir konstanta:

 (3.5)

kur Δ*U* ir sprieguma pieaugums raksturlīknes lineārajā posmā un Δ*I* — atbilstošais strāvas pieaugums.

Taisnes nogriežņa AB pagarinājums krusto sprieguma asi punktā C.

3.9. attēlā a redzams, ka ieliektas voltampēru raksturlīknes lineārajam posmam AB atbilstošais spriegums *U* ir divu sprie­guma komponenšu summa (komponentes attēlo nogriežņi OC un CD).

Sprieguma nemainīgo komponenti, ko mērogā *mU* attēlo no­grieznis OC, var pieņemt par tāda EDS avota elektrodzinējspēku E, kuram iekšējā pretestība vienāda ar nulli.

Sprieguma mainīgā komponente, ko attēlo nogrieznis CD, ir sprieguma kritums dinamiskajā pretestībā *Rdin* = const:



Tātad spriegums

*U = E + IRdin*. (3.6)

Pēdējo izteiksmi var interpretēt tā, ka doto nelineāro elementu (3.9. att. *b*) raksturlīknes posmam AB (3.9. att. *a*) var atvietot ar ekvivalentu shēmu, kurā nemainīga lineāra pretestība *Rdin* slēgta virknē ar EDS avotu, kura elektrodzinējspēks ir E (3.9. att. c).

No izteiksmes (3.6) nelineārā, elementa ekvivalentajā shēmā ķēdes strāva

 (3.7)

Šī izteiksme rāda, ka nelineāra elementa ar ieliektu voltampēru raksturlīkni ekvivalentajā shēmā (3.9. att. c) avota elektrodzinējspēka E virziens ir pretējs strāvas (sprieguma) virzienam.

Nelineāram elementam ar izliektu voltampēru raksturlīkni (3.10. att. *b* un *a*) līdzīgā veidā dabū, ka raksturlīknes lineārajam posmam AB spriegums

*U = IRdin - E* (3.8)

un nelineārā elementa ekvivalentās shēmas ķēdes strāva

 (3.9)

Tātad nelineāra elementa ar izliektu voltampēru raksturlīkni ekvivalentajā shēmā avota elektrodzinējspēks E vērsts strāvas virzienā.

Tādējādi, aprēķinot nelineāru ķēdi grafoanalītiski, ķēdes katru nelineāro elementu atvieto ar tam ekvivalentu shēmu; tādā veidā iegūto ekvivalento lineāro ķēdi aprēķina, lietojot kādu lineāro ķēžu aprēķina metodi.

**4. NODAĻA**

**MAGNĒTISKĀS ĶĒDES**

**4.1. ELEKTRISKĀS STRĀVAS MĀGNĒTISKAIS LAUKS.**

Magnētiskais lauks, tāpat kā elektriskais lauks, ir elektromagnētiskā lauka sastāvdaļa un viens no matērijas veidiem. Magnētiskais lauks ir nedalāmi saistīts ar elektrisko strāvu, jo katra elektriskā strāva rada magnētisko lauku. Šis apstāklis paver vienkāršu iespēju magnētisko lauku iegūšanai elektroteh­niskām vajadzībām.

Eksperimentāli noskaidrots, ka ap vadu, pa kuru plūst elektriskā strāva, pastāv magnētiskais lauks. Magnētiskais lauks ir viena no matērijas formām. Magnētiskajā laukā ir sadalīta enerģija; tāpēc viena strāvas vada lauks iedarbojas uz otru strāvas vadu, kas atrodas šinī laukā. Uz magnētadatu, kas atrodas magnētiskajā laukā, iedarbojas spēki, kuru darbības rezultātā adata ieņem noteiktu stāvokli. Kustoties magnētiskajā laukā, vadītājā rodas EDS.

Magnētiskā lauka pastāvēšana vienmēr liecina par to, ka plūst elektriskā strāva. Piemēram, pastāvīgo magnētu magnētisko lauku rada molekulārās elektriskās strāvas, ko nosaka elektronu kustība pa orbītām un elektronu rotācija ap savām asīm.

Magnētisko lauku uzskatāmi attēlo ar magnētiskajam spēka līnijām, kas vienmēr ir noslēgtas līnijas un nekad ne­krustojas. Magnētiskās līnijas velk magnētiskajā laukā tā, lai pieskares virziens jebkurā tās punktā sakristu ar magnētadatas virzienu. *Par magnētisko līniju pozitīvo virzienu pieņemts uzskatīt to virzienu, kurā nostājas magnētadatas ziemeļpols*. Eksperimentāli noskaidrots, ka magnētiskās līnijas vienmēr ir noslēgtas, t.i., tām nav ne sākuma, ne beigu. Piemēram, līnijas, kas attēlo pastāvīga magnēta lauku, savieno tā ziemeļpolu ar dienvidpolu, noslēdzoties magnēta iekšienē (4.1. un 4.2. att.). Taisna strāvas vada magnētiskās līnijas ir koncentriski riņķi, kas aptver vadu (4.3. att.).

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| ***a*** | ***b*** | ***c*** |

4.1. att. Pastāvīga magnēta magnētiskā lauka pieņemtais grafiskais apzīmējums (a, c) un pastāvīga magnēta magnētiskā lauka fotogrāfija (b).

Magnētiskā lauka pastāvēšana vienmēr liecina par to, ka plūst elektriskā strāva. Piemēram, pastāvīgo magnētu magnētisko lauku rada molekulārās elektriskās strāvas, ko nosaka elektronu kustība pa orbītām un elektronu rotācija ap savām asīm.

Magnētisko lauku uzskatāmi attēlo ar magnētiskajam spēka līnijām, kas vienmēr ir noslēgtas līnijas un nekad ne­krustojas. Magnētiskās līnijas velk magnētiskajā laukā tā, lai pieskares virziens jebkurā tās punktā sakristu ar magnētadatas virzienu. *Par magnētisko līniju pozitīvo virzienu pieņemts uzskatīt to virzienu, kurā nostājas magnētadatas ziemeļpols*. Eksperimentāli noskaidrots, ka magnētiskās līnijas vienmēr ir noslēgtas, t.i., tām nav ne sākuma, ne beigu. Piemēram, līnijas, kas attēlo pastāvīga magnēta lauku, savieno tā ziemeļpolu ar dienvidpolu, noslēdzoties magnēta iekšienē (4.1. un 4.2. att.). Taisna strāvas vada magnētiskās līnijas ir koncentriski riņķi, kas aptver vadu (4.3. att.).

|  |  |
| --- | --- |
| ***a*** | ***b c*** |

4.3. att. Taisna strāvas vada magnētiskais lauks (*a*) un magnētisko lauka virziens, ja strāva plūst uz mums (*b*) un no mums (*c*)

Strāvas magnētiskā lauka virziens ir atkarīgs no strāvas vir­ziena. Šo abu virzienu saistību taisnam strāvas vadam nosaka labās skrūves 1ikums : *ja skrūve pārvietojas strāvas virzienā, tad skrūves griešanas vir­ziens sakrīt ar magnētiskā lauka* (*magnētisko līniju*) *virzienu* (4.4. att. *a*).

Ja ņem riņķveida saliektu stiepli un laiž pa to strāvu, tad arī šādā gadījumā strāva radīs ap vadu magnētisko lauku (4.4. att. *b*). Vairākos riņķos ar vienādu diametru saliekta stieple, ja riņķi saslēgti virknē un novietoti tā, ka to asis sakrīt, izveido tā saucamo solenoidu (4.4. att. *c*). Ja pa solenoidu laiž strāvu, tad tā iekšpusē un ārpusē izveidojas magnētiskais lauks.

Lai noskaidrotu magnētiskā lauka virzienu ap riņķveidīgu vadu vai solenoidu, kad pa tiem plūst strāva, izlietot augstāk izskaidroto labās skrūves likumu sekojoša redakcijā: *ja skrūves rotācijas virziens sakrīt ar strāvas virzienu kontūrā, tad skrūves pārvietošanās norāda magnētisko līniju virzienu, kas šķeļ strāvas kontūra ierobežoto virsmu*.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| ***a*** | ***b*** | ***c*** |

4.4. att. Labas skrūves likums.

Labās skrūves likuma pirmo formulējumu ir ērti lietot, ja jānosaka magnētisko līniju virziens ap taisnu strāvas vadu, bet otro formulējumu – ja jānosaka magnētisko līniju virziens, strāvai plūstot spolē.

**4.2.** **MAGNĒTISKĀ INDUKCIJA**

Ievietosim magnētiskajā laukā taisnu vadu (4.5. att.), kura garums ir *l*, un laidīsim pa to atrāvu *I*, ko pievadām pa lokaniem pievadiem (tie 4.5. attēlā nav parādīti). Ar šo eksperimentu var pārliecināties, ka uz vadu darbojas spēks, kura virziens ir perpendikulārs ka magnētisko līniju, tā arī strāvas virzienam, bet skaitliskā vērtība ir proporcionāla strāvai un vada garumam. Tomēr arī tad, ja strāva un vada garums ir vieni un tie paši, spēks var būt dažāds atšķirīgos magnētiskos laukos vai arī viena un tā paša magnētiskā lauka dažādās vietās. Tas liecina, ka spēks ir atkarīgs no magnētiskā lauka stipruma.

Magnētisko lauku stiprumu katrā tā punktā raksturo ar vektoriālu lielumu — magnētisko indukciju, ko apzīmē ar *B*. Magnētiskās indukcijas vektors vērsts pa magnētiskās līnijas pieskari (4.3. att. un 4.4. att.).

Magnētisko lauku, kura visos punktos magnētiskajai indukcijai *B* ir viena un tā pati skaitliskā vērtība un viens un tas pats virziens, sauc par homogēnu jeb viendabīgu magnētisko lauku.

Tehnikā ļoti plaši izmanto magnētiskā lauka elektromehānisko un induktīvo darbību. Lauka elektromehāniskā darbība izpaužas tā, ka magnētiskais lauks darbojas uz laukā ievietotu strāvas vadu ar elektromagnētisku spēku *F*. Ja taisns vads ar strāvu *I* (A) un garumu *l* (m) atrodas homogēnā magnētiskā laukā (4.5. att.), tad spēka, kas darbojas uz šo strāvas vadu, skaitlisko vērtību nosaka Ampēra likums:

, (4.1)

kur *α* — leņķis starp strāvas *I* virzienu un indukcijas *B* vektora virzienu.

|  |  |
| --- | --- |
|  | 4.5. att. Magnētiskā lauka iedar­bība uz taisnu strāvas vadu. |

Ja leņķis *α* = 0, tad arī *F* = 0, t. i., magnētiskais lauks neiedarbojas uz magnētiskajām līnijām paralēli novietotu strāvas vadu.

Ja leņķis *α* = 90° (strāvas vads perpendikulārs magnētiskajām līnijām), tad uz strāvas vadu darbojas vislielākais elektromagnētiskais spēks:

 (4.2)

Virzienu spēkam F, kas darbojas uz taisnu strāvas vadu, ērti noteikt pēc kreisās rokas likuma: *ja kreisās rokas plaukstu novieto pretī magnētiskajām līnijām un četrus izstieptos pirkstus — strāvas virzienā, tad atliektais īkšķis rāda spēka virzienu* (4.6. att.).

Magnētiskā lauka elektromehānisko darbību izmanto tādās elektriskās mašīnās un aparātos, kur elektrisko enerģiju pārveido mehāniskajā enerģijā (elektrodzinējos, elektriskajos mēraparātos u. c).

|  |  |
| --- | --- |
| No izteiksmes (4.2)  (4.3)  t. i., magnētiskā indukcija *B* skaitliski vienāda ar spēku, ar kādu homogēns magnētiskais lauks darbojas uz taisnu 1 m garu, magnētiskajām līnijām perpendikulāri novietotu vadu, kurā plūst 1 A stipra strāva. Magnētiskās indukcijas mērvienība SI sistēmā ir vēbers uz kvadrātmetru, ko sauc par teslu (T):    bet, tā kā voltsekundi (V·s) sauc par vēberu (Wb), tad | 4.6. att. Kreisas rokas likums. |

**4.3. MAGNĒTISKĀ PLŪSMA**

Magnētisko lauku dažādos ķermeņos (vidē) raksturo ar jēdzienu magnētiskās indukcijas vektora plūsma (īsāk — magnētiskā plūsma), ko apzīmē ar Φ.

Homogēnā magnētiskā laukā par magnētisko plūsmu Φ caur plakni ar laukumu S (m2), kas perpendikulāra magnētiskās indukcijas vektora B virzienam (4.7. att. a), sauc magnētiskās indukcijas un šī laukuma reizinājumu:

Φ = *B·S*. (4.4)

Magnētiskās plūsmas mērvienība SI sistēmā ir vēbers:



No izteiksmes (4.4)

 (4.5)

t. i., homogēna magnētiskā lauka indukcija ir vienu teslu liela, ja magnētiskā plūsma caur lauka virzienam perpendikulāru 1 m2 lielu laukumu ir 1 Wb.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| ***a*** | ***b*** | 4.7. att. Homogēna (*a*) un nehomogēna (*b*) magnētiskā lauka magnētiskā plūsma caur laukumu S. |

Tādejādi magnētisko indukciju *B* var uzskatīt par magnētiskās plūsmas blīvumu.

Nehomogēna magnētiskā lauka (4.7. att. *b*) magnētiskās indukcijas vektora normālās komponentes *Bn* un laukuma *S* elementa dS reizinājums ir elementāra magnētiska plūsma:



bet plūsma caur visu laukumu *S*

 (4.6)

***4.1. piemērs.*** Homogenā magnētiskā laukā atrodas taisns 0,5 m gars vads, kas novietots perpendikulāri lauka virziena, strāva vada ir 100 A, indukcija B = 0,6 T. Aprēķināt spēku, kas darbojas uz vadu.

Atrisinājums.



***4.2. piemērs.*** Vadītājs AB atrodas homogēna magnētiskā laukā ar indukciju *B* = 0,4 T un ir pieslēgts EDS avotam (4.8. att.). Ķēdes kopēja pretestība *Rk* = 0,4 Ω, strāva ķēdē *I* = 50 A, bet vadītāja miera stāvoklis tiek panākts ar tam pievienotu atsvaru *G* = 10 N.

Aprēķināt avota EDS un vadītāja aktīvo garumu.

|  |  |
| --- | --- |
| Atrisinājums.  1. Avota EDS  *E = Rk·I*  = 2·50 = 100 V.  2. Vadītāja aktīvo garumu izsaka no formulas  *F = B·I·ℓ*.  Atrod, ka | 4.8. att. |

*Piezīme.* Tā kā vadītājs atrodas miera stāvoklī, tad *F = G* = 10 N

4.4. MAGNĒTISKĀ LAUKA SPĒKU DARBS

Jau konstatējām, ka uz taisnu strāvas vadu, kas ievietots ho­mogenā magnētiskā laukā, darbojas spēks

*F = B∙l∙I∙*sin*α*

vai

*F = B∙l∙I,*

ja vads ir perpendikulārs magnētisko līniju virzienam.

Pieņemam, ka spēka F iedarbībā vads pārvietojas šī spēka virzienā par attālumu b (4.9. att.). Vadam pārvietojoties, tiek veikts darbs

*A = F∙b = B∙l∙I∙b.* (4.7)

Reizinājums *l*b ir vienlīdzīgs laukumam *S*, ko vads pārklājis, kus­toties perpendikulāri lauka virzie­nam, bet reizinājums *B*S — mag­nētiskajai plūsmai *F* caur lau­kumu *S*. Tātad

*A = B∙I∙S = I∙*Φ, (4.8)

t. i., mehāniskais darbs, kas tiek veikts, pārvietojoties vadam ar ne­mainīgu strāvu magnētiskajā lau­kā, ir vienlīdzīgs strāvas un vada šķērsotās magnētiskās plūsmas reizinājumam. Ar vārdiem «šķēr­sotā magnētiskā plūsma» jāsaprot magnētiskās indukcijas reizinā­jums ar laukumu, ko pārklājis vads savā kustībā.

***4.3. piemērs***. Homogenā magnētiskā laukā (*B* = 1 T) perpendiku­lāri tā virzienam novietotas divas paralēlas sliedes, kuru garums *b* = 3,6 m. bet attālums starp tām — *l* = 0,5 m (4.10. att.). Pa sliedēm var pārvietoties vads, uz kura nostiprināts šāviņš ar masu *m* = 1 kg. Kādai strāvai jāplūst pa vadu, lai šāviņš, atstājot sliedes, kustētos ar ātrumu v = 60 m/sek?

|  |  |
| --- | --- |
|  | 4.9. att. Elektromagnētisko spēku darbs (vada pārvietošanās magnētiskajā laukā attālu­mā *b*). |

Atrisinājums.

Kinētiskā enerģija, kas jāiegūst šāviņam līdz izlidošanas brīdim



|  |  |
| --- | --- |
|  | 4.10. att. Shēma 4.3. piemēram. |

Šo enerģiju šāviņš iegūst uz tā darba rēķina, ko veic elektromagnētiskie spēki, pārvietojot magnētiskajā laukā strāvas vadu, uz kura nostiprināts lā­diņš. Tātad



no kurienes



Formulu (4.7) var izmantot ap­rēķiniem arī vispārīgākā gadījumā. Pieņemsim, ka nehomogenā magnē­tiskā laukā pārvietojas patvaļīgas formas vads ar nemainīgu strāvu (4.8. att.). Darbs, kas tiek veikts, pārvietojot vada garuma elementu dl virzienā, kurā darbojas spēks:

*dA = dF∙db = B∙I∙dl∙db∙*sin*α*;

bet, tā kā *dl∙db=dS*

un 

kur *β* - leņķis starp vektoru B un taisni, kas perpendikulāra ele­mentam dl un spēkam dF (pārtrauktā taisne), t. i., taisni, kas perpendikulāra laukumam dS, tad sin*α* = cos*β*.

Vektora *B* projekcija uz laukuma *dS* normāli

*Bn = B∙*cos*β* = *B∙*sin*α,*

bet reizinājums *Bn*d*S* ir plūsma, ko elements *dl* šķērso, pārvieto­joties par attālumu *db*, t. i.,

*d*Ф= *Bn∙dS =B∙dS∙*sin*α*

Tātad darbs



|  |  |
| --- | --- |
|  | 4.11. att. Liekta strāvas vada pārvietošanās magnē­tiskajā lauka |

Tādu pašu elementārā darba izteiksmi mēs dabūtu arī tad, ja aplūkotu vada elementa pārvietošanos kaut kādā leņķī pret spēka virzienu. Šajā gadījumā ir ērti pārvietojumu *db* sadalīt divos sav­starpēji perpendikulāros pārvietojumos: vienā, kas vērsts spēka virzienā, otrā — kas tam perpendikulārs. Darbs tiek veikts tikai pirmajā pārvietojumā, kuru jau aplūkojām. Pilnais darbs, kas tiek veikts, pārvietojoties magnētiskajā laukā vadam, kura garums ir l,



kas ir identisks ar (4.8). Pēdējā izteiksmē, tāpat kā agrāk, Ф ap­zīmē plūsmu caur to laukumu, ko vads pārklāj savā kustībā, t. i., plūsmu, ko vads šķērso savā kustībā.

4.5. STRAVAS KONTŪRA PĀRVIETOŠANĀS DARBS

Jebkurā vadā strāva plūst tikai tādā gadījumā, ja šis vads ir noslēgta kontūra daļa.

Kā izriet no vienādojuma (4.8), pārvietojoties kontūram ar strāvu, lauka spēki veic darbu tikai tādā gadījumā, ja mainās plūsma caur šo kontūru. Kā piemēru ap­skatīsim taisnstūra rāmīti ar strāvu I nehomogenā magnētiskā laukā (4.12. att.), kur spēku virzieni norādīti sa­skaņā ar kreisās rokas likumu). Pieņe­mam, ka magnētiskā indukcija pieaug virzienā no kreisās uz labo pusi, t. i., F2 = F4 un F3 > F1. Apakšējā un aug­šējā mala šajā gadījumā atrodas vienā­dos apstākļos, un rezultējošā spēka vir­ziens sakrīt ar spēka F3 virzienu. Uz­skatīsim kontūra strāvu par pozitīvu, bet magnētisko plūsmu caur kontūru vai nu par pozitīvu, vai ari par negatīvu atkarībā no tā, vai starp I un Ф virzieniem ir spēkā labās skrūves likums vai ne. Šajā ga­dījumā plūsma ir pozitīva, un tās absolūtā vērtība pieaug, kontū­ram pārvietojoties pa labi.

Tā kā darbs, kas tiek veikts, pārvietojot malas *bc* un *ad*, ir vien­līdzīgs nullei (leņķis starp spēka un pārvietojuma virzienu ir vien­līdzīgs 90°), tad

*A = Aab + Acd*;

Šī summa ir algebriska, jo komponente ir negatīva (kontūrs pārvietojas pretēji spēkam *F*1). Tātad

*A = - I*Ф*' + I*Ф*" = I*ΔФ, (4.9)

kur ΔФ ir starpība starp magnētiskajām plūsmām Ф*"* un Ф*'*, kuras šķērsojušas kontūra malas *cd* un *ab*, jeb starpība starp plūsmām caur kontūru ceļa beigās un sākumā:

ΔФ = Ф2 - Ф1, (4.10)

kur Ф2 — plūsma caur kontūru tā beigu stāvoklī;

Ф1 — plūsma caur kontūru sākuma stāvoklī.

Ja darbu veic lauka spēki, tad kontūrs pārvietojas no kreisās uz labo pusi (F3>F1) un pieaugums ir pozitīvs (Ф2 > Ф1).

|  |  |
| --- | --- |
|  | 4.12. att. Kontūrs ar strāvu magnētiskajā laukā. |

Ja kontūrs kustas lauka spēku iedarbībā, tad magnētiskās plūsmas pieaugums caur šo kontūru vienmēr ir pozitīvs. Aplūkotā parādība ļauj formulēt ļoti svarīgu praktisku secinājumu. *Jebkurš strāvas kontūrs, kas ievietots magnētiskajā laukā, strāvas un lauka mijiedarbības spēku rezultātā cenšas ieņemt tādu stāvokli, lai plūsma caur kontūru būtu pozitīva un maksimāli liela.* Piemēram, ja vijumu ar strāvu ievieto homogenā magnētiskā laukā, tad uz to darbojas griezes moments, kas cenšas to pagriezt tā, lai vi­juma ass sakristu ar ārējā magnētiskā lauka virzienu. Sasniedzot šo stabilo stāvokli, spēki, kas darbojas uz kontūru, cenšas to tālāk deformēt tā, lai magnētiskā plūsma caur kontūru vēl pa­lielinātos (4.13. att.).

|  |  |
| --- | --- |
|  | 4.13. att. Strāvas kontūra stāvoklis, kurā plūsma ir pozi­tīva un maksimāli liela. |

Ja vijums ar strāvu atrodas nehomo­genā magnētiskā laukā, tad notiek ne vien griezes kustība, bet arī translācijas kus­tība virzienā uz lauka apgabalu ar vis­lielāko indukciju.

Ja magnētiskā plūsma caur kontūru sa­mazinās, t. i., tās pieaugums ir negatīvs, tad veiktais mehāniskais darbs arī ir ne­gatīvs, t. i., šo darbu veic nevis lauka spēki, bet gan pretēja virziena ārējie spēki.

**4.6. ELEKTROMAGNĒTISKĀ INDUKCIJA**

Elektromagnētiskās indukcija parādībā vērojams elektromagnētiskā spēka parādībai pretējs process. Ja spēka parādībā elektromagnētiskie spēki ir cēlonis mehāniskam pārvietojumam, tad elektromagnētiskās indukcijas parādībā mehānisks pārvietojums, izjaucot elektrisko līdzsvara vadītājā, (ģenerē, rada) inducē tajā elektrodzinēj spēku. Elektromagnētiskās indukcijas process ir elektrodzinēj spēka ģenerēšanas process, kura laikā mehāniska (neelektriska) enerģija pārveidojas elektriskajā enerģijā. Ja elektriskā ķēde, kurā inducējas elektrodzinēj spēks ir noslēgta, tajā plūst arī strāva. To pieņemts saukt par indukcija strāvu.

Magnētiskā lauka induktīvā darbība izpaužas elektromagnē­tiskajā indukcijā, ko 1831. gadā atklāja Faradejs: *ja mainās noslēgtu, vadošu kontūru caurtverošās magnētiskās plūsmas Φ vērtība, kontūrā rodas (inducējas) elektrodzinējspēks e* (4.14. att.). Inducētais elektrodzinējspēks *e* noslēgtā kontūrā uztur indukcijas strāvu *i*.

Elektromagnētiskās indukcijas likums, ko ana­lītiska forma devis Maksvels, nosaka, ka jebkurā vadošā kontūrā inducētais elektrodzinējspēks **e** skaitliski ir vienāds ar kontūru caurtverošās magnētiskās plūsmas Φ iz­maiņas ātrumu:

 (4.11)

kur dΦ — kontūru caurtverošās (ar kontūru saķēdētās) plūs­mas Φ bezgalīgi mazs pieaugums bezgalīgi īsā laika sprīdi dt.

Mīnusa zīme norāda inducētā EDS virzienu.

Kontūrā inducētā EDS pozitīvo virzienu pieņemts noteikt pēc labas skrūves likuma: EDS, kas, skatoties uz kontūru plūsmas Φ virzienā, vērsts pulksteņa rādītāja kustības virzienā, ir pozitīvs (4.15. attēlā EDS pozitīvais virziens parādīts ar bultiņu, kam pie­vienota « + » zīme).

Noteiksim indukcijas strāvas i virzienu noslēgtā nekustīgā kontūra dažos raksturīgos gadījumos (4.15. att.).

Ja kontūru caurtverošā plūsma Φ = const (*d*Φ = 0), tad *e* = 0 un *i* = 0 (4.15. att. a).

Ja kontūru caurtverošā plūsma Φ pieaug (*d*Φ >0), tad saskaņā ar izteiksmi (4.7) kontūrā inducētais EDS ir ar mīnusa zīmi (—*e*). Tātad indukcijas strāvas *i* virziens ir pretējs pieņem­tajam EDS pozitīvajam virzienam, un indukcijas strāvas radītā magnētiskā plūsma Φ*i* kontūrā ir vērsta pretī pamatplūsmai Φ (4.15. att. b).

|  |  |
| --- | --- |
| 4.14. att. Noslēgtu kon­tūru caurtverošā mag­nētiskā plūsma Ф. | 4.15. att. Indukcijas strāva *i* un tās vir­ziens noslēgtā nekustīgā kontūrā, ja *dФ = 0* (a), *dФ > 0 (b)* un *dФ<0 (c).* |

Samazinot kontūru caurtverošo plūsmu Φ (dΦ <0), kon­tūrā inducētā EDS virziens sakrīt ar EDS pozitīvo virzienu, un indukcijas strāvas i magnētiskā plūsma Φi kontūrā vērsta pamatplūsmas Φ virzienā (4.15. att. c).

Tādējādi noslēgtā kontūrā inducētā EDS radīta indukcijas strāva i tiecas uzturēt nemainīgu kontūru caurtverošo plūsmu Φ.

Iztirzātās sakarības ietver elektromagnētiskās iner­ces principu, ko 1833. gadā formulēja Lencs: noslēgtā kontūrā inducētajam EDS vienmēr ir tāds virziens, ka indukcijas strāvas magnētiskā plūsma darbojas pretim kontūru caurtverošās plūsmas izmaiņai, kura rada indukcijas strāvu kon­tūrā (Lenca likums).

**4.7. PLŪSMAS SAĶĒDĒJUMS**

Kontūrā (spolē) ar *ω* vijumiem, kurus caurtver viena un tā pati magnētiskā plūsma Φ (4.16. att. a), inducētais EDS

 (4.12)

Tātad katrs spoles vijums ir saķēdēts ar vienu un to pašu magnētisko plūsmu, tad EDS spole ir ω reizes lielāks nekā vienā vijuma.

Magnētiskās plūsmas Φ reizinājumu ar tās caurtverto spoles vijumu skaitu *ω* sauc par plūsmas saķēdējumu un ap­zīmē ar Ψ. 4.16. attēlā *a* parādītajai spolei

Ψ = *ω*Ф. (4.13)

|  |  |
| --- | --- |
| ***a*** | ***c*** |
| ***b*** |

4.16. att. Magnētisko plūsmu caurtvertie vijumi.

4.16. attēlā *b* parādīta nekustīga spole, pa kuru asi pārvietojas pastāvīgs magnēts. Pārvietojoties magnētam, mainās plūsma, kas saķēdēta ar spoles vijumiem, un spole inducējas EDS.

Šajā gadījumā EDS rodas katrā spoles vijumā, un summārais EDS

.

Plūsmu algebrisko summu, kuras saķēdētas ar atsevišķiem vijumiem, sauc par plūsmas saķēdējumu un apzīmē ar burtu Ψ, t.i.,

Ψ = Ф1 + Ф2 + … + Фk.

Tātad summārais EDS



Ja vienas un tās pašas spoles atsevišķas vijumu grupas *ω*1, *ω*2, *ω*3 caurtver dažādas magnētiskas plūsmas Φ1, Φ2, Φ 3 (4.16. att. c), tad spolē inducētais elektrodzinējspēks e ir vienāds ar spoles atsevišķās vijumu grupas inducēto EDS summu



Plūsmas saķēdējums 4.16. attēlā *c* parādītajai spolei

Ψ = Ψ1 + Ψ2 + Ψ3 = *ω*1Ф1 + *ω*2Ф2 + *ω*3Ф3,

un vispārīgā gadījumā

Ψ = Σ*ω*Ф. (4.14)

Tad apskatāmajā spolē inducētais EDS



No pēdējās sakarības dabū elektromagnētiskās indukcijas likuma vispārīgo izteiksmi

 (4.15)

kura rāda, ka noslēgtā vadošā kontūrā inducētais EDS skaitliski vienāds ar šī kontūra plūsmas saķēdējama izmaiņas ātrumu.

Elektromagnētiskā indukcija ir pamatā elektrisko ģeneratoru un transformatoru darbībai; šo parādību izmanto arī elektrodzinējos, elektriskajos mēraparātos un daudzās citās elektroierīcēs.

Indukcijas EDS var rasties arī jebkurā masīvā metāla ķer­meni, kas atrodas mainīgā magnētiskā laukā vai pārvietojas ne­mainīgā magnētiskā laukā. Indukcijas strāvas masīvos metāla ķermeņos sauc par virpu[strāvām. Tās izmanto metālu kausēšanai, metāla detaļu ter­miskai apstrādei, detaļu virsmas rūdī­šanai, arī elektriskajos mēraparātos u. c.

**4.8. ELEKTROMAGNĒTISKĀS INDUKCIJAS ELEKTRODZINĒJSPĒKS**

Ar vienu vijumu saķēdēto magnē­tisko plūsmu Φ var mainīt, ja nekus­tīgu kontūru pakļauj mainīga magnē­tiskā lauka iedarbībai vai nemainīgā laukā pārvieto kontūru tā, lai tā malas šķeltu magnētiskās līnijas. Analizējot pēdējo gadījumu, iegūst Faradeja izteiksmi taisnā vadā inducētā EDS aprēķināšanai, ja zināms vada garums un kustības ātrums.

Pieņemam, ka homogēnā magnē­tiskā laukā (*B* = const) starp magnēta poliem novietots taisns vads (4.17. att.), kura aktīvais garums (kas atrodas magnētiskajā laukā) ir *l* (m), vienmērīgi kustoties ar ātrumu v (m/s), pārvietojas perpendikulāri lauka virzienam.

|  |  |
| --- | --- |
| 4.17. att. EDS inducēšana taisna vada. | 4.18. att. Labas rokas likums |

Bezgalīgi īsā laika sprīdī *dt* vads pārvietojas attālumā *dx = vdt*, šķeļot vada kustības virzienam perpendikulārās magnētis­kās līnijas.

Ja vada galiem 1 un 2 pievieno ārējo ķēdi (ārpus lauka), iz­veidojas noslēgts kontūrs, kuru caurtverošās (saķēdētās) plūs­mas izmaiņa laika sprīdī *dt*

*d*Ф = *B∙dS* = *B∙l∙dx* = *B∙l∙v∙dt*.

Tad saskaņā ar izteiksmi (4.11) vada aktīvajā posmā *l* inducētā EDS skaitliskā vērtība, ja indukcija *B* izteikta teslās,

*e* = *B∙l∙v* . (4.16)

Vispārīgā gadījumā

*e* = *B∙l∙v∙*sin*α* , (4.17)

kur *α* — leņķis starp vada kustības virzienu (*v*) un magnētiskā lauka indukcijas vektora *B* virzienu.

Ja leņķis *α* = 90° , tad vadā inducējas maksimālais EDS, bet, ja *α* = 0, t. i., vads pārvietojas paralēli magnētiskajam līnijām, tad elektrodzinējspēks *e* = 0.

Ja vadu pārvieto pretējā virzienā, tad inducēta EDS un tā uzturētās indukcijas strāvas *i* virziens ir pretējs 4.17. attēla para­dītajam.

Vienkāršākā gadījumā elektromagnētiskās indukcijas procesu var apskatīt taisnā vadītājā, kura pārvieto homogenā magnētiskā laukā ar vienmērīgu ātrumu perpendikulāri magnētiskajai plūsmai (skat. 4.18. att.).

Taisnos vados inducētā EDS virzienu ērti noteikt pēc labās rokas likuma: *ja labās rokas plaukstu novieto pretī magnētiskajām līnijām, bet atliekto īkšķi — vada kustības virzienā, tad izstieptie pirksti rāda vadā inducētā EDS virzienu.*

Jāiegaumē, ka, vadam šķeļot magnētiskās līnijas, tajā vien­mēr inducējas EDS, bet indukcijas strāva *i* parādās tikai tad, ja pārvietojamais vads ieslēgts noslēgtā kontūrā (sk. 4.17. att.).

**4.9. MEHĀNISKĀS ENERĢIJAS PĀRVEIDOŠANA ELEKTRISKAJĀ**

**ENERĢIJĀ**

Novietosim magnētiskajā laukā perpendikulāri tā virzienam taisnu vadu, kas noslēgts ar pretestību *r*, un pārvietosim to ar ātrumu *υ* (4.19. att.). Vadā rodas EDS, bet noslēgtajā ķēdē — strāva *I*.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| ***a***  4.19. Mehāniskās enerğijas pārveidošana elektriskajā enerğija |  |  |
| ***b*** | ***c*** |

Elektromagnētiskais spēks, kas darbojas uz strāvas vadu, ir

*F = BIl.*

Spēka virzienu nosaka saskaņā ar kreisās rokas likumu. Šis spēks bremzē vadu, jo tas versts pretī ātruma vektora *ν* virzienam (4.19. att.). Tātad, lai vads kus­tētos, ātruma vektora virziena jā­pieliek ārējs spēks, kas skaitliski vienāds ar bremzējošo speķu, bet kura virziens ir pretējs. Primārajam dzinējam, kas rada ārējo spēku, jāattīsta mehāniska jauda

*Pmeh = Fv*.

Ievietojot šajā formulā spēka *F* izteiksmi, iegūstam, ka

*Pmeh = BlIv = IE*, (4.18)

t. i., dzinēja attīstīta jauda ir vienlīdzīga elektriskās strāvas jau­dai noslēgtajā ķēde. Tātad, kustoties noslēgtam vadam magnētis­kajā lauka ārējo spēku iedarbībā, mehāniskā enerģija pārveidojas elektriskajā enerģija.

Bet, ja noslēgtā kontūrā plūst indukcijas strāva *I*, tad uz strāvas vada aktīvo garumu *l* magnētiskais lauks darbojas ar bremzējošu elek­tromagnētisku spēku

*Fbr = B∙I∙l*, (4.19)

kura pārvarēšanai un strāvas vada pārvietošanai magnētiskajā laukā jāpatērē mehāniskā enerģija. Tādējādi, izmantojot 4.19. at­tēlā parādīto elektriskā ģeneratora darbības principu, mehānisko enerģiju var pārveidot elektriskajā enerģijā.

***4.4. piemērs***. Vadītājs, kura aktīvais garums *ℓ* = 0,5 m, pievienots patērētājam (4.20. att.). Vadītājs pārvietojas perpendikulāri magnētiskā lauka indukcijas līnijām tam pievienota atsvara (*G* = 12 N) ietekmē ar ātrumu *v* = 8 m/s. Vadītājā inducējas EDS un plūst strāva *I* = 20 A.

Aprēķināt magnētisko indukciju, vadītājā inducēto EDS un ķēdes kopējo pretestību, kā arī salīdzināt mehānisko un elektrisko jaudu.

|  |  |
| --- | --- |
|  | 4.20. att. Shēma 4.4. piemēram. |

Atrisinājums.

1. Magnētiskā lauka indukciju izsaka no formulas

*F = B·I·ℓ*.

Atrod, ka



2. Vadītāja inducētais EDS

*F = B·ℓ·v =* 1,2·0,5·8 = 4,8 V.

3. Ķēdes kopējā pretestība



4. Mehāniskā jauda

*Pm = F·v* = 12·8 = 96 W.

5. Elektriskā jauda

*P = E·I* = 4,8·20 = 96 W.

Tātad *Pm = P*.

**4.10. ELEKTRISKĀS ENERĢIJAS PĀRVEIDOŠANA MEHĀNISKAJĀ ENERĢIJĀ.**

Iedarbojoties magnētiskajam laukam uz vadu ar strāvu, elektriskā enerģija pārveidojas mehāniskajā.

Pieņemsim, ka pa taisnu vadu, kas ievietots homogenā mag­nētiskā laukā un ieslēgts ķēdē ar EDS *Ε*, plūst nemainīga lieluma strāva (4.21. att.).

Magnētiskais lauks iedarbojas uz strāvas vadu ar spēku

*F = Bil*,

un vads kustas ar ātrumu ν (spēka un ātruma virzienus nosaka sa­skaņā ar kreisās rokas likumu).

Vadam kustoties, tajā rodas elektromagnētiskās indukcijas EDS, kas vērsts pretī strāvai

*Epr = Blv*.

Saskaņa ar otro Kirhofa likumu kontūrām

*E — Ep = Ir*0 + *Ir*,

kur *r* — taisnā vada pretestība;

*r*0 — pārējās ķēdes daļas pretestība.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| ***a***  4.21. att. Elektriskās enerğijas pārveidošana mehāniskajā enerğijā |  |  |
| ***b*** | ***c*** |

Apzīmējot

*Ε — Ir*0 = *UAB* ,

atrodam, ka

*UAB = Ir + Epr*. (4.20)

Reizinot vienādojuma (4.20) visus locekļus ar *I*, nosakām elek­trisko jaudu

*UABI = I*2*r + EprI*.

Ievērojot, ka *Epr = Blv*, dabūjam

*UABI = I*2*r + BlvI = I*2*r +Fv*. (4.21)

Vienādojuma (4.21) labajā pusē pirmais loceklis izsaka sil­tuma jaudu, otrais — mehānisko jaudu. Tātad, lauka spēku iedar­bībā kustoties noslēgtam vadam ar strāvu magnētiskajā laukā, elektriskā enerģija pārveidojas siltuma un mehāniskajā enerģijā,

**4.11. ELEKTRODZINĒJI**

Pirmo elektromotoru, kas tika praktiski izmantots, izgudroja 1834. gadā B. Jakobi, kurš 1838. gadā lietoja to kā laivas, bet vēlāk — ratiņu dzinēju.

Katrs līdzstrāvas ģenera­tors darbojas dzinēja režīmā, ja tā EDS kļūst mazāks par sprie­gumu uz spailēm. Šo elektrisko ma­šīnu apgriežamības prin­cipu atklāja 1833. gadā E. Lencs un pēc tam formulēja B. Jakobi.

Tātad tās pašas mašīnas, kas darbojas kā ģeneratori, var darbo­ties arī kā elektromotori. 4.22. attēlā parādīta elektromotora ieslēg­šanas shēma. Dažiem elektromoto­riem ir divi paralēli zari. Vienā ir ieslēgts palaišanas reostats un en­kurs, otrā — ierosmes tinums (4.22. attēlā nav parādīts). Pa­laišanas reostats ierobežo palaišanas strāvu. Sākuma momentā palaišanas strāva

 (4.22)

kur *rp* — reostata pretestība; *re* — enkura pretestība.

|  |  |
| --- | --- |
|  | 4.22. att. Elektromotora ieslēgšanas shēma. |

Bez reostata pretestības *rp* palaišanas strāva būtu daudzās reizes lielāka par elektromotora nominālo strāvu (sk. 4.5. piemēru).

Kad enkurs ir iegriezies un tinumā rodas pretelektrodzinējspēks, palaišanas reostats vairs nav vajadzīgs, un tā pretestību pakāpe­niski samazina līdz nullei.

**4.5. piemērs**. Elektromotora spailēm pieslēgts 120 V liels spriegums. Pret - elektrodzinejspeks nominālā režīmā ir 116 V. Enkura tinuma pretestība ir 0,4 Ω.

Aprēķināt: 1) motora nominālo strāvu; 2) palaišanas reostata pretestību, lai palaišanas strāva nepārsniegtu 2*IN*; 3) palaišanas strāvu ķēdē, ja motoru ieslēdz bez palaišanas reostata.

Motora nominālā strāva



Palaišanas reostata pretestību var aprēķināt pēc formulas (4.22):



Palaišanas strāva, ieslēdzot motoru bez reostata,



**4.12. VIRPUĻSTRĀVAS**

Telpā, kur pastāv mainīgs mag­nētiskais lauks, vienlaicīgi novērojams arī elektriskais lauks. Šī lauka elektriskās līnijas atrodas plaknē, kas perpendikulāra mag­nētiskās plūsmas virzienam, un atšķirībā no elektrostatiskā lauka līnijām ir noslēgtas (virpuļlauks). Ja telpā, kur pastāv mainīgs magnētiskais lauks, atrodas masīvi vadoši ķermeņi (izgatavoti no tērauda, vara, misiņa utt.), tad elektromagnētiskās indukcijas EDS rada šajos vadītājos virpuļstrāvas, kuras ir inducēto strāvu speciālgadījums.

Piemēram, ja spolē ar masīvu tērauda serdi plūst maiņstrāva, tad serdē inducējas virpuļstrāvas, kas noslēdzas plaknē, kura per­pendikulāra magnētiskajai indukcijai. Šo strāvu iedarbībā tērauds sasilst, pazeminot e1ektrоmagnētisko mehānismu lietderības koe­ficientu (*η*). Lai samazinātu virpuļstrāvas, lieto serdes, kas iz­gatavotas no tērauda loksnēm, kuras izolētas viena no otras (4.23. att.). Šajā gadījumā serdes pretestība virpuļstrāvām pie­aug, bet pašas strāvas samazinās.

|  |  |
| --- | --- |
| ***a b***  4.23. att. Virpuļ­strāvas serdē no masīva (*a*) un lokšņu (*b*) tērauda | 4.24. att. Virpuļstrāvas enkurā. |

Virpuļstrāvas rodas arī, rotējot magnētiskajā laukā elektriskās mašīnas enkuram. 4.24. zīmējumā *a* attēlota puse no elektriskās mašīnas enkura, kas izgatavots no viena tērauda gabala. Ja tāds enkurs griežas magnētiskajā laukā, tad enkurā rodas virpuļstrāvas, kas 4.24. attēlā parādīti ar pārtrauktām līnijām. Bet, ja enkuru samontē no atsevišķām tērauda loksnēm (4.24. att. *b*), tad šīs strāvas var daudzkārt samazināt.

Ja daudzās mašīnās, aparātos un mehānismos virpuļstrāvu ra­šanās ir kaitīga, tad daudzās citās iekārtās virpuļstrāvas var iz­mantot lietderīgi, darbinot mehānismus vai arī nodrošinot tiem nepieciešamo darba režīmu.

4.25. zīmējumā attēlots mēraparāta disks. Griežoties diskam starp pastāvīga magnēta poliem, tajā rodas virpuļstrāvas. Šo strāvu mijiedarbība ar pastāvīgā magnēta lauku bremzē disku; šis process nodrošina aparāta normālu darbību.

|  |  |
| --- | --- |
|  | 4.25. att. Virpuļstrāvas diskā, kas griežas pastā­vīga magnēta magnētiskajā lauka. |

Virpuļstrāvas izmanto metālu karsēšanā virsmu rūdīšanai un kausēšanai.

**4.13. MAGNĒTISKĀ LAUKA INTENSITĀTE**

Magnētiskā lauka intensitāte, ko apzīmē ar *H*, ir otrs vekto­riāls pamatlielums, kas raksturo lauku katrā tā punktā.

Strāvas magnētiskā tauka intensitāte homogēnā vidē nav at­karīga no vides magnētiskajām īpašībām.

Magnētiskā lauka intensitāte vakuumā

 (4.23)

kur *B*0 — magnētiskā indukcija vakuumā, T;

μ0 — magnētiskā konstante jeb vakuuma ab­solūtā magnētiskā caurlaidība, kas rak­sturo vakuuma magnētiskās īpašības.

Magnētisko konstanti SI sistēmā izsaka henrijos uz metru (H/m):



Magnētiskā lauka intensitātes mērvienība SI sistēmā ir am­pērs uz metru (A/m). Praktiskos aprēķinos vēl lieto mērvie­nību ampērs uz centimetru (1 A/cm = 102 A/m)

Gaisam, papīram, kokam, keramikai, varam, alumīnijam un citām neferomagnētiskām vielām absolūtā magnētiskā caurlaidība praktiski vienāda ar vakuuma absolūto magnētisko caurlaidību *μ*0.

Tātad magnētiskā indukcija vakuumā un praktiski jebkurā neferomagnētiskā vidē

*B*0 = *μ*0*H*0. (4.24)

Ja magnētisko indukciju vakuumā izsaka vēberos uz kvadrāt­metru, tad jebkurā neferomagnētiskā vidē magnētiskā lauka inten­sitāte

 (4.25)

Magnētiskā lauka intensitāte feromagnētiskā vidē

 (4.26)

kur *μa* — vides absolūtā magnētiskā caurlaidība, kas raksturo vides magnētiskās īpašības, H/m.

Magnētiskā indukcija feromagnētiskā vidē

*B = μaH*. (4.27)

Dažādu vielu magnētiskās īpašības parasti raksturo ar vielas magnētisko caurlaidību

 (4.28)

kas ir nenosaukts skaitlis un rāda, cik reizes dotās vielas absolūtā magnētiskā caurlaidība ir lielāka par magnētisko konstanti.

Praktiski jebkurai neferomagnētiskai videi *μ* = l.

No izteiksmēm (4.27) un (4.28) izriet, ka

*B = μμ*0*H*. (4.29)

Tātad magnētiskā lauka magnētiskā indukcija, pretēji lauka intensitātei, ir atkarīga no vides magnētiskajām īpašībām.

Viendabīgā un izotropā vidē (tai fizikālās īpašības visos vir­zienos ir vienādas) magnētiskā lauka intensitātes vektora vir­ziens sakrīt ar magnētiskās indukcijas vektora  virzienu.

Lauka intensitāte ir nepieciešama, aprēķinot elektrisko mašīnu un transformatoru magnētiskās ķēdes, kā arī visos gadījumos, kur magnētiskās līnijas šķērso ķermeņus ar dažādām magnētiskām caurlaidībām; tātad lauka intensitāte ir svarīgs lielums aprēķinos. Ja lauka intensitāte ir zināma, nav grūti noteikt ari magnētisko indukciju (4.29).

Sakarību starp strāvu un tās magnētiskā lauka intensitāti iz­saka pilnās strāvas likums.

**4.14. MAGNĒTISKAI MOMENTS UN MAGNĒTISKAIS SPRIEGUMS**

**Magnētiskais moments**. Noslēgtu elektrisku strāvu elementārā kontūrā, t.i., kontūrā, kas ir ļoti mazs, salīdzinot ar attālumiem līdz novēršanas punktiem, sauc par *elementāru elektrisko strāvu* jeb *magnētisko dipolu*.

Šo dipolu raksturo ar vektoriālu lielumu, kura skaitliskā vērtība ir vienlīdzīga strāvas *i* un elementārā strāvas kontūra ierobežota laukuma *S* reizinājumam, bet virzienu, kas perpendikulars kontūra plaknei, nosaka saskaņā ar strāvas virzienu pēc labās skrūves likuma. Šādu vektoriālu lielumu sauc par elementārās elektriskās strāvas magnētisko momentu.

Magnētisko momentu apzīmē ar burtu *m*, mērvienība SI sistēmā ir A∙m2:

*m = i∙S*. (4.30)

**Magnētiskais spriegums**. Analoģiski elektriskajam spriegumam magnētisko lauku aprē­ķinos lieto magnētiskā sprieguma jēdzienu (apzīmējums *Um*). Ja magnētiskā lauka intensitāte ir vienāda visos magnētis­kās līnijas punktos, kā, piemēram, taisna strāvas vada gadījumā vai arī homogenā magnētiskā laukā (4.26. att. *a*), tad magnētisko spriegumu starp jebkuriem diviem šīs magnētiskās līnijas punktiem aprēķina, sareizinot magnētiska lauka intensitātes vērtību ar magnētiskās līnijas posma garumu:

*Um = Hl.* (4.31)

|  |  |
| --- | --- |
| ***a*** | ***b*** |

4.26. att. Magnētiskais spriegums.

Vispārīgākā gadījumā, piemēram, aprēķinot magnētisko sprie­gumu homogenā magnētiskā laukā starp diviem punktiem, kuri atrodas attālumā *l* viens no otra, bet ne uz vienas un tās pašas magnētiskās līnijas (4.26. att. *b*):

*Um = Hl∙l*, (4.32)

kur *Hl* — intensitātes vektora tangenciālā komponente (attiecībā pret taisni *l*). Vispārīgā gadījumā, kad attāluma *l* dažādos punk­tos magnētiskā lauka intensitāte nav vienāda, rakstām

 (4.33)

atšķirībā no elektrostatiskā lauka *Um* ir atkarīgs no izvēlētā ceļa starp punktiem.

No pēdējām formulām izriet, ka magnētiskā sprieguma mērvienība ir ampērs:



Bieži jāaprēķina magnētiskais spriegums pa brīvi izvēlētu no­slēgtu kontūru. Magnētisko spriegumu pa noslēgtu kontūru sauc par magnetizējošo spēku (m. s.) jeb magnetodzinējspēku (MDS) (apzīmējums *F*).

4.15. PILNĀS STRĀVAS LIKUMS

Pilnās strāvas likums dod iespēju ne tikai ērti aprēķināt strā­vas magnētiskā lauka intensitāti dažādas ģeometriskas konfigu­rācijas strāvas vadiem (taisns vads, spole, toroīds), bet uz to pamatojas visu elektrisko mašīnu un aparātu magnētisko ķēžu aprēķini.

Par pilno strāvu sauc visu to strāvu algebrisko summu (Σ*I*), kuras aptver iedomāts patvaļīgas formas noslēgts kontūrs jeb, kā saka, kuras saķēdētas ar šo kontūru (4.27. att.).

Tā kā katra strāva rada magnētisko lauku, tad telpā ap strāvas vadiem pastāv rezultējošais magnētiskais lauks; vispārīga ga­dījumā intensitātei katrā šī lauka punktā ir savs virziens un sava skaitliskā vērtība.

|  |  |
| --- | --- |
| 4.27. att. Ilustrācija pilnās strāvas likumam. | 4.28. att. Spoles vi­sus vijumus aptve­rošā magnētiskā līnija. |

Patvaļīgi izvēlēta, strāvas vadus aptveroša kontūra punktā *K* (4.27. att.) parādām lauka intensitātes *H* vektoru un ap punktu *K* izdalām bezgalīgi mazu kontūra elementu, kura virzienu parāda patvaļīgi izvēlētā kontūra apejas virzienā vērsts vektors 

Eksperimentāli pamatotais pilnās strāvas likums nosaka, ka magnētiskā lauka intensitātes vektora līnijas integrālis pa jebkuru noslēgtu kontūru vienāds ar pilno strāvu:

 (4.34)

Aprēķinot pilno strāvu Σ*I*, strāvas, kuru virzienus ar kontūra apejas virzienu saista labās skrūves likums, pieņem par pozitī­vām, pārējās — par negatīvām.

Tad 4.27. attēla apskatītajā piemēra pilna strāva

Σ*I = I*1 + *I*2 – *I*3.

Ja spolē ar w vijumiem plūst strāva *I* (4.28. att.), tad jebkurām noslēgtam kontūrām, kas aptver visus vijumus, pilnā strāva

 (4.35)

Reizinājumu *Iw* sauc par magnetizējošo spēku, mērvienība ampērs.

Ja par integrēšanas kontūru pieņem magnētisko līniju (4.28. att.), tad magnētiskās līnijas virziens tai pašā laikā ir arī kontūra apejas virziens. Bet, tā kā intensitātes vektors ir magnētiskās līnijas pieskare jebkurā tās punktā (sakrīt ar vektora virzienu), tad šādiem gadījumiem vektoru zīmes pilnās strāvas likuma izteiksmē ir liekas:



Ja bez tam vēl tādas vai citādas simetrijas dēļ integrēšanas kontūra (magnētiskās līnijas) visos punktos magnētiskā lauka intensitātei ir viena un tā pati skaitliskā vērtība (*H* = const), tad



kur *l* — kontūra (magnētiskās līnijas) garums, m.

Un pilnās strāvas likuma izteiksme kļūst visai vienkārša:

*Hℓ = Iw* . (4.36)

Šī izteiksme ir ļoti ērta strāvas magnētiskā lauka intensitātes noteikšanai, par integrēšanas kontūru pieņemot magnētisko līniju.

Tā, piemēram, homogēnā vidē novietotam bezgalīgi garam praktiski ļoti garam) taisnam vadam, pa kuru plūst strāva *I*, magnētiskā lauka intensitāti *H* punktos, kas atrodas *a* metru attālumā no vada ass, aprēķina no izteiksmes (4.36), par integrēšanas kontūru pieņemot magnētisko līniju ar rādiusu *a*. Tā kā *w* = 1 un *l* = 2π*a*, tad

 (4.37)

Līdzīgi aprēķina toroīda (gredzenveida spoles) magnētiskā lauka intensitāti H uz toroīda viduslīnijas, ko pieņem par integrē­šanas kontūru. Tā kā spoles vijumi vienmērīgi iz­vietoti pa visu toroīda serdi, tad strāvas magnētiskais lauks ir koncentrēts tikai toroīda iekšienē, un magnētiskās līnijas ir kon­centriskas aploces. Tādēļ toroīda viduslīnijas *l* visos punktos intensitātes skaitliskā vērtība ir viena un tā pati (*H* = const). Tad toroīdam ar *w* vijumiem neatkarīgi no serdes materiāla

 (4.38)

Ja toroīda ārējais un iekšējais rādiuss maz atšķiras no toroīda viduslīnijas rādiusa a, tad var pieņemt, ka magnētiskais lauks toroīda iekšienē ir homogēns.

No izteiksmes (4.38) secinām, ka magnētiskā lauka intensi­tāte *H* skaitliski ir vienāda ar magnetizējošo spēku uz magnētis­kās līnijas garuma vienību.

**4.16. TAISNA STRĀVAS VADA MAGNĒTISKAIS LAUKS**

Izmantojam pilnās strāvas likumi, lai aprēķinātu intensitāti magnētiskajam laukam, kas aptver taisnu strāvas vadu, patvaļīgi punktā A, kurš atrodas no vada ass attālumā *r > a* (*a* - vada rādiuss), Novelkam ar rādiusu *r* noslēgtu kontūru ap vadu. Simet­rijas dēļ visos punktos, kas atrodas vienādā attālumā no vada ass, lauka intensitāte ir viena un tā pati (4.29. att.),

Tā kā kontūrs sakrīt ar magnētisko līniju, tad intensitātes vek­tors un tā tangenciālā komponente ir vienādi: *H = Hl*.

Pilnā strāva šajā gadījumā ir vienlīdzīga strāvai vadā, t.i., Σ*I = I*, bet, tā ka *l* = 2*πr*, tad

 (4.39)

|  |  |
| --- | --- |
| 4.29. att. Magnētiskais lauks ap taisnu strāvas vadu. | 4.30. att. Magnētiskais lauks taisna strāvas vada iekšienē. |

Reizinot lauka intensitātes vērtību ar absolūto magnētisko caurlaidību, iegūstam magnētisko indukciju:

 (4.40)

Ja vads atrodas diamagnētiskā vai paramagnētiskā vidē, tad ar pietiekošu precizitāti *μ* = 1 un



Stingri ņemot, šī formula ir pareiza jebkurai *r* vērtībai tikai tādā gadījumā, ja vads ir bezgalīgi garš; tomēr to var lietot mag­nētiskās indukcijas aprēķināšanai, ja vada garums ir pietiekami daudz reižu lielāks par attālumu *r*.

Izmantojot pilnās strāvas likumu, var aprēķināt lauka intensi­tāti arī cilindriska vada iekšienes punktā, kura attālums no vada ass ir *r < a*.

Strāvas blīvums



ir vienāds visā vada šķērsgriezumā. Par noslēgto kontūru atkal izvēlamies riņķa līniju ar rādiusu r. Izmantojot pilnās strāvas likumu, rakstām:



kur Sr = πr2 — laukums, ko ierobežo kontūrs;

δ∙Sr — pilnā strāva, kas plūst caur laukumu *S*.

Ievietojot pilnās strāvas vērtību, iegūstam

 (4.41)

t. i., lauka intensitāte patvaļīgā punktā vada iekšienē ir tieši pro­porcionāla attālumam r no vada ass. Tātad centrā (r = 0) kā H = 0, tā arī B = 0.

Lauka intensitāte uz vada virsmas (*r ≈ a*)



ir vislielākā intensitāte aplūkojamā magnētiskajā laukā.

***4.6. piemērs.*** Aprēķināt magnētiskā lauka intensitāti un magnētisko induk­ciju punktos, kas atrodas 2, 4 un 10 mm attālumā no taisna vada ass. Vada rādiuss *r0* = 4 mm, strāva vadā *I*

= 50 A un *μ* = l. Uzzīmēt magnētiskā lauka izmaiņu vadā un ārējā vidē.

Punkts, kura attālums no vada ass ir *r*1 = 2 mm*,* atrodas vada iekšienē, tāpēc





Punkts, kura attālums no vada ass ir *r*2 = 4 mm*,* atrodas uz tā virsmas (*r*2 = *r*0):





Beidzot, punkts, kura attālums no vada ass ir *r*3 = 10 mm,atrodas ārpus vada:





4.31. attēlā grafiski attēlota lauka intensitātes un indukcijas maiņa vadā un ārpus tā.

|  |  |
| --- | --- |
|  | 4.31. att. Magnētiskā lauka intensitātes un indukcijas maiņas grafiks 4.6. piemēram. |

**4.17. DIVU PARALĒLU STRĀVAS VADU MAGNĒTISKAIS LAUKS**

Ja lauku rada strāvas, kas plūst pa diviem taisniem paralē­liem vadiem, tad magnētiskās indukcijas lielumu un virzienu jeb­kurā lauka punktā var aprēķināt, ģeometriski saskaitot atsevišķo vadu radīto magnētisko indukciju vektorus attiecīgajā lauka punktā:

***B = B*1 + *B*2**. (4.42)

Tātad divu strāvas vadu magnētisko lauku var uzskatīt kā atsevišķo strāvas vadu magnētisko lauku superpozīcijas rezultātu.

Aprēķinām divu strāvas vadu mijiedarbības spēkus, ievērojot, ka vads ar strāvu *I*2atrodas strāvas *I*1magnētiskajā laukā un, otrādi, vads ar strāvu *I*1— strāvas *I*2magnētiskajā laukā (4.32. att.).

Eksperimentāli noskaidrots, ka spēki *F*1 un *F*2, kas darbojas uz vadiem, ir vienādi, t.i., *F*1= = *F*2.

Vadi ar vienāda virziena strāvām pievelkas, bet vadi ar pretēja virziena strāvām atgrūžas. Par to var viegli pārliecināties, izmantojot svārpsta likumu un kreisās rokas likumu.

|  |  |
| --- | --- |
|  | 4.32. att. Divu paralēlu strāvas vadu mijiedarbība. |

Ja posma garums *l*, kurā vadi ir paralēli (vadu tuvināšanas garums), ir daudz lielāks par attālumu *a* starp vadiem, tad spēks *F* ir proporcionāls strāvu reizinājumam ar vadu garumu, apgriezti proporcionāls attālumam starp vadiem un ir atkarīgs no vides, kurā vadi ir novietoti.

 (4.43)

Magnētisko indukciju *B*1*,* ko strāva *I*1rada punktos, kur atrodas otrs vads, nosaka pēc formulas:



Vektors *B*1 ir perpendikulārs vadu plaknei; tā virzienu nosaka labās skrūves likums.

Savukārt pirmais vads atrodas strāvas I2 radītajā laukā; šajā gadījumā



Tādējādi visos punktos, kas atrodas vienādos attālumos *a* no strāvas vadu asīm, magnētiskajai indukcijai ir vienādas vērtības:

 (4.44)

Praktiskos aprēķinos ērtāk izmantot spēku, kas darbojas uz vadu garuma vienību:

 (4.45)

Ievietojot šinī formulā magnētiskās konstantes vērtību *μ*0 = 4π∙10-7 H/m vakuumam un gaisam (uzskatot, *μ* = 1), iegūstam spēku ņūtonos uz metru:

 (4.46)

kur I1 un I2 — ampēros, bet a — metros.

Pārveidojot formulu (4.45), ja I1 = I2, iegūstam

 (4.47)

Vadu mijiedarbības spēks ir sevišķi liels tad, kad elektriskajā tīklā rodas īsslēgums.

**4.7. piemērs.** Cik stipras ir vienādas strāvas divos paralēlos vados, kuri atrodas viens no otra 20 cm lielā attālumā, ja uz katru vada metru darbojas 100 N liels spēks?

Ievietojot formulā (4.47) iegūstam



***4.8. piemērs.*** Aprēķināt, kurs no izolatoriem ir visvairāk noslogots, ja pa trim paralēliem gaisa elektropārvades līnijas vadiem īsslēguma gadījumā plūst sekojošas strāvas *IA* = 4000 A, *IB* = 8000 A, *IC* = 12000 A un attālums starp blakus esošajiem balstiem ir *l* = 80 m, bet attālums starp diviem blakus esošiem paralēliem vadiem *a* = 1,5 m (4.33. att.)

|  |
| --- |
| 4.33. att. Aprēķina shēma 4.8. piemēram |

Atrisinājums.

1. Mijiedarbības spēks starp diviem strāvas vadiem (gaisam μ = 1)







2. Rezultējošais spēks uz katru izolatoru

*FA = FAB – FAC* = 341 – 256 = 85 N.

*FB = FBA + FBC* = 341 + 1024 = 1356 N.

*FC = FCB + FCA* = 1024 + 256 = 1280 N.

Tātad, vislielākais rezultējošais spēks darbojas uz fāzes B izolatoru

**4.18. KOAKSIĀLA KABEĻA MAGNĒTISKAIS LAUKS**

Dažās elektrotehnikas nozarēs lieto koaksiālus kabeļus, kas sastāv no cilindriska vienlaidus vada 1 un cauruļveida vada 2 (4.34. att.), kuriem ir kopēja ass. Pa vadiem 1 un 2 plūst skaitliski vienādas pretēja virziena strāvas.

|  |  |
| --- | --- |
|  | 4.34. att. Koaksiālais kabelis. |

Aprēķinām kabeļa magnētisko lauku. Apzīmējam cilindriskā vada rādiusu *R*1, cauruļveida vada iekšējo rādiusu *R*2 un ārējo — ar *R*3. Izmantojot pilnās strāvas likumu, aprēķinām magnētiskā lauka intensitāti punktos, kas atrodas dažādā attālumā *r* no vada ass.

1. Ja *r < R*1, pēc pilnās strāvas likuma (sk. 4.41)



2. Ja *R*1 < *r* < *R*2 (sk. 4.39):



3. Ja *R*2 < *r* < *R*3, tad



4. Ja *r > R*3, pilnā strāva ir vienlīdzīga nullei un *H* = 0.

Tātad ārpus koaksiāla kabeļa magnētiskā lauka intensitāte ir vienlīdzīga nullei.

**4.19. GREDZENVEIDA SPOLES (TOROĪDA) MAGNĒTISKAIS LAUKS**

Izmantosim pilnās strāvas likumu, lai aprēķinātu lauka inten­sitāti toroīdā, t. i., spolē, kas ar vienmērīgu blīvumu (vijumu skaitu uz 1 cm) uztīta gredzenā (4.35. att.).

Simetrijas dēļ magnētiskā lauka in­tensitāte *H* ir vienāda visos punktos, kuru attālums no gredzena ass ir *r*; tā­pēc, izvēloties noslēgtu kontūru, kas sa­krīt ar magnētisko līniju (aploci ar rādiusu *r*), rakstām saskaņā ar pilnās strāvas likumu (4.36):

*Hl = Iw*, (4.48)

kur

*l* = 2π*R*; *Iw* = Σ*I*,

|  |  |
| --- | --- |
|  | 4.35. att. Gredzenveida spole (toroīds) |

jo virsmu, ko ierobežo aplūkojamais kontūrs, šķērso *w* vadu (*w* — spoles vijumu skaits) ar vienāda virziena strāvu *I*.

No (4.48) atrodam lauka intensitāti

 (4.49)

Acīm redzot lauka intensitāte atšķiras no nulles tikai tad, ja *R < R*2, kur *R*1 — gredzenveida spoles iekšējais, bet *R*2 — ārējais rādiuss. Strāvu algebriskā summa, kuras plūst caur virsmu, ko ierobežo kontūrs ar rādiusu, mazāku par *R*1 vai lielāku par *R*2, ir vienlīdzīga nullei.

Magnētiskā indukcija spoles iekšienē (punktā A)

 (4.50)

Lauka intensitātei un magnētiskajai indukcijai spoles iekšienē ir lielāka vai mazāka vērtība atkarībā no punkta A attāluma līdz gredzena centram. Magnētiskajai indukcijai ir maksimālā vērtība



uz spoles iekšējās virsmas, bet minimālā



uz ārējās virsmas. Jo mazāka ir starpība starp *R*1 un *R*2, jo tuvākas viena otrai ir *Bmax* un *Bmin* vērtības. Magnētiskās induk­cijas vidējā vērtība

 (4.51)

kur *lv* = 2π*R*, bet *R* ir spoles vidējais rādiuss.

***4.9. piemērs.*** Uz noslēgtas gredzenveida serdes (4.36. att.) vienmērīgi uztīts tinums, kura vijumu skaits *w* = 200. Gredzena šķērsgriezuma laukums ir taisnstūris. Tā ārējais diametrs *D* = 16 cm, iekšējais diametrs *d* = 10 cm, biezums *b* = 4 cm.

|  |  |
| --- | --- |
|  | 4.36. att. Aprēķina shēma 4.9. piemēram |

Aprēķināt strāvu spolē, pie kuras magnētiskā plūsma serdē ir Φ = 12·10-4 Wb. Serdes materiāls izgatavots no neferomagnētiska materiāla (*μ* = 1).

Atrisinājums.

1. Serdes materiāla šķērsgriezums



2. Magnētiskā indukcija serdē



3. Magnētiska lauka intensitāte serdē



4. Strāvu tinumā aprēķināsim, lietojot formulu



Kur magnētiskās līnijas vidējais garums



tātad



5. Toroīda induktivitāte



Magnētiskā lauka intensitāte gredzenveida spoles iekšienē [formula (4.49)] skaitliski ir vienlīdzīga magnetizējošam spēkam uz spoles garuma vienību; tāpēc magnētiskā lauka intensitāti kādā punktā A, kas atrodas uz vijumu ass, var izteikt kā attiecību starp *m. s.*, kas darbojas loka daļā, un šīs loka daļas garumu *l'* (4.37. att. *a)*:



|  |  |
| --- | --- |
|  | ***b*** |

4.37. att. Cilindriska spole.

Cilindrisku spoli (4.37. att. *a*) var uzlūkot kā daļu no gre­dzenveida spoles, kam ir bezgalīgi liels rādiuss un tinums uztīts tikai uz serdes daļas, kuras garums ir vienlīdzīgs spoles garumam. Garas (teorētiski - bezgalīgi garas) spoles iekšienē var pieņemt, ka magnētiskais lauks ir homogēns un vektors B vērsts aksiālā virzienā (4.37. att. *b*) atkarībā no strāvas virziena spoles vijumos. Ārpus šādas spoles magnētiskais lauks nerodas. Tāpēc lauka intensitāti šādas spoles centrā aprēķina pēc tās pašas formulas:

 (4.52)

kur *I*w — spoles *m. s.*, *l* — tās garums.

Šī formula ir tikai tuvināti pareiza, jo vijumi šajā gadījumā nav izvietoti pa visu spoles garumu (t.i., pa noslēgtu gredzenu). Kļūda ir jo mazāka, jo garāka ir spole.

Galīga garuma spolei pēdējā formula lietojama gan tikai ļoti aptuvenam lauka intensitātes aprēķinam, jo pieņēmums, ka ārpus spoles magnētiskais lauks nenokļūst, tādā gadījumā nav pamatots. Galīga garuma cilindriskas spoles aptuvena magnētiskā lauka spēka līniju aina parādīta 4.38. attēlā *a*.

Sevišķi liela kļūda ir tad, ja pēc šīs formulas aprēķina lauka intensitāti vai magnētisko induk­ciju spoles galos. Precīzāk magnētisko indukciju uz galīga garuma spoles (4.38. att. *b*) ass punktā A aprēķina pēc formulas

 (4.53)

|  |  |
| --- | --- |
| ***a*** | ***b*** |

4.38. att. Galīga garuma cilindriskas spoles: *a* - spoles magnētiska lauka aina; *b* – aprēķina shēma

***4.10. piemērs.*** Aprēķināt cilindrveida spoles magnētiskā lauka intensitāti, indukciju, plūsmu, induktivitāti un magnētiskā lauka uzkrāto enerģiju, ja spoles diametrs *d* = 5 cm, garums *l* = 20 cm, vada vijumu skaits *w* = 1000 un strāvas stiprums *I* = 5 A.

Atrisinājums.

1. Spoles magnētiska lauka intensitāte



2. Spoles magnētiska lauka indukcija



3. Magnētiskā plūsma spolē

Φ = B·S = 0,0314·0,002 = 0,628·10-4 Wb,

kur S – spoles šķērsgriezuma laukums.

To savukārt izsaka no formulas



4. Induktivitāte spolei



5. Spoles magnētiskā lauka enerģija



**4.20. FEROMAGNĒTISKO MATERIĀLU PAMATĪPAŠĪBAS**

Elektrotehnikā visas dabā sastopamās vielas atkarībā no to magnētiskajām īpašībām iedala divās grupās — neferomagnētiskās un feromagnētiskās vielās.

Neferomagnētiskām vielām raksturīgākā īpašība ir nemainīga magnētiska caurlaidība (*μ* = const), un tādēļ tām sa­karība *B =* *f*(*H*) ir lineāra (4.39. att.); taisnes slīpums ir atka­rīgs tikai no *B* un *H* mērogiem. Praktiskos aprēķinos šīm vielām pieņem *μa = μ*0, t. i., *μ* = l.

|  |  |
| --- | --- |
|  | 4.39. att. Sakarība *B = f*(*H*) neferomagnētis*­*kām vielām. |

Neferomagnētiskas vielas ir gāzes, elektroizolācijas materiāli, varš, alumīnijs, misiņš, bronza un daudzi citi metāli.

Feromagnētiskām vielām (materiāliem) ir raksturīga visai liela magnētiskā caurlaidība (μ sasniedz 104— 105 un vairāk), tikai tā nav konstanta (*μ* ≠ const), bet ir atkarīga no magneti­zējošā lauka intensitātes *H*, un tādēļ sa­karība *B = f*(*H*) ir nelineāra; šīs vielas sa­glabā magnētismu, ko sauc par palie­košo magnētismu.

Feromagnētiskie materiāli ir dzelzs, niķelis, kobalts, dzelzs modifikācijas (tē­rauds, čuguns) un to sakausējumi, kā arī sakausējumi ar nefero-magnetiskiem materiāliem (Al, Cu, Cr, Si u. c.).

Feromagnētiskos materiālus ļoti plaši izmanto elektriskajās mašīnas un dažādos elektriskos aparātos un ierīcēs, kurās jārada noteikta stipruma un noteiktas konfigurācijas magnētiskais lauks. Šim nolūkam parasti izveido *e1ektromagnētus*, t. i., spo­les ar feromagnētisku materiālu serdēm, jo pastāvīgie magnēti ir samērā dārgi, grūti regulēt to magnētisko lauku utt. Feromag­nētiska serde, kā tas paskaidrots tālāk, daudzkārt pastiprina strā­vas radīto magnētisko lauku.

Ja divām spolēm ir pilnīgi vienādi ģeometriskie izmēri un vie­nāds vijumu skaits w un tajās plūst vienādas strāvas *I*, tad strā­vas magnētiskā lauka intensitāte *H* abās spolēs ir vienāda (4.40. att.), kaut gan viena spole (*a*) atrodas vakuumā resp. gaisa, citiem vārdiem, spolei ir neferomagnētiska materiāla serde (*μ* = l), bet otrai spolei (*b*) — feromagnētiska materiāla serde ar *H* vērtībai atbilstošu *μ* >> l.

No magnētiskās indukcijas izteiksmēm abām spolēm [*B*0 = *μ*0*H* (*a*) un *B = μμ*0H (*b*)] izriet, ka spolē ar feromagnētisku serdi magnētiskā indukcija *B* ir *μ* reizes lielāka par magnētisko Indukciju *B*0 spolē ar neferomagnētiska materiāla serdi.

Tātad, spoli novietojot uz feromagnētiska materiāla noslēgtas serdes (4.40. att.) ar šķērsgriezuma laukumu S, magnētiskā plūsma spoles serdē Φ = *BS* ir μ reizes lielāka nekā spolei bez šīs serdes. Izskaidrojums te vienkāršs: spoles strāvas magnētiskais lauks magnetizē serdi, pie tam pašas serdes magnētiskais lauks ir daudzkārt spēcīgāks par spoles strāvas magnētisko lauku.

Katru feromagnētisku materiālu kvalitatīvi raksturo tā magnetizēšanas līkne *B = f*(*H*) un histerēzes cilpa.

Magnetizēšanas līkne attēlo, kā materiālā mainās magnētiskā indukcija B atkarībā no dažādām ārējā magnetizējošā lauka intensitātes H vērtībām. Līkni iegūst eksperimentāli, mainot strā­vas magnētiskā lauka intensitāti, t. i., mainot strāvu *I* spolē, kura vienmērīgi uztīta uz pētāmā materiāla noslēgtas serdes (4.40. att.).

|  |  |
| --- | --- |
| 4.40. att. Spole bez feromagnētiskas serdes (*a*) un ar feromagnētisku serdi **(*b*).** | 4.41. att. Sākotnējā magnetizēšanas līkne un μ = *f*1(H) līkne. |

Magnetizēšanas līkne elektrotehniskā tērauda skārdam parādīta 4.41. attēlā. Tai ir vairāki raksturīgi posmi:

0—*a* — līkne, kas rāda sakarību starp B un H vājā laukā; šim posmam ir praktiska nozīme tikai magnētiskajās ķēdēs ar ļoti vāju lauka intensitāti H;

*a—b* — praktiski taisne;

*b—c* — magnetizēšanas līknes izliekums (sākas materiāla magnētiskā piesātināšanās) un

*c—d* — materiāla magnētiskā piesātinājuma rajons, ko attēlo gandrīz taisna līnija, kas ar abscisu asi veido nie­cīgu leņķi; tātad šajā posmā sakarība *B = f*(*H*) prak­tiski ir lineāra, un ievērojamam intensitātes H pie­augumam atbilst ļoti mazs indukcijas B pieaugums.

Katram feromagnētiskam materiālam ir sava magnetizēšanas līkne (4.42. att.). Magnetizēšanas līkni *B = f*(*H*), ko uzņem iepriekš pilnīgi atmagnetizētam feromagnētiskam materiālam, sauc par sākotnējo magnetizēšanas līkni (4.36. att.).

Ja palielina ārējā magnetizējošā lauka intensitāti, sakot ar vērtību *H* = 0, tad feromagnētiska materiāla magnētiskā caurlai­dība *μ* pieaug no sākotnējās vērtības *μs* > 0 līdz mak­simālajai vērtībai *μm* un pēc tam strauji samazinās (4.41. att.). Magnētiskās caurlaidības sākotnējā vērtība *μs* rak­sturo materiāla izmantošanas efektivitāti vājos magnētiskos lau­kos, bet maksimālā magnētiskā caurlaidība *μm* — materiāla izmantošanas iespēju magnētiskās plūsmas pastiprināšanai.

Magnētiskās caurlaidības robežvērtības elektrotehniskā tē­rauda skārdam *μs* = 400—1000 un *μm* = 5000—30 000. Speciāliem sakausējumiem *μm* vērtības ir daudzkārt lielākas.

|  |  |
| --- | --- |
|  | 4.42. att. Dažu feromagnētisko materiālu magnetizēšanas līknes (magnētiski mīkstie): 1 — permendurs (50% Fе un 50% Со); 2 — elektrotehniskais tērauds 3413; 3 — elektrotehniskais tērauds 1211; 4— permalojs 50Н; 5 — permalojs 79НМ |

***Histerēzes cilpa***. Ja pilnīgi atmagnetizētu feromagnētisku ma­teriālu ievieto ārējā magnētiskā laukā, kura intensitāti maina no vērtības *H* = 0 līdz patvaļīgi izraudzītai maksimālai vērtībai *Hm* (mainot magnetizējošās spoles strāvu no nulles līdz *Im*), tad mag­nētiskā indukcija *B* materiālā mainās pēc sākotnējās magnetizē­šanas līknes OA, sasniedzot maksimālo vērtību *Bm* (4.43. att.).

Samazinot lauka intensitāti *H* resp. spoles strāvu *I*, magnētis­kās indukcijas izmaiņas līkne AK atpaliek no sākotnējās magne­tizēšanas līknes.

Parādību, ka magnētiskās indukcijas *B* izmaiņas atpaliek no ārējā magnētiskā lauka intensitātes H izmaiņām, sauc par mag­nētisko histerēzi.

Ja lauka intensitāti samazina līdz vērtībai *H* = 0, materiālā tomēr saglabājas sākotnējā virziena magnētiskais lauks, ko rak­sturo paliekošās jeb remanentās magnētiskās in­dukcijas vērtība OK.

Lai materiālu atmagnetizētu, t. i., sasniegtu *B* = 0 (punkts M), tad materiāls jāpakļauj pretēja virziena magnētiskajam laukam (jāmaina *I* virziens) ar intensitātes vērtību OM. Nogrieznis OM izsaka materiāla aizturošo jeb koercitīvo spēku.

Palielinot pretējā virziena lauka intensitāti līdz — *Hm*, dabū līknes punktu C, kam atbilst maksimālā indukcija — *Bm*.

Samazinot pretējā virziena lauka intensitāti līdz vērtībai *H* = 0, dabū līknes punktu D. Paliekošo magnētisko indukciju (nogriez­nis OD = OK) likvidē sākotnējā virziena magnētiskais lauks ar nogrieznim ON atbilstošu intensitātes vērtību.

|  |  |
| --- | --- |
| 4.43. att. Histerēzes cilpa. | 4.44. att. Histerēzes cilpu saime un histerēzes  robežcilpa |

Lauka intensitāti palielinot līdz vērtībai *Hm*, nonāk atkal punktā A, t. i., iegūst noslēgtu kontūru.

Noslēgto kontūru, kas attēlo magnētiskās indukcijas izmaiņu vienā pār magnetizēšanas ciklā, sauc par histerēzes cilpu. Tās forma ir atkarīga no materiāla magnētiskajām īpašībām.

Izmantojot dažādas *Hm* vērtības, feromagnētiskam materiālam var eksperimentāli iegūt dažāda lieluma histerēzes cilpas, kuras, attēlotas kopīgā koordinātu plaknē, izveido cilpu saimi (4.44. att.). Šo histerēzes cilpu virsotņu ģeometriskā vieta ir līkne, ko sauc par galveno magnetizēšanas līkni (tā gandrīz sakrīt ar sākotnējo magnetizēšanas līkni).

Ja palielina ārējā magnētiskā lauka intensitātes maksimālo vērtību *Hm*, histerēzes cilpu laukumi palielinās tik ilgi, kamēr tiek sasniegta maksimālās intensitātes robežvērtība *HS* (4.44. att.): ar *Hm > HS* cilpas laukums vairs nepalielinās, un materiāla mag­nētiskā stāvokļa izmainu raksturo cilpas bezhisterēzes posmi AA' un CC'.

Robežintensitātei *HS* atbilstošo histerēzes cilpu sauc par his­terēzes robežcilpu, un tā kvalitatīvi raksturo materiālu.

Histerēzes robežcilpas krustpunkti ar koordinātu asīm (*Br* un *Hc*) izsaka feromagnētiskā materiāla būtiskākās īpašības: *Br* ir remanentā (paliekošā) indukcija un *Hc* — koercitīvais (aizturo­šais) spēks, kas raksturo materiāla spēju saglabāt magnētismu.

Magnētiskajai histerēzei ir liela praktiska nozīme (pastāvīgie magnēti, līdzstrāvas ģeneratori, histerēzes mikrodzinēji u. c).

Taču maiņstrāvas mašīnās, aparātos un ierīcēs magnētiskā histerēze ir enerģijas zudumu cēlonis (histerēzes zudumi), jo feromagnētiskā materiāla periodiskai pārmagnetizēšanai jāpatērē enerģija, kas materiālā pārvēršas siltumā. Tādēļ feromagnētiskie materiāli, kas atrodas mainīgā magnētiskā laukā, sasilst.

Vienā pārmagnetizēšanas ciklā patērētā elektriska enerģija (histerēzes zudumi) proporcionāla histerēzes cilpas laukumam. Tādējādi — jo lielāka pārmagnetizēšanas frekvence un jo lielāks materiāla histerēzes cilpas laukums, jo lielāki histerēzes zudumi. Tos ievērojami samazina, izgatavojot un izmantojot feromagnētiskus materiālus ar iespējami šauru histerēzes cilpu.

**4.21. FEROMAGNĒTISKIE MATERIĀLI**

Feromagnētiskos materiālus atkarībā no to magnētiskajām īpašībām parasti iedala trīs grupās: magnētiski mīkstie, magnē­tiski cietie un materiāli ar speciālām magnētiskajām īpašībām.

Magnētiski mīkstajiem materiāliem ir rakstu­rīga liela magnētiskā caurlaidība *μ*, mazs koercitīvais spēks *HC* (l—95 A/m), tātad šaura histerēzes cilpa un mazi histerēzes zu­dumi. Magnētiski mīkstie materiāli ir tehniski tīra dzelzs, tēraudi ar mazu oglekļa saturu, elektrotehniskā tērauda skārdi un permaloji; pēdējiem raksturīga histerēzes cilpa parādīta 4.45. at­tēlā *b*.

Tehniski tīru dzelzi un tēraudos ar mazu oglekļa saturu iz­manto līdzstrāvas magnētiskajās ķēdēs: no šiem materiāliem iz­gatavo līdzstrāvas elektromagnētu, releju un aparātu detaļas, līdzstrāvas mašīnu korpusus u. c.

Elektrotehniskā tērauda skārdus izmanto visvairāk; tie sastāv no dzelzs un 1—4% silīcija. Pēdējais uzlabo dzelzs magnētiskās īpašības: palielina *μs* un *μm* vērtības, palielina elektrisko pretes­tību un samazina koercitīvo spēku, tātad samazina histerēzes zudumus. Skārda biezums parasti ir 0,35 un 0,5 mm; tā viena puse pārklāta ar plānu elektroizolējošas emaljas slānīti.

No elektrotehniskā tērauda skārda izgatavo maiņstrāvas mag­nētiskās ķēdes: transformatoru serdes, elektrisko mašīnu statorus un rotorus, maiņstrāvas elektromagnētu serdes u. c.

|  |  |
| --- | --- |
|  | 4.45. att. Histerēzes cilpas magnētiski cie­tam (a) un magnētiski mīkstam (b) mate­riālam (permalojam). |

Permaloju — dzelzs-niķeļa sakausējumu — sastāvā ir līdz 80 % niķeļa; dažām šķirnēm ir vēl neliela hroma, silīcija vai cita elementa piedeva. Permalojam ir loti liela magnētiskā caurlaidība, kas vājos laukos 10—50 reizes lielāka nekā elektrotehniskajam tēraudam, un ļoti mazs koercitīvais spēks Hc (l—30 A/m). Taču permaloji ir visai dārgi.

No permaloja skārda izgatavo serdes mazjaudas transforma­toriem (radiotehnikai), droselēm, mērtransformatoriem, magnētis­kajiem pastiprinātājiem, relejiem u. c.

Magnētiski cietajiem materiāliem ir raksturīgs liels koercitīvais spēks Hc (40 000—60 000 A/m), liela paliekošā in­dukcija BT (0,4—1,3 T), tātad plata histerēzes cilpa (4.45. att. *a*).

Šai grupai pieder dzelzs sakausējumi ar kobaltu, niķeli, hromu, varu, alumīniju, silīciju, volframu u. c. metāliem: kobalttērauds, volframtērauds, hromtērauds un speciāli sakausējumi: alni (Fe, Ni, Al, Cu), alniko (Fe, Al, Ni, Co, Cu), magniko (Fe, Ni, Co, Cu, Al), alnisi (Fe, Al, Ni, Si).

No magnētiski cietajiem materiāliem izgatavo pastāvīgos mag­nētus elektriskajiem mēraparātiem, mazjaudas elektriskajām ma­šīnām un speciālām iekārtām (medicīnai, skaņu pierakstam u. c).

Feromagnētiskie materiāli ar speciālām mag­nētiskajām īpašībām ir magnētdielektriķi un ferīti.

Magnētdielektriķus iegūst, magnētiski mīksta materiāla, pie­mēram, permaloja pulveri sapresējot ar organisku vai neorga­nisku dielektrisku saistvielu (polistirolu vai izolējošiem sveķiem). Magnētdielektriķiem ir ļoti šaura histerēzes cilpa un ļoti mazi histerēzes zudumi; magnētiskā caurlaidība u, ir neliela — no da­žām vienībām līdz dažiem desmitiem vienību.

Ferītus izgatavo no dzelzs, cinka, niķeļa un citu metālu oksī­diem, kurus sasmalcina pulverī, pievieno saistvielas, sapresē formās un apdedzina 1200°C temperatūrā, iegūstot vajadzīgās for­mas detaļas (serdes). Pēc izskata ferīti atgādina keramiku. Ferī­tiem ir mazs koercitīvais spēks un liela magnētiskā caurlaidība.

Tā kā ferītu īpatnējā pretestība ir ap 106 reizes lielāka nekā tēraudam, tad virpuļstrāvu zudumi ferītos ir ļoti mazi, un šos materiālus var izmantot augstfrekvences ķēdēs.

Magnētdielektriķu un ferītu serdes lieto automātikas un skait­ļošanas tehnikas aparatūrā, radiotehnikā u. c.

**4.22. NESAZAROTU MAGNĒTISKO ĶĒŽU APRĒĶINI**

Par magnētisko ķēdi sauc ķermeni vai ķermeņu virkni, kurā noslēdzas magnētiskā plūsma.

Magnētiskās ķēdes veido galvenokārt no feromagnētiskajiem materiāliem, jo feromagnētiska serde daudzkārt pastiprina mag­netizējošā spēka *Iw* radīto magnētisko plūsmu un reizē novirza to uz vajadzīgo vietu elektriskajā iekārtā.

Magnētisko ķēžu konstruktīvā forma ir visai dažāda, pie tam starp feromagnētiskajiem posmiem bieži vien ir gaisa spraugas.

Magnētisko plūsmu Φ magnētiskajās ķēdēs parasti uztur uz to atsevišķiem posmiem novietotajās spolēs (tinumos) plūstošās strāvas (4.46. att. *a* un *c*), retāk — pastāvīgie magnēti (4.46. att. *b*).

Magnētiskās ķēdes, tāpat kā elektriskas ķēdes, ir nesazarotas jeb vienkāršas un sazarotas jeb saliktas, ar vienu vai vairākiem magnetizējošiem spēkiem.

Nesazarota magnētiskā ķēde sastāv tikai no viena feromagnētisko materiālu kontūra (4.46. att. *a* un *b*).

|  |
| --- |
| 4.46. att. Elektromagnēta (a), magnētelektriskās sistēmas mēr­aparāta (b) un  līdzstrāvas mašīnas (c) magnētiskās ķēdes. |

Magnētisko plūsmu Φ, kas noslēdzas pa magnētisko ķēdi, sauc par galveno magnētisko plūsmu. Bet reālajās magnē­tiskajās ķēdēs daļa magnētiskās plūsmas noslēdzas ap tinuma vijumiem gaisā (4.47. att.), jo tinums, atšķirībā no toroīda, nav izvietots pa visu serdes garumu. Šo plūsmas daļu, ko sauc par izkliedes plūsmu un apzīmē ar Фσ, precīzos aprēķinos ietver izkliedes koeficients *k*σ:

 (4.54)

Tomēr daudzos praktiskos gadījumos, vienkāršojot aprēķinus, izkliedes plūsmu var neievērot, t.i., var pieņemt, ka Фσ = 0, kā tas darīts tālāk iztirzātajos magnētisko ķēžu aprēķinos. Tādā ga­dījumā magnētiskā plūsma Ф visos nesazarotas magnētiskās ķē­des posmos ir viena un tā pati.

Pēc magnētisko ķēžu rakstura izšķir viendabīgas un nevien­dabīgas magnētiskās ķēdes.

Viendabīga nesazarota ķēde izveidota tikai no viena feromagnētiska materiāla, un ķēdes šķērsgriezuma laukums *S* visā tās garumā ir nemainīgs. Tādēļ magnētiskās indukcijas *B =* Φ/*S* un lauka intensitātes *H* vērtības visos viendabīgās ķēdes posmos arī ir nemainīgas (pieņemot, ka magnētiskais lauks ho­mogēns).

Magnētisko ķēžu aprēķināšanai vienmēr doti (vai izvēlēti) magnētiskās ķēdes ģeometriskie izmēri, materiāls un tā galvenā magnetizēšanas līkne *B = f*(*H*); aprēķināšanai izmanto pilnās strā­vas likumu.

|  |  |
| --- | --- |
| 4.47. att. Magnētiska ķēde ar galveno mag­nētisko plūsmu Φ un izkliedes plūsmu Φσ. | ***a b c***  4.48. att. Nesazarota viendabīga magnētiskā ķēde (*a*) un serdes materiāla magnetizēšanas līkne (*b*). |

Magnētisko ķēžu aprēķināšana ietver divējādus uzdevumus — tiešo un pretējo.

Visbiežāk jāatrisina tiešais uzdevums: jāaprēķina magnetizējošais spēks *Iw* vajadzīgās (dotās) magnētiskās plūs­mas Ф uzturēšanai noslēgtā serdē ar šķērsgriezuma laukumu S (4.48. att. *a*). Aprēķināšanas secība ir šāda:

* aprēķina serdē vajadzīgo magnētisko indukciju *B* = Ф/*S*;
* no serdes materiāla magnetizēšanas līknes (4.48. att. *b*) atrod serdē iegūstamai magnētiskajai indukcijai *B* atbil­stošo magnētiskā lauka intensitāti *H*;
* izmantojot pilnās strāvas likumu un no magnetizēšanas līk­nes nolasīto *H* vērtību, aprēķina vajadzīgo magnetizējošo spēku:

*Iw = Hl*,

kur *l* — serdes vidējais garums, m.

Tad izvēlas tinuma vijumu skaitu w (to ierobežo serdes iz­mēri) un aprēķina vajadzīgo strāvu: 

Retāk jāveic pretējais uzdevums: jāaprēķina magnē­tiskā plūsma Ф, ko magnētiskajā ķēdē uztur dotais magnetizējo­šais spēks *Iw*. Tādā gadījumā:

* no izteiksmes *Iw = Hl* aprēķina lauka intensitāti *H*;
* no magnetizēšanas līknes nolasa *H* vērtībai atbilstošo *B* vērtību;
* aprēķina iegūstamo magnētisko plūsmu Ф = *BS*.

Neviendabīga magnētiskā ķēde ir izveidota no da­žādiem materiāliem vai arī ķēdes posmiem ir dažādi šķērsgrie­zuma laukumi. Tādēļ magnētiskā lauka intensitātes H vērtības ķēdes dažādos posmos ir atšķirīgas.

4.49. attēlā *a* parādītā nesazarotā neviendabīgā magnētiskā ķēde sastāv no feromagnētiska materiāla serdes ar nemainīgu šķērsgriezuma laukumu (S = const) un vidējo garumu *l* un no gaisa spraugas ar garumu *l*0.

Ja gaisa sprauga ir īsa, tad magnētiskās plūsmas izkliedi gaisa spraugā var neievērot un pieņemt, ka plūsmas Ф šķērs­griezuma laukums gaisa sprauga *S*0 = *S*. Garākai gaisa spraugai plūsmas izkliede (4.49. att. *b*) jāņem vērā; laukumu *S*0 > *S* aprē­ķina pēc empīriskas formulas.

Tiešais uzdevums: jāaprēķina magnetizējošais spēks *Iw* va­jadzīgas (dotās) magnētiskās plūsmas Ф uzturēšanai serdē. Tad

* aprēķina serdē vajadzīgo magnētisko indukciju *B =* Ф/*S*;
* aprēķina magnētisko indukciju gaisa spraugā *B*0 = Ф/*S*0;
* no serdes materiāla magnetizēšanas līknes atrod *B* vērtī­bai atbilstošo *H* vērtību;
* aprēķina magnētiskā lauka intensitāti gaisa spraugā *H*0 (*H*0 ≈ 8*B*0∙105 A/m);
* no pilnās strāvas likuma izteiksmes apskatāmajai mag­nētiskajai ķēdei

*Iw = Hl + H*0*l*0 (4.55)

aprēķina magnetizējošo spēku *Iw*

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| ***a*** | ***b*** |  |
| 4.49. att. Nesazarota neviendabīga mag­nētiskā ķēde **(*a*)** un plūsmas Φ izkliede serdes gaisa spraugā (b). | | 4.50. att. Pretējā uzde­vuma  grafoanalītiskais aprēķins. |

Pretējo uzdevumu — aprēķināt dotā magnetizējošā spēka *Iw* uzturēto magnētisko plūsmu Φ serdē — atrisina grafoanalītiski (4.50. att.):

* patvaļīgi izvēlas vairākas Φ vērtības un aprēķina tām at­bilstošās *Iw* vērtības (tiešais uzdevums);
* izmantojot iegūtos rezultātus, konstruē ķēdes magnētisko raksturlīkni Ф = *f*(*Iw*);
* no raksturlīknes (4.50. att.) nolasa dotajam *Iw* atbilstošās plūsmas Ф vērtību.

|  |  |
| --- | --- |
|  | 4.51. att. Neviendabīgas nesazarotas magnētiskās ķēdes grafiskais aprēķins. |

Nupat iztirzāto pretējo uzdevumu par magnētisko ķēdi ar gaisa spraugu var atrisināt arī grafiski (4.51. att.) — līdzīgi tam, kā grafiski aprēķina līdz­strāvas nelineārās ķēdes ar virknē slēgtu lineāru un nelineāru elementu. 4.49. attēlā *a* parādītās mag­nētiskās ķēdes nelineārais elements ir tērauda serde un lineārais elements — gaisa sprauga. Elektriskās ķēdes ele­mentu voltampēru raksturlīknēm mag­nētiskajā ķēdē atbilst magnētiskās raksturlīknes Ф = *f*(*Hl*), kuras rāda magnētiskās plūsmas atkarību no mag­netizējošā spēka *Iw*.

Pēc šīs metodes magnētisko ķēdi aprēķina šādi:

* vairākām patvaļīgi izvēlētām plūsmas Ф vērtībām aprēķina atbilstošās *Hl* un *H*0*l*0 vērtības;
* no koordinātu sākuma punkta konstruē līkni Ф = *f*1(*Hl*);
* no abscisu ass punkta A, kura koordināte vienāda ar doto *Iw*, konstruē taisni Ф = *f*2(*Iw - Hl*), jo *H*0*l*0 = *Iw* — *Hl*;
* grafiku krustpunkta C ordināte ir meklējamās plūsmas Φ vērtība.

4.23. **OMA LIKUMS MAGNĒTISKAJAI ĶĒDEI**

4.52. attēlā parādītā nesazarotā neviendabīgā magnētiskā ķēde sastāv no dažādiem posmiem: diviem feromagnētisko materiālu posmiem ar vidējiem garumiem l1 un l2, šķērsgriezumiem *S*1 un S2 un absolūtajām magnētiskajām caurlaidībām *μ*a1 un *μa*2 un di­vām vienādām gaisa spraugām ar l0 = 2l'0, S0 un *μ*0.

|  |  |
| --- | --- |
|  | 4.52. att. Nesazarota neviendabīga magnētiskā ķēde. |

Pilnās strāvas likuma izteiksme dotajai ķēdei ir šāda:

*Iw = H*1*l*1 + *H*2*l*2 + *H*0*l*0. (4.56)

Pieņemot, ka izkliedes plūsma ir neievērojami maza (Фσ = 0), magnētiskā plūsma visos ķēdes posmos būs viena un tā pati:

Ф = *B*1*S*1 = *B*2*S*2 = *B*0*S*0 = *μa*1*H*1*S*1 = *μa*2*H*2*S*2 = *μ*0*H*0*S*0.

Bet magnētiskā lauka intensitāte ķēdes atsevišķos posmos ir da­žāda:



Ievietojot lauka intensitāšu izteiksmes vienādojumā (4.44), dabū, ka



un ķēdes magnētiskā plūsma

 (4.57)

Pēdējā izteiksme ir formāli līdzīga Oma likuma izteiksmei noslēgtai elektriskajai ķēdei ar elektrodzinējspēku *E* un trim virknē slēgtiem vadītājiem, kuru pretestības ir *r*1, *r*2 un *r*3, garumi *l*1, *l*2 un *l*3 un šķērsgriezuma laukumi *S*1, *S*2 un *S*3:



Tādēļ izteiksmi (4.57) sauc par Oma likumu 4.52. attēlā parādītajai magnētiskajai ķēdei.

Elektriskajā ķēdē strāvu *I* uztur elektrodzinējspēks *E*, bet mag­nētiskajā ķēdē plūsmu Ф uztur magnetizējošais spēks *Iw*.

Saskaitāmie, kas atrodas izteiksmes (4.57) saucējā, parāda magnetizējošā spēka *Iw* radītās magnētiskās plūsmas Ф atkarību no magnētiskās ķēdes posmu ģeometriskajiem izmēriem un mag­nētiskajām īpašībām.

Tādēļ izteiksme *l/μaS*, kura ir formāli līdzīga vadītāja elektriskās pretestības izteiksmei *l/γS*, izsaka magnētiskās ķēdes posma magnētisko pretestību, ko apzīmē ar *Rm*:

 (4.58)

Magnētiskās ķēdes posma magnētiskā pretestība ir tieši pro­porcionāla posma vidējam garumam *l* un apgriezti proporcionāla posma materiāla magnētiskajai caurlaidībai *μ* un šķērsgriezuma laukumam *S*. Apzīmējot



magnētiskā plūsma apskatāmajā magnētiskajā ķēdē

 (4.59)

Šī izteiksme rāda, ka nesazarotas neviendabīgas magnētiskās ķēdes magnētiskā pretestība ir vienāda ar virknē izvietoto ķēdes elementu magnētisko pretestību summu. Tātad magnētiskā plūsma ir tieši proporcionāla ķēdes magnetizējošajam spēkam un apgriezti proporcionāla ķēdes magnētiskajai pretestībai.

Tādēļ, lai ar doto magnetizējošo spēku *Iw* iegūtu iespējami lie­lāku plūsmu Φ, magnētiskās ķēdes veido no feromagnētiskiem materiāliem, kompaktas.

Tā kā gaisa magnētiskā caurlaidība ir daudzkārt (t.i. reizes) mazāka par feromagnētiska materiāla magnētisko caurlaidību, tad saprotams, ka magnētiskajā ķēdē izveidota gaisa sprauga rada daudzkārt (līdz 103-105 reizes) lielāku magnētisko pretestību plūsmai Ф nekā visi feromagnētiskie posmi kopā. Tādēļ, ja mag­nētiskajā ķēdē izveido gaisa spraugu, tad daudzkārt jāpalielina magnetizējošais spēks *Iw* sākotnējās plūsmas Ф uzturēšanai.

Šī iemesla dēļ elektrisko mašīnu un aparātu magnētiskajās ķēdēs nepieciešamās gaisa spraugas izveido iespējami šauras (sākot ar milimetra desmitdaļām).

***4.11. piemērs***. Magnētiskajai ķēdei (4.53. att.) doti ķēdes izmēri (cm), spoles vijumu skaits w = 400 un magnētiskā plūsma Φ = 2,4·10-4 Wb.

Magnētiskās ķēdes abi vertikālie magnētvadi (stieņi) izgatavoti no elektrotehniska tērauda Э42, bet horizontālie magnētvadi (jūgi) izgatavoti no lietā tērauda.

Aprēķināt strāvas stiprumu *I* spolē nepieciešamās magnētiskās plūsmas radīšanai, kā arī absolūto magnētisko caurlaidību *μa*1 un magnētisko caurlaidību *μ*1 magnētvadam, uz kuru nostiprināta spole.

|  |  |
| --- | --- |
|  | 4.53. att. Aprēķina shēma 4.11. piemēram. |

Atrisinājums.

1. Pēc 4.53. attēla datiem aprēķina magnētvada katra posma šķērsgriezumu

*S*1 = *S*2 = *b·c* = 4·6 = 24 cm2 = 24·10-4 m2;

*S*3 = *S*4 = *a·c* = 5·6 = 30 cm2 = 30·10-4 m2;

2. Pēc 4.48. attēla datiem aprēķina magnētvada katra posma magnētisko līniju vidējo garumu

*l*1 = *l*2 = 20 cm = 20·10-2 m2 (gaisa spraugu neievērojot);



3. Magnētiskās ķēdes katra posma magnētiskā indukcija





4. Zinot posmu magnētiskās indukcijas vērtības *B*1 = *B*2 = 1 T, *B*3 = *B*4 = 0,8 T un posmu materiālu *μ*1 = *μ*2 (tērauds Э42), *μ*4 = *μ*4 (lietais tērauds), pēc 4.1. tabulas nosaka magnētiskā lauka intensitāti magnētiskās ķēdes feromagnētiskajos posmos

*H*1 = *H*2 = 300 A/m;

*H*3 = *H*4 = 682 A/m.

5. Magnētiskā lauka intensitāte gaisa spraugā ( *B*2 = *B*0 = 1 T), jo *S*0 = *S*1



6. Magnētiskie spriegumi magnētiskās ķēdes feromagnētiskajos un neferomagnētiskajos posmos

*Um*1 = *Um*2 = *H*1·*l*1 = 300·20·10-2 = 60 A,

*Um*3 = *Um*4 = *H*3·*l*3 = 682·25·10-2 = 170,5 A,

*Um0* = *H*0·*l*0 = 0,8·106·0,02·10-2 = 160 A.

7. Magnētiskās ķēdes magnetizējošais spēks

*Fm = Um*1 + *Um*2 + *Um*3 + *Um*4 + *Um*0 = 2*Um*1 + 2*Um*3 + *Um*0 =

= 2·60 + 2·170,5 + 160 = 621 A.

8. Strāvas stiprumu spolē izsaka no formulas *Fm = I·w*



9. Absolūto magnētisko caurlaidību pirmajā posmā nosaka pēc formulas *B = μa·H*. Atrod, ka



10. Relatīvo magnētisko caurlaidību pirmajā posmā nosaka pēc formulas *μa = μ·μ*0. Atrod, ka



*4.12. piemērs.* Uz noslēgtas gredzenveida serdes no lieta tērauda (4.54. att.) vienmērīgi uztīts tinums, kura vijumu skaits ir *w* = 300. Gredzena šķērsgriezums ir taisnstūris. Tā ārējais diametrs *D* = 24 cm, iekšējais diametrs *d* = 20 cm, biezums *b* = 6 cm.

1. Aprēķināt strāvu spolē *I*, magnētisko caurlaidību *μ*, magnētisko pretestību *Rm*, induktivitāti *L*, pie kuras magnētiskā plūsma serdē ir Φ = 1,2·10-3 Wb.

2. Ka izmainīsies strāva un serdes magnētiskā pretestība, ja serdē izveidos gaisa spraugu *δ* = 0,5 mm. Magnētiskajai plūsmai serdē jāpaliek nemainīgai (mainās strāva *I*).

4.1. tabula

**Tēraudu magnetizēšanas raksturlielumi**

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **B**  **(T)** | **Tēraudu marka** | | | | | | | |
| **Э11, Э12** | **Э41, Э42, Э21** | **Liets**  **tērauds** | **Tērauds 3411** | **Ķets**  **(čuguns)** | **Э 1A** | **1410** | **Permalojs 65 HП** |
|  | Magnetizējošā lauka intensitāte, H (A/m) | | | | | | | |
| 0,05 |  |  | 40 |  | 420 |  |  |  |
| 0,1 |  | 40 | 80 | 57 | 600 |  |  |  |
| 0,15 |  |  | 120 |  |  |  |  |  |
| 0,2 | 87 | 50 | 160 | 72 | 900 |  |  |  |
| 0,25 |  |  | 200 |  |  |  |  |  |
| 0,3 | 113 | 60 | 240 | 73 | 1220 |  | 40 |  |
| 0,35 |  |  | 280 |  |  |  |  |  |
| 0,4 | 140 | 70 | 320 | 76 | 1650 |  | 70 |  |
| 0,45 | 152 | 75 | 360 | 79 | 2000 |  |  |  |
| 0,5 | 171 | 85 | 400 | 82 | 2300 |  | 100 |  |
| 0,55 | 191 | 94 | 443 |  | 2600 |  |  |  |
| 0,6 | 211 | 110 | 488 | 85 | 3000 |  | 135 |  |
| 0,65 | 236 | 127 | 535 |  | 3300 | 100 |  |  |
| 0,7 | 261 | 145 | 584 | 88 | 4000 | 110 | 160 |  |
| 0,75 | 287 | 165 | 632 |  | 4500 | 120 |  |  |
| 0,8 | 318 | 185 | 682 | 91 | 5400 | 140 | 210 |  |
| 0,85 | 352 | 210 | 745 |  | 6000 | 160 |  |  |
| 0,9 | 397 | 235 | 798 | 94 | 7000 | 170 | 245 |  |
| 0,95 | 447 | 270 | 850 |  | 9000 | 200 |  |  |
| 1 | 502 | 300 | 920 | 97 | 10000 | 220 | 300 |  |
| 1,05 | 570 | 340 | 1004 | 100 | 12000 | 250 |  |  |
| 1,1 | 647 | 395 | 1090 | 105 | 14000 | 290 | 390 |  |
| 1,15 | 739 | 460 | 1187 | 110 | 16000 | 340 |  |  |
| 1,2 | 840 | 540 | 1290 | 115 | 19500 | 400 | 500 |  |
| 1,25 | 976 | 640 | 1430 | 120 | 23000 | 480 |  |  |
| 1,3 | 1140 | 770 | 1590 | 125 | 27000 | 580 | 850 | 31 |
| 1,35 | 1340 | 970 | 1810 | 132 | 30000 | 700 |  | 500 |
| 1,4 | 1580 | 1300 | 2090 | 140 |  | 850 |  | 1062 |
| 1,45 | 1950 | 1830 | 2440 | 150 |  | 1200 |  | 1625 |
| 1,5 | 2500 | 2750 | 2890 | 162 |  | 1500 |  | 2250 |
| 1,55 | 3280 | 3850 | 3430 | 180 |  | 2000 |  |  |
| 1,6 | 4370 | 5150 | 4100 | 200 |  | 2600 |  |  |
| 1,65 | 5880 | 6950 | 4870 | 225 |  | 3900 |  |  |
| 1,7 | 7780 | 8900 | 5750 | 260 |  | 5800 |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 1,8 | 10000 | 14500 |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 1,9 | 16000 | 23000 |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 2 | 26000 | 50000 |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 2,1 | 49000 | 120000 |  |  |  |  |  |  |

Atrisinājums.

I. Serde bez gaisa sprauga.

1. Serdes šķērsgriezuma laukums



|  |  |
| --- | --- |
|  | 4.54. att. Shēma 4.12. piemēram. |

2. Magnētiskā indukcija noslēgtā serdē



3. Magnētiskā lauka intensitāte serdē no lieta tērauda nosaka ar magnetizēšanas līknes *B* = =*f*(*H*) palīdzību, ja *B* = 1 T, tad *H* = 920 A/m (4.1. tabula).

4. Vidējas magnētiskas līnijas garums



5. Strāva tinumā



6. Relatīva magnētiskā caurlaidība



7. Serdes magnētiskā pretestība



8. Spoles induktivitāte



II. Serde ar gaisa spraugu.

1. Magnētiskā indukcija gaisa spraugā un tēraudā ir vienāda *B*0 = *B* = 1 T.

2. Gaisa spraugas šķērsgriezuma laukums ir vienāds ar serdes šķērsgriezuma laukumu *S*0 = *S* = 1,2·10-3 m2.

3. Magnētiskā lauka intensitāte gaisa spraugā



4. Magnētiskā lauka intensitāte tērauda serdē nemainās H = 920 A/m.

5. Tinuma magnetizējošais spēks, ja serdē ir gaisa sprauga



6. Strāva tinumā



Strāva pieaug par 

7. Serdes magnētiskā pretestība



Gaisa spraugas magnētiska pretestība



Magnētiskās ķēdes kopēja pretestība



8. Spoles induktivitāte



**4.24. SAZAROTU MAGNĒTISKO ĶĒŽU APRĒĶINI**

Sazarota magnētiskā ķēde ietver divus vai vairākus magnē­tisko plūsmu kontūrus. Tādas magnētiskās ķēdes sastopam trans­formatoros, elektriskajās mašīnās un dažādos elektriskajos apa­rātos.

Sazarotu magnētisko ķēžu aprēķināšana pamatojas uz elektrisko un magnētisko ķēžu formālo līdzību. Šiem aprēķiniem izmanto izteiksmes, kas formāli līdzīgas elektriskajās ķēdēs izman­tojamiem Kirhofa likumiem un kuras tādēļ sauc par Kirhofa likumiem magnētiskajām ķēdēm.

Pirmais Kirhofa likums magnētiskajai ķēdei nosaka, ka jebkurā sazarotas magnētiskās ķēdes mezglā magnētisko plūsmu algebriskā summa ir vienāda ar nulli:

ΣФ = 0. (4.60)

Par magnētiskās ķēdes mezglu sauc magnētiskās plūsmas sazarošanās resp. magnētisko plūsmu apvienošanās vietu (4.50. att.).

Magnētiskajām plūsmām pievieno plusa vai mīnusa zīmes, kā tas paskaidrots par pirmā Kirhofa likuma izmantošanu elektris­kās ķēdes mezglam.

|  |  |
| --- | --- |
|  | 4.55. att. Sazarota simetriska magnētiskā ķēde. |

Otrais Kirhofa likums magnētiskajai ķēdei nosaka, ka sazarotas magnētiskās ķēdes noslēgtā kontūrā darbojošos magnetizējošo spēku algebriskā summa vienāda ar Aši kon­tūra zaru magnētisko spriegumu algeb­risko summu:

Σ*Iw* = Σ*Hl*; (4.61)

par kontūra zara magnētisko spriegumu, ko apzīmē ar *Um*, sauc zara magnētiskā lauka intensitātes *H* un zara vidējā garuma *l* reizinājumu. Tādējādi otrā Kirhofa likuma izteiksme magnētiskajai ķēdei ir pilnās strāvas likuma vispārīgā forma.

Pirms ķēdes kontūrām sastāda izteiksmi (4.61), patvaļīgi izvē­las kontūra apejas virzienu un par pozitīviem pieņem to zaru magnētiskos spriegumus *Hl*, kuros magnētiskās plūsmas virziens sakrīt ar kontūra apejas virzienu.

Vadoties no sazarotu magnētisko ķēžu konstruktīvā izveido­juma un no magnetizējošo spēku *Iw* izvietojuma, izšķir simetris­kas un nesimetriskas magnētiskās ķēdes.

Sazarota simetriska magnētiskā ķēde ir sada­lāma divās konstruktīvi un magnētiski vienādās (simetriskās) sa­stāvdaļās.

Visvienkāršākā sazarota simetriska magnētiskā ķēde parādīta 4.55. attēlā. Šī magnētiskā ķēde izgatavota no viena materiāla un ir simetriska pret attēla plaknei perpendikulāru simetrijas plakni, kas virzīta pa ķēdes simetrijas asi AA'. Arī magnētiskās plūsmas ir simetriskas pret šo plakni, jo ķēdes vidējā stieņa mag­netizējošā spēka *Iw* radītā magnētiskā plūsma Ф ķēdes simetrijas dēļ augšējā mezglā sadalās divās vienādās plūsmās *F*1 = *F*2 = = 0,5 Ф, kuras noslēdzas pa ķēdes sānu zariem (tātad *B*1 = *B*2 un *H*1 = *H*2). Tādēļ ķēdes aprēķināšana jāizdara tikai dotās magnētis­kās ķēdes vienai pusei, piemēram, labajai, kurā ķēdes posmā ar vidējo garumu *l*2 ir plūsma *F*2 un posmā ar vidējo garumu *l* — puse plūsmas Ф (0,5Ф = Ф2).

Tādējādi sazarotas simetriskas magnētiskās ķēdes aprēķinā­šana reducējas uz nesazarotas magnētiskās ķēdes aprēķināšanu, kurā izmantojam otro Kirhofa likumu:

*Iw = H*l + *H*2*l*2.

Atkarībā no uzdevuma rakstura (tiešais vai pretējais uzde­vums) no pēdējās izteiksmes aprēķina magnetizējošo spēku vai arī to izmanto plūsmas Ф grafoanalītiskai noteikšanai.

Sazarota nesimetriska magnētiskā ķēde. Nesimetriju sazarotās magnētiskās ķēdēs izraisa vai nu nesimetrisks ķēdes konstruktīvais veidojums (piemēram, gaisa sprauga kādā zarā), vai nesimetriski izvietotie magnetizējošie spēki, u. tml. Šo ķēžu aprēķināšanā izmanto Kirhofa likumus magnētiskajām ķē­dēm.

4.56. attēlā a parādītā sazarotā nesimetriskā magnētiskajā ķēdē nesimetriju rada gaisa sprauga to, kā arī nesimetriski novietotais magnetizējošais spēks Iw.

|  |  |
| --- | --- |
| ***a*** | ***b*** |

4.56. att. Sazarota nesimetriska magnētiskā ķēde *(a)* un tai formāli līdzīga

līdzstrāvas nelineāra ķēde (*b*).

Tā kā šai sazarotajai ķēdei ir tikai divi magnētisko plūsmu mezgli, tad, pēc analoģijas ar elektrisko ķēdi, ķēdes aprēķināšanā izmantojama tikai viena pirmā Kirhofa likuma izteiksme, kuru uzrakstām mezglam K:

Ф = Ф1 + Ф2. (a)

Otrā Kirhofa likuma izteiksmes var sastādīt ķēdes vienam mazajam kontūram un lielajam kontūram vai arī abiem mazajiem kontūriem

*Iw = H*l + *H*1*l*1, (b)

0 = *H*2*l*2 + *H*0*l*0 – *H*1*l*1, (c)

kur *l*2= *l'*2 + *l"*2.

Tiešajā uzdevumā dota kāda ķēdes zara magnētiskā plūsma, bet jāaprēķina vajadzīgais magnetizējošais spēks.

Aprēķināšanas secība 4.56. attēlā a parādītajai sazarotajai ķēdei, kurai dota, piemēram, plūsma Ф2 (vai magnētiskā induk­cija B0 gaisa spraugā), ir sekojoša.

Pēc zināmās Ф2 vērtības aprēķina B2 un B0 un pēc tam no­saka H2 un H0 vērtības.

Tad no izteiksmes (c) atrod magnētiskā lauka intensitāti H1 vidējā zarā:



Pēc tam aprēķina B1, Ф1 un no izteiksmes (*a*) atrod plūsmu Ф zarā ķēdes kreisajā pusē. Pēc atrastās Ф vērtības aprēķina B, tad atrod H un no izteiksmes (*b*) aprēķina vajadzīgo magnetizē­jošo spēku Iw.

Pretējo uzdevumu — atrast zaru magnētiskās plūsmas, ja dots magnetizējošais spēks Iw, atrisina grafiski.

Tā kā magnētiskās ķēdes feromagnētlsko materiālu posmi ir neli­neāri, jo šo posmu magnētiskā pre­testība Rm atkarīga no posma plūs­mas F (μa ≠ const), bet ķēdes neferomagnētiskie posmi, piemēram, gaisa spraugas, ir lineāri, jo šo posmu magnētiskā pretestība nav atkarīga no posma magnētiskās plūs­mas (μa = μ0 = const), tad magnētis­kās plūsmas sazarotā magnētiskā ķēdē (4.56. att. a) aprēķina gra­fiski tāpat, kā aprēķina tai formāli līdzīgu līdzstrāvas nelineāru ķēdi (4.56. att. b).

Grafiskās aprēķināšanas gaita ir šāda.

|  |  |
| --- | --- |
|  | 4.57. att. Sazarotas nesimetris­kas magnētiskās ķēdes (4.51. att. *a*) pretējā uzdevuma  gra­fiskais aprēķins. |

Vispirms patvaļīgi izvēlas vairākas magnētisko plūsmu vēr­tības, aprēķina tām atbilstošās B, B1, B2 un B0 vērtības, no magnetizēšanas līknes atrod H, H1 un H2 vērtības un aprēķina H0.

Tad mērogā uzzīmē magnētiskās raksturlīknes magnētiskās ķēdes paralēlajiem zariem 1 un 2 (4.57. att.):

Ф1 = *f*1(*H*1*l*1) = *f*1(*UM KN*) un Ф2 = *f*2(*H*2*l*2 + *H*0*l*0) = *f*2 (*UM KN*).

Pēdējo raksturlīkni dabū, grafiski summējot patvaļīgi izraudzī­tām Ф2 vērtībām atbilstošās taisnes Ф2 = *f'*2(*H*0*l*0) un raksturlīk­nes Ф2 = *f"*2(*H*2*l*2) abscisas.

Grafiski summējot ķēdes paralēlo zaru 1 un 2 magnētisko raksturlīkņu Ф1 = *f*1(*H*1*l*1) un Ф2 = *f*2(*H*2*l*2 +*H*0*l*0) ordinātes vairākām patvaļīgi izvēlētām magnētiskā sprieguma *Umkn* vērtībām, dabū šiem paralēlajiem zariem ekvivalenta zara magnētisko rakstur­līkni Фl + Ф2 = *f*3(*UM KN*).

Pēc tam ekvivalentai nesazarotai magnētiskai ķēdei zīme raksturlīkni Ф = *f*4(*Iw* — *Hl*) = *f*4(*UM KN*).

Abu pēdējo raksturlīkņu krustpunkta D ordināte ir meklēja­mās plūsmas Ф vērtība. No punkta D pret abscisu asi vilktā per­pendikula un paralēlo zaru 1 un 2 raksturlīkņu krustpunktu ordi­nātes ir šo zaru plūsmu Ф1 un Ф2 vērtības.

**4.25. MAGNĒTISKĀS ĶĒDES AR PASTĀVĪGAJIEM MAGNĒTIEM**

Magnētiskajā ķēdē magnētisko plūsmu var uzturēt arī šajā ķēdē «virknē ieslēgts» pastāvīgais magnēts.

Pastāvīgos magnētus magnētiskā lauka iegūšanai izmanto elektriskajos mēraparātos, speciālās elektriskās mašīnās un da­žādos elektriskajos aparātos.

|  |  |
| --- | --- |
|  | 4.58. att. Histerēzes robežcilpas atmagne­tizēšanas posms. |

Pastāvīgā magnēta magnētiski cieto materiālu kvalitatīvi raksturo tā histerēzes robežcilpas atmagnetizēšanas posms *Br—Hc* (4.58. att.), kuru izmanto, aprēķinot magnētiskās ķēdes ar pastāvīgajiem magnētiem. Šī cilpas posma forma un *Br* un *Hc* vērtības ir katrai materiāla markai raksturīgas. Materiāls ir jo augstvērtīgāks, jo lielāks reizinājums *BrHc*.

Pastāvīgo magnētu konstruktīvais izvei­dojums ir dažāds. Parasti magnēta galiem (poliem N un S) pievieno noteiktas formas magnētiski mīksta materiāla «armatūru».

4.59. attēlā parādītā magnētiskā ķēde sastāv no pastāvīgā magnēta 1 ar «arma­tūru» 2 un tā paša materiāla cilindra 3. Ķēdi aprēķinot, jānosaka magnētiskā plūsma Φ resp. magnētiskā indukcija B0 ķēdes gaisa spraugā. Aprēķināšanas gaita, neievērojot izkliedes plūsmu, ir šāda:

|  |  |
| --- | --- |
| 4.59. att. Magnētiska ķēde ar pastāvīgo magnētu. | 4.60. att. Magnētiskās plūsmas grafiska no­teikšana gaisa spraugā magnētiskajā ķēdē ar pastāvīgo magnētu. |

* no magnētiskās ķēdes rasējuma aprēķina katra ķēdes posma vidējo garumu un šķērsgriezumu (*lm, Sm* — magnē­tam, *lf, Sf* — magnētiski mīkstajam materiālam un *l*0, *S*0 — gaisa spraugai);
* histerēzes cilpas atmagnetizēšanas posmu (4.58. att.) pār­zīmē Φ—*Hl* koordinātu plaknē (II kvadrantā) līknes Φ = *f*1(*Hlm*) veidā (4.60. att.);
* magnētiski mīkstā materiāla magnetizēšanas līkni *B = f*(*H*) pārzīmē līknes Φ = *f*2(*Hlf*) veidā un uzzīmē lineāro saka­rību gaisa spraugai Φ *= f*3(*H*0*l*0);
* grafiski summējot abus pēdējos grafikus, dabū rezultējošo līkni Φ = *f*4(*Hl*) ķēdes posmam *l = lf + l*0, ko pārzīmē koor­dinātu plaknes II kvadrantā (4.60. att.), kur jau iezīmēta līkne Φ = *f*1(*Hlm*). Abu līkņu krustpunkta K ordināte izsaka magnētiskās plūsmas Φ vērtību gaisa spraugā.

Paskaidrotā metode dod aptuvenu, bet pa lielākai daļai praksē pieņemamu rezultātu.

**4.26. PAŠINDUKCIJA. INDUKTIVITĀTE**

Katru strāvas kontūru caurtver strāvas radītā magnētiskā plūsma Φ (4.61. att.). Ja kontūra strāva *I* nemainās, tad kontūra plūsmas saķēdējums Ψ = *wF* ir nemainīgs (dΨ = 0) un kontūra darba režīmu neietekmē.

Bet, tiklīdz mainās kontūra strāva, vienlaicīgi mainās arī kon­tūra plūsmas saķēdējums Ψ un saskaņā ar elektromagnētiskās indukcijas likumu kontūrā inducējas EDS

 (4.62)

|  |  |
| --- | --- |
|  | 4.61. att. Strāvas kontūru caurtverošā magnētiskā plūsma Ф. |

Šī EDS īpatnība ir tā, ka to rada paša kontūra (spoles vai cita ķēdes elementa) strāvas magnētiskās plūsmas izmaiņa.

Parādību, ka, mainoties paša kontūra plūsmas saķēdējamam, kontūrā inducējas EDS, sauc par pašindukciju, bet kontūrā inducēto EDS — par pašindukcijas elektrodzinējspēku

Ja kontūra magnētiskais lauks izvietots vidē ar nemainīgu magnētisko caurlaidību (μ = const), piemēram, gaisā, tad kontūra plūs­mas saķēdējums Ψ ir proporcionāls kontūra strāvai I:

 (4.63)

Proporcionalitātes koeficientu

 (4.64)

sauc par kontūra induktivitāti.

Tātad kontūriem, kuru magnētiskais lauks izvietots neferomagnētiskā vidē, ir nemainīga induktivitāte (*L* = const).

Induktivitātes mērvienība SI sistēmā ir henrijs (H):



Kontūra induktivitāte ir 1 H, ja strāva 1 A rada 1 Wb lielu plūsmas saķēdējumu.

Mazākas induktivitātes vienības ir milihenrijs (mH) un mikrohenrijs (μH): 1 mH=10-3 H un 1 μH= 10-6 H.

No izteiksmēm (4.62) un (4.64) izriet, ka

 (4.65)

t. i., pašindukcijas EDS proporcionāls strāvas izmaiņas ātrumam kontūrā (ja *L* = const).

Kontūra pašindukcijas EDS virziens ir atkarīgs no strāvas izmaiņas rakstura: strāvai pieaugot (*dI* > 0), elektrodzinējspēks *eL* ir negatīvs, i. i., virzīts pretī kontūra strāvai, bet, strāvai sa­mazinoties (*dI* < 0), elektrodzinējspēks *eL* ir pozitīvs, t. i., darbo­jas strāvas virzienā.

Tādējādi izteiksme (4.65) izsaka elektromagnētiskās inerces principu: pašindukcijas EDS pretojas ka strāvas palielināšanai, tā strāvas samazināšanai kontūrā. Parādība ir jo izteiktāka, jo lielāka kontūra induktivitāte.

Katrai elektriskās ķēdes sastāvdaļai piemīt induktivitāte. Bet, piemēram, īsu elektriskās enerģijas pārvades līniju, kvēlspuldžu, reostatu u. tml. ķēdes elementu induktivitāte ir neievērojami maza (*L* = 0). Turpretim droseļu, elektrisko mašīnu un aparātu tinumu un garu elektriskās enerģijas pārvades līniju induktivitāte var sasniegt visai lielas vērtības, un praksē to vienmēr ietver aprēķinos.

Oma likumu toroīda magnētiskajai ķēdei saskaņā ar izteiksmi (4.59.) var uzrakstīt šādi:

 (4.66)

Tad toroīda induktivitāte

 (4.67)

Tādējādi kontūra induktivitāte atkarīga no vijumu skaita *w* un no magnētiskās ķēdes ģeometriskajiem izmēriem (*l, S*) un magnētiskajām īpašībām (μ).

Analoģiski aprēķināma cilindriskas spoles induktivitāte. Taisnu cilindrisku spoli, ja tās garums ir liels, salīdzinot ar diametru, var uzskatīt par gredzenveida spoles daļu, ja spoles rādiuss ir bezgalīgi liels; tāpēc spoles induktivitāte

 (4.68)

kur *l* – spoles garums.

Tādēļ kontūriem (spolēm u. tml.) ar feromagnētiska materiāla serdēm (μ ≠ const) induktivitāte nav konstanta (*L* ≠ const), bet mainās reizē ar strāvu, jo *μ = f*(*H*), bet *H ~ I*.

Līdzstrāvas ķēdē pašindukcijas EDS rodas tikai tad, kad no­slēdz vai pārtrauc ķēdi vai maina ķēdes darba režīmu.

***4.13. piemērs***. Aprēķināt strāvas pieauguma ātrumu spolē, to pieslēdzot pie līdzstrāvas avota ar spriegumu *U* = 2 V, un strāvu spolē stabilizējošā režīmā, ja spoles induktivitāte *L* = 1 mH un pretestība *R* = 0,5 Ω.

Atrisinājums.

1. Pieslēdzot spoli pie līdzstrāvas avota, strāva spolē sāk izmainīties (palielināties) no nulles vērtības, jo lēcienveidīgu strāvas izmaiņu kavē spoles induktivitāte. Tātad sākotnējā momentā strāva spolē vienāda ar nulli un elektroenerģijas avota spriegums līdzsvaro spoles pašindukcijas EDS

*U = - EL* = 2 V.

Sākotnējo strāvas izmaiņas ātrumu spolē izsaka no formulas



Atrod, ka



2. Strāva spolē stabilizējošā režīmā



**4.27. SAVSTARPĒJĀ INDUKCIJA**

Elektrotehnisko iekārtu atsevišķus elementus bieži saista ko­pēja magnētiskā plūsma. Ja, piemēram, divas strāvas spoles (kontūri) atrodas tuvu viena otrai (4.62. att.), tad pirmās spoles mag­nētiskas plūsmas daļa Ф12 caurtver otro spoli, bet otrās spoles magnētiskās plūsmas daļa Ф21 caurtver pirmo spoli.

|  |  |
| --- | --- |
|  | 4.62. att. Induktīvi saistītas spoles |

Šādas spoles vai elektriskās ķēdes, kuras induktīvi ietekmē viena otru, sauc par induktīvi saistītām.

Ja maina strāvu spolē 1 vai maina spoļu savstarpējo stāvokli, tad mainās spoli 2 caurtverošā plūsma Ф12 un spolē 2 inducējas elektrodzinējspēks *eM*2.

Parādību, ka elektriskā ķēdē inducējas EDS, ja maina strāvu otrā ķēdē vai maina ķēžu savstar­pējo stāvokli, sauc par savstar­pējo indukciju, bet indu­cēto EDS — par savstarpējās indukcijas elektrodzinējspēku.

Spoles 1 strāvas *I*1 radītais plūsmas saķēdējums spolei 2

Ψ12 = *w*2Ф12

un spoles 2 strāvas *I*2 radītais plūsmas saķēdējums spolei 1

Ψ21 = *w*1Ф21

kur *w*1 un *w*2 — spoļu vijumu skaits.

Vidē ar μ = const plūsmas saķēdējums proporcionāls strāvai:

Ψ12 = *M*12*I*1 un Ψ21 = *M*21*I*2, (4.69)

kur *M*12 un *M*21 - spoļu (kontūru) savstarpējās indukti­vitātes, ko mēra henrijos. Tā kā magnētiskās plūsmas

 un 

kur *Rm* — magnētiskās sistēmas magnētiskā pretestība, tad





un



vai

*M*12 = *M*21 = *M*, (4.70)

t. i., spoļu (kontūru) savstarpējās induktivitātes ir vienādas.

Ja vidē ar μ. = const spoļu stāvokli nemaina, tad M = const.

Mainot strāvu vienā spolē, savstarpējās indukcijas EDS indu­cējas abās spolēs:



 (4.71)

Vispār savstarpējā induktivitāte *M* atkarīga no vides magnē­tiskajām īpašībām (ja μ ≠ const, arī *M* ≠const), no spoļu (ķēžu) ģeometriskajiem izmēriem, vijumu skaita un savstarpēja novieto­juma (pēdējo mainot, mainās *M*).

Spoļu induktīvo saiti raksturo saites koeficients *k*, kas vienmēr ir mazāks par 1:

 (4.72)

kur *L*1 un *L*2 — spoļu induktivitātes.

Savstarpējā induktivitāte dažām elektriskajām ietaisēm var būt ļoti nevēlama, piemēram, telefona līnijai tuva paralēla maiņstrā­vas līnija rada telefona līnijā sarunas traucējošas indukcijas strāvas.

***4.14. piemērs***. Aprēķināt divu spoļu savstarpējo induktivitāti, ja katras spoles vijumu skaits w = 1000 un pie vienmērīgas strāvas izmaiņas ātruma (par 2 A laikā 0,1 s) pirmajā spolē otrās spoles katrā vijumā inducējas *E*2 = 0,03 V.

Atrisinājums.

1. Savstarpējas indukcijas EDS

*EM = w·E*2 = 1000·0,03 = 30 V.

2. Spoļu savstarpējo induktivitāti izsaka pēc formulas



Atrod, ka



**4.28. DIVVADU LĪNIJAS INDUKTIVITĀTE**

Praksē ir svarīgi aprēķināt arī divvadu līnijas induktivitāti (4.63. att.).

Aprēķināsim magnētisko plūsmu starp vadiem, kuru rādiusi ir *r*0 un kurli atrodas attālumā *a* viens no otra. Magnētiskā plūsma., ko rada pirmā vada strāva, caur elementāru laukumiņu *dS = Idr* (*l*— līnijas vadu garums) ir



Pilna plūsma, ko rada šī strāva starp vadiem, ir



Plūsma, ko rada otrā vada strāva, arī ir vienlīdzīga, tāpēc ka strāvas vados ir vienādas.

Magnētiskās indukcijas vektori *B*1 un *B*2 ir paralēli viens otram (jo strāvu virzieni ir pretēji); tāpēc plūsma, kas šķeļ kontūru,



Tā kā parasti attālums starp vadiem *a* ir daudz lielāks par vadu rādiusu *r*0, tad starpības *a* - *r*0 vietā var rakstīt *a*:



|  |  |
| --- | --- |
|  | 4.63. att. Divvadu līnija. |

Magnētiskās indukcijas vektori *B*1 un *B*2 ir paralēli viens otram (jo strāvu virzieni ir pretēji); tāpēc plūsma, kas šķeļ kontūru,



Tā kā parasti attālums starp vadiem *a* ir daudz lielāks par vadu rādiusu *r*0, tad starpības *a* - *r*0 vietā var rakstīt *a*:



Divvadu līnijas induktivitāte (ω = 1)



Gaisa līnijai *μ* = 1 un, tā kā  tad induktivitāte henrijos ir

 (4.73)

Tā kā līnija parasti ir ļoti gara, tad ērti aprēķināt induktivitāti uz 1 km līnijas garuma (*L*0); 1 km = 103 m, tāpēc



Šajās formulās nav ievērota magnētiskā plūsma vadu iekšienē, ja ievēro šo plūsmu, tad divvadu līnijas induktivitāte jāaprēķina pēc formulas

 (4.74)

kur *μ* — vada materiāla magnētiskā caurlaidība; visiem materiā­liem, izņemot tēraudu, to var pieņemt par vienu.

**4.29. MAGNĒTISKĀ LAUKA ENERĢIJA**

Pieslēdzot nemainīgu EDS ķēdei, kam ir pretestība un induk­tivitāte, strāva pakāpeniski pieaug no nulles līdz stacionārajai vērtībai. Augot strāvai, ap ķēdi rodas magnētiskais lauks; tajā ir uzkrāta daļa enerģijas, ko pievada ķēdes barošanas avots. Magnētiskā lauka enerģiju var konstatēt, piemēram, atslē­dzot strāvu. Tiešām, saslēdzot spoli īsi, enerģiju spolei ķēde vairs nepievada; tomēr strāva spolē neizzūd uzreiz, bet gan samazinās pakāpeniski. Enerģija, kas šī procesa laikā pāriet sil­tumā (spoles pretestībā *r*), tiek saņemta no spoles magnētiskā lauka.

Aprēķināsim spoles magnētiskā lauka enerģiju, ja spoli pie­slēdz avotam ar nemainīgu EDS. Aplūkojam 4.64. att. shēmu un uzrakstām otro Kirhofa līkumu šim kontūrām šādi:



|  |  |
| --- | --- |
|  | 4.64. att. Spoles pieslēgšana  līdzspriegumam. |

Reizinot abas vienādojuma puses ar *idt*, tā kreisajā pusē iegūs­tam izteiksmi enerģijai, ko avots pievada laikā *dt*:

*Eidt = i*2*Rdt + Lidt*. (4.75)

Ievietojot, šeit *Ldi* = *d*(*Li*) = *d*Ψ, iegūstami:

*Eidt = i*2*Rdt + id*Ψ. (4.76)

Vienādojumu (4.75) un (4.76) labās puses pirmais loceklis izsaka enerģiju, kas laikā *dt* pārvēršas siltumā; otrais loceklis liecina, ka avots ir pievadījis, bet ķēde uzņēmusi vel papildus noteiktu enerģijas daudzumu

*dW = Lidi =id*Ψ,

kas saistās ar ķēdes plūsmas saķēdējuma pieaugšanu, t. i., ar mag­nētiskā lauka mainīšanos. No tā secinām, ka otrs saskaitāmais iz­saka magnētiskā lauka enerģijas pieaugumu, palielinoties strā­vai par *di*.

Pilna enerģija, kas uzkrājas magnētiskajā laukā, pieaugot strāvai no 0 līdz *I*, ir

 (4.77)

**4.30. MAGNĒTISKĀ LAUKA ENERĢIJAS BLĪVUMS**

Pieņemsim, ka magnētiskais lauks rodas gredzenveida spolē, kuras izmēri ir tādi, ka lauku var uzskatīt par homogenu; šajā gadījumā Ψ = *Фw* = *BSw*.

No otras puses,



no kurienes



Ievietojot magnētiskās enerģijas izteiksmē (4.63) Ψ un *I* vērtības, iegūstam



Reizinājums *Sl = V* ir spoles serdes tilpums; tāpēc

 (4.78)

Magnētiskā enerģija tilpuma vienībā jeb enerģijas blīvums (apzīmējums *W*0) ir

 (4.79)

Šī magnētiskās enerģijas izteiksme ir speķa arī nehomogēnam laukam.

***4.15. piemērs***. Gredzenveida spolē ar koka serdi (*μ* = 1) plūst strāva *I* = 25 A; spoles šķērsgriezums S = 25 cm2, vidējais garums *l* = 300 cm, vi­jumu skaits *ω =* 2100. Aprēķināt magnētiskā lauka enerģiju.

Magnētiskā lauka intensitāte



Magnētiskā indukcija



*V = Sl* = 25∙300 = 7500 cm3 = 7,5∙10-3 m3;



***4.16. piemērs***. Kontūrā plūst strāva *I* =12 A. Kontūra plūsmas saķēdējams Ψ = 5∙10-2 Wb. Aprēķināt magnētiska lauka enerģiju.



**4.31. ELEKTROMAGNĒTI**

Ja tuvu spolei, kurā plūst strāva, novieto tērauda gabalu (serdi), tad tas magnetizējas un tiek ievilkts spolē, cenšoties no­vietoties tās vidū, kur magnētiskā plūsma caur serdi ir maksimālā (4.65. att.). Enerģiju, kas nepieciešama serdes pārvietošanai, kā ari magnētiskā lauka enerģijas pieaugumu dod spoles barošanas avots. Parasti tērauda serdi novieto nekustīgi spoles vidū, bet pie tās pievelkas tērauda enkurs. Tādu ierīci sauc par elektromagnētu (4.66. att.).

|  |  |
| --- | --- |
| 4.65. att. Strāvas spoles un tērauda serdes  mijiedarbība. | 4.66. att. Elektromagnēts. |

Elektromagnētus plaši izmanto mēr­aparātos, relejos, automātos. Elektro­magnētus lieto arī celtņu būvē.

Spēku, kas jāpieliek enkuram, lai atrautu to no serdes, sauc par elektromagnēta atraušanas spēku.

Pieņemam, ka ārējā spēka *F* iedarbībā elektromagnēts ir at­rāvies, t. i., atvirzījies no serdes bezgalīgi mazā atstatumā *db* (4.67. att.). Tā kā enkurs ir atvirzījies bezgalīgi mazā atsta­tumā, tad var pieņemt, ka magnētiskā plūsma nav mainījusies; šādā gadījumā elektromagnēta tinumā nerodas indukcijas EDS un visa no strāvas avota saņemtā enerģijā pārvēršas siltumā.

Atraujoties enkuram, magnētiska lauka tilpums pieaug; arī magnētiskā lauka enerģija pieaug, jo ārējie speķi veic mehānisku darbu *dA = Fdb*, pārvietojot enkuru. Tātad magnētiska lauka ener­ģijas pieaugums

*dW = dA*.

|  |  |
| --- | --- |
| 4.67. Elektromagnēta atraušanas spēks | 4.68. att. Shēma 4.17. piemēram. |

Bet, tā kā saskaņā ar (4.78), ja *μ* = 1 (gaisa sprauga),



tad



no kurienes, liekot *dV* vietā *Sdb*, atrodam,

 (4.80)

Ievietojot *μ*0 skaitlisko vērtību un izsakot spēku kilogramos, iegūstam

 (4.81)

vai, izsakot magnētisko indukciju gausos, bet polu šķērsgriezuma laukumu kvadrātcentimetros, atrodam

 (4.82)

Elektromagnēta atraušanas spēku var regulēt, mainot strāvu tā tinumā, ja serde ir izgatavota no magnētiski mīksta tērauda ar nelielu paliekošo indukciju un mazu koercitīvo spēku.

***4.17. piemērs***. Aprēķināt elektromagnēta (4.68. att.) atraušanas spēku, ja iekšējā pola šķērsgriezuma laukums *S*1 = 1200 cm2, magnētiskā indukcija tajā ir *B*1 = 16 000 Gs, bet ārējā gredzenveida pola šķērsgriezuma laukums *S*2 = 2000 cm2.

Magnētiska indukcija ārēja polā



Atraušanas spēks



**4.32. SAVSTARPĒJĀ INDUKTIVITĀTE**

Ja divi kontūri vai divas spoles, kurās plūst strāva, atrodas tuvu viena otrai, tad daļa no pirmās spoles magnētiskās plūsmas (Ф12) šķeļ otrās spoles vijumus un, otrādi, daļa no otrās spoles magnētiskās plūsmas (Ф21) šķeļ pirmās spoles vijumus (4.69. att. *a* un *b*). Šādus kontūrus un spoles sauc par induktīvi jeb magnētiski saistītiem.

|  |  |
| --- | --- |
| ***a*** | ***b*** |

4.69. att. Divu strāvas kontūru magnētiskā saite.

Apzīmējam ar w1 un w2 attiecīgi pirmā un otrā kontūra vijumu skaitu. Otrā kontūra plūsmas saķēdējumu, ko nosaka plūsma Ф12, kuru radījusi strāva *i*1 pirmajā kontūrā, apzīmējam ar

Ψ12 = *ω*2*Ф*12

un pirmā kontūra plūsmas saķēdējumu, ko nosaka plūsma Ф21, kuru radījusi strāva *i*2 otrajā kontūrā, ar

Ψ21 = *ω*1*Ф*21

Plūsmas saķēdējums Ψ12 proporcionāls strāvai *i*1, bet Ψ21 strāvai *i*2. Attiecības



kā rāda eksperiments un aprēķins, ir vienādas:

 (4.83)

šo lielumu sauc par abu kontūru vai spoļu *savstarpējo induktivitāti*.

Vienādības (4.83) pareizums izriet no tā, ka reizinājumus Ψ12*i*2 un Ψ21*i*1 var uzlūkot kā darbu, kas jāveic, attālinot vienu kontūru no otra līdz bezgalībai, ar nosacījumu, ka strāvas *i*1 un *i*2 nemainās. Kustības relativitātes dēļ šis pārvietošanas darbs abiem kontūriem ir vienāds, t. i., Ψ12*i*2 = Ψ21*i*1.

Savstarpējo induktivitāti, tāpat kā ķēdes induktivitāti, mērī henrijos.

Aprēķināsim plūsmas *Ф*12 attiecību pret visu plūsmu *Ф*11, ko rāda pirmā strāva. Šī attiecība  Ievērojot, ka saskaņā ar izteiksmi (4.83) Ψ12 = *Mi*1, bet saskaņā ar (4.64) — Ψ11 =*L*1*i*1, iegūstam



Analoģiski atrodam attiecību



Attiecības rāda, kāda daļa no kontūra plūsmas šķeļ blakus kon­tūru. Šo attiecību vidējo ģeometrisko sauc par kontūru vai spoļu saites koeficientu un apzīmē ar burtu *k*:

 (4.84)

Saites koeficients raksturo kontūru vai spoļu induktīvā saistījuma pakāpi un vienmēr ir mazāks par vienu, jo Ф11 > Ф12 un Ф22 > Ф21.

Dažos gadījumos saites koeficients ir tuvs vienam, piemēram, transformatoriem ar tērauda serdi; lai palielinātu saites koefi­cientu, atsevišķos tinumus izvieto vienu virs otra.

**4.33. INDUKTĪVI SAISTĪTU KONTŪRU MAGNĒTISKĀ LAUKA ENERĢIJA**

Enerģija, kas uzkrāta divu strāvas kontūru magnētiskajā laukā, izsakāma kā divu saskaitāmo summa:



kur Ψ1 un Ψ2 — kontūru pilni plūsmas saķēdējumi. Acīm redzot

Ψ1 = Ψ11 ± Ψ21 = *L*1*i*1 ± *Mi*2

un

Ψ2 = Ψ22 ± Ψ12 = *L*2*i*2 ± *Mi*1.

Šajās formulās raksta «+» zīmi, kad plūsmas summējas, t. i., magnētiskā plūsma Ф12 ieiet otrā kontūrā no tās pašas puses, no kuras ieiet plūsma Ф22, un plūsma Ф21 ieiet pirmajā kontūrā no tās pašas puses, no kuras Ф11. Ja minēto plūsmu virzieni ir pre­tēji, tad formulās jāraksta «—» zīme. Tātad



Atkarībā no plūsmu Ф12 un Ф22 un plūsmu Ф21 un Ф11 savstar­pējiem virzieniem šī vienādojuma trešais saskaitāmais var būt pozitīvs vai negatīvs; tāpēc sistēmas kopējā enerģija var būt lielāka vai mazāka par atsevišķo spoļu magnētisko lauku enerģiju summu, tomēr, protams, vienmēr W > 0.

**4.34. SAVSTARPĒJAS INDUKCIJAS ELEKTRODZINEJSPEKS**

Mainoties strāvai vienā no induktīvi saistītajiem kontūriem, piemēram, strāvai *i*1 pirmajā kontūrā, mainās arī otra kontūra plūsmas saķēdējums un otrā kontūrā inducējas EDS, ko sauc par savstarpējās indukcijas EDS. Mainoties strāvai *i*2, sav­starpējās indukcijas EDS rodas pirmajā kontūrā.

Elektrodzinējspēks, kas inducējas otrajā kontūrā, ja pirmā kon­tūra strāva mainās, ir

 (4.85)

un EDS pirmajā kontūrā, kas inducējas, mainoties strāvai *i*2,

 (4.86)

Pieņemam, ka pirmā kontūra induktivitāte ir *L*1 pretestība *r*1 un tas pieslēgts tīklam, kura spriegums ir *U*1 bet otrs kontūrs (*L*2, *r*2) pieslēgts tīklam, kura spriegums ir *U*2.

Saskaņā ar otro Kirhofa likumu pirmajam kontūrām rakstām

*U*1 + *eL*1 + *eM*1 = *i*1*r*1,

no kurienes spriegums uz pirmā kontūra spailēm ir

 (4.87)

analoģiski spriegums uz otra kontūra spailēm

 (4.88)

**4.35. KONTŪRU MAGNĒTISKA SAITE**

Divu kontūru vai divu spoļu magnētisko saiti var izveidot mai­nīgu, pārvietojot vai grozot vienu spoli (kontūru) attiecībā pret otru. Tādu ierīci sauc par variometru (4.70. att.) Savieno­jam divas spoles virknē. Ķēdei pieliktā sprieguma *U* un ķēdes strāvas *i* sakarība ir dažāda atkarībā no spoļu savienošanas veida (vai savstarpējā novietojuma). Spoles ir savienotas līdzslēguma, ja plūsmas Ф12 un Ф22 un plūsmas Ф21 un Ф11 summējas (to virzieni ir vienādi), t.i., atsevišķo spoļu magnētiskās indukcijas vektori veido leņķi, ne lielāku par ±90° (4.70. att. *a*); šajā ga­dījumā



kur

*r = r*1 + *r*2, *L* = *L*1 + *L*2 + 2*M*.

Spoles ir savienotas pret slēgumā, ja plūsmu Ф12 un Ф22 un plūsmu Ф21 un Ф11 virzieni ir pretēji (tās attiecīgi jāatskaita viena no otras), t. i., atsevišķo spoļu magnētiskās indukcijas vektori veido leņķi, kas lielāks par ±90° (4.70. att. b); šajā gadījumā



kur

*L* = *L*1 + *L*2 — 2*M*.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| ***a*** | ***b*** |  |
| 4.70. att. Strāvas spoļu līdzslēgums un pretslēgums. | | 4.71. att. Bifilārs tinums. |

Abos gadījumos *L* ir kopējā ķēdes induktivitāte; to sauc par variometra induktivitāti.

Lai līdzslēguma vietā iegūtu pretslēgumu, nav nepieciešams veikt kaut kādus pārslēgumus; pietiek pagriezt par attiecīgu leņķi vienu no spolēm.

Pakāpeniski griežot vienu spoli attiecībā pret otru, iespējams nepārtraukti mainīt variometra induktivitāti no maksimuma, kad vektori **B**1 un **B**2 ir paralēli:

*Lmax* = *L*1 + *L*2 + 2*Mmax*. (4.89)

līdz minimumam, kad leņķis starp vektoriem **B**1 un **B**2 ir vienlī­dzīgs 180°:

*Lmin* = *L*1 + *L*2 — 2*Mmax*. (4.90)

Interesanti atzīmēt, ka, gadījumā, ja spolei būtu uztīti uz viena karkasa divi vienādi tinumi, kas (ideālā gadījumā) pilnīgi sa­kristu viens ar otru un būtu slēgti viens otram pretī, tad tādas spo­les induktivitāte būtu vienlīdzīga nullei, jo

Ψ11 = Ψ22 = Ψ12 = Ψ21

un tātad

*L*1 = *L*2 = *M; L =* 2*L* – 2*M* = 0.

Praksē šāda veida tinums ir spolēm, kuras izmanto kā vadu pretestības un kurām nedrīkst būt induktivitātes. Šādās spolēs uz­tin divkārt saliktu vadu (4.71. att.); rezultāts ir ekvivalents di­vām pretēji slēgtām spolēm. Tādu tinumu sauc par bifilāru tinumu.

**5. NODAĻA**

**ELEKTRISKĀS ĶĒDES AR KONDENSATORIEM**

**5.1. ELEKTRISKĀ KAPACITĀTE. KONDENSATORI.**

Sistēmu, kas sastāv no divām metāla platēm vai jebkuras formas vadītājiem, kaš atdalīti ar dielek­triķi, izveido elektrisko kondensatoru. Konden­satora vadītājus bieži sauc par elektrodiem vai kondensatora klājumiem.

Kā kondensatori darbojas, piemēram, elektriskā tīkla divi vadi, kabeļa dzīsla — apvalks, vads — zeme. Katru vadu, kas izolēts no zemes, arī var uzlūkot par kondensatoru: viens tā klājums ir vads, bet otrs – zeme. Kondensatori veidojas ne tikai dabiskos apstākļos, bet arī tiek izgatavoti speciāli.

Bieži lieto dažādas uzbū­ves plakanos kondensatorus, kurus izveido no divām pa­ralēli novietotām un savstarpēji izolētām platēm.

Pieņemtie kondensatoru apzīmējumi atbilstoši standartam IEEE 315-1975 parādīti 5.1. tabulā.

5.1. tabula

Pie­ņemtie kon­densatoru ap­zīmējumi

|  |  |
| --- | --- |
| **Apzīmējums** | **Apraksts** |
|  | Kondensators ar nemainīgu kapacitāti (blokkondensators) |
|  | Polarizētais kondensators (elektrolītiskais kondensators) |
|  | Kondensators ar mainīgu kapacitāti (maiņkondensators) |
|  | Pieskaņošanas kondensators ar mainīgu kapacitāti |

Uz kondensatora klājumiem, kas pievienoti barošanas avota spailēm, uzkrājas skaitliski vienādi, bet pretēju zīmju lādiņi, kuru lielums Q ir proporcionāls pieliktajam spriegumam U. Kondensatora spēju uzkrāt un saglabāt uz klājumiem vienāda lieluma un dažādas zī­mes elektriskos lādiņus raksturo kondensatora kapacitāte.

Pat kondensatora kapacitāti C sauc attiecību starp viena klājuma lādiņu pret spriegumu starp klā­jumiem:

 (5.1)

SI sistēma kapacitātes mērvienība ir farads — kapaci­tāte kondensatoram ar lādiņu 1 C un spaiļu spriegumu 1 V, t. i.,



Farads ir ļoti liela vienība, tāpēc biežāk lieto mazākas vienības: mikrofaradu (1μF= 10-6 F) vai pikofaradu (1 pF=10-12 F):

Kondensatora kapacitāte ir atkarīga no elektrodu izmē­riem, to savstarpējā novietojuma un starp elektrodiem no­vietotā dielektriķa īpašībām.

**5.2. Kondensatoru uzbūve.**

Pasaules rūpniecībā ražo kondensatorus ar dažādām ka­pacitātēm (no 1 pF līdz 10000 μF), nomināliem spriegu­miem līdz 100 kV, dažādu uzbūvi un dažādām vajadzībām.

Kondensatorus izmanto elektroenerģētiskās ietaisēs, radioteh­nikā un televīzijā, automātikā u. c. Kondensatoru raksturo tā *ka­pacitāte* resp. reaktīvā jauda (kvar) un darba spriegums.

Kondensatorus klasificē gan pēc izmantotajiem dielektriķiem, gan pēc elektrodu ģeometriskās formas, gan pēc darba sprieguma (spriegumiem līdz 1000 V un virs 1000 V).

Ņemot vērā izmantoto dielektriķa tipu, izšķir papīra, vizlas, keramikas, elektrolīta, gaisa un speciālām vajadzībām paredzētos kondensatorus (vakuuma un ar šķidru dielektriķi).

Līdzstrāvas un maiņstrāvas ķēdēs lieto papīra, plēves, vizlas, keramikas kondensatorus, bet elektrolīta kondensatorus lieto tikai līdzstrāvas ķēdēs.

***Ruļļu konstrukcija****.* Tāda konstrukcija raksturīga zemfrekvences papīra kondensatoriem ar lielu kapacitāti. Papīra kondensatoru elektrodus izveido no 10—20 μm biezas alumīnija, tantala vai alvas folijas, un vienu no otra atdala ar speciālu loti plānu (5—6 μm) augstvērtīgu kondensatoru papīru.

No folijām 1 un papīra 2 saliktu lentu (5.1. att. *a*) satin rullīti (abiem elektrodiem pievieno izvados 3), žāvē un piesūcina ar šķidru dielektriķi, kas aizpilda tukšās vietas papīrā, tā novēršot gaisa jonizācijas iespēju dielektriķī, t. i., uzlabojot dielektriķa sta­bilitāti. Papīru piesūcina ar speciālu kondensatoru minerāleļļu, kuras dielektriskā caurlaidība ε = 2,1— 2,3 (papīra — eļļas kondensatori), vai arī — ar sintētisku šķidru, nedegošu dielektriķi ar lielāku ε. Kondensatora sekcijas var būt cilindriskas vai presētas (5.1.att. *b*). Šādi sagatavotus papīra kondensatorus parasti ievieto metāla vai plastmasas kārbā (5.1 att. *c* un *d*). Kondensatora sekcijas var būt cilindriskas vai presētas. Izgatavo arī hermē­tiski slēgtus papīra kondensatorus (5.1. att. *d*).

|  |  |
| --- | --- |
| ***a*** | ***b*** |
| ***c*** | ***d*** |

5.1. att. Papīra kondensators

Papīra kondensatoru galvenās priekšrocības ir lētums un sta­bilā kapacitāte. Taču tie ir ļoti jutīgi pret paaugstinātu tempera­tūru (pieļaujamā robežtemperatūra ir 60 °C).

Papīra kondensatorus izmanto jaudas koeficienta (cos*φ*) uz­labošanai — vienfāzes un trīsfāzu spriegu­miem 0,22—10,5 kV ar kapacitātēm 0,26—790 μF, maiņstrāvas iztaisnošanas shēmu filtros, elektrificētās satiksmes taisngriežu stacijās, radio un televīzijas raidītājos, rentgena iekārtās u. c. Kondensatori, kurus izmanto cos *φ* uzlabošanai, paradīti 5.2. at­tēlā.

|  |  |
| --- | --- |
|  | 5.2. att. Vienfāzes un trīsfāzu kondensa­tori cos *φ* uzlabošanai |

Metālpapīra kondensatoros (5.3. att.) folijas vietā pielieto metālisko plēvi ar biezumu 0,03-1 μm, kas uzklāta uz papīra lenti vakuumā.

Ruļļu konstrukcijas kondensatoru kapacitāte var aprēķināt pēc formulas

 (5.2)

kur *b* – papīra lentes platums, *l* – lentes garums, *d* – papīra biezums.

Papīra kondensatoru kapacitāte sasniedz 10 μF, bet metālpapīra 30 μF.

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

5.3. att. Metālpapīra kondensatori

**Elektrolīta kondensators** (5.4. att.) izveidots no trim dažādām lentām, kuras satītas rullītī un ievietotas hermētiski slēgtā alumīnija apvalkā.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  |  |

5.4. att. Elektrolītiskā kondensatora uzbūve: 1- alumīnija folija – katods; 2 - alumīnija folija – anods;

3 – papīra lente; 4 – alumīnija oksīda slānis; 5 – elektrolīts; 6 – katoda izvads; 7 - anoda izvads;

8 – korpuss.

Kondensatora «—» elektrods — katods — ir alumīnija folija 1, kas ar elektrolītu piesūcinātu speciāla papīra, kokvilnas auduma vai speciāla polimēra lentu 3 (tās biezums 6-8 μm) atdalīta no abpusēji oksidētas alumīnija folijas 2, kura veido « + » elektrodu — anodu. Elektrolītiskajā kondensatorā elektriskais lādiņš uzkrājas starp alumīnija klājumu (anods) un elektrolītu (elektrovadošais šķīdums, ciets organiskais pusvadītājs vai elektrovadošais polimērs) – katods.

Kā dielektriķi izmanto uz elektroda 2 esošo alumīnija oksīda (Al2O3) slānīti. Tā kā pēdējais ir ļoti plāns (0,01—1,5 μ), tad elektrolīta kondensatoriem ar nelieliem ģeometriskajiem izmēriem ir visai lielas kapacitātes — līdz 2000 μF. Kondensatora katods ar izvadu 4 pievienots alumīnija korpusam 5, bet anods — ārējai (« + ») spailei 6.

Elektrolīta kondensatori izmantojami ti­kai līdzstrāvas ķēdēs, izņemot speciālus tipus, jo oksīda slānītim piemīt vienvir­ziena vadītspēja. Ar pretēju polaritāti ieslēgtā kondensatorā (ķēdes « —» pievie­nots kondensatora « + » spailei) plūst nepie­ļaujami liela strāva, kas kondensatoru ļoti ātri sabojā (pārkarsē). Elektrolīta konden­sators ar maināmu kapacitātes vērtība nav precīza (±20%), tā mainās atkarībā no tempera­tūras.

Elektrolīta kondensatorus izmanto radio shēmu filtros, elek­trisko mēraparātu shēmās un citur spriegumiem līdz 450 V.

Vispārēja nozīme kondensatoriem nomināla kapacitāte sastāda 0,1...33000 μF, nominālais spriegums 4...500 V un darba temperatūra līdz 850C (SD sērija) vai 1050C (RD sērija).

Speciālas nozīmes kondensatoriem kapacitāte atrodas diapazonā 6,8 -10000 μF, darba spriegums 10-450 V, darba temperatūra no – 450C līdz 1450C

Pakešu konstrukcija. Tādu konstrukciju pielieto vizlas, stikla emaljas, stikla keramiskas un keramikas kondensatoriem. Pakešu kondensators (5.5. att.) sastāv no dielektriskas plāk­snītēm 1 ar biezumu aptuveni 0,04 mm, uz plāk­snītēm uzputina metāla klājumus 2, kurus savieno ar metāla folijas joslām 3 paralēlās grupās. Salikto paketi sapresē ar metāla aptverēm 4 un pielodē lokano elektroda izvadu 5. Veidojums, ko satur kopā metāla aptveres, ievietots plastmasas vai keramiskā apvalkā. Dielektriskas plāk­snīšu skaits var sasniegt 100 gabalus.

Pakešu konstrukcijas kondensatoru kapacitāte var aprēķināt pēc formulas (pF)

 (5.3)

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| ***a*** | ***b*** | ***c*** |

5.5. att. Pakešu konstrukcijas kondensators: *a* – kondensatora uzbūve; *b* – vizlas kondensatori,

*c* – plevju-vizlas kondensatori

Vizlas un keramikas kondensatoru kapacitāte ir ļoti stabila, un praktiski to neietekmē ārējie faktori.

Vizlas kondensatoriem kapacitāte atrodas diapazonā 100-12000 pF, darba spriegums – 63…250 V, darba temperatūra no -650C līdz + 2000C, precizitāte 1%. Viņiem arī raksturīgi mazie zudumi augstfrekvences ķēdes.

Plēves kondensatoriem vizla-teflons (politetrafluoretilens) kapacitāte līdz 30 μF, darba temperatūra no -650C līdz 1550C, darba spriegums no 630 V līdz 10 kV, spriegums nav atkarīgs no temperatūras, kapacitātes izmaiņa minimāla (-3/7%).

Vizlas un keramikas kondensatorus lieto galvenokārt radiotehnikā un elektronikā.

Keramikas **diskveida kondensators** (5.6. att.) sa­stāv no keramikas diska 1, kura abās pusēs izveidotie plānie sud­raba slānīsi 2 un 3 veido divus elektrodus, kam pievienoti izvadi 4. Šos kondensatorus izgatavo ar kapacitātēm 1 —100 pF līdz 500 V spriegumam un galvenokārt lieto augstfrekvences ķēdes.

|  |  |
| --- | --- |
| ***a*** | ***b*** |

5.6. att. Keramikas diskveida kondensators

Diskveida kondensatoru kapacitāte var aprēķināt pēc formulas (pF)

 (5.4)

kur *ε* *-* dielektriķa relatīva dielektriska caurlaidība;

*S* – kondensatora elektroda laukums, cm2;

*d* - atstatums starp elektrodiem, cm.

Svārstību kontūros izmanto keramikas ***diskveida kondensatorus ar maināmu kapacitāti***. Šie kondensatori (5.7. att.) sastāv no nekustīga keramikas pamata (stators) 1, virs kura ar skrūvi piestiprināts keramikas disks 2, ko var pagriezt ap asi (rotors). Elektrodus veido uz pamata 1 virsmas un diska augšējās virsmas izveidotie sudraba sektorveida slānīši. No rotora un statora izveidoti ārēji izvadi 3 un 4. Blīvo piekļaušanu rotora pie statora nodrošina atspere 5 (5.7. *b*) vai skrūve 5 (5.7. att. *a*). Disku griežot ap tā asi, mainās elektrodu savstarpējais novietojums un vienlaicīgi arī kondensatora kapacitāte. Šī tipa kondensatoru ka­pacitāti var mainīt robežās no 2—7 pF līdz 25—175 pF.

|  |  |
| --- | --- |
| ***a*** | ***b*** |

5.7.att. Keramikas kondensators ar maināmu kapacitāti

Gaisa kondensatoros dielektriķis ir gaiss, tādēļ šo kondensa­toru kapacitāte ir ļoti maza.

|  |  |
| --- | --- |
|  | 5.8. att. Gaisa kondensators ar maināmu kapacitāti: 1- rotoru sekcija; 2 – ass; 3 – lodīšu gultnis; 4 – korpuss; 5 – statoru sekcija; 6 – atspere - spaile; 7 – stiprinājuma veltnītis; 8 – pēdas gultnis; 9 – nostiprinātājplāksne; 10 – rotora ārējas plāksnes; 11 – rotora iekšējas plāksnes |

Šāda veida kondensatorus ar maināmu kapacitāti (maiņkondensatorus) lieto galvenokārt radiouztvērēju shēmās svārstību kontūru noskaņošanai rezonanses režīmā. Maināmas kapacitātes gaisa kondensators (5.8. att.) sastāv no divām alumīnija elek­trodu sistēmām, no kurām viena nostiprināta nekustīgi, bet otra — uz grozāmas ass. Katras sistēmas elektrodi savstarpēji savienoti. Griežot kondensatora asi, tiek mainīts elektrodu savstarpējais stā­voklis un reizē nepārtraukti mainās kondensatora kapacitāte.

Lieta sekcijas konstrukcija. Lieta sekcijas konstrukcija raksturīga monolītām daudzslāņu keramiskiem kondensatoriem.

|  |  |
| --- | --- |
|  | 5.9. att. Monolītais daudzslāņu keramiskais kondensators: 1- gala elektrods; 2 – iekšējais elektrods; 3 – keramiskais dielektriķis |

Tādus kondensatorus izgatavo izmantojot karsto keramisko izstrādājumu liešanu.  Rezultātā izveidojas keramiskā sagatave 3 ar sieniņu biezumu 100 μm un ar rievām 2 starp viņiem ar biezumu 130-150 μm. Pēc tam sagatave iemērcē sudraba pastā. Kad sudrabs aizpilda rievas, sagatave sakarsē. Pēc atdzišanas iegūta sudraba plāksnītēs grupa, kas atrodas keramiskas sagataves rievās. Pie sudraba plāksnītēm pievieno gala kontaktus 1 vai pielodē lokano kontaktu, pārklāj ar izolējošo materiālu un ievieto aizsargājošā apvalkā.

Monolītā daudzslāņu keramiska kondensatora kapacitāte var aprēķināt pēc formulas:

          (5.5)

kur *ε*0 – elektriskā konstante;

*ε* – relatīva dielektriskā caurlaidība keramiskam materiālam;

*S*0 – viena elektroda aktīvais laukums;

*n* – dielektriķa slāņu skaits,

*d* – dielektriķa slāņa biezums.

**5.3. Kondensatoru slēgumi**

Ja rīcībā nav kondensatora ar vajadzīgo kapacitāti vai nominālo spriegumu, tad var lietot vairākus kondensato­rus ar citiem parametriem.

Kondensatorus saslēdz virknē, paralēli vai jauktā slē­gumā.

Virknes slēgumā (5.10. att.) visiem kondensatoriem uz elektro­diem ir vienādi lādiņi, jo enerģijas avots uzlādē vienīgi ārējos elektro­dus, bet iekšējie elektrodi uzlādējas elektrostatiskās indukcijas dēļ.

|  |  |
| --- | --- |
| 5.10. att. Kondensato­ru virknes slēgums. | 5.11. att. Kondensato­ru paralēlais slēgums. |

Ja apzīmē katra kondensatora elektroda lādiņu ar *Q*, tad

 un 

tādējādi dažādu kapacitāšu gadījumā dažādi būs arī to spriegumi.

Ja izsaka ķēdes spaiļu spriegumu

*U = U*1 + *U*2

ar kondensatoru lādiņu attiecību pret kapacitāti, iegūst:



vai, dalot katru locekli ar Q, iegūst formulu:

 (5.6)

no kurienes divu virkne saslēgtu kondensatoru ko­pējā jeb ekvivalentā kapacitāte

 (5.7)

Paralēlajā slēgumā (5.11. att.) visiem kondensatoriem ir vie­nādi spriegumi, bet lādiņi vispārīgā gadījumā ir dažādi:

*Q*1 = *C*1*U* un *Q*2 = *C*2*U*.

Visiem paralēli saslēgtajiem kondensatoriem pievadī­tais lādiņš ir vienāds ar atsevišķo kondensatoru lādiņu summu, t. i.,

*Q = Q*1 + *Q*2,

no kurienes kop ēj ā jeb ekvivalentā kapacitāte

 (5.8)

t. i., ir vienāda ar atsevišķo kondensatoru kapacitāšu summu.

Cita virknē vai paralēli saslēgto kondensatoru skaita gadījumā ekvivalento kapacitāti var viegli noteikt pēc formulām (5.6) un (5.8).

***5.1. piemērs***. Noteikt divu virknē (paralēli) saslēgtu konden­satoru kopējo jeb ekvivalento kapacitāti, ja *C*1 = 1 μF un *C*2 = 3 μF. Kondensatoru virknes slēguma ekvivalentā kapacitāte



Kondensatoru paralēlā slēguma ekvivalentā kapacitāte

*C = C*1 + *C*2 = 1 + 3 = 4 μF.

***5.2. piemērs***. Trīs kondensatori, kuru kapacitātes ir C1 = 20 μF, C2 = 25 μF un C3 = 30 μF, savienoti virknē. Aprēķināt kopējo kapacitāti.

Atrisinājums.



no kurienes

C ≈ 8,11 μF.

**5.3. piemērs**. 100 kondensatoru savienoti paralēli; katra kondensatora ka­pacitāte ir 2 μF. Aprēķināt kopējo kapacitāti.

Atrisinājums.

C = 100 Ck = 200 μF.

**5.4. PLAKANS KONDENSATORS**

Plakana kondensatora klājumi ir divas paralēlas metāla plates (5.12. att.).

Ja attālums starp platēm ir neliels, salīdzinot ar to garumu un platumu, tad elektrisko lauku starp tām (neievērojot noteiktus kropļojumus konden­satora malās) var uzlūkot par homogenu. Plakana kondensatora laukā ekvipotenciālās virsmas ir paralēlas kondensatora klājumiem (5.12. att.).

|  |  |
| --- | --- |
|  | 5.12. att. Plakans kondensators. |

Plakana kondensatora homogenā lauka intensitāte

 (5.9)

kur *S* — katra klājuma laukums, m2;

*d* — attālums starp klājumiem, m;

*ε*0 = 8,85·10-12 F/m – elektriskā konstante.

Relatīvā dielektriskā caurlaidība *ε* ir abstrakts skait­lis, kas parāda, cik reižu dotās vielas absolūtā dielektriskā caurlaidība ir *εa = εε*0 lielāka par elektrisko konstanti. Gaisam dielektriskā caurlaidība ir 1, minerāleļļai — 2,2, vizlai — 6, papīram — 4,3.

No (5.9) izsakām plakana kondensatora kapacitāti

 (5.10)

Plakana kondensatora kapacitāte ir tieši proporcionāla klājumu laukumam, apgriezti proporcionāla attālumam starp tiem un bez tam ir atkarīga no starpklājumu dielektriķa īpašībām. Kā jau mi­nēts un kā izriet no formulas (5.10), kapacitāte nav atkarīga no pievadītā sprieguma un lādiņa un noteiktam kondensatoram ir pa­stāvīgs lielums (ja dielektriskā caurlaidība nemainās).

**5.4. piemērs**. Aprēķināt kapacitāti plakanam kondensatoram, ja tā klājumu laukums, ir 60 *cm*2 (katram klājumam); telpa starp klājumiem piepildīta ar 0,1 *mm* biezu parafinētu papīru.

Pēc formulas (5.10) aprēķinām



**5.5. PLAKANS KONDENSATORS AR DIVSLĀŅU DIELEKTRIĶI**

Aplūkosim plakanu kondensatoru, starp kura klājumiem atrodas divi dažādi dielektriķi; to robežvirsma sakrīt ar ekvipotenciālo virsmu (5.13. att.). Lai aprēķinātu šāda kondensatora kapacitāti un elektriskā lauka intensitāti starp klājumiem, iedomājamies, ka robežvirsma ir bezgalīgi plāna vadoša virsma. Ievietojot vadošu virsmu vietā, kur dielektriķu slāņi robežo viens ar otru, lauks nemainās, jo katra vadoša virsma ir ekvipotenciāla tāpat kā slāņu robežvirsma. Plakano kondensatoru tātad varam iedomāties kā divu citu plakanu kondensa­toru virknes slēgumu; to kapacitātes ir

 (5.11)

Plakanā kondensatora kapacitāte, kuru var uzskatīt par divu virknē savienotu kondensatoru ekvivalento kapacitāti, aprēķināma pēc sakarības:

|  |  |
| --- | --- |
|  | 5.13. att. Kon­densators ar divslāņu dielektriķi. |



no kurienes

 (5.12)

Tā kā virknes slēguma gadījuma lādiņi uz visiem klājumiem ir skaitliski vienādi, t. i.,

*Q = C*ļ*U*ļ *= C*2*U*2 = *CU*,

kur *U*1 — spriegums uz pirmā kondensatora; *U*2 — spriegums uz otrā kondensatora; *U —* kopējais spriegums; tad



Ievērojot, ka saskaņā ar (5.11) un (5.12)



atrodam

 (5.13)

Elektriskā lauka intensitāte dielektriķa pirmajā slānī (ع1) un otrajā slānī (ع2):



Tātad lauka intensitātes ir apgriezti proporcionālas dielektris­kajām konstantēm:

 (5.14)

No pēdējās formulas var iegūt loti svarīgu secinājumu: ja kon­densatora dielektriķī ir gaisa slānis vai arī tikai gaisa pūslīši, kam dielektriskā konstante (*ε* = 1) ir ievērojami mazāka nekā dielektriķim, tad gaisa slānī var rasties elektriskais lauks ar tik lielu intensitāti, ka sākas izlāde. Gaisā izlādes laikā rodas slā­pekļskābes šķīdums, kas galu galā var sabojāt visas iekārtas izo­lāciju. Tāpēc vadu, kabeļu, mašīnu tinumu u. c. izolāciju žāvē tvertnēs, kurās ir zems spiediens, kas veicina gaisa pūslīšu izdalī­šanos no izolācijas.

***5.5. piemērs***. Plakana kondensatora (ar gaisa dielektriķi) klājumiem pie­vadīts 6000 *V* liels spriegums. Aprēķināt lauka intensitāti, ja klājumi atrodas viens no otra 4 *cm* lielā attālumā.

Lauka intensitāte gaisā



Kā mainīsies elektriskā lauka intensitāte, ja starp elektrodiem (paralēli tiem) novieto 3 *cm* biezu stikla (ε2 = 6) plāksnīti? Aprēķinām lauka intensitāti gaisā:



Lauka intensitāte stikla plāksnītē



**5.6. CILINDRISKS KONDENSATORS**

Cilindriskā kondensatorā elektriskais lauks rodas starp divām cilindriskām virsmām ar kopēju asi (5.14. att.); lauks ir vērsts radiāli. Simetrijas dēļ ekvipotenciālās virsmas ir cilindriskas; to asis sakrīt ar elektrodu kopējo asi. Uz katras ekvipotenciālās virsmas intensitātes skaitliskā vērtība ir nemainīga; tā samazinās, pārejot no vienas ekvipotenciālās virsmas uz otru (ar lielāku rā­diusu).

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

5.14. att. Cilindrisks kondensators.

Atradīsim lauka intensitāti punktā Α uz ekvipotenciālās virsmas ar rādiusu *R*.

Lauka intensitātes vektora plūsma

*N = ε·S = ε·2πRl*;

saskaņā ar Gausa teorēmu



no kurienes

 (5.15)

Spriegums starp cilindriska kondensatora elektrodiem



Cilindriskā kondensatora kapacitāte

 (5.16)

Elektriskā lauka intensitāti punktā, kas atrodas attālumā *R* no ass, var izteikt ar spriegumu *U.* Tā kā saskaņā ar (5.16)



tad

 (5.17)

Tātad laukā intensitāte ir apgriezti proporcionāla ekvipotenciālās virsmas rādiusam. Maksimālā lauka intensitāte ir uz iekšējā cilindra virsmas, bet minimālā — uz ārējā cilindra virsmas.

Ja spriegums starp klājumiem un rādiuss *R*2 ir zināmi, tad var iegūt tādu *R*1 vērtību, ka lauka intensitāte uz iekšējā cilindra virsmas



ir minimālā.

Aprēķinām, kādam nosacījumam izteiksmei  ir maksi­mālā vērtība, ja *R*1 mainās, bet *R*2 paliek konstants; šajā nolūkā atvasinājumu pielīdzinām nullei:



no kurienes

ln *R*2 – ln *R*1 = 1 jeb 

Ievērojot, ka ln*e* = l, iegūstam



t. i., elektriska lauka intensitāte uz iekšējā cilindra virsmas ir mi­nimumā tad, kad iekšējais diametrs ir 2,72 reizes mazāks par ārējo.

**5.7. DIVVADU LĪNIJAS KAPACITĀTE**

Praksē ļoti svarīgi ir zināt divvadu līnijas kapacitāti un tās elektriskā lauka maksimālo intensitāti. Apzīmējam attālumu starp vadu asīm ar *a*, bet vadu rādiusu ar *r*0 (5.15. att.). Aprēķinām lauka intensitāti punktā A, kas atrodas vienā plaknē ar vadu asīm un ir attālumā *r* no pirmā vada ass. Pieņemam, ka *a* ir daudz lielāks par *r*0. Šādā gadījumā var pieņemt, ka pirmā vada lādiņš ir vienmērīgi sadalīts pa tā virsmu un ka pirmā vada elektriskā lauka intensitāte uz cilindriskas virsmas, kurai rādiuss *r*, saskaņā ar (5.15) ir:



|  |
| --- |
|  |

5.15. att. Divvadu līnija.

(Ja *r*0 ir salīdzināms ar *a*, tad blakus vada ietekmē lādiņi uz vadu virsmām ir sadalīti nevienmērīgi).

No otra vada ass punkts Α atrodas attālumā *a — r*. Otrā vada lauka intensitāte punktā A



Tā ka intensitātes vektori ***ε***1 un ***ε***2 paralēli viens otram un vērsti vienā virzienā (5.15. att.), tad lauka rezultējošā intensitāte punktā A

 (5.18**)**

Spriegumu starp vadiem aprēķinām pēc formulas:

 (5.19)

jo attālums starp vadiem vienmēr ir daudz lielāks par to rādiusu (*a* >> *r*0); starpība *a* — *r*0 ļoti maz atšķiras no *a*. No (5.19) atrodam



un divvadu līnijas kapacitāte

 (5.20)

Lauka intensitāte ir maksimālā uz vada virsmas:



**5.8. KONDENSATORA UZLĀDĒS STRĀVA**

Pieslēdzam neuzlādētu kondensatoru ar kapacitāti *C* barošanas avotam, kura iekšējo pretestību var neievērot; tad spriegums *U* uz avota spailēm ir vienlīdzīgs EDS *Ε* (5.16. att.). Pa

vadiem, kas savieno EDS avotu ar kondensatoru, plūst uzlādēs strāva, kas ir atkarīga no laika:

|  |  |
| --- | --- |
|  | 5.16. att. Kondensatora uzlādēšanās caur pre­testību. |

Lādiņš *q* uzkrājās uz kondensatora klājumiem. Starp spriegumu uz kondensatora *uC* un lādiņu *q* pastāv sa­karība *q = CuC*, tāpēc

 (5.21)

Spriegums starp kondensatora elektrodiem  pieaug, uz­krājoties lādiņam, un pieaug arī lauka intensitāte starp klājumiem. Pēc otrā Kirhofa likuma

*U = iR* + *uc.*

Pārveidojot šo vienādojumu, iegūstam:

 (5.22)

Reizinājumu *RC* sauc par ķēdes laika konstanti (apzī­mējums *τ*), mērvienība sekunde:



Tātad



Uzrakstām šo diferenciālvienādojumu, atdalot mainīgos:

 (5.23)

Diferencējot izteiksmi *U* — *uc*, iegūstam

*d(U — u ) = —du ;*

ievietojam *duc* vērtību vienādojumā (5.23):



Integrējot šī vienādojuma labo un kreiso pusi,



no kurienes

 (5.24)

Integrēšanas konstanti *Κ* aprēķinām saskaņā ar nosacījumu, ka spriegums uz kondensatora nevar mainīties lēcienveidīgi, jo tad lēcienveidīgi būtu jāmainās lādiņam (*q = Cu* ) un strāva ķēdē būtu bezgalīgi liela, kas fizikāli nav iespējams. Tāpēc ieslēgšanas brīdī (*t* = 0) *uC* = 0 un no (5.24) *K = U*.

Ievietojot *Κ* vērtību, iegūstam, ka spriegums starp kondensatora spailēm uzlādēšanās procesā mainās pēc likuma

 (5.25)

bet spriegums uz pretestības *R* spailēm



Uzlādēs strāva, kas plūst pretestībā*R,*

 (5.26)

5.17. attēlā paradīti *uc* un *i* grafiki atkarībā no kondensatora uzlādēšanās laika. Ieslēgša­nas brīdī (*t* = 0) uzlādēs strāva ir maksimālā:



un ar laiku pakāpeniski sa­mazinās, tuvojoties nullei.

Laikā *t = τ* uzlādēs strā­va samazinās e ≈ 2,72 reizes:



bet spriegums uz kondensa­tora tai pašā laikā pieaug no nulles līdz 0,63 *U:*



|  |  |
| --- | --- |
|  | 5.17. att. Strāvas un kondensatora spaiļu  sprieguma izmaiņas grafiks, kondensatoram  uzlādējoties. |

Tātad laika konstante raksturo kondensatora uzlādēs ātrumu. Elektriskā lauka intensitāte starp kondensatora klājumiem uz­lādēšanās laikā arī mainās. Pieņemam, ka tiek uzlādēts plakans kondensators. Lauka intensitāte saskaņā ar (5.9)

 (5.27)

Lielumu *εε*0*ε = D* sauc par elektrisko nobīdi (arī elektrostatisko indukciju), bet lielumu  — par nobīdes strāvas blīvumu. No (5.27) seko, ka  un nobīdes strāvas blīvums  Lai atrastu nobīdes strāvu, jāreizina nobīdes strāvas blīvums ar lauka šķērsgriezumu, kas vienlīdzīgs kondensatora klājumu laukumam S. Tātad nobīdes strāva

 (5.28)

t. i., vienlīdzīga strāvai, kas plūst pa vadiem (5.18. att.), jo ķēde nav sa­zarota.

|  |  |
| --- | --- |
|  | 5.18. att. Nobīdes strāva kon­densatorā. |

Jēdziens par nobīdes strāvu ļauj uzskatīt ķēdi ar kondensatoru par noslēgtu elektriskās strāvas ķēdi.

**5.9. Elektriska lauka enerģija**

Ja ķēdei ar aktīvu pretestību *R* un kapacitāti C (5.19. att.) pievada nemainīgu spriegumu *U,* ķēdē rodas strāva un kondensators uzlādējas.

Katrā laika momentā ķēdes spaiļu spriegumam ir divi saskaitāmie:

*U = ur + uC*,

kur *ur = iR* — pretestības *r* spriegums,

*uC* — spriegums starp kondensatora klājumiem.

Ja vienādojumu reizina ar *idt,* iegūst:

*Uidt = i2R dt + uci dt = i2R dt + ucC duc.*

Vienādojuma kreisā puse izsaka enerģiju, kuru ķēde laikā *dt* saņem no barošanas avota. Labās puses pirmais saskaitāmais *i2Rdt* ir enerģija, kas laikā *dt* pretestība *R* pārvēršas siltumā, bet otrais saskaitāmais

*dWC=ucCduC*

ir enerģija, kas uzkrājas elektriskajā laukā, kad kondensa­tora spriegums pieaug par lie­lumu *duc.* Tā kā reizinājums *ucC = q,* tad

*dWC = q·duC.*

|  |  |
| --- | --- |
| 5.19. att. Ķēde ar pretestību un kapaci­tāti. | 5.20. att. Kondensatora uzlādēs grafiks *q=f(uC).* |

Kondensatora lādiņš pieaug proporcionāli spriegu­mam, un to grafiski attēlo ar taisni, kas novilkta caur ko­ordinātu sākumu (5.20. att.). Enerģiju, kuru kondensators saņem, ja tā spaiļu spriegums pieaug par *duc,* izsaka svīt­rotais laukums. Visu kondensatora elektriskajā laukā uz­krāto enerģiju laikā, kad spriegums pieaug no nulles līdz *uc*, izsaka trīsstūra laukums OAB. Tādējādi elektriskā lauka enerģija

 (5.29)

Laukam sabrūkot, kondensatora elektriskajā lauka ieslēgšanas laikā uzkrātā enerģija atbrīvojas.

**5.6. piemērs**. Aprēķināt enerģiju, kas uzkrāta kondensatora elektriskajā laukā, ja kondensatora kapacitāte ir 100μF, bet spriegums starp elektrodiem ir 1000 *V.*

Atrisinājums.



**5.10. Elektriskā lauka enerģijas blīvums**

Uzlādētā plakanā kondensatorā, kura lauks ir homogens, ener­ģija ir vienmērīgi sadalīta tilpumā

*V = Sd,*

un enerģija tilpuma vienībā (elektriskā lauka enerģijas blīvums) ir

 (5.30)

Ievērojot izteiksmi (5.29), iegūstam:

 (5.31)

Formula (5.31), kas izsaka elektriskā lauka enerģijas blīvumu, ir spēkā arī nehomogenam laukam.

Aprēķinām mijiedarbības spēku F starp uzlādēta plakana kon­densatora klājumiem. Pieņemam, ka mijiedarbības spēku rezul­tātā kondensatora klājumi tuvojas viens otram par bezgalīgi mazu attālumu *db.* Šajā pārvietojumā veiktais darbs *Fdb* ir vienāds ar lauka enerģijas samazināšanos *W0dV,* no kurienes



Šai izteiksmē *dV = Sdb,* kur S — kondensatora klājuma laukums; tātad

 (5.32)

**5.7. piemērs**. Aprēķināt mijiedarbības spēku starp plakana kondensatora klājumiem, ja *S* = 120 cm2, *d* = 1 mm, *ε* = l. Kondensatora spailēm pievadīts spriegums 1000 V.

Atrisinājums.



**5.11. KONDENSATORA IZLĀDE CAUR PRETESTĪBU**

Apskatīsim uzlādētu kondensatoru, starp kura klājumiem ir spriegums *U* (5.21. att.). Savienosim tā klājumus caur pretes­tību *R.* Elektrisko spēku iedarbībā ķēdē plūst elek­triskā strāva. Elektrības daudzums, kas laikā *dt* izplūst caur vada šķērsgriezumu, ir vienāds ar klājumu lādiņa samazināšanos, t. i.,

*idt = — dq,*

no kurienes

 (5.33)

|  |  |
| --- | --- |
|  | 5.21. att. Kon­densatora izlādē­šanās caur pre­testību. |

Potenciālu starpība uz pretestības *R* galiem ir vienlīdzīga sprie­gumam starp kondensatora klājumiem:



Atdalot mainīgos un apzīmējot *RC =* *τ*, iegūstam vienādojumu



no kurienes



 (5.34)

Kondensatora izlādes sākuma momentā (*t* = 0) *uC* = *U*, tāpēc no (5.34) izriet, ka *U = K.*

Tātad, kondensatoram izlādējoties, spriegums uz tā klājumiem mainās pēc likuma

 (5.35)

Izlādes strāva

 (5.36)

mainās proporcionāli spriegumam uz klajumiem. Maksimālā vēr­tība tai ir sākuma momentā (kad *t =* 0):



Laika konstante *τ = rC* ir jo lielāka, jo lielāka ir kondensa­tora kapacitāte un pretestība, caur kuru tas izlādējas. Tiešām, jo lielāka ir kapacitāte un pretestība, jo attiecīgi lielāks ir -uzkrātais lādiņš un *mazāka* izlādes strāva, un tāpēc kondensa­tors izlādējas lēnāk.

5.22. attēlā grafiski paradīta *u* un *i* maiņa atka­rībā no laika, izlādējoties kondensatoram.

|  |  |
| --- | --- |
|  | 5.22. att. Strāvās un sprieguma mainī­šanās  grafiks, kondensatoram izlādējoties. |

Enerģija, kas koncentrēta uzlādēta kondensatora elek­triskajā laukā izlādēšanās procesā pārvēršas siltumā pretestībā *R.*

Elektriskais lauks kon­densatorā ar izlādētiem klā­jumiem nevar saglabāties bezgalīgi ilgi, jo kondensa­tora dielektriķim vienmēr ir kaut arī neliela, tomēr noteikta vadīt­spēja, kas atšķiras no nulles. Kondensatora izlādēšanos caur dielek­triķi sauc par *pašizlādi*. Ja dielektriķis ir homogens, tad pašizlādes laika konstante

*τ* = *RC*

nav atkarīga no elektrodu formas un attāluma starp tiem. Piemē­ram, plakanā kondensatorā, kura kapacitāte



bet pretestība



laika konstante

 (5.37)

Tātad pašizlādes laika konstante ir atkarīga tikai no tā dielek­triķa fizikālajām īpašībām, kurš atrodas starp klājumiem, un ir vienlīdzīga absolūtās dielektriskās konstantes un īpatnējās pretes­tības reizinājumam. Šī sakarība ir spēkā jebkuras formas kondensatoram. Piemēram, kondensatoram ar vizlas izolāciju (*ε* = 6; *ρ=* 1012 Ω ·m) pašizlādes laika konstante



Kondensatora uzlādēšanās un izlādēšanās procesus, kuru laikā mainās strāva ķēdē un spriegums uz kondensatora, sauc par pār­ejas procesiem.

**5.16. Dielektriķis elektriskajā laukā**

Ķermeņiem, kam ir neliels brīvo elektronu un jonu skaits katrā tilpuma vienībā, ir maza vadītspēja, un tos sauc par nevadītājiem: izolatoriem jeb dielektriķiem.

5.27. attēlā a dielektriķa loksne 1 iespīlēta starp diviem elektrodiem 2 un 3, kuriem pievadīts spriegums *U*. Elek­triskā lauka spēki virzienā no elektroda 2 uz elektrodu 3 rada nelielu strāvu, kuras viena daļa *Iv* plūst caur dielek­triķi, bet otra daļa *Is* — pa tā virsmu. Pirmo no tām sauc par tilpuma strāvu, bet otro — par virsmas strāvu.

Tilpuma strāvu nosaka dielektriķa tilpuma pretestība *Rv*, kas atkarīga no tā īpašībām un izmēriem.

Virsmas strāvu nosaka dielektriķa virsmas pretestība *Rs*, kas atkarīga ne vien no dielektriķa īpašībām un izmē­riem, bet arī no apstākļiem, kādos atrodas dielektriķis, piemēram, no mitruma.

|  |  |
| --- | --- |
| ***a*** | ***b*** |

5.27. att. Strāvas dielektriķī: *Iv* — tilpuma strāva; *IS* — virsmas strāva; *a* — galvanometrs mēra *IV* un *IS; b —* galvanometrs mēra vienīgi *Iv*.

Tilpuma strāva

 (5.42)

Tilpuma īpatnējā pretestība ρv ir lielums, kas skaitliski vienāds ar tāda dielektriķa pretestību, kura šķērsgriezuma laukums ir 1 m2 un garums 1 m. Tilpuma īpatnējās pretestības vienība ir Ω·m, kas izriet no izteiksmes



Praktiskos aprēķinos izmanto mērvienību μΩ·m.

Virsmas strāva

 (5.43)

Virsmas īpatnēja pretestība ρs ir lielums, kas skaitliski ir vienāds ar tādas virsmas pretestību, kuras platums *d* = 1 m un ga­rums *l* = 1 m. Virsmas īpat­nējās pretestības vienība ir oms, kas izriet no izteiksmes

­

5.27. attēla *b* paradīta tā pati dielektriķa loksne, tikai tā augšējo elektrodu — disku — apliec gredzenveida elek­trods 4. Tādā gadījumā starp elektrodiem 1 un 2 plūst tikai tilpuma strāva, ko uzrāda galvanometrs. Izmērot spriegumu, kā arī zinot augšējā elektroda laukumu un dielektriķa loksnes biezumu, pēc minētās shēmas var no­teikt vispirms tilpuma pretestību



bet tad pēc for­mulas



tilpuma īpatnējo pretestību.

Dielektriķa tilpuma īpatnējā pretestība ir viens no tā parametriem.

***5.9. piemērs***. Cieta dielektriķa tilpuma pretestība *Rv* = 1·109 Ω, saskares virsmas laukums *S* = 25 mm2, elektrodu atstatums *l* = 1 cm.

Aprēķināt dielektriķa tilpuma īpatnējo pretestību *ρv* un īpatnējo vadītspēju *σv*.

Atrisinājums.

1. dielektriķa tilpuma īpatnēja pretestība



2. dielektriķa tilpuma īpatnēja vadītspēja



***5.10. piemērs***. Cieta dielektriķa tilpuma īpatnēja pretestība *ρv* = 1·1010 Ω, saskares virsmas laukums *S* = 20 mm2, elektrodu atstatums *l* = 2 cm.

Aprēķināt dielektriķa tilpuma pretestību *Rv*.

Atrisinājums.

1. dielektriķa tilpuma īpatnēja pretestība



2. dielektriķa tilpuma īpatnēja vadītspēja



***5.11. piemērs***. Noteikt elektrokartona tilpuma īpatnējo pretestību *ρv* un īpatnējo vadītspēju *σv*, ja spriegums *U* = 500 V, tilpuma strāva *Iv* = 2·10-8 A, elektrodu virsmas laukums *S* = 100 cm2, elektrodu atstatums *l* = 1 cm.

Atrisinājums.

1. Elektrokartona elektriskā tilpuma pretestība



2. Elektrokartona elektriskā tilpuma īpatnēja pretestība



3. Elektrokartona elektriskā tilpuma īpatnēja vadītspēja



Ja dielektriķi novieto elektriskajā laukā, tad lauka spēku iedarbības rezultātā elektronu orbītas nobīdās lau­kam pretējā virzienā, tādēļ atomu kodoli neatrodas elek­tronu orbītu centrā, bet gan zināmā attālumā no tā (5.28. att.). Nobīdes parādību sauc par dielektriķa polari­zāciju. Elektriskajam laukam izzūdot, izzūd arī nobīde.

|  |  |
| --- | --- |
| ***a*** | ***b*** |

5.28. att. Dielektriķa atoms: *a* — nepolarizēts; *b* — polarizēts.

Polarizētās molekulas izveido savu elektrisko lauku, kas darbojas pretī pamatlaukam, un rezultātā pamatlauks klust vājāks. Par dielektriķa spēju polarizēties elektris­kajā lauka spriež pēc dielektriskās konstantes, kas rāda cik reižu polarizācija pavājina pamatlauku.

Mainīgā elektriskajā laukā mainīga būs ari nobīde dielektriķī. Šajā procesā daļiņu kustības ātrums pieaug, un tātad dielektriķis sasilst. Jo lielāka ir elektriskā lauka izmaiņu frekvence, jo stiprāk sasilst dielektriķis. Šo pa­rādību izmanto mitru dielektriķu karsēšanai un žāvēšanai vai tādu ķīmisku reakciju iegūšanai, kurām vajadzīga paaugstināta temperatūra. Ar periodiskām nobīdes iz­maiņām saistīto sildīšanai vajadzīgo jaudu, attiecinātu uz tilpuma vienību, sauc par īpatnējiem dielektris­kajiem zudumiem.

Dielektriskā caurlaidība un īpatnējie dielektriskie zu­dumi ir svarīgi dielektriķa parametri.

Ja palielina elektriskā lauka intensitāti, kurā novietots dielektriķis, intensitāte var sasniegt tādu vērtību, ka no­tiek dielektriķa caursišana, t. i., tā vietēja sagraušana. Šo lauka intensitāti sauc par caursites intensitāti vai dielek­triķa elektrisko stiprību, bet spriegumu, kura ga­dījumā notiek caursišana, — par caursites spriegumu.

Caursišanas raksturs var būt dažāds.

Elektriskas caursišanas sākuma momentā nedaudzie brīvie elektroni elektriskā lauka spēka ietekmē dielektriķī sasniedz noteiktu kritisko ātrumu, kas ir pietiekams, lai no dielektriķa neitrālajiem atomiem un molekulām atšķel­tos jauni elektroni — rodas triecienjonizācija, kurai seko caursišana.

Termiskās caursišanas gadījumā dielektriķis elektris­kajā laukā sakarst līdz tādai temperatūrai, ka tas termiski bojājas vai sagrūst, piemēram, izirst, pārogļojas utt. Sakaršanas iemesli var būt dielektriskie zudumi vai dielek­triķa elektrovadītspējas palielināšanās un ievērojams spriegumam neproporcionāls tilpuma strāvas pieaugums sakarā ar negatīvo pretestības temperatūras koeficientu.

Lai raksturotu dielektriķa īpašības caursites procesā, lieto *elektrisko stiprību Ɛst* — homogēna ārējā elektriskā lauka intensitāti dielektriķa caursites gadījumā. Elektrisko izturību parasti mēra megavoltos uz metru (MV/m). Ja homogēns dielektriķis atrodas starp diviem plakaniem elektrodiem, tā elektrisko izturību var aprēķināt pēc for­mulas

 (5.44)

kur *h* — atstatums starp elektrodiem jeb dielektriķa bie­zums.

Lai elektriskās izturības vērtības iegūtu vajadzīgajās mērvienībās (MV/m), caursites spriegumu *UC* formulā ievieto kilovoltos, bet elektrodu atstatumu — milimetros, jo 1 MV/m = l kV/mm.

Dielektriķa elektriskā stiprība nav pilnīgi pastāvīgs lielums. Tā ir atkarīga no dažādiem apstākļiem: no sprie­guma veida, tā izmaiņas ātruma un iedarbes ilguma, no elektriskā lauka veida (elektrodu formas), dielektriķa biezuma, tā temperatūras un mitruma, bet gāzēm — arī no spiediena.

Lai nodrošinātu elektroietaises darbu, visos tās dielektriķos elektriskā lauka darba intensitāte nedrīkst pārsniegt pieļaujamo intensitāti, kurai ir jābūt vairākos reizes mazākai par caursites intensitāti (3-5 reizes) *Ɛpieļ = Ɛst*/(3…5).

Gaisam elektriskās izturības maksimālā vērtība nor­mālos apstākļos homogēnā elektriskajā laukā, ja atsta­tums starp elektrodiem 1 cm, ir 3,2 MV/m (efektīvā vēr­tība tātad 1/2 reizes mazāka). Elektronegatīvajām gāzēm elektriskā izturība ir 2... 3 reizes lielāka nekā gaisam. Šķidriem un cietiem dielektriķiem elektriskā izturība at­karīga no caursites mehānisma (aptuvenās robežvērtības dotas 5.2. tabulā).

**5.12. piemērs.** Elektrokartona loksne ar biezumu0,2 cm ir iespī­lēta starp diviem plakaniem elektrodiem. Noteikt pieļaujamo un caur­sites spriegumu. Pieļaujamam spriegumam ir jābūt 3 reizes mazākam par caursites spriegumu.

Pēc 5.2. tabulas atrodam vidējo elektrokartona caursites intensitāti *Ɛst* = 10 MV/m.

Caursites spriegums

*Uc* = *Ɛst·d* = 10·0,002 = 0,02 MV = 20 kV.

Pieļaujamais spriegums



**5.17. Gāze elektriskajā laukā**

Normālos apstākļos gāze ir dielektriķis, jo brīvo elek­tronu un jonu skaits tajā ir niecīgs. Rentgenstaru, radio­aktīvo, kosmisko un citu staru, kā arī elektriskā lauka, augstas temperatūras un citu aģentu iedarbes rezultātā gāze jonizējas. Tā, piemēram, elektriskajā laukā, elektro­nam saduroties ar neitrālu gāzes atomu vai molekulu un neitrālam atomam sašķeļoties, var izveidoties elektrons un pozitīvs jons. Tādas sadursmes gadījumā daļu kustīgā elektrona enerģijas saņem gāzes atoms. Vismazāko enerģi­jas daudzumu, kas nepieciešams atoma jonizācijai, no­saka ar jonizācijas potenciālu. No atoma atšķel­tais elektrons var palikt brīvā stāvoklī vai arī tas var pievienoties atomam un izveidot negatīvu jonu.

Pretējs process — *dejonizācija* jeb *rekombi­nācija* —, kurā joni un elektroni apvienojas un izveido neitrālus atomus, notiek vienlaikus ar gāzes jonizāciju. Tādējādi, jonizatoram nepārtraukti darbojoties, gāzes jo­nizācijas pakāpe gandrīz nemainās.

Ja diviem gāzē novietotiem metāla elektrodiem pievada nemainīgu spriegumu, tad elektris­kajā laukā pozitīvie joni pārvietosies lauka virzienā, bet elektroni un negatīvie joni — pretējā virzienā, t. i., gāzē plūdīs strāva (5.29. att.).

Par nepastāvīgu vadītspēju sauc tādu gāzes vadītspēju, kuru izraisa svešs jonizators un kas novēro­jama tikai tā darbības laikā.

Ja jonizators un jonizācija ir nemainīgi, strāva sā­kumā pieaug proporcionāli spriegumam starp elektrodiem (posms 0A 5.29. att.), pēc tam strāvas pieaugums samazinās (posms AB) un tad izbeidzas (posms BC). Strāva sasniedz piesātinājuma vērtību, kuras gadījumā dejonizācija nenotiek, bet visi jonizācijas procesā radītie joni un elektroni nokļūst uz elektrodiem.

Ja palielina spriegumu, starp diviem elektrodiem var iegūt tādu lauka intensitāti, ka elektronu kinētiskā ener­ģija ir pietiekama, lai ar triecienu jonizētu neitrālus atomus. Atšķeltie elektroni, ieguvuši pietiekamu paātrinā­jumu, savukārt jonizē arvien jaunus neitrālus atomus utt. Jonu un elektronu izveidošanās process notiek lavīnveida, un tas ir saistīts ar strauju strāvas palielināšanos (posms FG 5.29. att.) līdz vērtībai, kuru nosaka pretes­tība *R*. Spriegums starp elektrodiem tādā ga­dījumā samazinās.

Izlādes laikā telpā starp elektrodiem rodas jonizēta gāze, kurā elektronu un pozitīvo jonu skaits apmēram ir vienāds. Šādu vidi sauc par elektronu-jonu plazmu vai vienkārši par plazmu. Plazmai piemīt liela elektrovadītspēja, kas maz atšķiras no metālu elektrovadītspējas.

Daļai elektronu kinētiskā enerģija nav pietiekama, lai jonizētu gāzes atomus. Šādā gadījumā enerģija, kuru trie­cienā iegūst atoms, to tikai ierosina. Pārpalikuma ener­ģiju ierosinātais atoms drīz pēc tam atdod gaismas izstarojuma veidā, un ir novērojama gāzes spīdēšana.

Patstāvīgo izlādi gāzēs var izraisīt elektriskais lauks ar pietiekami lielu intensitāti. Sasniedzot zināmu intensitāti un tātad arī spriegumu, ko sauc par aizde­dzes spriegumu, strāva spēji pieaug (posms FG 5.29. att.) un gāze sāk spīdēt.

|  |
| --- |
|  |

5.29. att. Gāzes posma voltampēru raksturlīkne.

Gāzēs izšķir vairākas patstāvīgās izlādes stadijas: Taunsenda sekundāro izlādi (tumšo izlādi), mirdzošo izlādi, dzirksteļizlādi un lokizlādi.

Tumšā izlāde rodas, ja lauka intensitāte kādā vietā sasniedz gāzei atbilstošo kritisko vērtību, piemēram, smailumu vai maza diametra vadu virsmas tuvumā. Šā­das izlādes laikā dažkārt ir novērojama spīdēšana — korona — un raksturīga šņākoņa.

Mirdzošā izlāde kā tumšās izlādes turpinājums rodas zemspiediena aparātos. Tai raksturīgs ir anodspīdums — spīdošs gāzes slānis ap anodu. Garās stikla cau­rulēs anodspīdums aizņem caurules lielāko daļu, un tā krāsa ir atkarīga no gāzes ķīmiskā sastāva, piemēram, ar neonu iegūst sarkanu gaismu. Šādas caurules lieto re­klāmu apgaismojumam.

Gāzspīdes spuldzes lieto par sprieguma indikatoriem. Ar neonu vai argonu piepildītā balonā ievieto divus elek­trodus. Ja spuldzei pievada noteiktu spriegumu, tā spīd. Spuldzes jauda ir vata daļas.

Dzirksteļizlāde izveidojas pēc tumšās izlādes, ja palielina spriegumu un tātad arī lauka intensitāti, un jonizējas visa elektrodu starptelpa. Dzirksteļizlāde notiek pa kanāliem — mazākās pretestības ceļiem. Elektronu la­vīna, kas pārvietojas pa dzirksteles kanālu, rada spēju temperatūras un spiediena pieaugumu, tādēļ dzirksteļizlādes laikā dzird raksturīgus sprakstus. Zibens ir milzīga apmēra dzirksteļizlāde.

Dzirksteļizlāde rada elektrokoroziju, t. i., vielas daļiņu izraušanu no anoda. Šādu parādību izmanto metālu ap­strādei ar elektrisko dzirksteli.

Lokizlādi var iegūt arī bez iepriekšējas stadijas, piemēram, starp diviem ogles elektrodiem, kas pieslēgti barošanas avotam virknē ar ierobežojošo pretestību. Lai iegūtu loku, ogļu galus tuvina līdz saskarei. Tādā veidā iegūtā strāva sakarsē satuvinātos galus līdz augstai temperatūrai. Attālinot ogles, elektroni jonizē spraugu starp tām, un tā piepildās ar plazmu, kas noslēdz ķēdi. Turpi­nās elektrodu, it sevišķi anoda, sakaršana, jo to bom­bardē elektroni. Anoda un plazmas temperatūra pārsniedz 4000 °C, un rodas spēcīga gaismas plūsma.

Plazmai ir liela vadītspēja, tāpēc ķēdē ar mazu spriegumu (15—30 V) plūst liela strāva.

Ja palielina strāvu, plazmas tem­peratūra un vadītspēja palielinās, bet spriegums samazinās. Loka voltampēru raksturlīknei ir krītošs raksturs (5.30. att.).

|  |  |
| --- | --- |
|  | 5.30. att. Loka voltampēru raksturlīkne. |

Dzirksteļizlāde un lokizlāde rodas, ja pārtrauc elektrisko ķēdi, ja atslēdz elektroenerģijas patērētājus.

Metālu metināšana ar elektrisko loku, kuru plaši pie­lieto mūsu zemē, ir progresīvs tehnoloģisks process.

**5.18. Elektriskā izolācijā**

Jebkuru elektrisko ķēdi izveido ne vien no strāvas vada, t. i., no ceļa, pa kuru plūst elektriskā strāva, bet arī ierīces, kas nepieļauj strāvai plūst pa kaut kādiem blakus ceļiem ārpus strāvas vada. Tādējādi strāvas va­dam visā tā garumā ir jābūt aptvertam ar izolāciju, kas to atdala no apkārtējās vides un atšķir vienu no otra strā­vas vada posmus ar dažādiem potenciāliem.

Bez tam izolācijai ir jānodrošina cilvēki pret pieskar­šanos strāvas vada posmam, kura potenciāls atšķiras no Zemes potenciāla.

Kondensatoros un citās ierīcēs, piemēram, kabeļos, izo­lāciju izmanto par darba dielektriķi, kas ietekmē to ka­pacitāti, parametrus un īpašības.

Pareiza izolācijas izvēle, tās pareizs konstruktīvais iz­veidojums un izolācijas stāvokļa kontrole nodrošina elektroietaišu bezavārijas darbu. Pie tam jāievēro, ka izolā­cija ātrāk izmainās un bojājas nekā strāvas vads.

Elektrotehnisko ietaišu atsevišķu elementu izolatoru un izolācijas uzbūve un konstruktīvais izveidojums un to stāvokļa kontrole ir aplūkoti attiecīgajās grāmatas no­daļās.

Ja palielina elektroietaises darba spriegumu, elektris­kās izolācijas nozīme un izmaksa pieaug.

Liela tehniska un ekonomiska nozīme ir jaunu izolā­cijas materiālu ar augstu elektrisko stiprību, augstu siltumizturību, lielu dielektrisko caurlaidību ieguvei un ra­cionālai izmantošanai, jo tad var samazināt elektrisko mašīnu, elektriskās aparatūras, elektrisko tīklu un elek­troenerģijas pārvades līniju gabarītus, svaru un izmaksu.

Elektroizolācijas materiāliem izvirza ļoti dažādas pra­sības attiecībā uz to īpašībām, pie tam svarīgākas no tam nosaka pēc šādiem lielumiem:

elektriskās stiprības *Ɛst*;

tilpuma īpatnējās pretestības *ρv*;

virsmas īpatnējās pretestības *ρs*;

dielektriskās caurlaidības *εa* vai *ε*;

dielektriskajiem zudumiem.

Bez tam liela nozīme ir mehāniskajām, termiskajām un citām fizikālajām un ķīmiskajām īpašībām.

Atbilstoši daudzveidīgām prasībām elektrotehnikā lieto visdažādākos elektroizolācijas materiālus.

**5.19. Elektroizolācijas materiāli**

Elektroizolācijas materiālus var sadalīt grupās pēc dažādām pazīmēm, piemēram:

1) pēc to agregātstā­vokļa — gāzveida, šķidros un cietos izolatoros;

2) pēc to ķīmiskas dabas, — organiskos un neorganiskos izola­toros;

3) pēc to siltumizturības — klasēs utt.

**Gāzveida dielektriķi.**

Gaiss ir dabisks izolators. Ietaišu atsevišķās daļās, pie­mēram, elektropārvades gaisvadu līnijās, starp balstiem gaiss ir vienīgā kailvadu izolācija.

Gaisa un citu gāzu elektriskā stiprība ir atkarīga no temperatūras, spiediena un citiem apstākļiem. Normālas temperatūras ( + 20 °C) un normāla spiediena gadījumā gaisa elektriskā stiprība (3-3,2 MV/m) , ir mazāka nekā šķidro un cieto dielektriķu vairumam. Tādēļ dažkārt ir novēro­jama gaisa starpas caursite tieši uz cieta dielektriķa (izo­latora) virsmas, ko sauc par *virsmas izlādi.* Virsmas izlāde ir labāka nekā izolatora caursite, jo gaisa elek­triska stiprība atjaunojas, bet caursists izolators ir sabojāts, un tas ir jānomaina.

Lieto arī citas gāzes, piemēram, ūdeņradi, ogļskābo gāzi, slāpekli un inertās gāzes. Argonu un neonu iepilda elektrospuldžu balonos.

Lielu elektrisko mašīnu dzesēšanai gaisa vietā lieto ūdeņradi, jo tam ir lielāka siltuma vadītspēja un siltum­ietilpība.

**Šķidrie dielektriķi**

Šķidrie dielektriķi ir minerāleļļas, sintētiskie šķidrumi, sveķi un lakas.

Minerāleļļas ir naftas pārstrādes produkti, un tās iz­veido šķidru ogļūdeņražu maisījums. Tās galvenokārt lieto eļļas transformatoros, eļļas slēdžos, spēka kabeļos un kondensatoros.

Transformatoros eļļu lieto strāvu vadošo daļu izolēša­nai un dzesēšanai ar konvekciju, t. i., siltuma pārnešanai ar eļļas cirkulāciju.

Eļļas slēdžos eļļa izveido vidi, kas ķēdes pārtraukša­nas laikā veicina elektriskā loka dzišanu.

Kabeļos ar darba spriegumu līdz 35 kV izolāciju pie­sūcina ar eļļu. Kabeļos, kuru darba spriegums 100 kV un lielāks, ar eļļu piepilda tajos izveidotos kanālus.

Eļļai ir jābūt ar lielu elektrisko stiprību (10— 20 MV/m). Tā krasi samazinās, ja eļļa ir mitra, tāpēc pirms iepildīšanas un ekspluatācijā periodiski eļļa ir jāžāvē un jātīra. Eļļas dielektriskā caurlaidība *ε* = 2-2,3; tilpuma īpatnējā pretestība *ρν* = 1014- 1015 Ω·cm.

Pēdējā laikā diezgan bieži lieto mākslīgos šķidros di­elektriķus.

Sovols ir difenila molekulu maisījums ar dažadam hlorēšanas pakāpēm. Šo sintētisko šķidro dielektriķi lieto kondensatoru piesūcināšanai un piepildīšanai, jo tā di­elektriskā caurlaidība vairāk nekā 2 reizes lielāka nekā minerāleļļai un tātad kondensatora kapacitāte pieaug ap­mēram 2 reizes.

Lielās stigrības dēļ to nevar iepildīt transformatoros. Šādam nolūkam lieto sovtolu, kas ir atšķaidīts trihlorbenzols.

Sovtols, tāpat kā sovols, ir nedegošs, un ar to pie­lietie transformatori ir ugunsdroši.

Sveķi zemās temperatūrās ir amorfas stiklveida ma­sas. Karsējot tie kļūst plastiski un pēc tam šķidri. Sveķi nav higroskopiski un nešķīst ūdenī, bet šķīst spirtā un citos šķīdinātājos.

Sveķi ir svarīgākā dažādu laku, kompaundu, plast­masu un plēvju sastāvdaļa. Tie var būt dabiski vai māk­slīgi.

Dabiskie sveķi ir dažu dzīvnieku organismu dzīvības procesā izdalītie produkti, piemēram, šellaka, vai augu valsts produkti. Vislielākā nozīme ir sintētiskajiem sve­ķiem, piemēram, polietilēnam, polivinilhlorīdam. Polivinilhlorīdu — vinilhlorīda polimēru — lieto vadu, kabeļu izolācijai, aizsargpārklājumiem un laku izgatavošanai.

Mākslīgo sveķu dielektriskā caurlaidība ε = 4,5-9, elek­triskā stiprība *Ɛst* = 15-40 MV/m, tilpuma īpatnējā pre­testība ρv = 10Ι3- 1014 Ω·cm.

Lakas ir plēvi veidojošu vielu — sveķu, bitumenu, žūstošu augu eļļu vai celulozes ēteru šķīdumi. Žūšanas procesā izveidojas lakas plēve.

Pēc nozīmes izšķir piesūcināšanas, pārklāšanas un lī­mēšanas lakas. Piesūcināšanas lakas lieto elektrisko ma­šīnu un aparātu tinumu piesūcināšanai, lai palielinātu to mitrumizturību. Pārklāšanas lakas izveido aizsargsegumu, kas novērš apkārtējās vides iedarbi. Līmēšanas la­kas ir paredzētas vizlas plāksnīšu salīmēšanai, pielīmēšanai pie papīra vai auduma (mikanīts, mikalenta).

Emaljas ir lakas, kurām piejauktas neorganiskas pildvielas, kas palielina emaljas plēves cietību, mehānisko izturību un mitrumizturību.

Emaljas lakas ir speciāla laku grupa, kuras ir paredzētas plānu (0,05 mm) un elastīgu segumu iegūša­nai uz tinumu stieplēm (stieples ar emaljas izolāciju).

**Cietie dielektriķi**

Cietie dielektriķi izveido ļoti lielu izolācijas materiālu grupu. Aplūkosim dažus visplašāk lietotos materiālus. Kompaktuma dēļ daļa ziņu par tiem ir dotas 5.2. tabulā.

1. Šķiedrvielu organiskos materiālus — papīru, kartonu, fibru, audumus — izgatavo no koksnes šķiedrām, kokvilnas, dabiskā zīda.

Tiem piemīt lokanība, pietiekama mehāniskā izturība un higroskopiskums, kuru samazina, piesūcinot ar eļļu vai kompaundu.

Papīru izgatavo no koksnes, to speciāli apstrādājot. Lieto kabeļu un kondensatoru papīru, piesūcināšanas pa­pīru getinaksa izgatavošanai, uztīšanas — bakelīta izstrā­dājumu izgatavošanai, aplīmēšanas — tērauda lokšņu izolēšanai.

Elektrokartonu (prešpānu) izgatavo no celulo­zes un presē. 3B markas elektrokartons ir paredzēts dar­bībai gaisā, bet markas 3M — darbībai eļļā.

Elektrokartonu plaši izmanto elektrisko mašīnu rievu starpliku, transformatoru tinumu karkasu izgatavošanai un citiem elektroizstrādājumiem.

Fibru izgatavo no poraina papīra, apstrādājot to ar hlorcinku. Lieto paneļu, statņu ieliktņu, spoļu karkasu un citu elektroizstrādājumu izgatavošanai.

Getinakss — presēts ar bakelītu piesūcināts pa­pīrs, izgatavo loksnēs ar biezumu no 0,2 mm līdz 50 mm.

Tekstolīts — presēts daudzslāņu audums, piesūci­nāts ar rezola sveķiem.

2. Plastmasas — materiāli, kuriem ir divas sa­stāvdaļas — saistviela un pildviela. Par saistvielām lieto sveķus vai bitumenu un arī stiklu (mikaleksam) vai ce­mentu (azbestcementam). Pildvielas var būt pulverveida vai šķiedrainas.

5.2. tabula

**Dažu elektroizolacijas materialu raksturojumi**

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **Dielektriķis** | **عst,**  **MV/m** | ***ε*** | ***ρv*,**  **Ω·m** |
| Azbests | 3—6 | — | 1010 |
| Papīrs, ar eļļu piesūci­nāts | 10—25 | 3,6 | — |
| Getinakss | 10—15 | 4—7 | 1012—1014 |
| Koks | 2,5—5 | 2—3 | 1010—1013 |
| Lakas audums | 7—40 | 3—4 | 1013—1015 |
| Marmors | 3—5 | 7—8 | 1010—1013 |
| Polistirols | 20—30 | 2,5 | 1018—1020 |
| Parafīns | 20—25 | 2—2,2 | 1018—1019 |
| Polivinilhlorīds | 32,5 | 3,2 | 1016 |
| Polietilēns | 50 | 2,25 | 1016—1018 |
| Gumija | 15—25 | 3—6 | 1015—1016 |
| Stikls | 10—15 | 6—10 | 1016 |
| Stikls, organiskais | 40—50 | 3 | 1016—1018 |
| Stikla audums | 30—40 | 3—4 | 1014—1016 |
| Vizla | 50—100 | 5,4 | 5·1013 |
| Sovols | 14—18 | 5,3 | 1015—1017 |
| Transformatoru eļļa | 5—18 | 2—2,5 | 5·1016—5·1017 |
| Tekstolīts | 1—7,5 | 4—8 | 1012—1015 |
| Porcelāns | 15—20 | 5,5 | 1016—1017 |
| Ebonīts | 60—80 | 3—3,5 | 1017—1018 |
| Elektrokartons | 8—12 | 3—3,5 | 1010—1012 |

Lai samazinātu trauslumu, dažkārt piejauc plastifikatorus, bet nokrāsošanai — krāsvielas.

Izšķir plastmasas, kas iegūtas ar auksto vai karsto presēšanu. Presformās plastmasa pārveidojas vēlamās formas gatavā izstrādājumā.

Elektrotehnikā plastmasas plaši izmanto par izolāci­jas un konstrukcijas materiāliem.

3. Elastomēri. Elastība — materiāla īpašība stiep­jot pagarināties un, pārtraucot stiepšanu, iegūt iepriekšē­jos apmērus.

Materiālus, kuriem piemīt elastība, mēdz saukt par elastomēriem.

Dabiskajam kaučukam, kuru iegūst no kaučuka auga, ir liela elastība un maza mitruma un gāzu caurlaidība.

Pēdējos gadu desmitos plaši lieto sintētisko kaučuku.

Gumija — elastīgs materiāls, kuru iegūst no kau­čuka, to apstrādājot ar sēru. Ja sēra saturs ir 1—3%, iegūst mīkstu, ļoti elastīgu gumiju; ja sēra saturs ir 25— 50%, iegūst neelastīgu, viegli apstrādājamu cieto gu­miju — ebonītu.

Elastības un labo elektrisko īpašību dēļ gumiju plaši lieto elektrotehnikā (sk. 4-1. tabulu).

Gumiju ar mazu sēra saturu lieto vadu un kabeļu izo­lācijai. No ebonīta izgatavo izolācijas detaļas.

Gumijas trūkums ir zemā siltumizturība un nepastā­vība, ja uz to iedarbojas minerāleļļas.

Pēdējā laikā gumiju sekmīgi aizvieto ar plastmasām — elastomēriem, piemēram, polivinilhlorīdu, polieti­lēnu, kurus mazāk ietekmē sārmi, skābes, minerāleļļas un benzīns.

4. Stiklu iegūst, kausējot kramzemi (Si02)ar nāt­rija kālija, kalcija oksīdiem, pēc tam strauji atdzesējot un apstrādājot, lai iegūtu vēlamās formas izstrādājumu.

Parastais stikls ir trausls, speciāli izgatavotiem stik­liem, piemēram, stalinītam, piemīt liela stiprība.

Elektrotehnikā no stikla izgatavo izolatorus, kvēlspul­džu un elektronu lampu balonus.

No stikla var izgatavot šķiedru un stikla audumu, kuru lieto, piemēram, vadu izolēšanai, ja tie paredzēti darbībai ar augstu temperatūru.

5. Elektroporcelāns: kaolīnu, ugunsdrošo mālu, kvarcu, lauka špatu sasmalcina, sajauc, apstrādā, lai iz­strādājums iegūtu vēlamo formu, pārklāj ar glazūru, lai samazinātu higroskopiskumu, un apdedzina.

Porcelānam ir liela mehāniskā un elektriskā stiprība un siltumizturība. No tā izgatavo zemsprieguma un augst­sprieguma izolatorus.

6. V i z 1 a — kristāliskas struktūras minerāls, viegli sašķeļams plānās plāksnītēs. Tai ir liela siltumizturība, mitrumizturība un labas elektriskās īpašības (sk. 4-1, ta­bulu). Vizlu plaši lieto elektrotehnikā un radiotehnikā.

Mikanīts — ar laku vai sveķiem salīmētas vizlas plāksnītes. No tā izgatavo kolektoru plāksnīšu un cita veida starplikas, kā arī veido fasondetaļas.

7. Azbests — šķiedrainas uzbūves minerāls. Svarī­gākā azbesta priekšrocība — liela siltumizturība (līdz 300—400 °C). Tas ir higroskopisks, ar ne visai labām elektriskajām īpašībām (sk. 4-1. tabulu). No azbesta iz­gatavo pavedienus, audumus, lentas, auklas, kartonu.

Azbestcementu iegūst, presējot aukstā veidā masu, kas sastāv no azbesta šķiedrām, cementa un ūdens. Tam piemīt liela siltumizturība, mehāniskā stiprība, un tas ir nedegošs. Azbestcementu. lieto slēgdēļos, kā ari cauruļu un fasondetalu izgatavošanai.

8. Marmors — kalnu iezis, no kura izgatavo sada­lītāju paneļu marmora plates.

9. Parafīns — naftas pārstrādes produkts — balta vaskveida viela. Parafīns ir nehigroskopisks un kūst pie 55 °C. Ar to piesūcina papīru, kartonu, koku, lai samazi­nātu ihigroskopiskumu.

**6. NODAĻA**

**SINUSOIDĀLAS MAIŅSTRĀVAS ĶĒDES**

**6.1. PAMATJĒDZIENI. SINUSOIDĀLA EDS IEGŪŠANA**

Mūsu dienās maiņstrāvai ir ļoti liela praktiska nozīme. Pietiek atzīmēt, ka gandrīz visu elektrisko enerģiju ražo maiņstrāvas enerģijas veidā.

Līdzstrāva nepieciešama tikai speciālām vajadzībām: elektrificētam transportam, sakaru tehnikā, elektroķīmijā, elektropiedziņai, ja ātrums jāmaina plašās robežās, dažreiz arī elektriskajai metināšanai utt. Taču minētajām vajadzībām līdzstrāvu bieži vien iegūst, taisngriežot maiņstrāvu.

Maiņstrāvas galvenās priekšrocības salīdzinājumā ar līdz­strāvu ir šādas:

* ar transformatoru palīdzību iespējams vienkārši un ar ma­ziem enerģijas zudumiem izmainīt maiņsprieguma skaitlisko vēr­tību un tādējādi nodrošināt elektriskās enerģijas ekonomisku pārvadīšanu un sadalīšanu patērētājiem;
* maiņstrāvas elektrisko mašīnu konstrukcija un ekspluatā­cija ir ievērojami vienkāršāka, tās ir lētākas un darbā drošākas nekā līdzstrāvas mašīnas.

Par *maiņstrāvu* sauc elektrisko strāvu, kura periodiski maina savu skaitlisko vērtību un virzienu.

Elektroenerģētikā, radiotehnikā, sakaru tehnikā u. c. izmanto sinusoidālu maiņstrāvu, t. i., tādu strāvu, kuras skait­liskā vērtība mainās pēc sinusa likuma, jo nesinusoidāla strāva izraisa lielākus enerģijas zudumus pārvades līnijās un elektroiekārtās, kā arī citas nevēlamas parādības.

Par *maiņstrāvas elektrisko ķēdi* sauc ķēdi, kurā plūst laikā periodiski mainīga strāva. Sinusoidālu maiņstrāvu ķēdē var uzturēt sinusoidāls EDS resp. sinusoidāls maiņspriegums. Sinusoidālu EDS iegūst elek­trostacijās uzstādītajās maiņstrāvas mašīnās — ģeneratoros, kurus piedzen tvaika vai ūdens turbīnas. Ģeneratoru darbības pa­matā ir elektromagnētiskā indukcija.

Visvienkāršākā sinusoidāla EDS iegūšanas iekārta (ģenera­tors) parādīta 6.1. attēlā.

Homogēnā magnētiskā laukā ar magnētisko indukciju *B* ap asi 00' vienmērīgi rotē taisnstūrveida kontūrs 1—2—3—4—1 ar leņķisko ātrumu ω = const; kontūra gali pievienoti izolētiem me­tāla, kontaktgredzeniem K1 un K2, kas nekustīgi nostip­rināti uz ass. Kontūra vārpstu 00' griež kāds primārais dzinējs.

Kontūrām rotējot, tā aktīvās malas 1—2 un 3—4 šķel mag­nētiskās līnijas, un tādēļ šajās malās inducējas elektrodzinējspēks *er*, kura virzienu nosaka pēc labās rokas likuma. Kontūra ma­las 2—3 un 1—4 pārvietojas paralēli magnētiskajām līnijām, un tādēļ tajās EDS neinducējas.

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

6.1. att. Sinusoidāla EDS iegūšanas princips.

Kontūra aktīvajā malā inducētais EDS

*er* = *Blv* sin*α*,

kur *l* — kontūra aktīvās malas garums, m;

*v* — aktīvo malu lineārais ātrums, m/s;

*α* — leņķis starp vektoru *B* un lineārā ātruma vektoru *v*.

Saskaņā ar labās rokas likumu kontūra malās inducēto elektrodzinējspēku *er* virzieni ir pretēji, bet attiecībā pret kontūru tiem ir viens virziens, tādēļ jebkurā mirklī šie EDS aritmētiski summējas. Tātad rotējošā kontūrā inducējas EDS

*e =* 2*er* = 2*Blv* sin*α*.

Kontūra lineārais griešanās ātrums



kur *d* — kontūra diametrs.

Tad

*e =* *ωBld* sin*α*.

Laiku *t* sāk skaitīt no tā momenta, kad leņķis *α* = 0, t. i., kad kontūrs iet caur horizontālo plakni, ko sauc par neitrālo plakni (tā sakrīt ar rotācijas asi un ir perpendikulāra magnē­tiskajām līnijām).

Tādējādi leņķis *α* ir kontūra pagrieziena leņķis pret neitrālo plakni pēc *t* sekundēm.

Tā kā  tad *α = ωt* un *e =* *ωBld* sin *ωt.* Reizinājums *Bld* izsaka kontūru caurtverošās magnētiskās plūsmas maksimālo vēr­tību *Фm*, t. i., *Bld* = *Фm*. Tad kontūrā inducētais EDS

*e =* *ωФm* sin *ωt,*

t. i., homogēnā magnētiskā laukā rotējošā kontūrā inducētais EDS mainās pēc sinusa likuma.

Ja rotējošam kontūrām ar kontaktgredzenu K1 un K2 un suku S1 un S2 palīdzību pievieno noslēgtu ārējo ķēdi (pretestību *R*), tad sinusoidālais EDS noslēgtajā ķēdē uztur sinusoidālu maiņ­strāvu *i*, citiem vārdiem, — ģenerators nodrošina ārējai ķēdei sinusoidālu maiņspriegumu *u*.

Kontūrā inducētā EDS virziens mainās tad, kad kontūrs iet caur neitrālo plakni (*α* = 0 un *e* = 0). Kad leņķis , kontūra EDS sasniedz maksimālo vērtību *Em*:

*e =* *ωФm* = *Em*.

Tātad kontūrā inducētā EDS maiņas likums ir šāds:

*e = Em*sin*ωt*. (6.1)

Mainīgo leņķi *α* = *ωt* sauc par EDS - fāzes leņķi jeb fāzi.

|  |  |
| --- | --- |
|  | 6.2. att. Homogēnā magnētiskā lauka rotējošs kontūrs |

Ja laika skaitīšanas sākuma mo­mentā (*t* = 0) rotējošais kontūrs ar ne­itrālo plakni veido kādu leņķi ψ (6.2. att.), tad kontūrā inducētā EDS maiņas likuma izteiksmes vispārīgā forma ir šāda:

*e = Em*sin (*ωt +* ψ), (6.2)

kur ψ —EDS sākuma fāzes leņķis (sākuma fāze);

*ωt +* ψ — EDS fāzes leņķis (fāze).

Tādējādi inducētā EDS vērtība jebkurā mirklī ir atkarīga no EDS maksimālās vērtības *Em* un no fāzes leņķa.

Sinusoidālus lielumus — EDS, spriegumu un strāvu — var attēlot grafiski ar sinusoīdām, uz abscisu ass atliekot kontūra pagrieziena leņķi *α* = *ωt* vai laiku *t*. Maiņ­strāvas sinusoīda parādīta 6.3. attēlā.

Sinusoidāla lieluma (EDS, sprieguma vai strāvas) vērtību kādā laika momentā sauc par šī lieluma momentāno vēr­tību un apzīmē ar attiecīgo mazo burtu (*e, u, i*).

Strāvas momentāno vērtību izteic ar elementāra elektrības daudzuma *dq* attiecību pret elementāru laika sprīdi *dt*, kurā šis elektrības daudzums izplūst caur vadītāja šķērsgriezumu

 (6.3.)

Sinusoidāla sprieguma, strāvas vai EDS vislielāko vērtību sauc par maksimālo vērtību jeb

amplitūdu un ap­zīmē ar attiecīgo lielo burtu ar indeksu «*m*»: *Um*, *Im* un *Em*.

|  |  |
| --- | --- |
|  | 6.3. att. Sinusoidālas maiņstrāvas  grafiskais attēls. |

5.1. attēlā parādīto maiņstrāvas ģeneratora modeli ar nekus­tīgiem poliem praksē izmanto reti, pie tam tikai mazām jaudām, jo tehniski nav izdevīgi no rotējošas sastāvdaļas noņemt lielas strāvas ar slīdošu kon­taktu — suku un kontaktgredzenu — starpniecību: sukas dzirksteļo, gredzenu virsma ap­deg, un tādēļ gredzeni un sukas ļoti sakarst utt.

Tādēļ vijumu, kurā inducē­jas EDS, ievieto ģeneratora ne­kustīgajā dala — statorā (6.4. att.), bet uz vārpstas novieto elektromagnētus jeb ierosmes polus, kuru tinumu baro ar līdz­strāvu. Reāla ģeneratora sta­torā, protams, ir daudzi vijumi, kas izvietoti rievās pa visu statora iekšējo cilindrisko virsmu.

|  |  |
| --- | --- |
|  | 6.4. att. Maiņstrāvas divpolu ģeneratora  vienkāršota shēma. |

**6.2. MAIŅSTRĀVAS FREKVENCĒ**

Minimālo laika sprīdi, pēc kurā mainīga lieluma (strāvas, sprieguma, EDS) momentānas vērtības atkārtojas tajā pašā secībā, sauc par maiņstrāvas periodu un apzīmē ar *T* (sk. 6.3. att.).

Perioda mērvienība ir sekunde.

Maiņstrāvas periodu skaitu vienā sekundē sauc par maiņstrā­vas frekvenci un apzīmē ar *f*:

 (6.4)

Frekvences mērvienība ir hercs (Hz). Lielākas frekvences vienības ir kilohercs (kHz) un

megahercs (MHz): l kHz = 103 Hz, l MHz = 106 Hz.

Frekvence ir 1 Hz, ja sekundē notiek viena pilna strāvas izmaiņa.

Latvijā un Eiropas valstīs rūpniecībā un apgaismē iz­manto maiņstrāvu ar standartfrekvenci *f =* 50 Hz, ko sauc par rūpniecisko frekvenci, bet, piemēram, ASV un Japānā — 60 Hz frekvenci.

Rūpnieciskās frekvences skaitliskā vērtība izvēlēta, ievērojot, ka

* pazeminot frekvenci, palielinās transformatoru un elektrisko mašīnu izmēri un izmaksa; elektriskā apgaismē ar frekvenci ap 40 Hz cilvēka acis sāk sajust gaismas izstarojuma svārstības;
* paaugstinot frekvenci, pieaug sprieguma zudums maiņstrā­vas pārvades līnijās un elektriskajās mašīnās, un pastiprinātās pašindukcijas un kapacitīvās parādības nevēlami ietekmē elek­trisko ietaišu darbību.

Bez rūpnieciskās frekvences (50 Hz) dažādās tautas saimnie­cības nozarēs izmanto maiņstrāvas ar visai plašiem frekvenču diapazoniem, kā tas redzams tabulā 6.1.

6.1. tabula

|  |  |
| --- | --- |
| **Nozare** | **Frekvence, Hz** |
| Elektrificētā satiksme (ārzemēs) | 16 un 25 |
| Elektriskie rokas darba rīki  Ātrgaitas asinhronie elektrodzinēji  Augstfrekvences telefonija  Indukcijas krāsnis  Dielektriķu karsēšana augstfrekvences elektriskajā laukā  Detaļu virsmas termiskā apstrāde  Radiotehnika, televīzija | 200  200—10 000  300—5000  500—105  106—107  103—105  105—1012 |

Sinusoidāla EDS ģeneratora modelī ar 2 poliem (6.4. att.), t. i., ar vienu polu pāri, ko apzīmē ar *p* (*p* = l), kontūra vie­nam apgriezienam atbilst inducētā EDS viens periods, bet ģene­ratorā ar 4 poliem (*p* = 2) — divi periodi, ar 6 poliem (*p* = 3) — trīs periodi utt.

|  |  |
| --- | --- |
| ***t* = 0**  6.5. att. Maiņstrāvas ģenerators ar diviem polu pāriem: 1 – stators; 2 - rotors | 6.6. Mainīga EDS grafiks ģeneratorā ar  diviem polu pāriem |

Tātad maiņstrāvas ģeneratora EDS frekvence proporcionāla ģeneratora polu pāru skaitam.

Ja ģeneratoram ir *p* polu pāri un rotējošā daļa izdara *n* ap­griezienus minūtē, tad EDS frekvence

, Hz. (6.5)

Izejot no tā, formula rotora griešanās ātruma noteikšanai ir šāda:

 (6.6)

Tā kā vienā periodā *T* elektrodzinējspēka *e* un strāvas *i* fāze izmainās par leņķi *ωt = ωT = =*2*π,* tad

 (6.7)

Lielumu *ω* sauc par maiņstrāvas leņķisko frekvenci.

***6.1. piemērs*.** Ģeneratoram, kuru darbina tvaiku turbīna, ir divi polu pāri (*p* = 2). Un tā enkurs griežas ar ātrumu 1500 apgr./min. Noteikt maiņstrāvas frekvenci.



***6.2. piemērs***. Kādam ir jābūt ģeneratora polu pāru skaitam, ja tvaika turbīna to griež ar nominālo ātrumu 250 apgr./min un ģeneratora frekvence f = 50 Hz.

Pēc formulas (5.5)

pāri.

**6.3. MAIŅSTRĀVAS UN MAIŅSPRIEGUMA VIDĒJĀS VĒRTĪBAS**

Viena perioda laikā sinusoidāla lieluma vidējā vērtība ir vie­nāda ar nulli, jo mainīgā lieluma līknes un abscisu ass ierobe­žotie laukumi abos pusperiodos ir vienādi un ar pretējām zīmēm.

Tāpēc ar sinusoidāla EDS, strāvas vai sprieguma vidējo vēr­tību saprot mainīgā lieluma vidējo vērtību pusperioda laikā starp divām nullvērtībām.

Sinusoidāla EDS vidējo vērtību *Evid* atrod, EDS līk­nes pozitīvās daļas un abscisu ass ierobežoto laukumu dalot ar pusperioda ilgumu *T*/2 (6.7. att.).

|  |  |
| --- | --- |
| 6.7. att. Sinusoidāla EDS vidējā vērtība. | 6.8. att. Sinusoidālas maiņstrāvas efektīvā vērtība |

Ja elektrodzinējspēks *e = Em*sin*ωt*, tad EDS vidējā vērtība



Līdzīgi

*Uvid* = 0,637*Um* un *Ivid* = 0,637*Im*. (6.8)

Sinusoidālo elektrisko lielumu vidējās vērtības izmanto samērā reti, piemēram, analizējot maiņstrāvas taisngriežu darbību u. tml.

**6.4. MAIŅSTRĀVAS UN MAIŅSPRIEGUMA EFEKTĪVĀS VĒRTĪBAS**

Tā kā maiņstrāvas momentānā vērtība *i* nedod iespēju kvan­titatīvi novērtēt maiņstrāvas darbību dažādās norisēs, tad maiņ­strāvu novērtē pēc tās enerģētiskās darbības, kas ekvivalenta kā­das nemainīgas, tā sauktās efektīvās strāvas darbībai. Kā kritēriju minētajai ekvivalencei

izmanto strāvas siltumdarbību.

Maiņstrāvas efektīvā vērtība ir vienāda ar tādu konstantu strāvu *I*, kura vienā periodā tajā pašā pretestībā izdala tādu pašu siltuma daudzumu, kādu izdala dotā maiņstrāva *i* (6.8. att.).

Sinusoidālo lielumu efektīvās vērtības apzīmē ar attiecīgajiem lielajiem burtiem bez indeksiem, t. i., ar *E, U* un *I*.

Nemainīgā (efektīvā) strāva *I* pretestībā *R* vienā periodā *T* izdala siltuma daudzumu *QI* = =*I*2*RT*.

Maiņstrāva *i = Im* sin *ωt* tajā pašā pretestībā *R* vienā periodā izdala siltuma daudzumu



Saskaņā ar definīciju šie siltuma daudzumi ir vienādi, t. i.,

 un 

Tad maiņstrāvas efektīvā vērtība

 (6.9)

Tā kā



tad



un maiņstrāvas efektīvā vērtība



Līdzīgi  (6.10)



Strāvas, sprieguma un EDS efektīvās vērtības uzrāda maiņ­strāvas ķēdē ieslēgti elektromagnētiskās, elektrodinamiskās, elektrostatiskās un siltuma sistēmas ampērmetri un voltmetri. Arī tehniskajā dokumentācijā vienmēr uzdod šo lielumu efektīvas vērtības.

Periodiski mainīgā lieluma efektīvās vērtības attiecību pret tā vidējo vērtību sauc par mainīgā lieluma līknes formas koeficientu un apzīmē ar *kf*.

 vai  vai  (6.11)

Periodiski mainīgā lieluma maksimālās vērtības (amplitūdas) attiecību pret tā efektīvo vērtību sauc par amplitūdas koe­ficientu un apzīmē ar *ka*:

 vai  vai  (6.12)

Sinusoīdas formas koeficients



un amplitūdas koeficients



Voltmetrus un ampērmetrus, kurus paredz darbam sinusoidālas strāvas ķēdēs, parasti graduē tā, lai tie rādītu tieši sprieguma un strāvas efektīvās vērtības.

***6.3. piemērs***. Tīklam pieslēgtais voltmetrs uzrāda spriegumu 380 V. Noteikt tīkla sprieguma amplitūdu.



**6.5. FĀZE. FĀZU NOBĪDE**

Pieņemsim, ka uz ģeneratora enkura ir divi vienādi vijumi, kas nobīdīti telpā viens pret otru (6.9. att.).

|  |  |
| --- | --- |
|  | 6.9. att. Vienkāršāka ģeneratora spoļu  novietojums brīdī *t* = 0. |

Enkuram griežoties, vijumos inducējas elektrodzinējspēki, kam ir vienāda frekvence un amplitūda, jo vijumi rotē ar vienādu ātrumu vienā un tai pašā magnētiskajā laukā. Tāpēc, ka vijumi ir nobīdīti telpā, EDS nesasniedz maksimālās vērtības vienā laikā.

Pieņemam, ka enkurs griežas pulksteņa rādītāja kustībai pretējā virzienā (6.9. att.) un sākuma momentā (*t* = 0) vijums 1 veido ar neitrālo plakni leņķi *α*1 = ψ1, bet vijums 2 ar to pašu plakni — leņķi *α*2 = ψ2. Pirmajā vijumā inducējas EDS

*e*1 = *Em* sin(*ωt* + ψ1),

bet otrajā vijuma

*e*2 = *Em* sin(*ωt* + ψ2).

Šo EDS grafiki redzami 6.10. attēlā.

Abās izteiksmes leņķi (*ωt* + ψ) sauc par fāzes leņķi jeb fāzi. Tādējādi no formulas izriet, ka EDS momentāno vērtību nosaka amplitūda *Em* un fāze.

Laika skaitīšanas sakuma momentā EDS pirmajā vijumā ir

*e*10 = *Em* sin(*ω∙*0 + ψ1) = *Em* sin ψ1

un EDS otrajā vijumā

|  |
| --- |
|  |

6.10. att. 6.9. attēlā ģeneratora spolēs inducēto elektrodzinējspēku grafiki.

*e*20 = *Em* sin(*ω∙*0 + ψ2) = *Em* sin ψ2;

elektriskos leņķus ψ1, ψ2, kas nosaka EDS vērtības sākuma momenta, sauc par sakuma fāzes leņķiem vai vienkārši par sakuma fāzēm. Pozitīvo sākuma fāzi atliek pa kreisi, bet negatīvo pa labi no koordinātu sistēmas nullpunkta.

Dalot sākuma fāzes leņķi ar leņķisko frekvenci, iegūstam laiku

 (6.13)

kas pagājis no perioda sākuma līdz tam momentam, kurš pieņemts par laika skaitīšanas sakumu (par perioda sākumu sauc to mo­mentu, kurā sinusoidāls lielums ir vienlīdzīgs nullei, bet pēc tam kļūst pozitīvs).

Tātad jebkuru sinusoidālu lielumu raksturo: 1) amplitūda; 2) frekvence vai periods; 3) sākuma fāze.

Divu vienādas frekvences sinusoidālu lielumu sakuma fāzu star­pību sauc par fāzes nobīdes leņķi:

ψ1 - ψ2 = ψ12.

Dalot fāzes nobīdes leņķi ar leņķisko frekvenci, iegūstam no­bīdes laiku:



Nobīdes laiks ir starpība starp laika momentiem, kuros divi sinusoidāli lielumi sasniedz nulles vērtības (vai amplitūdas vēr­tības).

Par lielumu, kurš agrāk nekā otrs sasniedz nulles vērtību (pēc tam kļūst pozitīvs) vai arī pozitīvo amplitūdu vērtību, saka, ka tas apsteidz fāzē otru lielumu, bet par lielumu, kas tās pašas vērtības sasniedz vēlāk, — ka tas nokavējas (vai at­paliek) fāzē. Apsteiguma vai nokavēšanās leņķi nepārsniedz 180°, jo pretējā gadījumā varētu, piemēram, sajaukt nokavēšanos par 40° ar apsteigšanu par 320° u. tml. Par elektrodzinējspēkiem, kas attēloti 6.10. attēlā, var teikt, ka EDS *e*1 apsteidz elektrodzinējspēku *e*2 par leņķi ψ12 (laiku *t*12) jeb, kas ir tas pats, EDS *e*2 at­paliek fāzē no EDS *e*1 par leņķi ψ12 (laiku *t*12).

Ja diviem sinusoidāliem lielumiem ir vienādas sākuma fāzes, tad tie sasniedz nulles vērtības vienā laikā; šai gadījumā saka, ka lielumi sakrīt fāzē.

***6.4. piemērs***. Dots *e*1 = *E*1*m* sin(*ωt* + 450); *e*2 = *E*2*m* sin(*ωt* + 150); *f* = 50 Hz.

Aprēķināt: 1) *e*1 un *e*2 fāzu nobīdes leņķi; 2) *t*1 un *t*2 kas atbilst *e*1 un *e*2 sākuma fāzēm; 3) laiku, kas atbilst *e*1 un *e*2 fāzu nobīdei.

Izsakām *e*1 un *e*2 sākuma fāzes radiānos:

Aprēķinām laiku, kas atbilst *e*1 un *e*2 sākuma fāzēm:





Aprēķinām *e*1 un *e*2 fāzu nobīdes leņķi:

ψ12 = ψ1 – ψ2 = 450 – 150 = 300;



Periods



**6.6. SINUSOIDALU LIELUMU GRAFISKAIS ATTĒLS**

Sinusoidālus lielumus var grafiski attēlot vai nu ar sinusoīdām, vai arī ar rotējošiem vektoriem.

Pirmajā gadījumā sinusoīdas ordinātes noteiktā mērogā attēlo lieluma momentānās vērtības, bet abscisas — laiku, kas pagājis no sākuma momenta. Šāds attēls ļauj atrast amplitūdu, sakuma fāzi un periodu (6.10. att.).

Otrā gadījumā sinusoidālu lielumu attēlo rotējošs vektors. Tā garums noteiktā mērogā attēlo sinusoīdas amplitūdu; leņķis, ko vektors veido ar abscisu ass pozitīvo virzienu, sākuma momenta ir vienlīdzīgs sākuma fāzei, bet vektora griešanas ātrums ir vien­līdzīgs leņķiskajai frekvencei. Sinusoidālā lieluma momentānās vērtības attēlo rotējošā vektora projekcijas uz ordinātu asi.

Ja, piemēram, dots *EDS*

*e = Em* sin(*ωt* +ψ) , (6.14)

tad to sākuma momentā (*t =* 0) var attēlot ar vektoru *OA* (5.11. att.), kas veido ar abscisu ass pozitīvo virzienu leņķi ψ1; vektora garums noteiktā mērogā ir vienlīdzīgs amplitūdai *Em*.Vektoram griežoties pozitīvajā virzienā (pretī pulksteņa rādītāja kustības virzienam) ar leņķisko ātrumu *ω*, tā projekcijas uz ordi­nātu asi attēlo *EDS e* momentānās vērtības attiecīgajos laika mo­mentos.

|  |
| --- |
|  |

6. 11. att. Sinusoidāla lieluma grafika konstruēšana.

Patiešām, no formulas (6.14) iegūstam *e*0 = *Em* sin*ψi*, ja *t* = 0 un vektora *OA* projekcija ir vienlīdzīga šim lielumam. Laika mo­mentā *t*1no (6.14) iegūstam *e = Em* sin (*ωt*1 *+ ψi*) un, projicējot vektoru, kas tagad atrodas jaunā stāvoklī (*OB*):

*Em* sin *α* = *Em* sin (*ωt*1 + *ψi*) = *e*

utt.

Izmantojot rotējošus vektorus, aploces un koordinātu asis nav vajadzīgas, jo vektoru diagrammā svarīgi tikai vektoru ga­rumi un leņķi starp vektoriem.

Tā kā maiņstrāvas ķēžu aprēķinos parasti jāiegūst strāvu vai spriegumu efektīvās vērtības, kas ir proporcionālas maksimā­lajām vērtībām, tad sinusoidālo lielumu (*e, u, i*) vektoru dia­grammās amplitūdu vietā atliek to efektīvās vērtības. Pie tam, zīmējot vektoru diagrammu, viena vektora virzienu izvēlas patva­ļīgi (parasti horizontālā virzienā, pa labi), bet pārējos vektorus orientē pret pirmo atbilstoši to fāzu leņķiem.

Vairāku vektoru kopību, kuri attēlo sinusoidālus lielumus ar vienu un to pašu frekvenci *laika sākuma momentā,* sauc par *vek­toru diagrammu*.

Piemēram, elektrodzinējspēkus

*e*1 = *E*1*m* sin (*ωt* + ψ1) un *e2 = Em* sin (*ωt* + ψ2)

var attēlot vektoru diagrammā ar diviem vektoriem *E*1*m* un *E* 2*m*  (6.12. att*.).*

6.13. attēlā parādīta vektoru diagrammā strāvām, kuras ana­lītiski izteiktas ar vienādojumiem:

*i*1 = 10 sin *ωt*,

*i*2 = 10 sin (*ωt* — 120°),

*i*3 = 10 sin (*ωt* — 240°).

Vektoru diagrammā ar vektoriem attēlo tikai vienas noteiktas frekvences lielumus; tātad vektori griežas ar vienu un to pašu leņķisko ātrumu un to savstarpējais stāvoklis nemainās. Salīdzinot sinusoidālus lielumus, *laika skaitīšanas sākuma momentu var iz­vēlēties patvaļīgi, t. i., viena vektora virziens var būt patvaļīgi iz­vēlēts;* leņķiem, ko ar to veido pārējie vektoru, jābūt vienlīdzīgiem attiecīgajiem fāzu nobīdes leņķiem, pie tam pozitīvos leņķus at­liek virzienā, kas pretējs pulksteņa rādītāja kustības virzienam. Acīm redzot vektoru novietojums (tātad arī sinusoīdu stāvoklis) vienam attiecībā pret otru nav atkarīgs no tā, kādu laika momentu pieņem par sākumu.

|  |  |
| --- | --- |
| 6.12. att. EDS vektoru diagramma. | 6.13. att. Strāvu vektoru diagramma. |

Sinusoidālu lielumu attēlošanai ar vektoriem ir tā priekšrocība, ka vairāku lielumu summu vai starpību var atrast grafiski, ātri un vienkārši, kamēr, attēlojot lielumus ar sinusoīdām, šīs

operācijas ir sarežģītas un ilgstošas.

***6.5. piemērs***. Uzzīmēt vektoru diagrammu elektrodzinējspēkiem 6.4. pie­mērā, pieņemot vispirms par laika sākuma momentu to brīdi, kad *e*2 (0) = *E*2*m* sin 15°, un pēc tam brīdi, kad EDS *e*2 (0) = 0.

Pirmajā gadījumā *e*2 = *Е*2*m* sin (*ωt* +15°), bet *e*1 = *E*1*m* sin (*ωt* + 45°) un apsteidz fāzē elektrodzinēj speķu *e*2 par 30° (6.14. att. *a*). Otrā gadījuma EDS *e*, jāraksta šādi: *e*2 = *Е*2*m* sin *ωt*, un pirmais EDS *e*1 = *E*1*m* sin (*ωt* + 30°) tāpat kā iepriekš apsteidz fāzē elektrodzinējspēku *e*2 par 30° (6.14. att. *b*).

|  |
| --- |
|  |

6.14. att. 6.5. piemērā aplūkoto EDS vektoru diagramma.

**6.7. SINUSOIDĀLU LIELUMU SASKAITĪŠANA**

Praksē bieži jāsaskaita sinusoidālas strāvas, spriegumi un EDS. Pieņemam, ka jāsaskaita divi EDS:

*e*1 = *E*1*m* sin (*ωt* + ψ1) un *e2 = E*2*m* sin (*ωt* + ψ2).

Summārā EDS momentānā vērtība ir vienlīdzīga saskaitāmo lielumu momentāno vērtību summai, t. i.,

*e* = *e*1 + *e2 = E*1*m* sin (*ωt* + ψ1) + *E*2*m* sin (*ωt* + ψ2).

Divus sinusoidālus lielumus var saskaitīt grafiski, summējot divas sinusoīdas, kas attēlo šos lielumus. Lai iegūtu summāras līknes ordinātes, jāsaskaita katram laika momentam atbilstošās summējamo līkņu ordinātes. To attēlo 6.15. attēls. Iegūtā sum­mārā līkne ir sinusoīda, kurai ir tas pats periods. No zīmējuma var atrast summārā EDS amplitūdu un sākuma fāzi, t.i., var uzrakstīt:

*e* = *e*1 + *e*2 *= Em* sin (*ωt* + ψ) (6.15)

Pierādām, ka vektors, kas attēlo šo sinusoīdu, ir vienlīdzīgs to vektoru ģeometriskajai summai, kuri attēlo saskaitāmās sinusoīdas. Lai saskaitītu divus dotos EDS *e*1 un *e2*, ko attēlo vektori OA un OB (6.16. att.), jāpārnes vektors OB paralēli pats sev tā, lai tā sākums sakristu ar vektora OA beigu punktu (vai arī vektors OA paralēli pats sev jāpārzīmē tā, lai tā sākums sakristu ar vektora OB beigu punktu); tad noslēdzošais vektors ОС attēlo sum­māro EDS.

|  |  |
| --- | --- |
| 6.15. att. Divu sinusoīdu saskaitīšana. | 6.16. att. Divu vektoru saskaitīšana. |

Šī apgalvojuma pareizība izriet no tā, ka laika momentā *t =* 0 vektora OA projekcija uz ordinātu ass ir momentānā vērtība *e*10, vektora OB projekcija vai tam vienlīdzīgā vektora AC projekcija uz to pašu asi — momentānā vērtība *e*20, bet šo projek­ciju summa (*e*10 + *e*20) ir vienlīdzīga summārā vektora ОС pro­jekcijai *e*0 uz ordinātu ass. Vektoriem rotējot, to savstarpējais stāvokļus nemainās un visu laiku ir spēkā sakarība *e* = *e*1 + *e*2.

No vektoru trīsstūra saskaņā ar pazīstamo kosinusu teorēmu iegūstam summārā EDS amplitūdu

 (6.16)

un summārā EDS (5.15) sākuma fāzes leņķa tangensu



bet

*Em* sin ψ = *e*0; *e*10 *= E*1*m* sin ψ1; *e*20 *= E*2*m* sin ψ2;

un, tā kā

*e*0 = *e*10 + *e*20 ,

tad

*Em* sin ψ = *E*1*m* sin ψ1 + *E*2*m* sin ψ2.

Analoģiski, projicējot vektorus uz abscisu asi, iegūstam

*Em* cos ψ = *E*1*m* cos ψ1 + *E*2*m* cos ψ2.

Tātad

 (6.17)

Tātad, saskaitot vienādas, frekvences sinusoidālus lielumus, iegūstam tās pašas frekvences sinusoidālu lielumu, kura amplitūda ir vienlīdzīga saskaitāmo sinusoīdu amplitūdu ģeometriskajai summai.

Bieži sastopams gadījums, kad jāsummē divi sinusoidāli lielumi, kas viens pret otru nobīdīti fāzē par ; šajā gadījumā

*e* = *E*1*m* sin *ωt*; *e*2 *= E*2*m* sin (*ωt* ).

*e* = *e*1 + *e2 = Em* sin (*ωt* ± ψ)

(sk. 6.17. att., kur izvelēts leņķis );

 (6.18)

|  |  |
| --- | --- |
| 6.17. att. EDS vektoru sum­mēšana, ja tie nobīdīti fāzē par leņķi π/2 | 6.18. att. Fāze sakrītošu EDS vek­toru  saskaitīšana. |

 (6.19)

Speciālā gadījumā, kad saskaitāmo sinusoidālo lielumu sākuma fāzes ir vienādas (6.18.

att.),

*e*1 = *E*1*m* sin (*ωt* + ψ); *e*2 *= E*2*m* sin (*ωt* + ψ);

*e* = *e*1 + *e*2 *=* (*E*1*m* + *E*2*m*)sin (*ωt* + ψ) = *Em* sin (*ωt* + ψ). (6.20)

t. i., šajā gadījumā rezultējošā EDS amplitūda ir vienlīdzīga sa­skaitāmo EDS amplitūdu summai, bet rezultējošā EDS sakuma fāze ir vienlīdzīga saskaitāmo EDS sakuma fāzei.

|  |  |
| --- | --- |
| 6.19. att. Triju vek­toru saskaitīšana. | 6.20. att. Vektoru atskaitīšana. |

Ja vektoru ir vairāk, tad tos saskaita analogi, t. i., vektorus pārnes paralēli pašus sev tā, lai otra vektora sakums sakristu ar pirmā vektora beigu punktu utt. Noslēdzošais vektors ir sum­mārā lieluma vektors. 6.19. attēlā parādīta triju EDS vektoru saskaitīšana.

Ja no viena sinusoidāla lieluma jāatskaita otrs, tad atskaitīša­nas vietā var pieskaitīt pirmajam lielumam otru ar pretēju zīmi, t. i,

*e*1 ‒ *e*2 = *e*1 + (‒ *e*2 ).

Jāatceras, ka sinusoidāla lieluma zīmes maiņa atbilst sākuma fāzes leņķa maiņai par 180°; patiešām, var rakstīt:

*‒ E*2*m* sin (*ωt* + ψ2) = *E*2*m* sin (*ωt* + ψ2 ± π).

Ja sinusoidāli lielumi attēloti ar vektoriem, tad zīmes maiņa ir ekvivalenta vektora pagriešanai par ± 180°.

Tātad atskaitot vienu sinusoidālu lielumu no otra, var pie ma­zināmā lieluma vektora pieskaitīt atskaitāmā lieluma vektoru ar pretējo zīmi (6.20. att.).

Maiņstrāvas ķēdē strāvai (spriegumam, EDS) vienā pusperiodā ir viens virziens, bet otrā pusperiodā — pretējs virziens. Vienu no abiem virzieniem patvaļīgi pieņem par strāvas po­zitīvo virzienu, un ķēdes shēmā to parāda ar bultiņu (6.21. att.).

|  |  |
| --- | --- |
|  | 6.21. att. Maiņstrāvas ķē­des mezgls. |

Reize ar to ķēdes shēmā parāda arī sprieguma (EDS) pozitīvo virzienu: tā kā ārējā ķēdē strāvu uztur ķēdei pie­vienotais spriegums, tad sprieguma pozitīvais virziens kā ārējai ķēdei, tā arī ķēdes atsevišķiem elementiem sakrīt ar strāvas po­zitīvo virzienu.

Maiņstrāvas ķēžu shēmās EDS, spriegumu un strāvu pozitīvos virzienus parāda šo lielumu momentānajām vai efektīvajām vēr­tībām.

***6.6. piemērs***. Maiņstrāvu momentānās vērtības dotas ar izteiksmēm: *i*1 = 28,2sin(314*t* + 900), *i*2 = 10sin314*t* un *i*3 = 14,1 sin(314*t* - 450). Aprēķināt maiņstrāvu parametrus, konstruēt vektoru diagrammu un saskaitīt un atņemt vektorus.

Atrisinājums.

1. Strāvu maksimālās vērtības

*Im*1 = 28,2 A, *Im*2 = 10A, *Im*3 = 14,1 A.

2. Strāvu efektīvās vērtības



3. Strāvu frekvence



4. Strāvu periods



5. Strāvu sākuma fāžu leņķi

*ψi*1 = 900, *ψi*2 = 00, *ψi*3 = - 450.

6. Konstruē vektoru diagrammu, pieņemot, ka strāvas mērogs MI = 5 A/cm.

Aprēķina strāvu vektoru garums  

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| ***a*** | ***b*** | ***c*** |

6.22. att. 6.6. piemēra vektoru diagramma (*a*), vektoru summa (*b*) un

vektoru atņemšana (*c*)

*Vektoru saskaitīšana*. Vektorus pārnes paralēli pašus sev tā, lai otra vektora sakums sakristu ar pirmā vektora beigu punktu utt. Noslēdzošais vektors ir sum­mārā lieluma vektors, tā garums  efektīva vērtība *I* = = 4,25∙5 = 21,25 A un sākuma fāze *ψi* = 37,60 (6.22. att. *b*).

*Vektoru atņemšana*. Ja no viena sinusoidāla lieluma jāatskaita otrs, tad atskaitīša­nas vietā var pieskaitīt pirmajam lielumam otru ar pretēju zīmi. Sinusoidāla lieluma zīmes maiņa atbilst sākuma fāzes leņķa maiņai par 180°. Ja sinusoidāli lielumi attēloti ar vektoriem, tad zīmes maiņa ir ekvivalenta vektora pagriešanai par ± 180°. Tātad atskaitot vienu sinusoidālu lielumu no otra, var pie ma­zināmā lieluma vektora pieskaitīt atskaitāmā lieluma vektoru ar pretējo zīmi (6.22. att. *c*). Noslēdzoša vektora garums  efektīva vērtība *I* = = 2,65∙5 = 6,6 A un sākuma fāze *ψi* = 102,80.

***6.7. piemērs***. Divi maiņstrāvas EDS avoti savienoti virknē, ERS ir attiecīgi vienlīdzīgi: *e*1 = 100 sin*ωt*, V; *e*2 = 100 sin(*ωt* +600), V. Aprēķināt summāro EDS un uzkonstruēt vektoru diagrammu.

Atrisinājums.

1. Summārā EDS amplitūda



2. Sākuma fāze





3. Summārais EDS

*e = e*1 + *e*2 = 173,2 sin(*ωt* + 300), V

4. Konstruē vektoru diagrammu, pieņemot, ka strāvas mērogs *ME* = 20 V/cm.

Aprēķina EDS vektoru garumi 

|  |  |
| --- | --- |
|  | 6.23. att. Vektoru diagramma 5.7. piemēram. |

No vektoru diagrammas var atrast, ka summāra vektora garums ir  efektīva vērtība *E* = = 8,66∙20 = 173,2 A un sākuma fāze *ψ* = 300. Tātad aprēķins izdarīts pareizi.

**6.8. MAIŅSTRĀVAS ĶĒŽU ĪPATNĪBAS**

Parādību norise maiņstrāvas ķēdēs ir ievērojami komplicētāka nekā līdzstrāvas ķēdēs, kurās, ja spriegums *U* = const, strāva, jauda, elektriskā un magnētiska lauka enerģija nemainās.

Maiņstrāvas ķēdē periodiski mainīgā strāva *i* rada periodiski mainīgu magnētisko un elektrisko lauku. Mainīgais magnētiskais lauks ķēdē inducē periodiski mainīgu pašindukcijas EDS

 (6.21)

kur *L* — ķēdes induktivitāte.

Tātad maiņstrāvas ķēdei pievienotais maiņspriegums izraisa perio­diski mainīgu magnētisko lauku, kurā uzkrātā enerģija ir propor­cionāla ķēdes induktivitātei *L*.

Maiņstrāvas ķēdei pievienotais maiņspriegums izraisa perio­diski mainīgu elektrisko lauku, kurā uzkrātā enerģija ir propor­cionāla ķēdes kapacitātei *C*.

Arī ķēdes jauda, kas pārveidojas siltuma ķēdes aktīvajā pre­testībā *R*, nepārtraukti mainās.

Tādejādi maiņstrāvas ķēdes darbību vispārīgā gadījumā ne­pārtraukti ietekme trīs parametri: ķēdes aktīvā pretestība *R*, ķē­des induktivitāte *L* un ķēdes kapacitāte *C*.

Tomēr ir arī tādas maiņstrāvas ķēdes, kuru darba režīmu nosaka tikai viens no minētajiem parametriem — *R*, *L* vai *C*, — jo pārējo divu parametru ietekme ir neievērojami maza, kā arī tādas ķēdes, kuru režīmu nosaka tikai divi parametri, piemēram, *R* un *L* vai *R* un *C*. Tā, piemēram, ķēdi ar kvēlspuldzi kvalificē ka maiņstrāvas ķēdi ar aktīvo pretestību *R*, ķēdi, kurā ir tikai spole ar noslēgtu tērauda serdi, — bieži vien kā ķēdi ar induk­tivitāti *L*, bet ķēdi ar kondensatoru — kā ķēdi ar kapacitāti *C*.

**6.9. MAIŅSTRĀVAS ĶĒDE AR AKTĪVO PRETESTĪBU**

Visvienkāršākā maiņstrāvas ķēde sastāv no sinusoidāla EDS avota, kas nodrošina arējai ķēdei sinusoidālu spriegumu *u = Um* sin*ωt*, un avotam pieslēgtas aktīvās pretestības *R* (6.24. att. *a*).

Aktīvās pretestības ir kvēlspuldzes, elektriskās pretestības krāsnis, dažādas sildierīces,

reostati u. c. patērētāji, kuriem induk­tivitātes *L* un kapacitātes *C* ietekme ir tik niecīga, ka to var pil­nīgi neievērot.

|  |
| --- |
|  |

6.24. att. Maiņstrāvas ķēde ar aktīvo pretestību R: a – pretestības grafiskais apzīmējums shēmā;

b – elektriskās ķēdes principiālā shēma, c – vektoru diagramma; d – strāvas un spriegumu momentānas vērtības; e – jaudas momentānas vērtības.

Ķēdes strāvu *i* atrod no Oma likuma izteiksmes dotās ķēdes posmam ar aktīvo pretestību *R* (savienojošo vadu pretestību ne­ievēro) :



Tā kā sinusoidāla lieluma izteiksmē reizinātājs pirms sinusa zīmes ir mainīga lieluma maksimālā vērtība, t. i.,

 (6.22)

tad ķēdes strāvas momentānā vērtība *i = Im* sin *ωt*.

Sprieguma *u* un strāvas *i* izteiksmēs ir viens un tas pats fā­zes leņķis *ωt*. Tādēļ secinām, ka ķēdē ar aktīvo pretestību sinusoidāls spriegums uztur sinusoidālu strāvu, kas sakrīt fāzē ar spriegumu, t. i., fāzu nobīdes leņķis starp strāvu un spriegumu *φ* = *ωt* - *ωt* = 0. Ķēdes strāvu, kas sakrīt fāzē ar spriegumu, sauc par aktīvo strāvu.

Izteiksmes (6.22) abas puses izdalot ar dabū Oma likuma izteiksmi efektīvajām vērtībām ķēdei ar aktīvo pretestību *R*:

 (6.23)

kur *U* — pretestībai *R* pievadītais spriegums.

Redzam, ka Oma likuma izteiksme maiņstrāvas ķēdei ar aktīvo pretestību ir tāda pati kā līdzstrāvas ķēdes posmam.

Līdzstrāvas ķēdē, ja spriegums un strāva nemainās, jauda ir konstanta: *P = UI* = const. Tas nozīmē, ka patērētājs enerģiju sa­ņem nepārtraukti un vienmērīgi.

Turpretim maiņstrāvas ķēdē, kaut tajā ir tikai aktīvā pretes­tība *R*, jauda ir mainīgs lielums, t. i., patērētāja saņemtās jaudas skaitliska vērtība periodiski mainās.

Maiņstrāvas ķēdē ar aktīvo pretestību *R* strāva sakrīt fāze ar spriegumu (6.24. att.):

*p = ui = UmIm*sin2*ωt* = 2*UI*sin2*ωt*.

Šīs ķēdes momentānā jauda mainās pēc «sin2» likuma, un tās maksimālā vērtība ir 2*UI*,

*u = Um* sin*ωt* un *i = Im* sin*ωt*.

Grafiski momentānās jaudas *p* līkni (6.24. att.) iegūst, atlie­kot mērogā patvaļīgi izvēlētiem laika momentiem atbilstošo *u* un *i* vērtību reizinājumus. Laika momentos, kad *u* un *i* zīmes ir vienādas, momentānā jauda *p* ir pozitīva, bet, kad *u* un *i* zīmes ir pretējas, tā ir negatīva.

Redzam, ka momentānā jauda ķēdē ar *R* visā periodā *T* ir pozitīva. Tas nozīmē, ka neatkarīgi no ķēdes strāvas virziena ener­ģija ķēdē plūst tikai vienā virzienā, t. i., no avota uz aktīvo

pre­testību, kurā tā neatgriezeniski pārveidojas siltumā.

Izmantojot trigonometrisko sakarību , var iegūt momentānās jaudas *p* izteiksmi

*p = UI – UI*cos2*ωt*. (6.24)

Jaudas vidējo vērtību, ko apzīmē ar *P*, vienam periodam at­rod, aktīvajai pretestībai *R* vienā periodā atdoto enerģiju, ko at­tēlo momentānās jaudas līknes un abscisu ass ierobežotais svīt­rotais laukums , dalot ar perioda ilgumu *T*:



Tā kā pēdējās izteiksmes otrā locekļa vidējā vērtība vienā periodā ir nulle, tad aktīvās pretestības *R* patērēta vidēja jauda, ko parasti sauc par aktīvo jaudu un mēra vatos, ir

 (6.25)

Aktīvo jaudu *P* mēra ar vatmetru.

***6.8. piemērs.*** Tīklam ar spriegumu *U* = 220 V un frekvenci *f* = 50 Hz pieslēgts patērētājas, kura aktīva pretestība *R* = 44 Ω (6.25. att.).

Aprēķināt patērētāja strāvas amplitūdu un efektīvo vērtību.

Aprēķināt momentānas jaudas amplitūdu, vidējo un maksimālo vērtību.

Uzrakstīt strāvas un sprieguma momentāno vērtību izteiksmes, pieņemot par sprieguma sākuma fāzi Ψ*U* = 300. Uzzīmēt vektoru diagrammu.

Atrisinājums.

1. Strāvas amplitūda un efektīvā vērtība

|  |  |
| --- | --- |
| 6.25. att. Shēma 5.8. piemēram | 6.26. att. Vektoru diagramma |

2. Sprieguma amplitūda



3. Sprieguma un strāvas momentānās vērtības





4. Aktīvās jaudas vidēja vērtība



5. Momentānās jaudas maksimālā vērtība

*Pm = 2·P* = 2200 W = 2,2 kW

vai



6. Vektoru diagramma (6.26. att.)

Mērogs *MU* = 10 V/cm, *MI* = 1 A/cm.

Vektoru garums 

**6.10. VIRSMAS EFEKTS**

Vada pretestību līdzstrāvai aprēķina pēc pazīstamās formulas



Šo pretestību var aprēķināt arī citādi, proti, zinot līdzstrāvas vērtību *I*0 un jaudu *P*0:



Izrādās, ka maiņstrāvas ķēdē tā paša vada pretestība *R* ir lielāka par pretestību līdzstrāvas ķēdē:

*R* > *R*0.

Šo pretestību *R* atšķirībā no pretestības *R*0 sauc par aktīvo pretestību, bet pretestību *R*0 sauc par omisko pretestību.

Vada pretestības palielināšanās izskaidrojuma ar to, ka maiņstrāvas gadījumā strāvas blīvums pa vada šķērsgriezumu ir nevienāds. Sprieguma un strāvas sinusoīdas un vektoru diagramma maiņ­strāvas ķēdei ar aktīvo pretestību parādītas 6.27. attēlā *b* un *c*.

Maiņstrāvas plūšana vadītājā saistīta ar virsmas efektu, kas izpaužas strāvas izbīdē uz vadītāja virsmas pusi.

Virsmas efekta cēlonis ir pašindukcijas EDS, kam vadītāja šķērsgriezuma dažādās vietās

ir dažādas vērtības, jo strāvas magnētiskais lauks ir ne tikai ap vadītāju, bet arī pašā vadītājā.

Ja masīvu cilindrisku vadītāju, pa kuru plūst strāva *I*, nosa­cīti sadalām, piemēram, trijos koncentriskos cilindros 2 un 3 (6.27. att. *a*), tad iekšējo cilindru 1 aptver ne tikai vadītāju ap­tveroša magnētiska plūsma Ф, bet arī cilindros 2 un 3 izvietotās plūsmas Ф2 un Ф3 (t. i., plūsma Ф + Ф2 + Ф3). Cilindru 2 aptver plūsma Ф + Ф3, bet cilindru 3 — tikai plūsma Ф.

|  |  |
| --- | --- |
|  | *c* |

6.27. att. Paskaidrojums virsmas efektam: *a* - magnētiskais lauks cilindriska vada iekšienē;

*b* – strāvas blīvuma sadalījums vadā; *c* – grafiks virsmas efekta koeficienta aprēķināšanai

Sakarā ar to apskatāmajos ci­lindros inducējas dažāda lieluma pašindukcijas EDS: vislielākais — vadītāja centrālajā daļā, visma­zākais — ārējā daļā. Tādēļ maiņ­strāva atšķirībā no līdzstrāvas sadalās nevienmērīgi pa visu vadītāja šķērsgriezuma laukumu: vismazākais strāvas blīvums ir vadītāja ass rajonā, bet vislielā­kais — vada virsmā, citiem vār­diem — strāvas blīvums *δ* ne­pārtraukti pieaug virzienā no va­dītāja ass uz tā virsmu (6.27. att. *b*).

Bet nepilnīgi izmantotais va­dītāja šķērsgriezuma laukums (salīdzinājumā ar līdzstrāvu) ir līdzvērtīgs šķērsgriezuma lau­kuma samazinājumam un pretestības pieaugumam.

Virsmas efekts cilindriskā vadītājā ir jo izteiktāks, jo lielāks vadītāja diametrs, jo lielāka maiņstrāvas frekvence un jo lielāka vadītāja materiāla magnētiskā caurlaidība.

Aktīvās pretestības attiecība pret pretestību līdzstrāvai

 (6.26)

vara un alumīnija vadiem ar dažus desmitus mm2 lielu šķērsgrie­zuma laukumu 50 Hz frekvencei praktiski ir 1; tas nozīmē, ka šādos gadījumos virsmas efektu var neievērot. Krasi izteikts vir­smas efekts ir tērauda vadstieņiem, kuriem 50 Hz frekvencei *ξ* = 1,5—2,5.

Koeficientu ξ var noteikt, izmantojot 6.27. att. *c* grafiku, kur parādīta ξ atkarība no lielumu *d* un reizinājuma. Aprēķinot šo reizinājumu, *d* jāizsaka centimetros, *γ* — 1/Ω∙cm, *μ*0 – H/cm un *f* — hercos.

***6.9. piemērs***. Atrast virsmas efekta koeficientu vara vadam, kura diametrs ir d = 11,3 mm (S = 100 mm2), ja frekvence *f* = 150 Hz:



Izmantojot 5.27. att. *c* grafiku, atrodam 

Augstfrekvences strāva praktiski plūst tikai vada plāna vir­smas slānī, tādēļ augstfrekvences ķēdēm ekonomiski izdevīgi lie­tot cauruļveida vadītājus.

Virsmas efektu izmanto tērauda detaļu virsmas rūdīšanai augstfrekvences magnētiskajā laukā.

Strāvas blīvums vados ir nevienāds arī blakus esošo vadu ietekmes dēļ. Šo parā­dību sauc par tuvuma efektu.

Aplūkojot magnētisko lau­ku vienvirziena strāvām, ku­ras plūst pa diviem paralē­liem vadiem, un spriežot analoģiski, var parādīt, ka ar vismazāko magnētisko plūs­mu ir saķēdēti tie elementārvadi, kas atrodas vistālāk viens no otra, t. i., abu vadu ārējās malās, un tātad strā­vas blīvums tajos ir maksi­mālais.

Ja paralēlos vados strāva plūst pretējos virzienos, tad strāvas blīvums ir maksimālais tajos elementarvados, kuri atrodas vistuvāk viens otram, t. i., vadu iekšējās malās.

**6.11. MAIŅSTRĀVAS ĶĒDE AR INDUKTIVITĀTI**

Ja spoli ar induktivitāti *L* ieslēdz maiņstrāvas ķēdē (6.28. att. *a*), tad spolē nepārtraukti inducējas pašindukcijas EDS, jo, spoles strāvai periodiski mainoties, nepārtraukti mainās arī spoles plūsmas saķēdējums Ψ.

|  |
| --- |
|  |

6.28. att. Maiņstrāvas ķēde ar induktivitāti L: a – spoles konstruktīvā shēma; b - induktivitātes grafiskais apzīmējums shēmā; c – elektriskās ķēdes principiālā shēma, d – vektoru diagramma; e – strāvas un spriegumu momentānas vērtības; f – jaudas momentānas vērtības.

Pieņemam, ka spoles aktīvā pretestība ir tik maza, ka to var neievērot, t. i., ka *R* = 0. Tādu

spoli var saukt par ideālu, jo katrai reālai spolei ir lielāka vai mazāka aktīvā pretestība.

Ja spole ar induktivitāti *L* plūst sinusoidāla strāva *i = Im* sin *ωt*, tad spolē inducējas pašindukcijas EDS



Tā kā pašindukcijas EDS maksimālā vērtība *ELm = ωLIm*, tad

 (6.27)

t. i., pašindukcijas EDS mainās pēc sinusa likuma un atpaliek fāzē no strāvas par 90°.

Apskatāmajam kontūrām var uzrakstīt otrā Kirhofa likuma izteiksmi momentānajām vērtībām:

*uL + eL = iR*.

Te spriegumu *uL* uzskata par tāda avota EDS, kuram iekšējā pretestība ir nulle (avota spriegums tad vienāds ar avota EDS).

Tā kā *R* = 0, tad *uL + eL* = 0 vai *uL = —eL*, t. i., pašindukcijas EDS katrā mirklī ir skaitliski vienāds ar induktivitātei *L* pie­vienoto spriegumu, bet vērsts tam pretējā virzienā. Tad

 (6.28)

kur

*ULm = ωLIm* (6.29)

ir pievienotā sprieguma maksimālā vērtība.

Redzam, ka sinusoidāls spriegums ķēdē ar induktivitāti uztur sinusoidālu strāvu, kas atpaliek fāzē no sprieguma par 90° (6.28. att. d).

Induktivitāte rada starp strāvu un spriegumu pozitīvu fāzu nobīdes leņķi:



Strāvas un sprieguma vektoru diagramma parādīta 6.27. at­tēlā *e*.

Izteiksmes (6.29) abas puses izdalot ar, dabū, ka sprie­guma efektīvā vērtība *UL* = *ωLI*, bet ķēdes strāva



Tā ka lielumam *ωL* ir pretestības dimensija:



tad tas izsaka induktivitātes radīto pretestību maiņstrāvai, ko sauc par induktivitātes reaktīvo

pretestību jeb induktīvo pretestību un apzīmē ar *XL*:

*XL = ωL = 2πfL*, (6.30)

kur *L* — induktivitāte, H.

Induktīvā pretestība *XL* ir proporcionāla maiņstrāvas frekven­cei *f* un induktivitātei *L*.

Tādējādi Oma likuma izteiksme maiņstrāvas ķēdei ar induk­tivitāti ir šāda:

 (6.31)

Induktīvās pretestības cēlonis maiņstrāvas ķēdē ir spoles pašindukcijas EDS, kas saskaņā

ar Lenca likumu pretojas jeb­kurai strāvas izmaiņai, tātad ierobežo, samazina strāvas maksi­mālo un efektīvo vērtību, salīdzinot ar līdzstrāvu, kādu tajā pašā spolē uzturētu tas pats spriegums *UL*.

Maiņstrāvas ķēdē ar induktivitāti *L* (ar ideālu spoli) spriegums apsteidz strāvu par leņķi 

*I = Im*sin *ωt* un 

un momentānā jauda



Redzam, ka maiņstrāvas ķēdē ar induktivitāti momentānā jauda mainās pēc sinusa likuma

ar divkāršu maiņstrāvas frek­venci (2*ω*), un momentānās jaudas maksimāla vērtība ir *ULI* (6.28. att. *f*).

Perioda pirmajā ceturksnī, kad ķēdes strāva *i* pieaug no nul­les līdz maksimālajai vērtībai *Im*, jauda *p* ir pozitīva, t. i., induk­tivitāte no avota saņem enerģiju un uzkrāj to magnētiskajā laukā:



Perioda otrajā ceturksnī, kad ķēdes strāva samazinās no mak­simālās vērtības *Im* līdz nullei, jauda *p* ir negatīva, t. i., magnē­tiskajā laukā uzkrātā enerģija , laukam sabrūkot, tiek atdota atpakaļ avotam. Nākošajos divos perioda ceturkšņos norises ir līdzīgas.

Ķēdes vidējā jauda vienā periodā ir vienāda ar nulli:



To var secināt ari no 6.28. attēla *f*: perioda 1. un 3. ceturksnī jauda ir pozitīva, bet 2. un 4. — negatīva, un svītrotie laukumi ir vienādi.

Tādējādi ķēdē ar induktivitāti (ar ideālu spoli) notiek tikai periodiska enerģijas apmaiņa starp avotu un spoles magnētisko lauku, pie tam te nav neatgriezenisku procesu, t. i., elektriskā enerģija nepārveidojas citā enerģijas formā. Tātad induktivitāte nepatērē enerģiju. Enerģijas lielumu, kura apmainās starp avotu un induktivitāti, raksturo induktivitātes momentānās jaudas mak­simālā vērtība *ULI*, ko sauc par reaktīvo induktīvo jaudu un apzīmē ar *QL*:

*QL = ULI = I2XL*. (6.32)

Reaktīvo jaudu mēra reaktīvajos voltampēros (VAr) vai reaktīvajos kilovoltampēros (kVAr). Induktivitātei pievadītā reaktīvā jauda *QL* rada tikai magnētisko lauku.

***6.10. piemērs.*** Tīklam ar spriegumu *U* = 220 V un frekvenci *f* = 50 Hz pieslēgta spole ar induktivitāti *L* = 70 mH un ļoti mazu aktīvo pretestību (*R* ≈ 0).

Nosacīt 6.29. attēlā ieslēgto mērīšanas aparātu rādījumus un reaktīvas jaudas amplitūdu. Uzrakstīt strāvas, sprieguma un pašindukcijas EDS momentāno vērtību izteiksmes. Konstruēt tam grafikas un vektoru diagrammas, pieņemot, ka sprieguma sākuma fāze 600.

Atrisinājums.

1. Spoles induktīvā pretestība



|  |  |
| --- | --- |
| 6.29. att. Shēma 5.10. piemēram | 6.30. att. Vektoru diagramma 5.10. piemēram |

2. Strāvas efektīvā vērtība



3. Strāvas un reaktīvas jaudas amplitūdas





Sprieguma efektīvā vērtība *UL = U* = 220 V, tā amplitūda



4. Sprieguma un strāvas momentānās vērtības





Pašindukcijas EDS



5. Vektoru diagramma (5.30. att.)

Mērogs *MU* = 100 V/cm; *MEDS* = 100 V/cm; *MI* = 2 A/m.

Vektoru garums 

Pašindukcijas EDS vektors atpaliek fāzē no strāvas vektora leņķī π/2, bet induktīva sprie-

guma vektors apsteidz strāvas vektoru leņķī π/2.

**6.12. MAIŅSTRĀVAS ĶĒDE AR KAPACITĀTI**

Ja kondensatoru ieslēdz līdzstrāvas ķēdē, tad kondensators uz­lādējas. Šī norise saistīta ar īslaicīgu uzlādēs strāvu, kas strauji samazinās līdz nullei pēc logaritmiskas likumsakarības. Stacionāra strāva līdzstrāvas ķēdē ar kondensatoru nav iespējama, jo kon­densatora dielektriķis ķēdi pārtrauc.

Ieslēdzot kondensatoru maiņstrāvas ķēdē, tas periodiski uz­lādējas un izlādējas, un ķēdē plūst stacionāra maiņstrāva (dielek­triķī starp kondensatora klājumiem — nobīdes strāva).

Ja kondensatoram ar kapacitāti *C* (6.31. att. *c*) pievieno sinusoidālu spriegumu

*uC = UCm* sin *ωt*,

tad kondensatora lādiņš *q* mainās proporcionāli sprie­gumam *uC*, t. i., *q = CuC*. Ķēdes strāva

 (6.33)

kur

*Im = ωCUCm* (6.34)

ir ķēdes strāvas maksimālā vērtība.

Redzam, ka sinusoidāls spriegums ķēdē ar kapacitāti uztur sinusoidālu strāvu, kas apsteidz spriegumu par 90° (6.31. att. *e*).

Kapacitāte rada starp strāvu un spriegumu negatīvu fāzu no­bīdes leņķi:



Izteiksmes (6.34) abas puses izdalot ar, dabū, ka ķēdes strāvas efektīvā vērtība *I = =ωCUC* vai



Lielumam  ir pretestības dimensija:



un tādēļ tas izsaka kapacitātes radīto pretestību maiņstrāvai, ko sauc par kapacitātes reaktīvo pretestību jeb kapacitīvo pretestību un apzīmē ar *XC*

|  |
| --- |
|  |

6.31. att. Maiņstrāvas ķēde ar kapacitāti *C*: *a* – kondensatora konstruktīvā shēma;

*b* - kondensatora grafiskais apzīmējums shēmā; *c* – elektriskās ķēdes principiālā shēma, *d* – vektoru diagramma; *e* – strāvas un spriegumu momentānas vērtības; *f* – jaudas momentānas vērtības.

 (6.35)

Ķapacitīvā pretestība *XC* ir apgriezti proporcionāla frekvencei *f* un kapacitātei *C*.

Tādējādi Oma likuma izteiksme maiņstrāvas ķēdei ar kapaci­tāti ir šāda:

 (6.36)

Sprieguma kritums kapacitīvajā pretestībā *XC*

*UC = IXC*. (6.37)

Maiņstrāvas ķēdē ar kapacitāti *C* strāva ap­steidz spriegumu par leņķi 

*uC = UCm* sin *ωt* un 

un momentānā jauda



Arī šajā gadījumā momentānā jauda mainās pēc sinusa likuma (6.31. att. *f*) ar divkāršu maiņstrāvas frekvenci (2*ω*). Tādēļ ķēdes vidējā jauda vienā periodā ir vienāda ar nulli, t. i., *P* = 0.

Maiņstrāvas ķēdei ar kapacitāti, tāpat kā ķēdei ar induktivi­tāti, raksturīgi, ka momentānā jauda perioda vienā ceturksnī ir pozitīva, bet tam sekojošā — negatīva.

Perioda pirmajā ceturksnī, kad spriegums *uC* pieaug no nulles līdz maksimālajai vērtībai *UCm*, kondensators uzlādējas un no avota saņemtā enerģija uzkrājas tā elektriskajā laukā:



Perioda otrajā ceturksnī, kad spriegums *uC* samazinās no mak­simālās vērtības *UCm* līdz nullei, kondensators izlādējas un elek­triskajā laukā uzkrāto enerģiju  atdod avotam.

Tādējādi ķēdē ar kapacitāti notiek tikai periodiska elektriskās enerģijas apmaiņa starp avotu un kapacitātes elektrisko lauku, pie tam elektriskā enerģija nepārveidojas citā formā. Tātad ka­pacitāte nepatērē enerģiju. Enerģijas lielumu, kura apmainās starp avotu un kapacitāti, raksturo kapacitātes momentānās jau­das maksimālā vērtība *UCI*, ko sauc par reaktīvo kapacitīvo jaudu un apzīmē ar *QC*:

*QC = UCI = I*2*XC*. (6.38)

Jāiegaumē, ka katrā laika momentā reaktīvajām jaudām *QL* un *QC* ir pretējas zīmes: kad *QL* pozitīva, tad *QC* negatīva, t. i., kad induktivitāte no avota saņem reaktīvo enerģiju, tad ka-

pacitāte tajā pašā laika atdod avotam reaktīvo enerģiju – un otrādi.

***6.11. piemērs.*** Kondensators, kura kapacitāte *C* = 79,6 μF, ieslēgts maiņstrāvas tīklā ar spriegumu 220 V (6.32. att.). Aprēķināt kondensatora kapacitīvo pretestību, strāvu ķēdē, kapacitīvo jaudu un konstruēt vektoru diagrammu. Uzrakstīt strāvas un sprieguma momentāno vērtību izteiksmes, pieņemot, ka sprieguma sākuma fāze 00.

|  |  |
| --- | --- |
| 6.32. att. Shēma 6.11. piemēram | 6.33. att. Vektoru diagramma 6.11. piemēram |

Atrisinājums.

1. Kondensatora kapacitīvā pretestība



2. Strāva ķēdē (efektīvā vērtība)



3. Strāvas, sprieguma un reaktīvas jaudas amplitūdas







4. Sprieguma un strāvas momentānās vērtības





5. Konstruē vektoru diagrammu (6.33. att.), ievērojot, ka strāva ideāla kondensatorā apsteidz spriegumu par 900, t.i., Ψ*I* = 900.

Mērogs *MU* = 55 V/cm; *MI* = 2,5 A/m.

Vektoru garums 

**6.13. MAIŅSTRĀVAS ĶĒDĒ AR AKTĪVO PRETESTĪBU UN INDUKTIVITĀTI**

**Spriegums un strāva**. 6.34. attēlā parādītajai ķēdei piemīt aktīvā pretestība *R* un induktivitāte *L*. Šādu ķēdi izveido, piemēram, jebkura elektromagnētiskā aparāta spole.

Ja ķēdē plūst maiņstrāva *i*, tajā inducējas pašindukcijas EDS 

|  |  |
| --- | --- |
|  | 6.34. att. Ķēde ar aktīvo pretestību un  induktivitāti. |

Pēc otra Kirhofa likuma

*U +eL = iR*,

No kurienes ķēdes spaiļu spriegums



Pirmo saskaitāmo *ua = iR*, kura momentānā vērtība ir proporcionāla strāvai, sauc par aktī-

vo spriegumu, bet otro saskaitāmo  kura momentāna vērtība ir proporcionāla strāvas izmaiņas ātrumam, sauc par reaktīvo spriegumu.

Ja strāva mainās pēc sinusa likuma

*i = Im*sin*ωt*,

tad aktīvais spriegums

*ua = iR = ImR* sin*ωt* = *Uam* sin*ωt*

arī mainās sinusoidāli un sakrīt fāzē ar strāvu.

Aktīvā sprieguma amplitūdas vērtība

*Uam = ImR,*

abas puses izdalot ar, dabū sprieguma komponenšu efektīvās vērtības

*Ua = IR.*

Reaktīvais spriegums



izmainās sinusoidāli un apsteidz fāzē strāvu par 900.

Reaktīvā sprieguma amplitūdas vērtība

*ULm* = *ωLIm = XLIm*,

bet efektīvā vērtība

*UL* = *ωLI = XLI.*

Ķēdes spaiļu spriegums

 (6.39)

Spaiļu spriegums mainās sinusoidāli un apsteidz fāzē strāvu par leņķi *φ*.

6.35. attēlā parādīti *i, ua, uL* un *u* grafiki.

|  |  |
| --- | --- |
| ***a*** | ***b*** |

6.35. att. Strāvas (*a*) un sprieguma (*b*) grafiks ķēdei ar aktīvo pretestību un induktivitāti.

**Sprieguma trīsstūris**. Spriegumu uz ķēdes izvadiem nosaka vektors  Šo

vektoru summu konstruējam pēc trīsstūra likumiem. Šai nolūkā vektoru pārnesam paralēli

sev no punkta 0 uz punktu K un savienojam punktus 0 un M. Trīsstūra OKM malas attēlo spriegumus uz posmiem un izvadiem (*Ua, UL* un *U*) un sprieguma vektori *U, UR* un *UL* izveido taisnleņķa spriegumu trīsstūri (6.36. att.), no kura tieši izriet sakarība, kas saista šos lielumus

 (6.40)

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| ***a*** | ***b*** |  |
| 6.36. att. Vektoru diagramma ķēdei ar aktīvo pretestību un  induktivitāti (*a*) un sprieguma trīsstūris (*b*). | | 6.37. att. Pretestību trīsstūris ķēdei ar aktīvo pretestību un induktivitāti |

Analoģiska sakarība pastāv starp amplitūdu vērtībām:



Fāzes nobīdes leņķi starp ķēdes spaiļu spriegumu un tās strāvu atrod no sprieguma trīsstūra pēc šādām formulām

 vai 

Jo lielāks ir reaktīvai spriegums salīdzinājumā ar aktīvo spriegumu, jo lielāks ir strāvas fāzes nobīdes leņķis attiecībā pret spaiļu spriegumu.

**Ķēdes pretestība**. Formulu (6.40) var pārrakstīt šādā veidā:



no kurienes ķēdes strāva

 (6.41)

Lielumu

 (6.42)

sauc par ķēdes pilno pretestību.

Izteiksme (6.41) formāli ir līdzīga Oma likuma izteiksmei, tādēļ to sauc par Oma likumu maiņstrāvas ķēdei ar aktīvo pretestību un induktivitāti.

Pretestības *R, XL* un *Z* var attēlot grafiski ar taisnleņķa trīsstūra – pretestības trīsstūra – malām (6.37. att.), kuru var iegūt no sprieguma trīsstūra, samazinot katru tā malu *I* reizes.

Tā kā pretestību un spriegumu trīsstūri ir līdzīgi, sprieguma un strāvas fāzes nobīdes leņķis *φ*, kas ir vienāds ar leņķi starp trīsstūra malām *Z* un *R*, var noteikt pēc sakarībām

 vai 

Svarīgi atzīmēt aktīvas pretestības divas īpašības:

1. pretestība *R* nav atkarīga no strāvas izmaiņas frekvences *f*;

2. spriegums uz pretestības *Ua* sakrīt fāzē ar strāvu *I*.

Šo īpašību dēļ Oma likumu pretestībai *R* var uzrakstīt gan sprieguma un strāvas momentānām vērtībām *ua = Ri*, gan arī efektīvām *Ua = RI*, vai maksimālām *Uam = RIm*.

Citādi ir ar induktivitātes īpašībām. Maiņstrāva rada induktivitāte EDS *eL*, kurš kavē (pretojas) strāvas izmaiņas ķēdē (Lenca likums), tādēļ parādās induktīvā pretestība. Induktīva pretestība *XL* atšķirībā no aktīvās pretestības ir atkarīga no frekvences *XL = ωL =* 2*πfL*.

Induktivitāte no aktīvās pretestības atšķiras arī ar fāžu starpību starp strāvu un spriegumu. EDS induktivitātē (*EL*) atpaliek no strāvas *I* fāzē par leņķi π/2. Šo EDS līdzsvaro spriegums uz induktivitātes *UL*. Tāpēc spriegums *UL* vienāds ar EDS *EL*, bet tam ir pretēja zīme (*UL = - EL*). Līdz ar to Oma likumu var uzrakstīt tikai efektīvajām vai maksimālajām strāvas un induktivitātes sprieguma vērtībām *UL = XLI*, vai *ULm = XLIm*, bet to nevar izmantot momentānajam vērtībām (*uL ≠ XLi*).

**Jauda**. Jaudas momentānā vērtība

*p = ui = Um* sin(*ωt + φ*)*Im* sin*ωt* = *UmIm* sin(*ωt + φ*) sin*ωt*.

Ievērojot, ka

**

kā arī izteiksmi (6.10), var uzrakstīt citu momentānās jaudas izteiksmi

*P = UI* cos*φ* – *UI* cos(2*ωt + φ*). (6.43)

6.38. attēlā parādīti strāvas, sprieguma un jaudas grafiki. Momentānās jaudas līknes ordinātes iegūtas, reizinot sprieguma un strāvas līkņu attiecīgo punktu ordinātes.

Uzrakstītajai izteiksmei (6.43) ir divi locekļi; nemainīgais, no laika neatkarīgais loceklis *UI* cos*φ* un sinusoidāli mainīgais loceklis *UI* cos(2*ωt + φ*). Viena perioda laikā jaudas vidējā vērtība, kuru parasti pielieto maiņstrāvas ķēžu aprēķinos, ir vienāda ar nemainīgo locekli *UI* cos*φ,* jo sinusoidālas funkcijas vidējā vērtība perioda laikā ir vienāda ar nulli.

Tādējādi ķēdes jaudas vidēja vērtība ir vienāda ar sprieguma un strāvas efektīvo vērtību un cos*φ* reizinājumu, t.i.,

*P = UI* cos*φ.* (5.44)

Tā kā tad

*P = UaI = I*2*R*.

Tātad ķēdes vidēja jauda ir vienāda ar jaudas vidējo vērtību aktīvajā pretestībā, un tāpēc jebkuras ķēdes vidējo jaudu sauc par aktīvo jaudu.

|  |
| --- |
|  |

6.38. att. Strāvas, sprieguma un jaudas grafiki maiņstrāvas ķēdei

Tā kā elektriskā ķēde sastāv no diviem elementiem, tad arī jaudu var uzrakstīt kā divu saskaitāmo – aktīvajā un induktīvajā pretestībā patērēto jaudu summu:

*p = ui =* (*ua + uL*)*i = uai + uLi = pa + pL*. (6.45)

Momentānā jauda ķēdes aktīvajā pretestībā

*pa = uai = i*2*R*,

jeb

*pa = uai = Uam*sin*ωt*∙*Im*sin*ωt = UamIm*sin2*ωt =* 2*UaI*sin2*ωt,*  (6.46)

kā zināms, raksturo ātrumu, ar kādu elektriskā enerģija pārveidojas siltuma vai mehāniskajā enerģijā. Visa perioda laikā tā ir pozitīva (6.39. att.); divas reizes tā sasniedz pozitīvo maksimumu *Pam =* 2*UaI* = 2*I*2*R* un divas reizes kļūst vienlīdzīga nullei.

Pārveidojot momentāno jaudu aktīvajā pretestībā saskaņā ar (6.24), redzam, ka

*pa = uai = UamIm* sin2*ωt = UaI – UaI* cos2*ωt,* (6.47)

t.i., tā ir pastāvīgās un mainīgās komponentes summa. Pastāvīgā komponente ir aktīvajā pretestībā patērētās jaudas vidējā vērtība periodā

*P = UaI = I*2*R*, (6.48)

un to sauc, kā jau minēts, par ķēdes aktīvo jaudu.

Tā kā *Ua = U*cos*φ*, tad *P = UI* cos*φ*, kas ir identisks ar (6.43).

Momentānā jauda induktīvajā pretestībā

 (6.49)

raksturo ātrumu, ar kādu avota enerģija pārveidojas magnētiskā lauka enerģijā.

Aplūkojamai ķēdei

 (6.50)

Momentānā jauda induktīvajā pretestībā mainās ar divkāršu frekvenci (6.38. att.); divas reizes periodā tā sasniedz pozitīvo maksimumu *ULI = I*2*ωL* un divas reizes skaitliski tikpat lielo negatīvo maksimumu. Perioda pirmā un trešā ceturkšņa laikā tā ir pozitīva, tāpēc ka spoles magnētiskajā laukā uzkrājas enerģija, pie tam  Perioda otrā un ceturtā ceturkšņa laikā momentānā jauda ir negatīva, jo spole atdod enerģiju, kas uzkrāta iepriekšējo ceturkšņu laikā. Ķēdes vidējā jauda periodā ir vienlīdzīga vidējai jaudai ķēdes aktīvajā pretestībā perioda laikā, t.i., aktīvajai jaudai (6.43)

|  |
| --- |
|  |

6.39. att. Sprieguma, strāvas un jaudas grafiki ķēdei ar aktīvu pretestību un induktivitāti.

Ķēdes reaktīvā jauda, kas raksturo enerģijas apmaiņas ātrumu starp ģeneratoru un ķēdi

*Q = ULI = I*2*XL = I*2*Z* sin*φ* = *UI* sin*φ* (6.51)

ir vienāda ar sprieguma un strāvas efektīvo vērtību un sin*φ* reizinājumu.

6.39. attēlā parādītas jaudu *pa* un *pL*, kā arī momentānās jaudas *p* līknes ķēdei ar pretestību un induktivitāti. Pēdējās līknes ordinātes var iegūt, vai nu saskaitot līkņu *pa* un *pL* ordinātes, vai arī reizinot sprieguma un strāvas momentānās vērtības.

Laika intervālā *t*1 < *t* < *t*2 ķēdes momentānā jauda un tās komponentes *pa* un *pL* ir pozitīvas; enerģija, ko ķēde saņem no ģeneratora, daļēji pārveidojas siltuma enerģijā un daļēji tiek uz­krāta magnētiskajā laukā.

Intervālā *t*2 < *t* < *t*3 ķēdes momentānā jauda un komponente pa ir pozitīva, bet komponente *pL* negatīva; šai laikā enerģiju, kas pārveidojas siltuma enerģijā, daļēju pievada ģenerators,

bet daļēji magnētiskais lauks, kura enerģija samazinās, strāvai sa­mazinoties.

Laika intervālā *t*3 < *t* < *t*4 komponente *pL* ir negatīva un tās absolūtā vērtība ir lielāka nekā pozitīvās komponentes pa abso­lūtā vērtība. Tas nozīmē, ka magnētiskā lauka enerģija daļēji pārvēršas siltuma enerģijā un daļēji tiek atdota atpakaļ ģene­ratoram.

Nākošajā pusperiodā parādības atkārtojas tādā paša secība.

**Pilnā jauda**. Dažu elektrotehnisko ierīču, piemēram, transformatoru, gabarītus, konstruktīvo sarežģītību un tātad arī izmaksu nosaka nevis aktīvā vai reaktīvā jauda, kuras mainās atkarībā no patērētāja darba režīma, bet gan sprieguma un strāvas nominālo efektīvo vērtību (kurām iekārta paredzēta) reizinājums.

Par ķēdes pilno jaudu sauc sprieguma un strāvas efektīvo vērtību reizinājumu:

*S = UI*. (6.52)

Ievērojot, ka sin2φ = cos2φ = 1, var rakstīt

(*UI* cos*φ*)2 + (*UI* sin*φ*)2 = (*UI*)2

vai, kas tas pats

*P*2 + *Q*2 = *S*2,

tātad

 (6.53)

Jaudas *P, Q* un *S* var attēlot grafiski ar taisnleņķa trīsstūra – jaudu trīsstūra – malām (5.40. att.), kuru var iegūt no sprieguma trīsstūra, reizinot tā visas malas ar *I*.

|  |  |
| --- | --- |
| Attiecību  (6.54)  t.i., aktīvas jaudas attiecību pret pilno jaudu, sauc par jaudas koeficientu.  Pilnās jaudas vienība ir voltampērs (VA).  Pilnās jaudas jēdzienu pielieto tāpēc, ka mašīnas vai aparāta konstrukciju, gabarītus un svaru nosaka pēc to nominālās jaudas | 6.40. att. Jaudas trīsstūris ķēdei ar aktīvo  pretestību un induktivitāti |

*SN  = UNIN*, bet pilnā jauda nosaka to izmantošanas pakāpi dažādos darbības režīmos.

***6.12. piemērs.*** Maiņstrāvas (sinusoidālas) tīklam ar spriegumu *U* = 220 V un frekvenci *f* = 50 Hz pievienota virknē slēgta aktīvā pretestība *R* = 30 Ω un induktivitāte *L* = 127 mH (6.41. att.).

Aprēķināt ķēdes strāvu *I*, tās posmu spriegums *Ua* un *UL*, visas jaudas (aktīvo, reaktīvo un pilno), kā arī konstruēt vektoru diagrammu, spriegumu, pretestību un jaudu trīsstūrus.

Atrisinājums.

1. Pretestību aprēķins. Pretestību trīsstūris.

Dota aktīvā pretestība *R* = 30 Ω. Induktīvā pretestība

*XL = ωL = 2πfL* = 2·3,14·50·0,127 = 40 Ω.

|  |  |
| --- | --- |
| 6.41. att. Maiņstrāvas ķēde ar R un L | 6.42. att. Pretestību un jaudu trīsstūris 6.41. attēla ķēdei |

Pilnā pretestība



Aprēķinātās pretestības ir saistītas ar 5.42. attēlā konstruētā taisnleņķa trīsstūra malu attiecību. Pēc mūsu datiem pretestību trīsstūrim OKM malu attiecība ir šāda:

*R : XL : Z =* 30 : 40 : 50 = 3 : 4 : 5.

2. Strāvas un spriegumu aprēķins. Vektoru diagramma.

Strāva ķēdē



Bet spriegumi tās posmos



3. Vektoru diagrammu varam uzkonstruēt, ja pieņemsim mērogu *MU* = 44 V/cm un *MI* = 1,1 A/cm. Tad vektoru garumi ir 

Spriegumu uz ķēdes spailēm nosaka vektors  Šo vektoru summu konstruējam pēc trīsstūra likumiem. Šai nolūkā vektoru *UL* (6.43. att.) pārnesam paralēli sev no punkta 0 uz punkta *K* (6.44. att.) un savienojam punktus 0 un *M*. Trīsstūra 0KM malas attēlo spriegumus uz posmiem un spailēm (*Ua*, *UL* un *U*).

4. Strāvas un sprieguma fāžu nobīdes aprēķins.

No spriegumu trīsstūra (5.44. att.), izriet



un 

Aprēķinātās izteiksmes var iegūt arī no pretestību trīsstūra (6.42. att.).

Pēc mūsu datiem cos*φ* = *R/Z* = 0,6, bet tg*φ* = *XL/R* = 1,33, no kurienes *φ* = arccos0,6 ≈ 530.

|  |  |
| --- | --- |
| 6.43. att. Vektoru diagramma 6.41. attēla ķēdei | 6.44. att. Sprieguma trīsstūris 6.41. attēla ķēdei |

Tādējādi nesazarotā ķēdē ar aktīvu pretestību *R* un induktīvu pretestību *XL* spriegums uz ķēdes spailēm apsteidz strāvu fāzē par leņķi *φ* = 530, kas atkarīgs no attiecības *XL/R*.

5. Jaudu aprēķins. Jaudu trīsstūris.

Vidējā vai aktīvā jauda

*P = U·I·*cos*φ* = 220·4,4·0,6 = 581 W.

Tā kā *U·*cos*φ* = *UR* (6.43. att.), tad

*P = U·I·*cos*φ* = *UR·I = R·I*2.

Bez aktīvās jaudas *P*, kas atkarīga no aktīvās pretestības *R*, maiņstrāvai vel lieto reaktīvo jaudu *Q =* *U·I·*sin*φ =XL·I*2un pilno jaudu *S = U·I = Z·I*2.

Mūsu gadījumā

*Q =* *U·I·*sin*φ=* 220·4,4·0,8 = 774 VAr.

*S = U·I =*220·4,4 = 968 VA.

Aktīvā jauda *P*, reaktīvā jauda *Q* un pilnā jauda *S* ir proporcionālas pretestībām *R*, *XL* un *Z*, kas ļauj pretestību trīsstūri (6.42. att.) citā mērogā aplūkot kā jaudu trīsstūri (jaudas apzīmētas iekavās).

6. Magnētiskā lauka uzkrāta enerģija

*W = L·I*2 = 127·10-3·4,42 = 2,46 J

7. Momentāno vērtību vienādojumi, ja pieņem, ka strāvas sākuma fāze ir vienāda ar nulli.

Nepieciešamie vienādojumi vispārīga veida uzrakstāmi šādi:









Pēc mūsu datiem







Bez tam dots Ψ*I* = 00. Tādējādi fāžu starpība avota spriegumam un ķēdes strāvai *φ =* Ψ*U* – Ψ*I* = Ψ*U*, jeb Ψ*U* *= φ =* 530.

Rezultātā iegūstām









**6.14. MAIŅSTRĀVAS ĶĒDE AR AKTĪVO PRETESTĪBU UN KAPACITĀTI**

**Strāvas un sprieguma vienādojumi**. Aplūkojam parādības, kādas norisinās nesazarotā ķēdē ar pre­testību *R* un kapacitāti *С* (6.45. att.).

Ja strāva ir sinusoidāla (*i = Im* sin *ωt*), tad spriegums uz aktīvas pretestības *ua = iR = Uam* sin*ωt* un tā efektīvā vērtība

*Ua = IR*.

|  |  |
| --- | --- |
|  | 6.45. att. Ķēde ar aktīvu pre­testību un  kapacitāti. |

6.46. attēlā šis spriegums parādīts ar līkni *uR*, kas sakrīt fāze ar strāvas *i* līkni, bet 6.47. attēlā — ar vektoru *Ua*, kura virziens sakrīt ar strāvas vektora *I* virzienu.

Spriegums uz kapacitātes jeb kapacitatīvais spriegums



Sprieguma efektīvā vērtība



6.46. attēlā parādīta līkne šim spriegumam *uC*, kas nokavējas attiecībā pret strāvu *i* par ¼ perioda, bet 6.47. attēlā - vektors *UC*, kas pagriezts attiecībā pret strāvas *I* vektoru par 900 virzienā, kurš pretējs vektoru rotācijas virzienam.

Spriegums uz ķēdes spailēm



tā amplitūda



un efektīvā vērtība



|  |  |
| --- | --- |
|  | 6.47. att. Vektoru diagramma ķēdei ar aktīvu pretestību un kapacitāti. |

6.46. attēlā šis spriegums *u* parādīts ar līkni, kuras ordinātas da­būtas, saskaitot līkņu *uR* un *uC* ordinātas. 6.47. attēlā šis spriegums parādīts ar vektoru *U*, kas iegūts, saskaitot vektorus *UR* un *UC*.

Ja dots spriegums uz ķēdes spailēm

*u = Um* sin *ωt*,

tad strāva ķēde



Spriegums uz ķēdes spailēm atpaliek fāzē no strāvas par leņķi φ, tātad strāva apsteidz spriegumu par leņķi φ. Šo leņķi var aprēķināt no vektoru diagrammas un formulām

 vai 

Jāiegaumē, ka vektors, kas attēlo spriegumu uz induktivitātes, ir pagriezts attiecībā pret aktīvā sprieguma vektoru par 90° vek­toru griešanās virzienā, bet vektors, kas attēlo spriegumu

uz ka­pacitātes, ir pagriezts attiecībā pret aktīvā sprieguma vektoru par 90° pretējā virzienā.

Spriegums uz ķēdes spailēm



strāva ķēde

 (6.55)

Lielumu

 (6.56)

sauc par ķēdes pilno pretestību (impedanci) un mērī omos.

**Pretestību trīsstūris.** Starp pretestībām *R*, *XC* un *Z* pastāv tāda pati sakarība kā starp taisnleņķa trijstūra malām; ja trijstūra katetes attēlo pre­testības *R* un *XC*, tad hipotenūza — pilno pretestību *Z* (6.48. att.).

Pretestību trijstūri var iegūt, ja *I* reizes sama­zina spriegumu trijstūra malas vektoru dia­grammā 6.47. attēlā.

Salīdzinot pretestību trijstūrus ķēdei ar ak­tīvu pretestību un induktivitāti un ķēdei ar aktīvu pretestību un kapacitāti, redzam, ka in­duktivitātes reaktīvā pretestība ir pagriezta at­tiecībā pret aktīvo pretestību par 90° vektoru rotācijas virzienā, bet kapacitātes reaktīvā pre­testība — par 90° pretējā virzienā. Tātad kapacitatīvā un induktīvā pretestība tiek atliktas pretējos virzienos. Leņķa *φ* tangensu aprēķina no formulas

 (6.57)

|  |  |
| --- | --- |
|  | 6.48. att. Pretes­tību trīsstūris ķēdei ar aktīvu  pretestību un kapacitāti |

**Momentāna jauda. Aktīva, reaktīva un pilna jauda.** Momentānā jauda ķēdē ar aktīvu pretestību un kapacitāti

*p = ui = Um* sin (*ωt* – *φ*) ∙*Im* sin *ωt = UI* cos *φ* – *UI* cos (2*ωt* – *φ*). (6.58)

Jaudas grafiks redzams 6.45. attēlā.

Tāpat kā ķēdei ar aktīvu pretestību un induktivitāti jaudu var uzskatīt par divu komponen-

tu summu:

*p = ui =* (*ua + uC*)*i* = *uai + uCi = pa + pC*, (6.59)

turklāt pirmais saskaitāmais ir jauda pretestībā, bet otrs — jauda kondensatorā. Likums, pēc kura mainās pretestībā patērētā jauda, tika konstatēts jau agrāk [(6.47) formula]. Jaudas momentāna vērtība kondensatorā



Tā mainās ar divkāršu frekvenci, divas reizes periodā sasnie­dzot pozitīvo maksimumu *UCI* un 2 reizes negatīvo maksimumu — *UCI*.

Jaudu *pR* un *pC* grafiki redzami 6.46. attēlā.

Aktīvā jauda

*P = UI* cos *φ*.

Reaktīvā jauda, kas raksturo enerģijas apmaiņas ātrumu starp ģeneratoru un kondensatora elektrisko lauku, ir



ķēdes pilnā jauda

*S = UI*.

***6.13. piemērs.*** Maiņstrāvas (sinusoidālas) tīklam ar spriegumu *U* = 240 V un frekvenci *f* = 50 Hz pievienota virknē slēgta aktīvā pretestība *R* = 60 Ω un kondensators ar kapacitāti C=

=40 μF (6.49. att).

Aprēķināt ķēdes strāvu *I*, tās posmu spriegums *Ua* un *UL*, visas jaudas (aktīvo, reaktīvo un pilno), kā arī konstruēt vektoru diagrammu, spriegumu, pretestību un jaudu trīsstūrus.

|  |  |
| --- | --- |
| 6.49. att. Maiņstrāvas ķēde ar R un C | 6.50. att. Pretestību un jaudu trīsstūris 6.49. attēla ķēdei |

Atrisinājums.

1. Pretestību aprēķins. Pretestību trīsstūris.

Dota aktīvā pretestība *R* = 60 Ω.

Kapacitīvā pretestība



Pilnā pretestība



Aprēķinātās pretestības ir saistītas ar 5.50. attēlā konstruētā taisnleņķa trīsstūra malu attiecību. Pēc mūsu datiem pretestību trīsstūrim malu attiecība ir šāda:

*R : XL : Z =* 60 : 80 : 100 = 3 : 4 : 5.

2. Strāvas un spriegumu aprēķins.

Strāva ķēdē



Bet spriegumi tās posmos



3. Vektoru diagrammu varam uzkonstruēt, ja pieņemsim mērogu *MU* = 48 V/cm un *MI* = 0,6 A/cm. Tad vektoru garumi ir 

Spriegumu uz ķēdes spailēm nosaka vektors  Šo vektoru summu konstruējam pēc trīsstūra likumiem. Šai nolūkā vektoru *UC* (6.51. att.) pārnesam paralēli sev no punkta 0 uz punkta *K* (6.52. att.) un savienojam punktus 0 un *M*. Trīsstūra 0KM malas attēlo spriegumus uz posmiem un spailēm (*UR*, *UC* un *U*).

4. Strāvas un sprieguma fāžu nobīdes aprēķins.

No spriegumu trīsstūra (6.52. att.), izriet



un 

Aprēķinātās izteiksmes var iegūt arī no pretestību trīsstūra (6.50. att.).

Pēc mūsu datiem cos*φ* = *R/Z* = 0,6, sinφ = 0,8, bet tg*φ* = *XC/R* = 1,33, no kurienes *φ* = arccos0,6 ≈ 530.

|  |  |
| --- | --- |
| 6.51. att. Vektoru diagramma 6.49. attēla ķēdei | 6.52. att. Sprieguma trīsstūris 6.49. attēla ķēdei |

Tādējādi nesazarotā ķēdē ar aktīvu pretestību *R* un kapacitīvu pretestību *XC* spriegums uz ķēdes spailēm atpaliek no strāvu fāzē par leņķi *φ* = 530, kas atkarīgs no attiecības *XC/R*.

5. Jaudu aprēķins. Jaudu trīsstūris.

Vidējā vai aktīvā jauda

*P = U·I·*cos*φ* = 240·2,4·0,6 = 345,6 W.

Tā kā *U·*cos*φ* = *UR* (6.51. att.), tad

*P = U·I·*cos*φ* = *UR·I = R·I*2.

Bez aktīvās jaudas P, kas atkarīga no aktīvās pretestības R, maiņstrāvai vel lieto reaktīvo jaudu *Q =* *U·I·*sin*φ =XC·I*2un pilno jaudu *S = U·I = Z·I*2.

Mūsu gadījumā

*Q =* *U·I·*sin*φ=* 240·2,4·0,8 = 460,8 VAr.

*S = U·I =*240·2,4 = 576 VA.

Aktīvā jauda *P*, reaktīvā jauda *Q* un pilnā jauda *S* ir proporcionālas pretestībām *R*, *XL* un *Z*, kas ļauj pretestību trīsstūri (6.50. att.) citā mērogā aplūkot kā jaudu trīsstūri (jaudas apzīmētas iekavās).

6. Elektriskā lauka uzkrāta enerģija

*W = C·U*2 = 40·10-6·2402 = 2,304 J.

7. Momentāno vērtību vienādojumi, ja pieņem, ka strāvas sākuma fāze ir vienāda ar nulli.

Nepieciešamie vienādojumi vispārīga veida uzrakstāmi šādi:









Pēc mūsu datiem







Bez tam dots Ψ*I* = 00. Tādējādi fāžu starpība avota spriegumam un ķēdes strāvai *φ =* Ψ*U* – Ψ*I* = Ψ*U*, jeb Ψ*U* *= φ =* 530.

Rezultātā iegūstām









**6.15. MAIŅSTRĀVAS ĶĒDĒ AR VIRKNĒ SLĒGTU AKTĪVO PRETESTĪBU, INDUKTIVITĀTI UN KAPACITĀTI**

***Strāvas un sprieguma vienādojumi***. Ja nesazarotu ķēdi ar aktīvu pretestību, induktivitāti un ka­pacitāti (6.53. att.) pieslēdz sinusoidāla sprieguma ģeneratoram, tad ķēdē plūst sinusoidāla strāva (pēc pārejas procesu izbeigšanās, kurus šeit neaplūkosim). Par sākuma brīdi (*t* = 0) izvēlamies momentu, kad strāva ir vienlīdzīga nullei, t. i., pieņemam, ka

*i = Im* sin *ωt*.

Spriegums uz aktīvās pretestības sakrīt fāzē ar strāvu un ir

*ua = Uam* sin *ωt* .

Šī sprieguma amplitūda *Uam = ImR*, bet efektīvā vērtība *Ua = IR*.

|  |
| --- |
|  |

6.53. att. Ķēde ar aktīvu pre­testību, induktivitāti un kapa­citāti.

Spriegums uz induktivitātes jeb induktīvais spriegums apsteidz fāzē strāvu par ¼ perioda:



Šī sprieguma amplitūda ir *ULm = ImωL = ImXL*, efektīvā vērtība *UL* = *= IωL = IXL*.

Spriegums uz kondensatora jeb kapacitatīvais spriegums atpa­liek fāzē no strāvas par ¼ perioda:



Šī sprieguma amplitūda  bet efektīvā vērtība 

6.54. attēlā redzami minēto spriegumu grafiki, bet 6.55. attēlā — ķēdes vektoru diagramma.

Tā kā *R, L* un *С* ir savienoti virknē, tad spriegums uz ķēdes spailēm jebkurā brīdī ir vienlīdzīgs triju komponentu summai:



Spriegumi uz induktivitātes un kapacitātes ir nobīdīti attiecībā viens pret otru fāzē par ½ perioda vai par leņķi π, un to summa, ko sauc par reaktīvo spriegumu, ir



Gadījumā, ja *ULm* > *UCm*, to starpība ir pozitīva; ja *ULm = UCm*, to starpība ir vienlīdzīga nullei, bet, kad *ULm* < *UCm*, to starpība ir negatīva.

Tātad spriegums uz spailēm



|  |  |
| --- | --- |
|  | 6.53. att. Strāvas, sprieguma un jaudas grafiki ķēdei ar aktīvu pretestību, induktivitāti un kapacitāti. |

Speciālgadījumam *ULm* > *UCm*, (*XL > XC*) šis spriegums attē­lots 6.54. attēlā ar līkni *u*, bet 6.55. attēlā — ar vektoru *U*, kas iegūts, saskaitot vektorus *Ua, UL* un *UC*.

Sprieguma amplitūda



bet efektīvā vērtība

 (6.60)

Reaktīvais spriegums *Ur = UL — UC* ir algebrisks lielums.

|  |  |
| --- | --- |
| 6.55. att. Vektoru diagramma ķēdei ar aktīvu pretestību, induktivitāti un ka­pacitāti gadījumā, kad *XL > XC.* | 6.56. att. Pretestību trijstūris ķēdei ar aktīvu pretestību, induktivitāti un ka­pacitāti gadījumā, kad *XL > XC*. |

Ja *UL > UC*, kā arī ķēdei ar *R* un *L*, tad *Ur* > 0. Ja *UC > UL*, kā arī ķēdei ar *R* un *С* iegūstam *Ur* < 0.

Izsakot formulā (6.60) spriegumus *Ua, UL* un *UC* ar strāvu un pretestībām, iegūstam

 (6.61)

šeit lielumu

 (6.62)

sauc par ķēdes pilno pretestību (impedanci).

***Reaktīvā pretestība. Pretestību trijstūris***. Induktīvās un kapacitatīvās pretestības starpību *X = XL — XC* sauc par reaktīvo pretestību. Reaktīvā pretestība atšķirībā no *XL* un *XC* ir algebrisks lielums. Ķēdei, kurā *XL* > *XC*, reaktīva pretestība ir pozitīva, bet ķēdei, kura *XL* < *XC*, reaktīvā pretestība ir negatīva. Ievie­tojot *X* formula (6.62), iegūstam

 (6.63)

Pretestību *Z* grafiski var attēlot ar hipotenūzu taisnleņķa trij­stūri, kur viena katete ir aktīvā pretestība, bet otra — starpība starp induktīvo un kapacitatīvo pretestību (6.56. att.).

**Leņķa *φ* zīme.** Lai nerastos neskaidrības, nosakot leņķa φ zīmi, visos gadī­jumos pieņemts šo leņķi aprēķināt kā sprieguma un strāvas sa­kuma fāzu starpību un uzskatīt par algebrisku lielumu. 6.56. attēlā redzams, ka ķēdei ar aktīvu pretestību un induktivitāti šis leņķis starp sprieguma un strāvas vektoriem jāuzskata par pozitīvu (sprieguma vektors apsteidz fāzē strāvas vektoru par leņķi *φ*).

Turpretī 6.57. attēlā redzams ka ķēdei ar aktīvu pretestību un kapacitāti šis leņķis jāuzskata par negatīvu (sprieguma vek­tors atpaliek fāzē no strāvas vektora). Vispārīgā gadījumā ķē­dei ar *R, L* un *С* spriegums apsteidz strāvu vai arī atpaliek no tās atkarībā no tā, kurš spriegums — *UL* vai *UC* ir lielāks (resp. kura pretestība — *XL* vai *XC* ir lielāka). Uzskatot visām ķēdēm leņķi par algebrisku lielumu un pieņemot *i = Im* sin*ωt*, var rakstīt *u = Um* sin(*ωt + φ*), jo ķēdei ar *R* un *L* vai arī ķēdei ar *R, L* un *C*, ja *XL > XC*, *φ* > 0 un, kā tam arī jābūt, spriegums ap­steidz fāzē strāvu; turpretī ķēdei ar *R* un *С* vai arī ķēdei ar *R, L* un *C*, ja *XC > XL*, *φ* < 0 un tātad spriegums atpaliek fāzē no strāvas (sprieguma vektoram attiecībā pret strāvas vektoru jābūt pagrieztam pulksteņa rādītāja kustības virzienā).

Ja pieņemam *u = Um* sin *ωt*, tad tādu pašu apsvērumu dēļ strā­vas izteiksme visos gadījumos jāraksta šādi: *i = Im* sin(*ωt – φ*).

|  |  |
| --- | --- |
| 6.57. att. Vektoru diagramma ķēdei ar aktīvu pretestību, induktivitāti un ka­pacitāti gadījumā, kad *XL* < *XC*. | 6.58. att. Pretestību trijstūris ķēdei ar aktīvu pretestību, induktivitāti un ka­pacitāti gadījumā, kad *XL* < *XC*. |

Starp spriegumu un strāvu fāzu nobīdes leņķi, kas vienlīdzīgs leņķim starp pretestību trijstūra malām *Z* un *R*, var aprēķināt pēc tā tangensa:

 (6.64)

Gaidījumā, ja *UL > UC* jeb *XL > XC*, leņķis *φ* ir pozitīvs, spriegums apsteidz fāze strāvu resp. strāva atpaliek fāzē no sprieguma.

Gadījuma, ja *UL = UC* jeb *XL = XC*, leņķis *φ* ir vienlīdzīgs nullei, strāva sakrīt fāze ar spriegumu. Šo gadījumu, ko sauc par spriegumu rezonansi, aplūkosim atsevišķi.

Gadījuma, ja *UL < UC* jeb, *XL < XC* leņķis ir *φ* negatīvs, spriegums atpaliek fāzē no strāvas resp. strāva apsteidz fāzē sprie­gumu. 6.57. un 6.58. attēlā redzama vektoru diagramma un pretestību trijstūris šim gadījumam. Speciālgadījuimā ķēdei ar *R, L*

 un φ > 0,

bet ķēdei ar *R, С*

 un φ < 0.

***Sakarība starp spriegumu uz ķēdes spailēm un uz atsevišķo ķēdes posmu galiem***. Tā kā spriegums uz induktivitātes un spriegums uz kapacitātes ir nobīdīti viens pret otru fāzē par ½ perioda, tad tie daļēji vai pilnīgi līdzsvaro (kompensē) viens otru. Tāpēc ķēdes kopējo sprie­gumu, no vienas puses, nosaka *Ua* vērtība, bet no otras — star­pība *UL — UC*, ka tas izriet no izteiksmes (5.60). Acīm redzot ir iespējams gadījums, kad sprieguma komponentes *UL* un *UC* var būt lielākas par ķēdes spaiļu spriegumu. Piemēram, ja *UL* = 9 kV, *UC* = 10 kV, *Ua* = 0,5 kV, tad *U* ≈ 1,1 kV. Tā rezultātā var tikt bojāta iekārtas atsevišķu elementu izolācija.

6.59. un 6.60. attēlā ir ilustrēts viens no šādiem gadījumiem. Transformatoru ar ģenera­toru savieno divdzīslu kabelis, kas sastāv no divām daļām: *a — x* un *b — y*. Starp spailēm *x* un *b* ieslēgti drošinātāji. Pārdegot vienam drošinātajam, piemēram, starp punktiem *x*2 un *b*2, transformators izrādās pieslēgts ģenerato­ram virknē ar divām kapacitātēm: viena no tam ir kapacitāte starp kabeļu dzīslu *b*2*y*2 un zemi (kabeļa metālisko apvalku), otra — starp dzīslu *a*2*x*2 un zemi. Šajā gadījuma spriegums starp kabeļa dzīslām *a*2*x*2, *b*2*y*2 un zemi, kā arī spriegums uz transformatora var būt daudz lielāks par ģeneratora nominālo spriegumu.

|  |  |
| --- | --- |
| 6.59. att. Transformators, kas, pārdegot drošinātājam,  pieslēgts ģeneratoram caur kapacitāti. | 6.60. att. 6.59. attēlā attēlotās ķēdes vektoru dia­gramma |

Aplūkojamā gadījumā ir skaidrs, ka ķēdes pilno pretestību *Z* tāpat nosaka, no vienas puses, ķēdes aktīva pretestība *R*, bet, no otras puses, reaktīvo pretestību *XL* un *XC* starpība, nevis pašas *XL* un *XC* vērtības, kuras var būt lielākas par *Z*, jo



**Momentānā jauda**. Momentānā jauda ķēdē ar pretestību, induktivitāti un kapaci­tāti sastāv no trim komponentēm: no jaudas *pa*, kas tiek patērēta aktīvajā elementā, *pL* — induktīvajā un *pC* — kapacitatīvaja ele­mentā:

*p = pa + pL + pC = uai + uLi + uCi*. (6.65)

Ja *i = Im* sin *ωt,* tad

*p* = 2*UaI* sin2*ωt* + *UL* sin 2*ωt* – *UCI* sin 2ωt.

Jaudas grafiki gadījumam *XL > XC* redzama 5.54. attēlā.

Komponentes *pL* un *pC* mainās ar divkāršu frekvenci, un katra laika momentā to zīmes ir pretējas.

Laika intervālos, kad *pL* ir pozitīva (perioda pirmajā un tre­šajā ceturksnī), magnētiskā lauka enerģija palielinās, jo pieaug strāva. Enerģija palielinās, no vienas puses, elektriska lauka ener­ģijas samazināšanās rezultātā, jo šajos laika intervālos jauda *pC* ir negatīva un spriegums uz kondensatora samazinās, un, no otras puses, uz tās enerģijas rēķina, kas tiek saņemta no ģenera­tora, jo aplūkojamā piemērā

.

Tajos laika intervālos, kad *pC* ir pozitīva, spriegums uz kon­densatora palielinās un elektriskajā laukā uzkrājas enerģija. Šī enerģija tiek iegūta magnētiskā lauka enerģijas samazināšanas rezultātā, strāvai samazinoties. Bez tam tajos pašos laika inter­vālos magnētiskā lauka

enerģijas pārpalikums (*WLm — WCm*) at­griežas atpakaļ ģeneratorā.

Tātad divas reizes periodā ķēde saņem no ģeneratora ener­ģiju (*WLm — WCm*) un divas reizes atdod to atpakaļ.

Gadījumā, ja *XL < XC*, *ULm < UCm* un *WLm < WCm*, parādības ir analoģiskas, atšķirība ir tikai tā, ka perioda otrā un ceturtā ceturkšņa laikā, kad spriegums uz kondensatora palielinās, ener­ģija, kas uzkrājas tā laukā, tiek iegūta, no vienas puses, samazi­noties magnētiskā lauka enerģijai, bet, no otras puses, — no ģeneratora. Perioda pirmā un trešā ceturkšņa laikā, samazinoties spriegumam uz kondensatora un pieaugot strāvai ķēdē, enerģija, kas tiek saņemta no elektriskā lauka, daļēji pārveidojas magnētiskā lauka enerģijā, daļēji tiek atdota atpakaļ ģeneratoram.

Enerģijas apmaiņu starp ķēdi un ģeneratoru raksturo reaktīvā jauda

*Q* = (*UL - UC*) *I* = *UI* sin *φ,* (6.66)

turklāt atkarībā no leņķa *φ* zīmes reaktīvā jauda var būt pozitīva vai negatīva.

Vidējā jeb aktīvā jauda ķēdē

*P = UaI = UI* cos *φ*,

bet pilnā jauda



**6.16. VIRKNES SLĒGUMA VISPĀRĪGS GADĪJUMS**

Ja ķēde (6.61. att.) sastāv no vairākiem virknē savienotiem posmiem (enerģijas patērētājiem) un katram no tiem ir aktīva un reaktīvā pretestība, tad, plūstot ķēdē strāvai *I*, sprieguma aktīvā komponente katrā posmā ir

*Uan = IRn*;

šeit *n* — atbilstošā posma kārtas skaitlis.

Sprieguma reaktīvā komponente katrā posmā ir

*Urn = IXn*.

6.62. attēlā sprieguma komponentu vektori atlikti tādā secībā, kādā savienoti atsevišķie posmi; aktīvo sprieguma kompo­nentu vektoru virziens sakrīt ar strāvas vektoru virzienu, bet reaktīvo komponentu vektori pagriezti attiecība pret strāvas vek­toru par leņķi ±90°.

Spriegums uz katra posma galiem



|  |
| --- |
|  |

6.61. att. Ķēde ar četriem virkne savienotiem posmiem.

Atsevišķo posmu spriegumi vektoru diagrammā attēloti ar vekto­riem, kas pagriezti attiecībā pret strāvas vektoru par leņķi, kura lielumu katram posmam nosaka saskaņā ar vienlīdzību



|  |  |
| --- | --- |
| 6.62. att. 6.61. attēlā parādītās ķēdes vektoru  diagramma. | 6.63. att. 6.61. attēlā parādītās ķēdes pretestību daudzstūris. |

Visu sprieguma vektoru summa (jeb visu aktīvo un reaktīvo sprieguma komponentu vektoru summa) ir ķēdes spaiļu sprieguma vektors .

Šī sprieguma efektīvo vērtību var aprēķināt pēc taisnleņķa trijstūra *ABC*, kur viena katete *AC* attēlo ķēdes sprieguma aktīvo komponenti, kas vienlīdzīga atsevišķo posmu spriegumu aktīvo komponentu aritmētiskajai summai, bet otra katete *CB* — ķēdes sprieguma, reaktīvo komponenti, kas vienlīdzīga atsevišķo posmu spriegumu reaktīvo komponentu algebriskajai summai.

Tātad spriegums uz ķēdes spailēm

 (6.67)

Tātad, savienojot virknē posmus, kuriem ir aktīvā un reaktīvā pretestība, sprieguma efektīvā vērtība uz ķēdes spailēm vienmēr ir mazāka par posmu spriegumu efektīvo vērtību aritmētisko summu (vai vienlīdzīga tai — ja visu posmu fāzes leņķi ir vienādi):

*U* ≤ *U*1 + *U*2 + *U*3 + … .

Ja ķēdes sprieguma izteiksmē sprieguma aktīvās un reaktīvās komponentes aizstājam ar strāvas un attiecīgo pretestību reizinā­jumu, tad iegūstam



jeb



No šī vienādojuma izriet, ka ķēdes pilnā pretestība

 (6.68)

Ķēdes pilno pretestību *Z* var attēlot grafiski ar pretestību daudzstūra noslēdzošo malu (6.63. att.), t. i.,

.

Šo daudzstūri var dabūt, samazinot spriegumu daudz­stūra katru malu *I* reizes.

Tātad, savienojot virknē posmus, kuriem ir aktīvā un reak­tīvā pretestība, ķēdes pilnā pretestība ir mazāka par atsevišķo posma pilno pretestību aritmētisko summu (vai vienlīdzīga tai — ja visu posmu pretestību fāzes leņķi ir vienādi).

Fāzu nobīdes leņķi starp spriegumu un strāvu var aprēķināt pēc sakarības

 (6.69)

Ja *X* = Σ*Xn* > 0, tad arī *φ* > 0 t. i., spriegums apsteidz fāzē strāvu — ķēdes režīms ir induktīvs (6.62. att.); ja X < 0, tad *φ* < 0 un strāva apsteidz fāzē spriegumu — režīms ir kapacitatīvs.

Ķēdes aktīvā jauda

*P = UI* cos *φ*,

reaktīvā jauda

*Q = UI* sin *φ*,

ķēdes pilnā jauda



***6.14. piemērs***. Spoles aktīvā pretestība *Rsp* = 8 Ω un induktīvā pretestība *xL* = 22 Ω. Virknē ar spoli ieslēgta aktīvā pretestība *R* = 4 Ω un kondensators ar kapacitatīvo pretestību *xC* = 6 Ω (6.64. att.). Aprēķināt: ķēdes strāvu; jaudas koeficientu; aktīvo, reaktīvo un pilno jaudu; sprieguma zudumu katrā pretestībā. Ķēde pieslēgta spriegumam *U* = 200 V. Uzzīmēt mērogā vektoru diagrammu. Kā jāizmaina kondensatora kapacitatīvā pretestība, lai ķēdē iestātos spriegumu rezonanse. Noteikt strāvu rezonanses gadījumā.

Atrisinājums.  
 1. Ķēdes pilnā pretestība

Ω

2. Ķēdes strāva

A

|  |
| --- |
| 6.64. att. Shēma 6.14. piemēram |

3. Ķēdes jaudas koeficients



no tabulas atrod, ka *cos*φ = 0,6atbilst φ = 53°10’.

4. Aktīvā jauda .

*P =I2(R + R)* = 102∙(22-6) = 1600 W

vai *P = UI cosφ* = 200∙10∙0,6 = 1200 W

5. Reaktīva jauda

*Q = I2(xL – xC)* = 10∙(22-6) = 1600 VAr

vai *Q = UI sinφ* = 200∙10∙0,8 = 1600 VAr

šeit *sinφ* = sin53010’ = 0,8.

Tā kā ķēdei induktīvs raksturs, jo *xL* > *x*C, tad *sinφ* ir pozitīva vērtība.

6. Pilnā jauda

*S = I2 ∙z* = 10∙20 = 2000 VA

vai *S = UI* = 200∙10 = 2000 VA

7. Sprieguma zudumi pretestības:

a) spoles aktīvā pretestībā

*Usp a = I∙Rsp* = 10∙8 = 80 V;

b) spoles induktīvā pretestībā

*UL = I∙xL* = 10∙22 = 220 V;

c) aktīvā pretestībā

*U = I∙R* = 10∙4 = 40 V;

d) kondensatora kapacitīvā pretestībā

*UC = I∙xC* = 10∙6 = 60 V.

8. Vektoru diagrammas konstruēšanai jāizvēlas strāvas un sprieguma mērogi. Ievērojot burtnīcas lapas izmērus, aprēķināto spriegumu un strāvas lielumus, dota gadījumā strāvai var izvēlēties mērogu *Mi* = 1 A/cm, bet spriegumam – *MU* = 20 V/cm.

Vektoru diagrammu sāk konstruēt, atliekot ķēdes kopējo lielumu. Tā kā virknes slēgumā caur visām pretestībām plūst viena un tā pati strāva, tad no punkta 0 horizontāli atliek strāvas vektoru *I* = 10 A. Tā garums ir *I/Mi* = 10/1 = 10 cm (6.65. att.). Paralēli šim vektoram pieņemtā mērogā konstruē sprieguma zuduma vektoru spoles aktīvā pretestība *Usp a*, tā garums *Usp a /MU* = 80/20 = 4 cm. No vektora *Usp a* gala, 900 leņķī pret strāvas vektoru *I* (strāva induktīvā pretestībā atpaliek no sprieguma par 900) zīmē sprieguma zuduma vektoru spoles induktīvā pretestībā *UL*; tā garums 220/20 = 11 cm. No vektora *UL* gala paralēli strāvas vektora virzienam zīmē sprieguma zuduma vektoru aktīvā pretestībā *Ua*; tā garums 40/20 = 2 cm. No vektora *Ua* gala. Vertikāli uz leju zīmē sprieguma zuduma vektoru kondensatora kapacitīvajā pretestībā *UC* (kapacitīvajā pretestībā strāva apsteidz spriegumu par 900); tā garums 60/20 = 3 cm. Šo četru vektoru ģeometriskā summa ir vienlīdzīga ķēdei pieslēgtam spriegumam U.



|  |  |
| --- | --- |
| ***a*** | ***b*** |

6.66. att. Vektoru diagramma (*a*) un topogrāfiskā diagramma (*b*)

No vektoru diagrammas redzams, ka strāvas vektors *I* atpaliek no sprieguma vektora *U* par leņķi *φ*. Šis leņķis ir pozitīvs (*φ* ≥ 0) un to atliek no strāvas vektora pozitīvā virzienā uz sprieguma vektoru *U*.

9. Lai ķēdē iestātos sprieguma rezonanse, jāievēro noteikums, lai *xL* = *xC*. Tātad dotā uzdevumā *xC* jāpalielina līdz vērtībai 22 Ω, tad

Ω

un strāva palielināsies līdz vērtībai

 A.

Atbildot uz uzdevuma jautājumiem, jāpieņem, ka tīkla spriegums *U* ir nemainīgs.

**6.17. SPRIEGUMU REZONANSE**

Ķēde, kas sastāv no virknē saslēgtas aktīvās pretestības, induk­tivitātes un kapacitātes (6.53. att.), reaktīvo pretestību vienlī­dzības gadījumā (*XL = XC*) iestājas spriegumu rezonanse

Tā kā *XL = ωL*, bet  tad rezonanses gadījuma  jeb *ω*2*LC* = 1.

Leņķiskā frekvence

 (6.70)

bet frekvence



Kontūrā bez zudumiem, pieslēdzot to līdzsprieguma avotam, rodas maiņstrāva ar pašsvārstību leņķisko frekvenci



Rezonanses gadījumā (*XL = XC*) tīkla frekvence *ω* sakrīt ar kontūra pašsvārstību frekvenci *ω*0, bet *X = XL – XC* = 0, t. i., reaktīvā pretestība ir vienlīdzīga nullei.

Rezonanses gadījumā jebkura reaktīvā ķēdes posma pretestību



pieņemts saukt par kontūra viļņu pretestību.

Ķēdes pilnā pretestība sprieguma rezonanses gadījuma



t. i., tā ir vienāda ar ķēdes aktīvo pretestību, tātad — vismazākā.

Strāva ķēdē (efektīvā vērtība) rezonanses gadījumā sasniedz maksimumu un sakrīt fāzē ar spriegumu. Tātad

 (6.71)

Rezonanses gadījumā induktīvais spriegums *UL = IXL* un kapacitatīvais spriegums *UC = =IX* ir vienādi pēc skaitliskās vērtī­bas, bet nobīdīti fāzē par pūsli no perioda; spriegums uz ķēdes spai­lēm *U* ir vienāds ar aktīvo spriegumu *U = IR* (6.66. un 6.67. att.). Pretestību diagramma redzama 6.68. attēlā.

Attiecība starp spriegumu uz ķēdes spailēm un spriegumu uz jebkura no reaktīvajiem posmiem ir



no kurienes

 (6.72)

Ja *Z*0 > *R*, tad spriegumi *UL* un *UC* ir  reizes lielāki par ķēdei pielikto spriegumu. Tātad spriegumu rezonanses gadījumā ķēdes atsevišķos posmos var rasties pārspriegumi.

|  |  |
| --- | --- |
| 6.66. att. Strāvas, sprieguma un jaudas grafiki spriegumu rezonanses gadījumā. | 6.67. att. Vektoru diagramma sprie­gumu  rezonanses gadījumā. |
| 6.68. att. Pretes­tību trīsstūris ga­dījumam, kad  *XL = XC*. |

Spriegumi *UL* un *UC* ir vienādi pēc skaitliskās vērtības un nobīdīti fāzē par pusi no perioda; tas nozīmē, ka jebkurā laika bridi momentānie spriegumi uz kapacitātes un induktivitātes ir vie­nādi pēc skaitliskās vērtības, bet ar pretējām zīmēm (*uL = - uC*), tātad jebkura laika momentā ir vienādas pēc skaitliskās vērtības, bet ar pretējam zīmēm momentānās jaudas ķēdes

reaktīvajos posmos:

*pL = - pC*.

Šī vienlīdzība nozīmē, ka magnētiskā tauka enerģija palielinās tikai, samazinoties elektriskā lauka enerģijai, un otrādi turpretī ģeneratora enerģija visu laiku tiek patērēti tikai enerģijas zudumiem aktīvajā pretestībā.

No teiktā izriet, ka spriegumu rezonansi var iegūt ķēdē ar pa­stāvīgām *L* un *С* vērtībām, t.i., ķēdē ar induktivitātes spoli un ar pastāvīgas kapacitātes kondensatoru, ja to pieslēdz spriegumam, kura frekvence ω = ω0. Bet no izteiksimies *ω*2*LC* = 1 izriet arī, ka rezonansi var iegūt, ja dota *ω* un C, bet ķēdes induktivitāti izvēlas L = 1/ *ω*2*C,* vai arī, ja dota *ω* un L, un, mainot kapacitāti, iegūstam C = 1/ *ω*2*L.*

**6.18. REZONANSES LĪKNES**

Nesazarotā ķēdē, kas sastāv no virknē saslēgtas *R, L* un *С* un pieslēgta spriegumam, kuram nemainīga efektīvā vērtība, bet mainīga frekvence, mainās visi lielumi: *XL, XC, Z, I, Ua, UL, UC, φ, Ρ, Q, S*. Līknes, kas attēlo strāvas spriegumu un fāzu nobīdes leņķu mainīšanos atkarībā no frekvences un ko sauc par rezonan­ses līknēm, redzamas 6.69. attēlā.

Induktivitātes reaktīvā pretestība *XL* = 2*πfL*, augot frekvencei no 0 līdz ∞, palielinās proporcionāli frekvencei no nulles, ja *f* = 0, līdz bezgalībai, ja *f* = ∞.

Kapacitātes reaktīvā pretestība  augot frekvencei no 0 līdz ∞, samazinās, jo tā ir apgriezti proporcionāla frek­vencei: ja *f* = 0 (līdzstrāva), pretestība ir bezgalīgi liela; pie *f = ∞* tā ir vienlīdzīga nullei.

Ķēdes reaktīvā pretestība *X = XL - X*C mainās no mīnus bez­galības, ja *f* = 0 (*X = XL – XC=*

*= –∞*), līdz nullei, ja *f = f*0 (*X = XL – XC =* 0), bet pēc tam, palielinoties frekvencei, pieaug līdz bezgalībai (*X = XL – XC = ∞*).

Tā, mainoties ķēdes reaktīvajai pretestībai, strāva  pieaug no nulles, ja

*f*  = 0, līdz maksimālajai vērtībai  ja *f = f*0, bet pēc tam, augot frekvencei līdz bezgalībai, samazinās līdz nullei (6.69. att.).

Spriegums uz aktīvās pretestības *Ua = IR* mainās proporcionāli strāvai, palielinoties no nulles, ja *f* = 0, līdz *Ua max = U*, ja *f = f*0, un pēc tam samazinoties atkal līdz nullei, ja *f = ∞.*

|  |  |
| --- | --- |
| 6.69. att. Rezonanses līknes atkarībā no  frekvences. | 6.70. att. Rezonanses līknes. |

Spriegums uz kapacitātes *UC = IXC*, ja *f* = 0, ir vienlīdzīgs spriegumam uz ķēdes spailēm, jo līdzstrāvas ķēdē kondensators nepārlādējas (strāva ir vienlīdzīga nullei, tātad vienlīdzīgi nullei ir arī *Ua = IR* un *UL = IXL*); tālāk spriegums uz kapacitātes pa­lielinās līdz noteiktai maksimālai vērtībai *UC max*, bet pēc tam sa­mazinās līdz nullei, ja *f* = ∞, jo šajā gadījumā *XC* = 0.

Spriegums uz induktivitātes *UL = IXL* mainās no nulles, ja *f* = 0, līdz noteiktai maksimālai vērtībai *UL max*, bet pēc tam samazinās līdz ķēdes spaiļu sprieguma vērtībai *UL* = 0, jo, kad *f = ∞,* strāva ir vienlīdzīga nullei un tātad vienlīdzīgi nullei arī *Ua = IR* un *UC* = *IXC* (*UL* nav vienlīdzīgs nullei, kaut arī strāva ir vienlīdzīga nullei, jo, kad *f* = ∞, arī *X* = ∞).

Kad frekvence *f = f*0, tad spriegumi uz induktivitātes un kapa­citātes ir vienādi: *UL = UC*.

Spriegumi *UC* un *UL* sasniedz savas maksimālas vērtības pie dažādām frekvencēm, kuras nesakrīt ar rezonanses frekvenci.

Fāzu nobīdes leņķis starp ķēdes spriegumu un strāvu (6.69. att.) vispirms pieaug no , ja *f* = 0 (), līdz nullei, ja *f = f*0 (), bet pēc tam no nulles līdz , ja *f* = ∞ ().

6.70. attēlā parādītas rezonanses līknes strāvai divās ķēdēs, kurās *U, L* un *С* ir viena un tā

pati, bet attiecībai  ir dažādas vērtības, proti,  un  (6.70. attēlā uz abscisu ass atliktas nevis frekvences *f* vērtības, bet gan attiecība *f*/*f*0, ja *f* < *f*0 un *f*0/*f*, ja *f* > *f*0; rezultāta sasniegta rezonanses līkņu si­metrija). No līknēm redzams, ka lielākām attiecības  vērtībām rezonanses līkne ir asāka nekā mazākām vērtībām.

Tas nozīmē, ka, jo mazāka ir ķēdes aktīvā pretestība, salīdzinot ar viļņu pretestību, jo krasāk izpaužas rezonanse.

Attiecību  sauc par kontūra labumu un apzīmē ar burtu *Q*.

***6.15. piemērs***. Ģeneratoram, kura spriegums *U* = 250 V un frekvence *f* = 50 Hz, pieslēgta ķēde, kas sastāv no virknē savienotas aktīvas pretestības *R* = 30 Ω, induktivitātes *L* = 382 mH un kapacitātes *C* = 40 μF.

Aprēķināt spriegumu rezo­nanses frekvenci *f*0. Rezonanses gadījumam aprēķināt lielumus *XL*, *XC*, *Z*, *I*, *UL*, *UC*, *WLm* un *WCm*.

Atrisinājums.



*XL* = 2*πf*0*L* = 2∙3,14∙41∙0,382 ≈ 98 Ω;







*UL = IXL* = 8,33∙98 = 817 V;

*UC = IXC* = 8,33∙98 = 817 V;

*WLm* = *I*2*L* = 8,332∙0,382 = 26,6 J;



**7. NODAĻA**

**SAZAROTĀS MAIŅSTRĀVU ĶĒDES**

**7.1. APRĒĶINS SAZAROTAI ĶĒDEI AR STRĀVU KOMPONETU METODI**

Maiņstrāvas patērētājus – spuldzes, elektrodzinējus, sildierīces u.c. slēdz paralēli pie kopējā tīkla sprieguma *U*, lai visiem patērētājiem nodrošinātu vienu un to pašu (nominālo) sprieguma vērtību.

Patērētāju paralēlā slēguma shēma ar diviem paralēliem zariem parādīta 7.1. attēlā. Patērētāji pieslēgti sinusoidālam maiņspriegumam *u = Um* sin *ωt*.

Patērētāju paralēlajam slēgumam parasti dots pievienotais spriegums *U* un paralēlo zaru pretestības, bet jāaprēķina zaru strāvas, ķēdes nesazarotā posma strāva *I* un ķēdes jaudas.

Strāva paralēlajos zaros:

*i*1 = *Im*1 sin (*ωt* – *φ*1)

un *i*2 = *Im*2 sin (*ωt* – *φ*2).

|  |  |
| --- | --- |
| 7.1. att. Sazarota ķēde ar aktīvām un reaktīvām pretestībām. | 7.2. att. Sazarotas ķēdes vektoru diagramma. |

Šo strāvu efektīvās vērtības atrod no Oma likuma izteiksmēm šiem zariem:

 un 

kur  un ir paralēlo zaru pilnās pre­testības.

Zaru jaudas koeficienti



kur *R*1 un *R*2 – paralēlo zaru aktīvās pretestības.

Lielumu  , kas ir apgriezts pilnajai pretestībai, sauc par pilno vadītspēju un apzīmē ar

burtu *Y*. Tātad

*I*1 = *UY*1; *I*2 = *UY*2.

Strāvas *I*1 un *I*2 nokavējās fāzē attiecībā pret pielikto sprie­gumu par leņķiem *φ*1 un *φ*2, kuru tangensi

 un 

Kopējā strāva nesazarotajā ķēdē

*i = i*1 *+ i*2 *= Im*1 sin (*ωt* – *φ*1) + *Im*2 sin (*ωt* – *φ*2) = *Im* sin (*ωt* – *φ*).

Šīs strāvas efektīvā vērtība *I* ir vienlīdzīga strāvu *I*1 un *I*2 efek­tīvo vērtību ģeometriskajai summai 

Ķēdes kopējo strāvu *I* atrod analītiski, izmantojot vai nu strāvu komponentes, vai zaru vadītspējas.

Paralēlā slēguma aprēķināšanai lietojot strāvu komponentes, pieņem, ka katra strāva *I* sastāv no divām komponentēm: no strāvas aktīvas komponentes *Ia*, kas sakrīt fāzē ar spriegumu, un no strāvas reaktīvās komponentes *Ir*, kura atpaliek fāzē no sprieguma par 900 (induktīvā strāva *IL*) vai apsteidz to par 900 (kapacitīvā strāva *IC*).

Tā ka paralēli slēgti patērētāji pievienoti vienam un tam pa­šam spriegumam *U*, tad, zīmējot sprieguma un strāvu vektoru diagrammu, vispirms atliek ķēdei pievienota sprieguma *U* vek­tora (parasti horizontālā virzienā pa labi).

Strāvas *I* vektora sadalīšana aktīvajā un reaktīvajā kompo­nentē parādīta 7.2. attēlā (φ > 0). Trīsstūri, kura katetes mērogā attēlo strāvas *I* aktīvo un reaktīvo komponenti, bet hipotenūza — strāvu *I*, sauc par strāvu trīsstūri. No tā

*Ia =* *I* cos *φ* un *Ir = I* sin *φ*, (7.1)

 (7.2)

Pēc izteiksmēm (7.1) aprēķina dotās ķēdes zaru strāvu aktī­vās komponentes

*Ia*1 = *I*1 cos *φ*1, *Ia*2 = *I*2 cos *φ*2

un reaktīvas komponentes

*Ir*1 = *I*1 sin *φ*1, *Ir*2 = *I*2 sin *φ*2.

Tā kā fāzu nobīdes leņķi, starp spriegumu *U* un paralēlo zaru strāvām atkarībā no zaros ieslēgtajiem ķēdes elementiem (*R, L, C*) var būt gan pozitīvi, gan negatīvi, tad zaru reaktīvajam strāvām ir induktīvs raksturs (*Ir = IL*) vai kapacitīvs raksturs (*Ir = IC*).

7.1. attēlā dotajai shēmai atbilstošā sprieguma un strāvu vektoru diagramma parādīta 7.2. attēla, bet topogrāfiskā – 7.4. att.

Paralēlo zaru strāvu aktīvo komponenšu *Iа*1 un *Iа*2 vektorus atliek *U* vektora virzienā. Pirmā un otrā zara induktīvās strāvas *IL*1 un *IL*2 atliek vertikāli uz leju (kapacitīvo strāvu atliek vertikāli uz augšu). Ķēdes nesazarota posma strāvu *I* mē­rogā attēlo strāvu summārais vektors, kas atpaliek fāze no sprie­guma *U* vektora par leņķi *φ*.

No vektoru diagrammas redzam, ka

a) kopējās strāvas *I* aktīvā komponente *Ia* vienāda ar atse­višķo zaru strāvu aktīvo komponenšu aritmētisko summu:

*Ia* = *Ia*1 + *Ia*2

vai vispārīgam gadījumam ar *n* paralēliem zariem

*Ia* = *Ia*1 + *Ia*2 + *Ia*3 + … + *Ian*; (7.3)

|  |  |
| --- | --- |
| 7.3. att. Strāvu trīsstūris | 7.4. att. Vektoru diagramma 7.1. attēlā parādītajai shēmai |

b) kopējās strāvas *I* reaktīvā komponente *Ir* vienāda ar at­sevišķo zaru strāvu reaktīvo komponenšu algebrisko summu

*Ir* = *Ir*1 + *Ir*2

vai vispārīgam gadījumam ar *n* paralēliem zariem

*Ir* = *Ir*1 + *Ir*2 + *Ir*3 + … + *Irn*.

In­duktīvās strāvas pieņem par pozitīvām, bet kapacitīvās — par negatīvām:

*Ir* = Σ*IL* – Σ*IC*, (7.4)

kur Σ*IL* — paralēlo zaru induktīvo strāvu aritmētiskā summa;

Σ*IC* — paralēlo zaru kapacitīvo strāvu aritmētiskā summa.

No strāvu trīsstūra (šī trīsstūra katetes apzīmētas ar pārtrauk­tām līnijām) kopējā strāva ķēdes nesazarotajā posmā



un jaudas koeficients ķēdes nesazarotajā posmā

 (7.5)

Ja Σ*IL* > Σ*IC*, tad kopējā strāva *I* atpaliek fāzē no sprieguma, un slodzei kopumā ir induktīvs raksturs (*φ* > 0).

Ja Σ*IL* < Σ*IC*, tad kopējā strāva *I* apsteidz spriegumu, un slodzei kopumā ir kapacitīvs raksturs (*φ* < 0).

Izteiksmes (7.3) abas puses pareizinot ar spriegumu *U*, dabū visa paralēlā slēguma aktīvās jaudas *Ρ* izteiksmi:

*Ρ = Ρ*1 + *Ρ*2 + *Ρ*3 + ... + *Ρn*, (7.6)

t. i., paralēli slēgtu patērētāju kopējā patērētā aktīvā jauda ir vienāda ar atsevišķo zaru aktīvo jaudu aritmētisko summu.

Izteiksmes (7.4) abas puses pareizinot ar spriegumu *U*, iegūst paralēli slēgto patērētāju reaktīvās jaudas izteiksmi

*Q =* Σ*QL* – Σ*QC*, (7.7)

kas rāda, ka kopējā reaktīvā jauda ir atsevišķo zaru reaktīvo jaudu algebriskā summa; induktīvo jaudu *QL* pieņem par pozi­tīvu, bet kapacitīvo jaudu *QC* — par negatīvu. Reizē ar to ir no­sacīti pieņemts, ka induktivitāte *L* no tīkla uzņem, patērē reak­tīvo jaudu ( + *QL*), bet kapacitāte *С* tīklam atdod, tātad ģenerē reaktīvo jaudu ( — *QC*). Ķēdes pilno jaudu atrod pēc izteiksmes .

Lai aprēķinātu *I*, var arī uzzīmēt vektoru diagrammu (7.2. att.), no kā izriet, ka

 (7.8)

Strāva nesazarotajā ķēdes daļā atpaliek no sprieguma par leņķi *φ*, kura tangenss



***7.1. piemērs***. Maiņsprieguma avotam ar spriegumu *U* = 220 V pieslēgta ķēde ar 3 paralēliem zariem (7.5. att.). Dotie lielumi: *R*11 = 5 Ω; *R*12 = 15 Ω; *R*2 = 4 Ω; *X*L2 = 3 Ω; *R*3 = 6 Ω; *X*C3 = 8 Ω. Aprēķināt visas strāvas, patērēto aktīvo un reaktīvo jaudu katrā zarā un visā ķēdē ar stāvu komponentu metodi; Mērogā konstruēt vektoru diagrammu.

Atrisinājums.

Paralēlo zaru pilnās pretestības







|  |  |
| --- | --- |
| ***a*** | ***b*** |

7.5. att. Patērētāju paralēlā slēguma shēma (*a*) un aizvietošanas shēma (*b*)

Paralēlo zaru strāvas:



Paralēlo zaru fāžu nobīdes leņķi:





Paralēlo zaru strāvu aktīvās un reaktīvās komponentes:

*I*a1 = *I*1· cos*φ*1 = 11 · 1 = 11 A;  *I*L1 = *I*1· sin*φ*1 = 11 · 0 = 0 A;

*I*a2 = *I*2· cos*φ*2 = 44 · 0,8 = 35,2 A;  *I*L2 = *I*2· sin*φ*2 = 44 · 0,6 = 26,4 A;

*I*a3 = *I*3· cos*φ*3 = 22 · 0,6 = 13,2 A;  *I*C3 = *I*3· sin*φ*3 = 22 · (-0,8) = -17,6 A;

Paralēlo zaru strāvas:



***Ķēdes kopējā strāva***. Kopējas strāvas *I* aktīvā komponente *Ia* vienāda ar atsevišķo zaru strāvu aktīvo komponenšu aritmētisko summu

*Ia = Ia*1 *+ Ia*2 *+ Ia*3 = 11 + 35,2 + 13,2 = 59,4 A.

Kopējas strāvas *I* reaktīvā komponente *Ir* vienāda ar atsevišķo zaru strāvu reaktīvo komponenšu algebrisko summu; induktīvās strāvas pieņem par pozitīvām, bet kapacitīvās – par negatīvām

*Ir = IL*1 *+ IL*2 *– IC*3 = 0 + 26,4 – 17,6 = 8,8 A.

Ķēdes kopēja strāva vienāda ar atsevišķo zaru kopējās aktīvās un reaktīvās strāvas ģeometrisko summu



Ķēdes fāžu nobīdes leņķis:



Ķēdes atsevišķās jaudas

*P* = *U* · *I* · cos *φ* = 220 · 60 · 0,99 = 13068 W.

*Q* = *U* · *I* · sin *φ* = 220 · 60 · 0,146 = 1927,2 VAr.

*S* = *U* · *I* = 220 · 60 = 13200 VA.

Konstruē vektoru diagrammu (7.6. att.). Tā kā visiem paralēliem zariem paralēlajā slēgumā ir pieslēgts viens un tas pats spriegums, tad zaru strāvas ir dažādās fāzēs pret spriegumu un ķēdes kopējā strāva ir vienāda ar paralēlo zaru strāvu vektoriālo (ģeometrisko) summu 

Jāatceras, ka

* aktīvā strāva (*I*a) sakrīt fāzē ar spriegumu, *φ* = 00;
* induktīvā strāva (*I*L) atpaliek fāzē no sprieguma par 900, *φ* = 900;
* kapacitīva strāva (*I*C) apsteidz fāzē spriegumu par 900, *φ* = 900.

Izvēlas sprieguma mērogu *MU* = 20 V/cm, strāvas mērogu *MI* = 10 A/cm un aprēķina sprieguma un strāvas vektoru garumus:



|  |
| --- |
|  |

7.6. att. Vektoru diagramma

Topogrāfisko diagrammu sāk konstruēt vispirms atliekot sprieguma vektoru skaitlisko vērtību *U* = 11 cm horizontālā virzienā. Paralēlo zaru aktīvo strāvu vektorus *Ī*a1 = 1,1 cm, *Ī*a2 = 3,52 cm, *Ī*a3 = =1,31 cm atliek vektora *U* virzienā. Otrā zara induktīvās strāvas vektoru *Ī*L2 = 2,64 cm atliek vertikāli uz leju, bet trešā zara kapacitīvās strāvas vektoru *Ī*C3 = 1,76 cm – vertikāli uz augšu. Ķēdes kopējo strāvu *I* mērogā attēlo strāvu summārais vektors *Ī*, kas atpaliek

fāzē no sprieguma vektora *U* par leņķi *φ* = 8,40 (skat. 7.7. att.).

No iegūtā strāvu trīsstūra (7.6. att.) var noteikt:

* aktīvo strāvu *I*a = *I* · cos *φ*;
* reaktīvo strāvu *I*r = *I*L – *I*C = *I* · sin *φ*;
* kopējo (pilno) strāvu 

|  |
| --- |
|  |

7.7. att. Topogrāfiskā diagramma

**7.2. VADĪTSPĒJU METODE**

Aprēķinot maiņstrāvas ķēdes ar paralēli slēgtiem patērētājiem, ļoti izdevīgi operēt nevis ar atsevišķo zaru pretestībām, bet ar šo zaru vadītspējām, jo tad kopējās strāvas aprēķins kļūst ievēro­jami vienkāršāks. Strāvas komponentes aprēķināšanas metode ir sarežģīta, ja paralēlo zaru ir daudz; tāpēc, aprēķinot sazarotu ķēdi, kurai daudz zaru, izmanto vadītspēju metodi. Lietojot šo metodi, strāvu katra zarā nosacīti uzlūko par divu komponentu (aktīvās un reaktīvas strāvas) summu.

Pirmās strāvas aktīvo komponenti *Ia*l izvēlas vienādā fāzē ar spriegumu (7.4. att.):

 (7.9)

Lielumu

 (7.10)

sauc par pirmā zara aktīvo vadītspēju.

Zaram ar R un С vai zaram ar R, L un С aktīvo vadītspēju ap­rēķina pēc tās pašas formulas (7.10). Otrās strāvas aktīvā komponente

*Ia*2 = *I*2 cos *φ*2 = *UG*2,

kur  — otrā zara aktīvā vadītspēja.

Strāvas reaktīvā komponente *Ir* zarā ar *R* un *L* nokavējas fāze attiecībā pret spriegumu par ¼ perioda, zara ar R un С — ap­steidz fāzē spriegumu par ¼ perioda, bet zara ar trim elementiem (*R, L* un *C*) — nokavējas par ¼ perioda, ja *XL > XC*, un apsteidz par ¼ perioda, ja *XL < XC* .

Pirmās strāvas reaktīvā komponente

 (7.11)

kur lielumu



sauc par reaktīvo vadītspēju. 7.1. attēlā parādītajai shēmai reaktīvā vadītspēja ir induktīva:

 (7.12)

Otrās strāvas reaktīvā komponente (7.1. att.)

*Ir*2 = *I*2 sin *φ*2 = *UB*2,

kur



Starp strāvām katrā zarā un to komponentēm pastāv tāda pati sakarība kā starp taisnleņķa trijstūra — strāvu trijstūra malām (7.4. att.):



(7.13)



Salīdzinot formulas *I*1 = *UY*1; *I*2 = *UY*2 un (5.85), viegli secināt, ka

  (7.14)

t.i., starp ķēdes aktīvo, reaktīvo un pilno vadītspēju pastāv tāda pati sakarība kā starp taisnleņķa trijstūra — vadītspēju trīsstūra malām (7.8. att.). Vadītspēju trīsstūri var iegūt no strāvu trijstūra, samazinot tā malas *U* reizes.

Fāzu nobīdes leņķus starp spriegumiem un strāvām zaros var aprēķināt pēc formulām

 un  (7.15)

Kopējās strāvas aktīvā komponente

*Ia = Ia*1 + *Ia*2 = *UG*1 + *UG*2 = *U*(*G*1 + *G*2) = =*UG*,

kur *G =* *G*1 + *G*2 — visas ķēdes aktīvā vadītspēja.

|  |  |
| --- | --- |
|  | 7.8. att. Vadītspēju trīsstūris. |

Kopējās strāvas reaktīvā komponente

*Ir = Ir*1 + *Ir*2 = *UB*1 + *UB*2 = *U*(*B*1 + *B*2) = *UB;*

šeit *B* = *B*1 + *B*2 = *BL*1 + *BL*2.

Kopējā strāva

 (7.16)

šeit — visas ķēdes pilnā vadītspēja (7.1. att.).

Strāva *I* nokavējas fāzē attiecībā pret spriegumu *U* par leņķi *φ*, kura tangenss

 (7.17)

ķēdes aktīvā jauda

*P = U*2*G*, (7.18)

ķēdes reaktīvā jauda

*Q =* *U*2*B,* (7.19)

ķēdes pilnā jauda

 (7.20)

Ķēdei ar *R* un *С* leņķis φ < 0, *X*1 = - *XC*1 < 0 un tātad *B*1 < 0, t. i., reaktīvā vadītspēja, tāpat kā reaktīvā pretestība, — algebrisks lielums. Strāvas reaktīvā komponente zaram ar *R* un *С* arī ir negatīva.

Kapacitatīvā vadītspēja

 (7.21)

Zaram ar *R,* *L* un *С*

 (7.22)

Ja vienā no zariem, piemēram, pirmajā, ieslēgta nevis induk­tivitāte, bet gan kapacitāte, tad *B*1 = - *BC*1 < 0 un *B = B*1 + *B*2 = - *BC*1 + *BL*2.

Zarā, kuram ir *R*, *L* un *C*, reaktīvā vadītspēja *B*1 > 0, ja *XL* > *XC*, un *B*1 < 0, ja *XL < XC*.

***7.2. piemērs***. Ķēde, kas sastāv no diviem paralēliem zariem (7.1. att.), kuru parametri *R*1 = 1 Ω, *XL*1 = 3 Ω, *R*2 == 3 Ω un *XL*2 = 2Ω, pieslēgta 115 V sprieguma tīklam.

Aprēķināt: 1) paralēlo zaru strāvas *I*1 un *I*2 un kopējo strāvu *I*; 2) strāvu fāzes nobīdes leņķus attiecībā pret tīkla spriegumu; 3) ķēdes aktīvo un re­aktīvo jaudu.

Pirmā zara aktīvā vadītspēja



Pirmā zara reaktīvā vadītspēja



Pirmā zara pilnā vadītspēja



Strāva pirmajā zara

*I*1 = *UY*1 = 115∙0,316 = 36,4 A.



*φ*1 = 71030'

Otrā zara aktīvā vadītspēja



Otrā zara reaktīvā vadītspēja



Otrā zara pilnā vadītspēja



Strāva otrajā zarā

*I*2 = *UY*2 = 115∙0,278 = 32,0 A.



*φ*2 = 33050'

Visas ķēdes aktīvā vadītspēja

*G = G*1 + *G*2 = 0,1 + 0,231 = 0,331 S.

Visas ķēdes reaktīvā vadītspēja

*B = B*1 + *B*2 = 0,3 + 0,154 = 0,454 S.

Visas ķēdes pilnā vadītspēja



Strāva nesazarotajā ķēdes daļā

*I = UY* = 115∙0,55 = 63,5 A.



*φ* = 53050'

Ķēdes reaktīvā jauda

*Q = U*2*B* = 1152∙0,454 = 6000 Var = 6,0 kVAr.

***7.3. piemērs***. Maiņsprieguma avotam ar spriegumu *U* = 220 V pieslēgta ķēde ar 3 paralēliem zariem (7.5. att.). Dotie lielumi: *R*11 = 5 Ω; *R*12 = 15 Ω; *R*2 = 4 Ω; *X*L2 = 3 Ω; *R*3 = 6 Ω; *X*C3 = 8 Ω. Aprēķināt visas strāvas, patērēto aktīvo un reaktīvo jaudu katrā zarā un visā ķēdē ar vadītspēju metodi. Mērogā konstruēt vektoru diagrammu.

*Uzdevuma risinājums ar vadītspēju metodi.*

Paralēlo zaru pilnās pretestības







Aprēķinot maiņstrāvas ķēdes ar paralēli slēgtiem patērētājiem, izdevīgāk ir operēt nevis ar atsevišķo zaru pretestībām, bet ar zaru vadītspējām.

Pirmā zara aktīvās vadītspējas



Pirmā zara reaktīvās vadītspējas



Pirmā zara pilnā vadītspēja



Otrā paralēla zara aktīvā vadītspēja



Otrā paralēla zara induktīvi reaktīvā vadītspēja



Otrā paralēla zara pilnā vadītspēja



Trešā paralēla zara aktīvā vadītspēja



Trešā paralēla zara kapacitīvi reaktīvā vadītspēja



Trešā paralēla zara pilnā vadītspēja



Paralēlo zaru strāvas:



Paralēlo zaru fāžu nobīdes leņķi:







Paralēlo zaru strāvu aktīvās un reaktīvās komponentes:

*I*a1 =*U·*(*G*11 + *G*12) = 220·(0,0125 + 0,0375) = 220·0,05 = 11 A;

*I*a2 =*U* ·*G*2 = 220·0,16 = 35,2 A; *I*a3 =*U* ·*G*3 = 220·0,06 = 13,2 A;

*I*L1 =*U* ·*B*L1 = 220·0 = 0 A; *I*L2 =*U* ·*B*L2 = 220·0,12 = 26,4 A;

*I*C3 =*U* ·*B*C3 = 220·(-0,08) = -17,6 A.

Paralēlo zaru strāvas:





*Ķēdes kopējā strāva*. Kopējas strāvas *I* aktīvā komponente *Ia* vienāda ar atsevišķo zaru strāvu aktīvo komponenšu aritmētisko summu

*Ia = Ia*1 *+ Ia*2 *+ Ia*3 = 11 + 35,2 + 13,2 = 59,4 A.

Kopējas strāvas *I* reaktīvā komponente *Ir* vienāda ar atsevišķo zaru strāvu reaktīvo komponenšu algebrisko summu; induktīvās strāvas pieņem par pozitīvām, bet kapacitīvās – par negatīvām

*Ir = IL*1 *+ IL*2 *– IC*3 = 0 + 26,4 – 17,6 = 8,8 A.

Ķēdes kopēja strāva vienāda ar atsevišķo zaru kopējās aktīvās un reaktīvās strāvas ģeometrisko summu



Paralēlā slēguma ekvivalentā vadītspēja vienāda ar atsevišķo paralēlo zaru aktīvo vadītspēju aritmētisko summu

*G* = *G*11 *+ G*12 *+ G*2 *+ G*3 = 0,0125 + 0,0375 + 0,16 + 0,06 = 0,27 S.

Ekvivalentā reaktīvā vadītspēja vienāda ar reaktīvo vadītspēju algebrisko summu

*B = B*L1 *+ B*L2 *– BC3* = 0 + 0,12 – 0,08 = 0,04 S.

Tad patērētāju paralēla slēguma ekvivalentā pilnā vadītspēja



un pilnā strāva



Ķēdes fāžu nobīdes leņķis:



Ķēdes atsevišķās jaudas

*P = U*2·*G* = 2202·0,27 = 13068 W.

*Q = U*2·*B* = 2202·0,04 = 1936 VAr.

*S = U*2·*Y* = 2202·0,273 = 13213 VA.

Vektoru diagramma un topogrāfiskā diagramma (sk. 7.6. att. un 7.7. att.).

No strāvu trīsstūra (7.6. att.) var noteikt:

* aktīvo strāvu *I*a = *I* · cos *φ*;
* reaktīvo strāvu *I*r = *I*L – *I*C = *I* · sin *φ*;
* kopējo (pilno) strāvu 

Izdalot pilnās strāvas izteiksmi ar spriegumu *U*, iegūst



jo 

Pilnās vadītspējas vienādojumam atbilst vadītspēju trīsstūris (7.9. att.), kas līdzīgs strāvu trīsstūrim.

No iegūtā vadītspējas trīsstūra var noteikt:

* aktīvo vadītspēju G = Y · cos φ;
* reaktīvo vadītspēju *B = BL – BC = Y ·* sin *φ*.

Pareizinot pilnās vadītspējas izteiksmi ar sprieguma kvadrātu *U*2, iegūst



jo *S = U*2*·Y; P = U*2*·G; Q = U*2*·B = U*2*(BL – BC).*

|  |  |
| --- | --- |
| 7.9. att. Vadītspēju trīsstūris | 7.10. att. Jaudu trīsstūris |

Pilnās jaudas vienādojumam atbilst jaudu trīsstūris (7.10. att.), kas līdzīgs vadītspēju trīsstūrim.

No iegūtā jauda trīsstūra var noteikt:

* aktīvo jaudu *P = S ·* cos *φ*;
* reaktīvo jaudu *Q = QL – QC = S·* sin *φ*.

**7.3. PARALĒLSLĒGUMA VISPĀRĪGS GADĪJUMS**

Ja ķēde sastāv no vairākiem paralēliem zariem, no kuriem daži satur aktīvo pretestību un induktivitāti, bet citi — aktīvo pretes­tību un kapacitāti vai arī aktīvo pretestību, induktivitāti un kapacitāti, tad zaru strāvu un kopējās strāvas aktīvas un reaktīvas kom­ponentes aprēķināmas analoģiski iepriekšējam.

Tātad vispārīgā gadījumā kopējas strāvas aktīva komponente ir vienlīdzīga atsevišķo zaru strāvu aktīvo komponentu aritmētis­kajai summai:

*Ia = Ia*1 + *Ia*2 + *Ia*3 + … = Σ*Ia* = *UG*,

kur *G = G*1 + *G*2 + *G*3 + … .

Kopējās strāvas reaktīvā komponente ir vienlīdzīga atsevišķo zaru strāvu reaktīvo komponentu algebriskajai summai:

*Ir = Ir*1 *+ Ir*2 *+ Ir*3 *+ … =* Σ*Ir = UB,*

kur *B = B*1 *+ B*2 *+ B3 + … .*

Kopējā strāva



Fāzu nobīdes leņķi starp spriegumu un kopējo strāvu aprēķina pēc izteiksmes



Ja tg *φ* ir pozitīvs, tad strāva nokavējas fāzē attiecībā pret spriegumu par leņķi *φ*, bet ja negatīvs — strāva apsteidz fāze spriegumu.

**7.4. MAIŅSTRĀVAS ĶĒDES JAUKTAIS SLĒGUMS**

Ja dots spriegums aiz ķēdes spailēm *U* un posmu pretestības (7.11. att.), tad strāvas un spriegumus šāda jaukta pretestību slēguma atsevišķos posmos var aprēķināt ar šādu paņēmienu.

Ķēdes sazaroto daļu, kas sastāv no diviem (vai vairākiem) paralēliem zariem, aizstāj ar

ekvivalentu nesazarotu posmu (7.12. att.)

Lai atrastu sazarotās daļas pretestību, vispirms aprēķina zaru aktīvās un reaktīvās vadītspējas:



|  |  |
| --- | --- |
| 7.11. att. Ķēde ar pretestību jauktu slēgumu. | 7.12. att. Ķēde, kas ekvivalenta 7.11. attēlā ķēdei. |



pēc tam sazarotās daļas aktīvo, reaktīvo un pilno vadītspēju:

*G*12 = *G*1 + *G*2; *B*12 = *B*1 + *B*2 = *B*L1 + *B*L2;



tālāk aprēķina tās pilno pretestību un, beidzot, sazarotās daļas ekvivalento aktīvo un reaktīvo pretestību, pārveidojot formulu (7.10) un (7.12):

 un 

Tātad ķēdi, kas parādīta 7.11. attēlā, aizstāj ar nesazarotu ķēdi, kurā ir divas pretestības Z3 un Z12 (7.12. att.). Ja vienā no paralēlajiem zariem, piemēram, otrajā, induktivitātes vietā ir ieslēgta kapacitāte, tad atkarībā no tā, kura no vadītspējām (*BL*1 vai *BC*2) ir lielāka, kopējā vadītspēja *B*12 = *B*1 + *B*2 = *BL*1 — *BC*2 var būt pozitīva vai negatīva. Atbilstoši tam arī *X*12 ir pozitīva vai negatīva, t. i., induktivitāte vai kapacitāte.

Tālāk šo nesazaroto ķēdi aizstāj ar ekvivalentu ķēdi, kurā ir viena pretestība (7.13. att.).

Šīs ķēdes aktīvā pretestība *R* = *R*3 + *R*12, reaktīvā pretestība *X* = *X*3 + *X*12 un pilnā pretestība 

Strāva šajā ķēdē un tātad arī strāva pretestībā *R*3



Šī strāva ir nobīdīta fāzē attiecībā pret ķēdes spriegumu par leņķi *φ*, ko aprēķina pēc izteiksmes



Spriegums uz pretestības Z3

*U*3 = *IZ*3.

Fāzu nobīdes leņķi starp spriegumu *U*3 un strāvu *I* aprēķina pēc formulas



Spriegums uz pretestības *Z*12 jeb (kas ir tas pats) uz ķēdes sa­zarotā posma *U*1 = *U*2 = *U*12 = =*IZ*12.

Fāzu nobīdes leņķi starp spriegumu *U*12 un strāvu *I* aprēķina pēc formulas



Pirmā paralēlā zara strāva



Fāzu nobīdes leņķis starp šo strāvu un spriegumu



Analoģiski otrā paralēlajā zarā



Ķēdes fiktīvā, reaktīvā un pilnā jauda:

*P = UI* cos*φ*; *Q = UI* sin*φ*; *S= UI*.

Paralēlo zaru aktīvās jaudas:

*P*1 *= U*1*I*1 cos*φ*1; *P*2 *= U*2*I*2 cos*φ*2.

Kad aprēķināti visi šie lielumi, konstruējam vektoru diagrammu (7.14. att.).

Izvēlamies strāvas mērogu un atliekam patvaļīga virziena (7.14. attēlā izvēlēts horizontālais virziens) strāvas *I*3 vektoru (7.14. attēlā pieņemts *i*3 = *I*3*m* sin *ωt* un laika skaitīšanas sā­kums sakrīt ar strāvas *i*3 sinusoīdas sākumu).

|  |  |
| --- | --- |
| 7.13. att. Ķēde, kas ekvivalenta 7.11. attēlā  parādītajai ķēdei. | 7.14. att. 7.11. attēlā parādītās ķēdes vektoru  diagramma. |

Tālāk izvēlamies mērogu spriegumam un leņķī *φ*12 pret strāvas *I*3 vektoru atliekami sprieguma *U*12 vektoru tā, lai vektoru sākumi sakristu. Tajā pašā mērogā leņķī *φ*3 pret strāvas *I*3 vektoru vel­kam sprieguma *U*3 vektoru tā, lai tā sākums sakristu ar sprieguma *U*12 vektora galu. Savienojot sprieguma *U*3 vektora galu ar vektora *U*12 sākumu, dabūjam ķēdes spaiļu sprieguma *U* vektoru. Ar strāvas *I = I*3 vektoru tas veido leņķi *φ*. Beidzot uzzīmējam iepriekš iz­vēlētajā mērogā strāvu *I*1 un *I*2 vektorus, velkot tos leņķos *φ*1, *φ*2 un pret sprieguma *U*12 vektoru.

***8.4. piemērs***. Aprēķināt strāvas un spriegumus atsevišķos ķēdes posmos (7.11. att.), ja zināmi: *U* = 120 V; *R*1 == 0,6 Ω; *X*1 = 0,8 Ω; *R*2 = l,2 Ω; *X*3 = 0,5 Ω; *R*3 = 0,15 Ω; *X*3 = 0,42 Ω.

Atrisinājums.

**

**





*G*12 = *G*1 + *G*2 = 0,6 + 0,71 = 1,31 S;

*B*12 = *B*1 + *B*2 = 0,8 + 0,29 = 1,09 S;









*R = R*3 + *R*12 = 0,15 + 0,45 = 0,6 Ω;

*X = X*3 + *X*12 = 0,42 + 0,38 = 0,8 Ω;











*U*1 = *U*2 = *U*12 = *IZ*12 = 120∙0,59 = 70,5 V;



*φ*12 = 400;









**7.5. KONDENSATORS AR ZUDUMIEM**

Pieslēgsim maiņspriegumam kondensatoru ar cietu vai šķidru dielektriķi. Atšķirībā no kondensatora ar gaisa dielektriķi konden­satorā ar cietu vai šķidru dielektriķi elektriskā enerģija daļēji pār­veidojas siltuma enerģijā, tāpēc ka dielektriķī rodas zudumi (kon­densators ar zudumiem).

Pieslēdzot kondensatoram ar zudumiem maiņsprieguma, strāva apsteidz fāzē spriegumu par leņķi *φ*, kas mazāks nekā 

Leņķi  sauc par zudumu 1eņķi; tas ir viens no kondensatora parametriem.

Aprēķinos kondensatoru ar zudumiem var aizstāt ar virknes vai paralēlo ekvivalento shēmu.

Virknes shēma (7.15. att.) sastāv no kondensatora bez zudu­miem *C*1 un virknē, ar to savienotas aktīvas pretestības *R*1. Abām shēmām jābūt ekvivalentām: ja uz otrās ķēdes spailēm ir sprie­gums, kas vienlīdzīgs spriegumam uz kondensatora ar zudumiem, tad strāvai pēc lieluma un fāzes jābūt vienlīdzīgai ar strāvu kon­densatorā ar zudumiem; tātad arī jaudai, kas attīstās shēmā, jā­būt vienādai ar jaudu atbilstošajā kondensatorā ar zudumiem. 7.16. attēlā redzama šīs shēmas vektoru diagramma.

Jauda, kas attīstās ķēdē,

*P = UI* cos *φ* = *UaI* = *I*2*R*1.

Bet no vektoru diagrammas izriet, ka

*Ua = IR*1 = *IXC*1 tg *δ* un *R*1 = *XC*1 tg *δ* = 

Ievietojot pēdējo izteiksmi jaudas formulā, atrodam

*P = UI* cos *φ* = 

Izmērījot spriegumu, strāvu un jaudu, var aprēķināt pilno aktīvo un reaktīvo pretestību:

 un 

|  |  |
| --- | --- |
|  | 7.16. att. 7.15. attēlā parādītas shēmas vektoru diagramma |
| 7.15. att. Pieņemtais apzīmējums kondensatoram ar zudumiem un virknes ekvivalentā shēma. |

no kurienes aprēķinām kapacitāti:

 (7.23)

Paralēlā ekvivalentā shēma (7.17. att.) sastāv no konden­satora bez zudumiem *C*2 un paralēli ieslēgtas aktīvās pretestības *R*2. Arī šai shēmai jābūt ekvivalentai. 7.18. attēlā redzama šīs shēmas vektoru diagramma

Jauda, kas attīstās šajā ķēde,



Bet no vektoru diagrammas izriet, ka



un



|  |  |
| --- | --- |
|  | 7.18. att. 7.17. attēlā parādītas shē­mas vektoru diagramma. |
| 7.17. att. Pieņemtais apzīmējums kondensa­toram ar zudumiem un paralēla ekvivalenta shēma. |

Ievietojot šo izteiksmi jaudas formulā, atrodam

*P = UI* cos *φ* = *U*2*ωC*2 *tg δ.*

Izmērījot spriegumu, strāvu un jaudu, var atrast ķēdes pilno, aktīvo un reaktīvo vadītspēju:

 un 

(zaram ar kapacitāti reaktīvā vadītspēja ir negatīva), no kurienes aprēķinām kapacitāti

 (7.24)

***7.5. piemērs***. Aprēķināt pretestību un kapacitāti paralēlai ekvivalentai shē­mai (7.17. att.), ja kondensatoram ar zudumiem iegūti šādi dati: strāva *I* = 1 A, sprie­gums *U* =100 V, bet jauda Ρ = 10 W.

Atrisinājums.

Pretestība



Kapacitāte



**7.6. STRĀVU REZONANSE**

Aplūkosim ķēdi, kura sastāv no diviem paralēliem zariem, no kuriem viens zars satur ak­tīvo pretestību un induktivitāti, bet otrs — aktīvo pretestībai un kapacitāti (7.19. att.). 7.20. attēlā parādīta ķēdes vek­toru diagramma. Strāva ķēdes nesazarotajā daļā

*I = UY*,

|  |  |
| --- | --- |
|  | 7.19. att. Sazarota ķēde ar aktīvām pretestībām, induktivitāti un kapa­citāti. |

kur



Zaru vadītspēju algebriskās summas *B = B*1 + *B*2 = *BL — BC* vieta var rakstīt vērtību *BL* un *BC* starpību, tāpēc ka nogriežņi, kas attēlo *BL* =  un *BC* =  diagrammas (7.21., 7.22. un 7.23. att.), vilkti pretējos virzienos.

Tātad fāzu nobīdes leņķis starp strāvu un spriegumu ir



Ja *BL* > *BC*, tad leņķis *φ* ir pozitīvs un strāva atpaliek fāzē no sprieguma (7.20. att.).

Turpretī, ja *BL* < *BC*, leņķis *φ* ir negatīvs un strāva apsteidz fāzē spriegumu (7.22. att.).

Beidzot, ja *BL* = *BC*, tad tg *φ* = 0 un leņķis *φ* = 0 (7.24. att.). Šajā gadījumā paralēlo zaru

strāvu reaktīvās komponentes *Ir*1 = *UBL* un  ir vienādas pēc skaitliskās vērtības. Tā kā reaktīvās komponentes ir nobīdītas fāzē viena pret otru par pusperiodu (180°), tad tās viena otru kompensē un ģeneratora strāva ir tīri aktīva, *I = Ia = UG = U*(*G*1 + *G*2). Šī strāva var būt vā­jāka par zaru strāvu reaktīvajām komponentēm, ja pretestības *R*1 un *R*2 ir mazākas par *XL* un *XC*.

|  |  |
| --- | --- |
| 7.20. att. 7.19. attēlā parādītās ķēdes vektoru  diagramma gadījumam, kad *BL* > *BC*. | 7.21. att. 7.19. attēlā parādītās ķēdes va­dītspēju daudzstūris gadī­jumam, kad *BL* > *BC*, |

|  |  |
| --- | --- |
| 7.22. att. 7.19. attēlā parādītās ķēdes vektoru  dia­gramma gadījumam, kad *BL* < *BC*. | 7.23. att. 7.19. attēlā parādītās ķēdes va­dītspēju daudzstūris gadī­jumam, kad *BL* < *BC* . |

|  |  |
| --- | --- |
| 7.24. att. 7.19. attēlā parādītās ķēdes vektoru  dia­gramma gadījumam, kad *BL* = *BC* | 7.25. att. 7.19. attēlā parādītās ķēdes va­dītspēju daudzstūris ga­dījumam, kad *BL* = *BC*. |

Gadījumā, kad *BL = BC* jeb *B = B*1 + *B*2 = 0, ķēdē iestājas strāvu rezonanse.

Ievērojot, ka



un



rezonanses nosacījumu var izteikt šādi:

 (7.25)

Rezonanses gadījumā reaktīvās jaudas *QL* un *QC* skaitliski ir vienādas, jo

*QL* =*U*2*BL* un *QC = U*2*BC*

jeb

*Q*1 = *U*2*B*1 > 0 un *Q*2 = *U*2*B*2 < 0

un summārā reaktīvā jauda

*Q = Q*1 + *Q*2 = *U*2(*B*1 + *B*2) = 0. (7.26)

Ģenerators pievada ķēdei tikai aktīvo jaudu.

Enerģētiskais process strāvu rezonanses gadījumā stipri atšķi­ras no šī procesa sprieguma rezonanses gadījumā. Aplūkojam speciālgadījumu, kad strāva *i*1 atpaliek fāzē no sprieguma *u* par leņķi , bet strāva *i*2 apsteidz fāzē spriegumu *u* par leņķi . Šajā ga­dījumā spriegums uz kondensatora spailēm *uC* sakrīt fāzē ar strāvu *i*1 (7.26. att.). Enerģija magnētiskajā un elektriskajā laukā uz­krājas vienā laikā. Laika intervālā *t*1 enerģija, ko pievada ģenera­tors, daļēji pārveidojas siltumā un izkliedējas pretestības *R*1 un *R*2 un daļēji uzkrājas magnētiskajā un elektriskajā laukā (strāva spolē *i*1 un spriegums uz kondensatora *uC* pieaug).

Laika intervālā *t*2 enerģija pārveidojas siltumā pretestības *R*1 un *R*2, samazinoties magnētiskajā un elektriskajā laukā uzkrātajai enerģijai, kā arī patērējot to enerģiju, ko pievada ģenerators. To­mēr visumā strāvu rezonanses gadījumā ķēdei ir tādas īpašības, kādas ir ķēdei, kurā ir tikai aktīvā pretestība (summārā jauda Σ*p* nekad nekļūst negatīva un ķēdes reaktīvā vadītspēja ir vienlīdzīga nullei).

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
|  | |

7.26. att. Strāvu, sprieguma un jaudas grafiki strāvu rezonanses gadījuma.

***7.6. piemērs***. Paralēla ķēde sastāv no diviem zariem (7.19. att.); tas parametri *R*1 = *R*2 = 0,8 Ω, *L*1 = 0,00828 Η un *C*2 = 1225 μF. Ķēde pieslēgta 118 V, 50 Hz tīklam.

Aprēķināt: 1. strāvas paralēlajos zaros (*I*1 un *I*2), kā arī strāvu *I* ķēdes nesazarotajā daļā; 2. strāvu *I*1, *I*2 un *I* fāzu nobīdes leņķi attiecībā pret *U*; 3. ķēdes aktīvo un reaktīvo jaudu; 4. maksimālas enerģijas, kādas tiek uzkrātas ķēdes elektriskajā un magnētiskajā lauka.

Atrisinājums.

Induktivitātes reaktīvā pretestība

*XL*1 = 2*πfL*1 = 2∙3,14∙50∙0,00828 = 2,6 Ω.

Kapacitātes reaktīvā pretestība



Pirmā paralēlā zara aktīvā vadītspēja



Pirmā paralēlā zara reaktīvā vadītspēja



Otrā paralēlā zara aktīvā vadītspēja



Otrā paralēla zara reaktīvā vadītspēja



Ķēdes aktīvā vadītspēja

*G = G*1 *+ G*2 = 0,108 + 0,108 = 0,216 S.

Ķēdes reaktīvā vadītspēja

*B = B*1 *+ B*2 = 0,352 – 0,352 = 0.

Ķēdes pilnā vadītspēja



Pirmā zara strāvas aktīvā komponente

*Ia*1 = *UG*1 = 118∙0,108 = 12,7 A.

Pirmā zara strāvas reaktīvā komponente

*Ir*1 = *UB*1 = 118∙0,352 = 41,5 A.

Pirmā paralēlā zara strāva



Strāvas *I*1 fāzu nobīdes leņķis attiecībā pret spriegumu aprēķināms pēc



t. i., strāva *I*1 atpaliek fāzē no sprieguma.

Otrā zara strāvas aktīvā komponente

*Ia*2 = *UG*2 = 118∙0,108 = 12,7 A.

ir vienlīdzīga pirmā zara strāvas aktīvajai komponentei, jo šajā piemērā *R*1 = *R*2.

Otrā zara strāvas reaktīvā komponente

*Ir*2 = *UB*2 = - 118∙0,352 = - 41,5 A.

Otrā zara strāva



Strāvas *I*2 fāzu nobīdes leņķis φ2 attiecībā pret spriegumu



t. i., strāva *I*2 apsteidz fāzē spriegumu.

Ķēdes nesazarotās daļas strāvas aktīvā komponente

*Ia = Ia*1 *+ Ia*2 = 12,7 + 12,7 = 25,4 A.

Ķēdes nesazarotās daļas strāvas reaktīvā komponente

*Ir = Ir*1 *+ Ir*2 = 41,5 – 41,5 = 0.

Strāva ķēdes nesazarotajā daļā



Pirmā zara aktīvā jauda

*P*1 *= U*2*G*1 = 1182∙0,108 = 1504 W = 1,5 kW.

Pirmā zara reaktīvā jauda

*Q*1 *= U*2*B*1 = 1182∙0,352 = 4900 Var = 4,9 kVAr.

Otrā zara aktīvā jauda

*P*2 *= U*2*G*2 = 1182∙0,108 = 1504 W = 1,5 kW.

Otrā zara reaktīvā jauda

*Q*2 *= U*2*B*2 = 1182∙(- 0,352) = - 4900 Var = - 4,9 kVAr.

Ķēdes aktīvā jauda

*Ρ = P*1 + *P*2 = 1,5 + 1,5 = 3 kW.

Ķēdes reaktīvā jauda

*Q = Q*1 + *Q*2 = 0.

Maksimālā enerģija, kas tiek uzkrāta ķēdes magnētiskajā laukā



Maksimālā enerģija, kas uzkrājas ķēdes elektriskajā laukā



**7.7. STRĀVU REZONANSE KONTŪRĀ BEZ ZUDUMIEM**

Idealizētā gadījumā *R*1 = *R*2 = 0 strāvu rezonanse iestājas, ja , t.i., jābūt spēkā tādam pašam nosacījumam kā spriegumu rezonanses gadījumā (7.27. att.).

|  |  |
| --- | --- |
|  | 7.27. att. Sazarotā ķēde ar induktivitāti un  kapacitāti |

Ja dota ir *ω* un *С*, tad rezonanse iestājas, tāpat kā spriegumu rezonanses gadījumā, kad *L*= = 1/*ω*2*C*; ja dota ir *ω* un *L*, tad jābūt *C* = 1/*ω*2*L*.

Beidzot, ja dota ir *L* un *C*, tad rezonanse iestājas tad, kad



jeb arī

 (7.27)

t. i., ģeneratora frekvence *f* vienāda ar kontūra nerimstošo svārstību pašfrekvenci.

Ja *R*1 = *R*2 = 0, tad zaru aktīvās vadītspējas ir vienlīdzīgas nullei:



Tātad arī ķēdes aktīvā vadītspēja ir vienlīdzīga nullei:

*G = G*1 + *G*2 = 0;

vienlīdzīga nullei ir arī strāvas aktīvā komponente

*Ia = UG* = 0.

Tas arī saprotams — ja *R*1 = *R*2 = 0, tad enerģijas zudumu ķēdē nav. Tā kā rezonanses gadījumā reaktīvā vadītspēja vienmēr ir vienlīdzīga nullei, tad vienlīdzīga nullei ir arī ķēdes pilnā vadīt­spēja  Turpretī ķēdes pretestība 

Strāva ķēdes nesazarotajā daļā rezonanses gadījumā arī ir vienlīdzīga nullei; paralēlajos zaros strāvas ir skaitliski vienā­das: *IL = UBL = IC = UBC* (7.28. un 7.29. att.).

|  |  |
| --- | --- |
| 7.28. att. Vektoru diagramma ķēdei, kas parādīta 7.27. attēlā. | 7.29. att. Strāvu, sprieguma un jaudu grafiki  ķēdei, kas parādīta 7.27. attēlā. |

Ķēde uzkrata enerģija šajā gadījumā (*R*1 = *R*2 = 0) neizkliedējas kontūrā. Kad ģeneratora spriegums un ar to vienādais spriegums uz kondensatora sasniedz maksimālo vērtību, strāva induk­tivitāte *iL* (7.29. att.) ir vienlīdzīga nullei; tāpēc enerģija kon­centrēta elektriskajā laukā. Pēc tam sakarā ar kondensatora izlādēšanos perioda pirmā ceturkšņa laikā enerģija pilnīgi pārvēršas magnētiskā lauka enerģijā (*u = uC* = 0, strāva *iL = Im*).

Perioda otrā ceturkšņa laikā magnētiskā lauka enerģija pārvēr­šas elektriskā lauka enerģijā. Enerģija pilnīgi koncentrēta elektris­kajā laukā tad, kad *iL* = 0 un *uC = Um*; pēc tam process atkārto­jas tai pašā secībā.

**7.8. JAUDAS KOEFICIENTS UN TĀ NOZĪME.**

Katru elektrisko mašīnu (vai aparātu) raksturo:

1. nominālā strāva (*IN*), t. i., robežvērtība strāvai, kurai ilg­stošu plūstot mašīna nesasilst vairāk, nekā tas normās paredzēts;

2. nominālais spriegums (*UN*), t.i., sprieguma pieļaujamā ro­bežvērtība, kurai aprēķināta mašīna;

3. nominālā pilnā jauda, kas vienlīdzīga nominālā sprieguma un nominālās strāvas reizinājumam:

*SN = UNIN*.

Ģeneratora jaudu vislabāk iespējams izmantot tad, ja ģenera­tors darbojas ar nominālo spriegumu, nominālo strāvu un cos *φ* = 1; šajā gadījumā ģenerators attīsta vislielāko aktīvo jaudu, kas vienlīdzīga pilnajai jaudai

*P =* *UNIN* cos *φ* = *UNIN* = *SN*. (7.28)

Ja ģenerators darbojas ar nominālo spriegumu un nominālo strāvu, bet ar mainīgu jaudas koeficientu (cos *φ*), kas atkarīgs no enerģijas patērētājiem, tad ģeneratora aktīvā jauda, kā tas redzams izteiksmē *P =* *UNIN* cos *φ*, ir proporcionāla cos *φ*.

Tātad cos *φ* samazināšanās rada ģeneratora (elektrostacijas) jaudas nepilnīgu izmantošanu.

No otras puses, ja enerģijas patērētājam ir pastāvīga aktīvā jauda un spriegums ir nemainīgs, bet cos *φ* dažādi, tad patērētāja strāva mainās apgriezti proporcionāli cos *φ*. Piemēram, samazinoties cos *φ* patērētāja strāva pieaug.

Patiešām, apzīmējot strāvu, ja cos *φ*0 = 1, ar *I*0 un, ja cos φ1 < 1, ar *I*1 rakstām:

*UI*0 cos *φ*0 = *UI*1 cos *φ*1, (7.29)

no kurienes izriet, ka

*I*0 cos *φ*0 = *I*1 cos *φ*1

jeb

 (7.30)

Plūstot strāvai ģeneratora tinumā un pa vadiem, kas savieno ģeneratoru ar enerģijas patērētāju, vadi un tinums sasilst, turklāt zudumu jauda , Δ*P = I*2*R*, kur *R* — vadu pretestība.

Ja patērētāja aktīvā slodze nemainās, bet mainās tikai cos *φ*, tad, samazinoties jaudas koeficientam, palielinās strāva un tātad arī zudumu jauda ģeneratorā un savienošanas vados.

Zudumu jauda, ja *φ*0 = 0,

 (7.31)

bet brīvi izvēlētai *φ* vērtībai, kas nav vienlīdzīga nullei, 

Ievietojot šeit *I*1 izteiksmi no formulas (7.30), iegūstam

 (7.32)

no kā izriet, ka nemainīgas patērētāja aktīvās jaudas gadījumā, samazinoties cos φ, silšanas zudumu jauda palielinās apgriezti proporcionāli jaudas koeficienta kvadrātam.

Tā kā zems jaudas koeficients, no vienas puses, neļauj pilnīgi izmantot ģeneratoru nominālo jaudu, bet, no otras puses, izsauc enerģijas zudumu palielināšanos, tad parasti cenšas sasniegt iekār­tas cos *φ* pēc iespējas tuvu vienam (ne mazāku par 0,93). Visiz­platītāko maiņstrāvas elektromotoru (asinhrono) cos *φ* ir atkarīgs no to slodzes. Tukšgaitā jaudas koeficients ir 0,2…0,3, bet, kad slodze ir nominālā, 0,83…0,85. Lai palielinātu cos φ virs šīs ro­bežas, paralēli motoram pieslēdz kondensatorus.

Ja motoram paralēli pieslēgti kondensatori, tad perioda pir­majā un trešajā ceturksnī motors uzkrāj enerģiju magnētiskajā laukā, bet perioda otrajā un ceturtajā ceturksnī to atdod; kon­densatori turpretī perioda pirmajā un trešajā ceturksnī atdod uzkrāto enerģiju, bet otrajā un ceturtajā — to saņem. Tātad ener­ģija uzkrājas motora magnētiskajā laukā daļēji vai pilnīgi, sama­zinoties kondensatorā uzkrātajai enerģijai, bet kondensatora elek­triskajā laukā savukārt enerģija uzkrājas, patērējot motora enerģiju; elektrostacija (stacionārā darba režīmā) ir atslogota (da­ļēji vai pilnīgu) no apmaiņas enerģijas.

Ja sasniedz cos *φ* = 1 (strāvu rezonanse), tad *Q* = 0 un ener­ģijas starp ģeneratoru un patērētāju neapmainās.

Elektroiekārtu cos *φ* palielināšana jebkuriem līdzekļiem ir ļoti svarīga tautas saimniecības . problēma. Paaugstināt cos *φ* — tas nozīmē ekonomēt daudz elektroenerģijas, jo samazinās zudumi visos ģeneratoros, transformatoros, motoros un gaisa līniju un kabeļu tīklos. Tā kā elektroenerģijas gada izstrāde pasaulē pārsniedz 20 tera kW·h (2·1013 kW·h), rastos iespēja papildus apgādāt ar enerģiju daudzus lielus uzņēmumus. Reizē ar to elektroiekārtu atslogošana no apmaiņas enerģijas ļauj pilnīgāk izmantot to nominālo jaudu, t. i., palielināt aktīvo jaudu, ko attīsta ģeneratori, un enerģijas pārvadi, izmantojot transformatorus un līnijas.

***7.7. piemērs***. Maiņstrāvas ģeneratora nominālie lielumi: *UN* = 1000 V; *IN* = 100 A; *SN* = 100 000 VA = 100 kVA.

Kādu aktīvo jaudu ģenerators attīsta, ja cos φ1 = 0,8 un cos φ2 = 0,2?

Atrisinājums.

*P*1 = *UNIN* cos *φ*1 = 1000∙100∙0,8 = 80000 W = 80 kW.

*P*2 = *UNIN* cos *φ*2 = 1000∙100∙0,2 = 20000 W = 20 kW.

***7.8. piemērs***. Enerģijas patērētājs darbojas ar spriegumu *U* = 1000 V un jaudu *Ρ* = 50 kW. Aprēķināt zudumu jaudu vados, kas savieno patērētāju ar ģeneratoru, ja cos φ1 = 0,8 un cos φ2 = 0,2 un vadu pretestība *R* = 0,1 Ω.

Patērētāja strāva pirmajā un otrajā gadījuma:





Zudumu jauda savienošanas vados:





Tā pati zudumu jauda, izteikta procentos attiecībā pret patērētāja jaudu:





***7.9. piemērs***. Motora jauda *Ρ* = 10 kW; tas darbojas 240 V, 50 Hz tīklā, cos *φ*1 = 0,6.

Aprēķināt kapacitāti kondensatoram, kas jāpieslēdz paralēli motoram, lai iekārtas jaudas koeficients pieaugtu līdz cos *φ*2 = 0,9.

Atrisinājums.

Motora strāva, ja cos *φ*1 == 0,6,



Pēc trigonometrisko funkciju tabulām iegūstam

*φ*1 = 53010' un sin *φ*1 = 0,8.

Motora strāvas reaktīvā komponente

*Ir*1 = *I*1 sin *φ*1 = 69∙0,8 = 55,5 A.

Ja paralēli motoram pieslēdz kondensatoru, tad jābūt cos *φ*2 = 0,9, kam atbilst *φ*2 = 26050' un sin *φ*1 = 0,436.

Iekārtas strāva



Šajā gadījumā strāvas reaktīvā komponente

*Ir*2 = *I*2 sin *φ*2 = 46,2∙0,436 = 20,2 A.

Ieslēdzot kondensatoru, strāvas reaktīvā komponente tātad samazinās par

*IC = Ir*1 - *Ir*2 = 55,5 – 20,2 = 35,3 A.

Kondensatora reaktīvā pretestība



Kondensatora kapacitāte



Tātad paralēli motoram jāieslēdz kondensators, kura kapacitāte *С* = 460 μF.

**7.9. AKTĪVĀ UN REAKTĪVĀ ENERĢIJA**

Vidējās (aktīvās) jaudas reizinājums ar laiku ir vienlīdzīgs enerģijai, kas patērēta ķēdē. Šo enerģiju parasti sauc par aktīvo enerģiju un apzīmē ar burtu *Wa*; tātad

*Wa = Pt = UI* cos *φ*∙*t* = *UIt* cos *φ*. (7.33)

Lielumu, kas vienlīdzīgs reaktīvās jaudas un laika reizināju­mam, saite par reaktīvo enerģiju un apzīmē ar *Wr*; tātad

*Wr = Qt = Ult* sin *φ*. (7.34)

Reaktīvajai enerģijai ir nozīme tikai kā aprēķina lielumam, no­sakot jaudas koeficienta vērtību, jo



Gadījumā, ja aktīvā un reaktīvā jauda mainās, aplūkojamo laika intervālu var sadalīt sīkākos intervālos, kuru laikā jaudas var uzskatīt par nemainīgām; tādā gadījumā aktīvo un reaktīvo ener­ģiju aplūkojamā laika Intervālā var uzrakstīt kā summu:

*Wa = W*1*a + W*2*a + W*3*a + … + =* Σ*Wka*;

*Wr = W*1*r + W*2*r + W*3*r + … + =* Σ*Wkr*;

Attiecību

 (7.35)

sauc par jaudas koeficienta vidējo vērtību.

Tā kā jebkurā patērētājā Σ*Wka* un Σ*Wkr* var tieši izmērīt ar enerģijas skaitītājiem, tad formulu (5.107) praksē lieto elektro­iekārtu cos φν aprēķināšanai.

***7.10. piemērs.*** Aktīvās enerģijas skaitītājs mēneša sākumā rādīja 1226 kWh, bet tā paša mēneša beigās 1376 kWh. Reaktīvās enerģijas skaitītājs mēneša sākumā rādīja 673 kVArh, bet tā paša mēneša beigās 773 kVArh. Aprēķināt iekārtas jaudas koeficientu šajā mēnesī.

Atrisinājums.

1. Aktīvās enerģijas skaitītāja rādījumu starpība

*Wa* = 1376 — 1226 = 150 kWh.

2. Reaktīvās enerģijas skaitītāja rādījumu starpība

*Wr* = 773 — 673 = 100 kVArh.

3. Jaudas koeficients



**8. NODAĻA**

**SIMBOLISKĀ METODE**

**8.1. PAMATJEDZIENI**

Maiņstrāvas ķēžu aprēķiniem var izmantot vai nu grafisko metodi (vektoru diagrammas), kuras priekšrocība ir uzskatāmība, vai analītisko metodi. Tomēr šīs metodes ne visai izdevīgas komplicētu ķēžu aprēķiniem, jo grafiskā metode nav precīza un analītiskā metode ir darbietilpīga.

Atšķirībā no vektoru diagrammu metodes, simbolisko metodi var lietot jebkuras sarežģītības pakāpes maiņstrāvas ķēžu aprēķināšanai. Simboliskās metodes pamatā ir visu aprēķinā lietojamo lielumu - EDS, spriegumu, strāvu, pretestību un jaudu - attēlošana ar kompleksiem lielumiem. Ar to aprēķina tehnika gan kļūst sarežģītāka, taču aprēķina metodika ievērojami vienkāršojas - maiņstrāvas ķēdes var aprēķināt ar līdzstrāvas ķēžu aprēķina metodēm.

Formulu iegūšanai vairs nav jāzīmē vektoru diagrammas - gluži otrādi, risinājuma gaitā iegūtos rezultātus - kompleksos skaitļus attēlojot kompleksu plakne, veidojas vektoru diagramma, kuru iespējams izmantot rezultātu pareizības kontrolei. Tā kā risinot jebkuru uzdevumu, svarīgi ir pārbaudīt katru starprezultātu, tad sekmīgai simboliskās metodes lietošanai vēlams pārzināt ari vektoru diagrammu metodi.

Šajā nodaļā vispirms atkārtosim no matemātikas kursa pazīstamos jēdzienus par kompleksiem skaitļiem un darbībām ar tiem. Pēc tam noskaidrosim, kā ar kompleksiem lielumiem attēlot sinusoidālus elektriskus lielumus (spriegumus un strāvas), kā arī aktīvo un reaktīvo elementu pretestības. Parādītas elektrisko ķēžu aprēķina pamatformulas kompleksā formā, kas ir līdzīgas līdzstrāvas ķēžu formulām, un arī to pielietojumu piemēri maiņstrāvas ķēžu analīzei.

Kompleksu plakne un darbības ar kompleksiem skaitļiem. Kompleksu plaknē ir divas savstarpēji perpendikulāras koordinātu asis: horizontāla reālo skaitļu ass un vertikāla imagināro skaitļu ass. Imagināro vienību (matemātikā ) elektrotehnikā, tāpat kā citās tehniskās disciplīnās, pieņemts apzīmēt ar "*j*". Kompleksu skaitli var uzskatīt par kompleksu plaknē novietota vektora (ar sākumu koordinātu sākumpunktā) analītisku pierakstu. 8.1. attēlā parādīta kompleksu plakne, kurā attēlots komplekss lielums . Šī kompleksā lieluma trīs pieraksta formas (algebriskā, trigonometriskā un eksponenciālā) redzamas sekojošā izteiksmē:

.

algebriskā forma trigonometriskā forma eksponenciālā forma

|  |  |
| --- | --- |
| *a* | *b* |

8.1. att. a - komplekss lielums kompleksu plaknē, b - saistītais komplekss .

Apzīmējumi šajā izteiksmē un 8.1. att.:

 - komplekss lielums (īsāk: komplekss),

*a* - kompleksā lieluma reālā daļa; to pieraksta šādi: Re() = *a*,

*b* - kompleksā lieluma imaginārā daļa; to pieraksta šādi: Im() = *b*,

*A* - kompleksā lieluma modulis,

*α* - kompleksā lieluma leņķa arguments,

*e* - naturālo logaritmu bāze (ne jau nu EDS).

8.1. att. *b* ilustrē simboliskajai metodei nepieciešamo jēdzienu "saistītais komplekss". Saistīto kompleksu  iegūst, ja kompleksā skaitļa Α imaginārās daļas zīmi (vai eksponenciālajā formā - kompleksa leņķa argumenta zīmi) maina uz pretējo.

Komplekso skaitļu algebriskā forma ir visai ērta to saskaitīšanai vai atņemšanai. Minētās darbības izpilda atsevišķi ar abu lielumu reālajām daļām un imaginārajām daļas, piemēram:

(1 + *j*2) - (3 + *j*4) = (1 - 3) + *j*(2 - 4) = -2 - *j*2 .

Algebrisko formu var lietot ari, izpildot reizināšanu vai dalīšanu:

(1 + *j*2)(3*+j*4*)* = 1∙3 + j22∙4*+j*2∙3 + *j*1∙4= (3 - 8)+ *j*(6 + 4) = -5 + j10.

Ja algebrisko formu lieto komplekso skaitļu dalīšanai, tad raksturīgs iršāds paņēmiens, lai atbrīvotos no imaginārās daļas saucējā: iegūtās izteiksmes saucēju un skaitītāju pareizina ar saucēja saistīto kompleksu:



Komplekso skaitļu eksponenciālā formā ir visai piemērota to reizināšanai vai dalīšanai:





Ievērojiet, ka pareizinot ar , kompleksā skaitļa arguments pieaug par leņķi α - tas nozīmē, ka kompleksam skaitlim atbilstošais vektors tiek pagriezts par leņķi αpozitīvā virzienā (t. i.,pretēji pulksteņa rādītāja kustības virzienam). Šo novērojumu ieteicams lietot, lai pārbaudītu reizināšanas vai dalīšanas rezultāta pareizību. Piemēram, pareizināt ar (-2 + *j*2)- t.i., ar kompleksu skaitli, kura leņķa arguments ir 1350 - nozīmē pagriezt kompleksu plaknē novietotu vektoru par 1350 pozitīvā virzienā.

Komplekso skaitļu trigonometrisko formu lieto, lai pārveidotu algebrisko formu eksponenciālajā vai otrādi. Lai pārietu no eksponenciālās formas uz algebrisko, kompleksā lieluma reālo un imagināro daļu atrod, sareizinot moduli Α ar leņķa argumenta α kosinusu vai sinusu:

а = Re (A) = A cosα, b = Im (А) = A sinα.

Lai pārietu no algebriskās formas uz trigonometrisko, formulas moduļa Α un leņķa argumenta α aprēķināšanai iegūst no taisnleņķa trijstūra ar katetēm *a* un b un hipotenūzu A (8.1.att.), piemēram:



 vai 

Pēdējās divas formulas dod tikai leņķa argumenta galvenās vērtības. Pie tam formula, kurā izmantota arctg funkcija, nebūs korekta gadījumā, ja kompleksā lieluma reālā daļa ir 0. Tāpēc, nosakot argumentu *α*, sekojiet tā novietojumam kompleksu plaknē (piemēram, ja reālā un imaginārā daļa ir negatīvas, arguments meklējams 3. kvadrantā - robežās no -180° līdz -270°).

Starp citu, aplūkojot sinusoīdu attēlojošo vektoru kā kompleksu skaitli, varam vēlreiz pārliecināties par vektora un sinusoīdas savstarpējo atbilstību. Pieņemsim, ka spriegums mainās sinusoidāli: *u = Um* sin (*ωt* + *ψ*). Iedomāsimies, ka šis spriegums būtu attēlots ar šādu kompleksu lielumu:



Lai noskaidrotu, ko šāds lielums nozīmē, pārveidojam tā izteiksmi:

.

Šajā izteiksmē ir sprieguma vektoram atbilstošais komplekss  (tiešam, tā modulis ir Um, bet virzienu nosaka sākuma fāzes leņķis *ψ*), pareizināts ar . Atcerēsimies, ka pareizināt ar *еjα* nozīmē pagriezt vektoru kompleksu plaknē par leņķi *α*. Tas nozīmē, ka apskatāmais kompleksais lielums būtībā ir spriegumu attēlojošais vektors, kas rotē ap koordinātu sākuma punktu. Pārveidosim izteiksmi tā, lai būtu redzama arī šī rotējošā vektora saistība ar sinusoīdu. Šai nolūkā pāriesim no eksponenciālās formas uz trigonometrisko:



Redzams, ka izteiksmes imaginārā daļa: *Um* sin (*ωt + ψ*) ir sinusoīdas momentānās vērtības izteiksme. Tas vēlreiz apstiprina jau zināmo par attēlojoša vektora atbilstību sinusoīdai: ja tas rotētu ap savu sākumpunktu, tad tā projekcija uz vertikālās ass mainītos sinusoidāli. Lai attēlojošais vektors nebūtu rotējošs, bet gan fiksēts sākuma stāvoklī, kompleksa izteiksmē reizinātājs  atmests, atstājot tikai .

***8.1. piemērs***. Dotie lielumi = 6 +*j*8 un  Aprēķināt ,  un . Aprēķinus veikt algebriskā un eksponenciālā forma.

Atrisinājums.

1. Pierakstīsim  eksponenciālā forma un  algebriskā forma.

Modulis , leņķa arguments  un 



2. = (6 + *j*8)(4 – *j*3) = 24 – *j*18 + *j*32 – *j*224 = 24 + *j*14 + 24 = 48 + *j*14.



Atbilde: 

3. 



Atbilde: 

4. 



Atbilde: 

**8.2. STRĀVAS, SPRIEGUMI UN PRETESTĪBAS SIMBOLISKĀ FORMĀ**

6.6. paragrāfā konstatējām, ka sinusoidālas strāvas vai sprieguma momentāno vērtību var attēlot ar rotējoša vektora projekciju uz nekustīgu asi. Pie tam maiņstrāvas ķēžu aprēķinos vektoru diagrammai nav nepieciešams griezties, jo vektoru savstarpējas stāvoklis vienmēr paliek viens un tas pats. No tā izriet, ka, pieņemot abscisu asi par reālo asi, bet ordinātu asi – par imagināro, vektorus, kas attēlo sinusoidālu lielumu momentānās vērtības, var izteikt ar kompleksiem skaitļiem.

Pieņemts reālo un imagināro asi novietot tā lai vektors, kas attēlo strāvu, kuras momentānā vērtība i1 = Im1 sin ωt, būtu vērsts reālās ass virzienā (8.2. att. a). Simboliski šo vektoru un tam atbilstošo strāvu pierakstām šādi:

 (8.1)

Ja strāva mainās pēc likuma i2 = Im2 cos ωt, tad tai atbilstošais vektors apsteidz strāvas i2 vektoru par leņķi 900 jeb  t.i., vērsts imagināro asi (8.2. att. a):

 (8.2)

Vispārīgā gadījumā sinusoidāla strāva mainās pēc likuma

I = Im sin (ωt + ψI) = Im cos ψI sin ωt + Im sin ψI cos ωt, (8.3)

un tās simboliskā izteiksme ir (8.2. att. b)

 (8.4)

Analoģiski simboliskā veidā pieraksta sprieguma momentānās vērtības. Ja

 (8.5)

|  |  |
| --- | --- |
| ***a*** | ***b*** |

8.2. att. Strāvas vektors koordinātu asīs.

tad

u = Um sin (ωt + ψU). (8.6)

Kompleksā sprieguma (strāvas, EDS)moduli nosaka efektīvā vērtība U, Ivai Ε (vai amplitūdas vērtība Um, Imvai Em,bet leņķa argumentu - tā sākuma fāze ψ. Komplekso spriegumu, strāvu vai EDSpieņemts apzīmēt ar attiecīgo lielo burtu ar punktu virs tā, piemēram: vai . Punkts, ko liek virs burta, nozīmē, ka attiecīgā strāva (spriegums vai EDS) mainās laikā pēc sinusa likuma ar leņķisko frekvenci ω.

***8.2. piemērs***. Doti šādi elektriskie lielumi:   

Uzrakstīt attēlojošo kompleksu  izteiksmes.

Atbilde:







**Kompleksa pretestība.** Ja EDS, sprieguma vai strāvas kompleksu varam uzskatīt par kompleksu plaknē novietotu vektoru, tad kompleksā pretestība būtībā ir kompleksu plaknē novietots pretestību trīsstūris. Atcerēsimies, kā zīmē pretestību trīsstūri: horizontāli pa labi atliek nogriezni, kas attēlo aktīvo pretestību *R*, pēc tam uz augšu - induktīvo pretestību *XL*, pēc tam uz leju - kapacitīvo pretestību *XC*. Ja to pašu atkārto kompleksu plaknē, iegūst komplekso pretestību *Ζ* - trīsstūra hipotenūzu. Tā kā kompleksās pretestības reālā daļa vienāda ar *R*, imaginārā daļa - ar reaktīvo pretestību *X = XL – XC*, bet leņķa arguments ir fāžu nobīdes leņķis *φ*, tad *Ζ* var aprakstīt ar formulām:

= *R* + *j*(*XL – XC*) = *Z*(cos *φ* + *j* sin *φ*) = *Zejφ*. (8.7)

Kompleksā pretestība (tāpat kā pretestību trīsstūris) ir jēdziens, kas attiecināms nevis uz jebkuru shēmas daļu, bet tikai uz elementu virknes slēgumu. Kompleksās pretestības moduļa *Ζ* vērtība ir vienāda ar virknes slēguma pilno pretestību (arī to apzīmējumi sakrīt). Praktiski gandrīz vienmēr, izveidojot aizvietošanas shēmu ar kompleksām pretestībām, lieto formulu:

= *R* + *j*(*XL - XC*),

Virknes slēguma speciālgadījums ir atsevišķs elements (*R, L* vai *C*). Tātad ar komplekso pretestību var aprakstīt arī atsevišķus elementus. Lietojot simbolisko metodi, kompleksā pretestība ir vienīgais pretestības tips, tāpēc shēmā tās apzīmēšanai izmanto aktīvās pretestības apzīmējumu.

***8.3. piemērs***. Sagatavot 8.3. att. *a* parādīto shēmu aprēķinam ar simbolisko metodi. Sastādīt komplekso pretestību izteiksmes.

Shēmas parametri: *R*1 = *R*2 = *R*3 = *R*4 = 10 Ω, *XL*1 = *XL*2 = 12 Ω, *ΧC*1 = *ХC*2 = 5 Ω.

|  |  |
| --- | --- |
| ***a*** | ***b*** |

8.3. att. Aprēķināmā shēma (*a*), aizvietošanas shēma ar kompleksām pretestībām (*b*).

Atrisinājums.

Dotajā shēmā ir 4 elementu grupas, kas satur virknes slēgumu vai vienu atsevišķu elementu: 1) *R*1, *C*1 un *R*2; 2) *R*3, 3) *C*2 un *L*1, 4) *L*2 un *R*4. Tāpēc aizvietošanas shēmā (8.3. att. *b*) ir 4 kompleksās pretestības ar šādām vērtībām:

** = *R*1 + *R*2 – *jXC*l = 10 + 10 – *j*5 = 20 – *j*5,

** = *R*3 = 10,

** *= jXL*1 – *jXC*2 = *j*12 – *j*5 = *j*7,

** = *R*4 *+ jXL*2 = 10 + *j*12.

Kompleksās pretestības Z apgriezto lielumu sauc par komplekso vadītspēju un apzīmē ar :



Tā kā tad kompleksa vadītspēja

 (8.8)

No vadītspēja trīsstūra dabū, ka *Y* cos *φ* = *G*, *Y* sin *φ* = *B* un

* = G – jB*, (8.9)

t.i., kompleksās vadītspējas reālā daļa ir ķēdes aktīvā vadītspēja, bet imaginārā daļa bez reizinātāja *j* – reaktīvā vadītspēja.

**8.3. OMA LIKUMS SIMBOLISKĀ FORMĀ**

Oma likums maiņstrāvas ķēdei saista tikai strāvas un sprieguma efektīvās vērtības ar ķēdes pilno pretestību 

 vai *U = IZ*,

un fāzu nobīdes leņķi starp strāvu un spriegumu var aprēķināt pēc izteiksmēm  un 

Simboliskā metode dod iespēju Oma likuma izteiksmē ietvert arī fāzu nobīdes leņķi *φ* starp *I* un *U*.

Lai no strāvas kompleksa vektora iegūtu sprieguma vektoru , tad strāvas vektors jāpalielina Z reizes ( un jāpagriež uz priekšu par leņķi *φ*, ja slodzei induktīvs raksturs (*φ* > 0), vai atpakaļ par leņķi *φ*, ja slodzei kapacitīvs raksturs (*φ* < 0).

Vektoru pagriež par leņķi φ, to pareizinot ar pagriezis reizinātāju *ejφ*:



Komplekso skaitli



kura modulis ir ķēdes pilnā pretestība, bet arguments – fāzu nobīdes leņķis starp strāvu un spriegumu, sauc par ķēdes komplekso pretestību.

Tad oma likuma izteiksme simboliskā formā ir šāda:

 (8.10)

Izmantojot komplekso vadītspēju, Oma likuma izteiksme ir

 (8.11)

**8.4. KIRHOFA LIKUMI SIMBOLISKĀ FORMĀ**

Algebriskā formā izteiktus Kirhofa likumus maiņstrāvas ķēdēm var izmantot tikai strāvu, spriegumu un EDS momentānajām vērtībām. Bet, izsakot sinusoidālos lielumus ar to kompleksiem, Kirhofa likumi izmantojami algebriskā formā arī sinusoidālo lielumu efektīvajām vērtībām.

8.4. attēlā parādītajam sazarotas maiņstrāvas ķēdes mezglam pirmā Kirhofa likuma izteiksme ir šāda:

 vai 

un pirmā Kirhofa likuma izteiksme vispārīgā veida simboliska formā ir

 (8.12)

t. i., sazarotas maiņstrāvas ķēdes mezglā strāvu kompleksu algeb­riskā summa ir vienāda ar nulli.

Noteikumi par strāvu kom­pleksu zīmēm ir tādi paši kā līdz­strāvas ķēdei.

|  |  |
| --- | --- |
| 8.4. att. Sazarotas maiņstrāvas ķēdes mezgls. | 8.5. att. Sazarotas maiņstrāvas ķēdes noslēgts kontūrs. |

Otra Kirhofa likuma izteiksme simboliska forma maiņstrā­vas ķēdes noslēgtam kontūrām ir šāda:

 (8.13)

t. i., noslēgta kontūra EDS kompleksu algebriskā summa vienāda ar spriegumu kritumu kompleksu kontūra zaros algebrisko summu.

Kontūra zaru strāvu un EDS kompleksu zīmes nosaka saskaņā ar patvaļīgi izvēlēto kontūra apejas virzienu.

8.5. attēlā parādītajam kontūrām ar izvēlēto kontūra apejas virzienu otrā Kirhofa likuma izteiksme simboliskā formā rak­stāma šādi:



kur zaru kompleksās pretestības saskaņā ar izteiksmi (8.7)









**8.5. MAIŅSTRĀVAS JAUDA SIMBOLISKĀ FORMĀ**

Sprieguma un strāvas kompleksu

 un 

reizinājums neizsaka ķēdes jaudu (8.6. att.), jo reizinājuma arguments nav fāzu leņķu *ψU* un *ψI* starpība, bet gan summa.

Lai, sprieguma un strāvas komplek­sus reizinot, iegūtu vajadzīgo argu­mentu φ = *ψU* - *ψI* , tad vienu kompleksu aizvieto artā saistīto kompleksu, ko apzīmē ar zvaigznīti virs vai blakus kompleksa apzīmējuma, piemēram, .

Saistīto kompleksu dabū, algebriskās vai trigonometriskās formas komplek­sam mainot imaginārās daļas zīmi vai eksponenciālās formas kompleksam mainot argumenta zīmi. Parasti iz­manto strāvas saistīto kompleksu 

Reizinot sprieguma kompleksu  ar ķēdes strāvas saistīto kompleksu dabū ķēdes jaudas kompleksu, ko apzīmē ar 

 (8.14)

|  |
| --- |
| 8.6. att. Sprieguma un strāvas vektori kompleksu plakne. |

Redzam, ka jaudas kompleksa reālā daļa ir aktīvā jauda un imaginārā daļa bez reizinātāja *j* — reaktīvā jauda. Jaudas kompleksa modulis ir pilnā jauda:



8.6. attēlā *ψU* > *ψI* t. i., slodzei induktīvs raksturs.

Kapacitīva rakstura slodzei *ψU* < *ψI* un

 (8.15)

Tādējādi jaudas kompleksa imaginārās daļas zīme (« —» vai « + ») parāda slodzes raksturu. Tikai jāiegaumē, ka, izmantojot reizinājumu  kompleksa imaginārajai daļai ir pretēja zīme nekā reizinājumā.

***8.4. piemērs***. Slodzes sprieguma un strāvas efektīvo vērtību kompleksi ir un  Aprēķināt slodzes aktīvo un reaktīvo pretestību, aktīvo un reaktīvo jaudu.

Atrisinājums.

1. Izmantojot sprieguma un strāvas kompleksu algebriskā un eksponenciālā formā, nosacīsim slodzes komplekso pretestību:



Tādējādi slodzes aktīvā pretestība *R* = 3 Ω, induktīvā *XL* = 4 Ω, bet pilnā *Z* = 5 Ω.

2. Lai aprēķinātu jaudas kompleksu, reizināsim sprieguma kompleksu ar strāvas saistīto kompleksu :



No šejienes dabūjam

*S* = 2000 VA, *P* = 1200 W un *QL* = 1600 V∙Ar.

**8.6. ĶEDES AR VIRKNĒ SLEGTĀM PRETESTĪBĀM**

Nesazarotai ķēdei, kura sastāv no ģeneratora ar EDS  un vairākām virknē saslēgtām pretestībām utt., pamatojoties uz otro Kirhofa likumu, varam rakstīt:



Strāva visos nesazarotās ķēdes punktos ir vienāda un rakstot to pirms iekavām, iegūstam:

,

no kā izriet:



t.i., nesazarotas ķēdes kopējās pretestības komplekss ir vienlīdzīgs atsevišķo pretestību kompleksu summai.

8.7. att. parādītās ķēdes kopējā pretestība:

= *R*1 + *jXL*1 + *R*2 – *jXC*2 + *R*3 + *jXL*3 + *R*4 – *jXC*4 =

= (*R*1 + *R*2 + *R*3 + *R*4) + *j*(*XL*1 +*XL*3 – *XC*2 – *XC*4) = *R + jX*,

kur *R* = *R*1 + *R*2 + *R*3 + *R*4, *X* = *XL*1 +*XL*3 – *XC*2 – *XC*4.

|  |  |
| --- | --- |
| ***a*** | ***b*** |

8.7. att. Nesazarota ķēde ar vairākām aktīvām un reaktīvām pretestībām: *a* - elektriskā

shēma, *b* - aizvietošanas shēma ar kompleksām pretestībām.

Ja spriegums uz ķēdes spailēm ir , tad strāva tajā



Aktīvo un reaktīvo jaudu aprēķina, reizinot sprieguma kompleksu ar strāvas saistīto kompleksu:



Spriegumi uz atsevišķām pretestībām ir:



Spriegums uz ķēdes spailēm



***8.5. piemērs.*** 8.8. att. *a*, *b* un *c* attēloto elektrisko ķēžu spriegums ir 100 V, bet šo ķēžu elementu pretestības *R = XL = XC* = 5 Ω. Uzrakstīt pretestību kompleksus. Nosacīt šo ķēžu efektīvo vērtību un jaudu kompleksus. Uzzīmēt vektoru diagrammas.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  |  |
| ***a*** | ***b*** | ***c*** |
|  |  |  |

8.8. att. Nesazarotas maiņstrāvas ķēdes ar vienu pretestības elementu

Atrisinājums.

1. Pretestības kompleksā reālā daļa ir ķēdes aktīvā pretestība, imaginārā daļa ar „+” zīmi – induktīvā pretestība, bet imaginārā daļa ar „–” zīmi – kapacitīvā pretestība, tādējādi:

a) 

b) 

c) 

2. Lai ar formulu  aprēķinātu strāvu kompleksus, iepriekš jānosaka spriegumu kompleksi. Aprēķinos parasti pieņem, ka ķēdes dota sprieguma vai dotas strāvas komplekss ir vienāds ar tā moduli. Piemērā pieņem ka 

a) 

b) 

c) 

3. Jaudas komplekss. Saistīto kompleksu iegūst, ja kompleksa skaitļa imaginārās daļas zīmi maina uz pretējo.

a) *S = P* = 2000 VA. Q = 0 VAr.

b) *P* = 0 W, *Q* = *QL* = 2000 VAr, *S* = 2000 VA.

c) *P* = 0 W, *Q* = *QC* = 2000 VAr, *S* = 2000 VA.

4. Vektoru diagramma

Sprieguma  vektors vērsts reālo vērtību ass virzienā

a) strāvas  vektors sakrīt fāzē ar sprieguma vektoru.

b) strāvas  vektors nokāvējas (atpaliek) fāzē pret sprieguma vektoru par 900.

c) strāvas  vektors apsteidz fāzē sprieguma vektoru par 900.

5. Strāvas un sprieguma momentāno vērtību vienādojumi

a) 

b) 

c) 

***8.6. piemērs***. 8.9. attēla *a* un *b* parādīto elektrisko ķēžu spaiļu spriegums *U* = 100 V, bet šo ķēžu elementu pretestības *R* = 3 Ω, *XC* = 4 Ω, *XL* = 4 Ω. Uzrakstīt pretestību kompleksu izteiksmes. Nosacīt strāvu un jaudas kompleksus. Uzzīmēt vektoru diagrammu un pretestību trīsstūri.

|  |  |
| --- | --- |
| ***a*** | ***b*** |

8.9. att.

Atrisinājums.

1. Pretestības komplekss un ķēdes pilnā pretestība:

*a*) 

*b*) 

Kompleksās pretestības moduļa vērtība *Z* = 5 Ω ir vienāda ar virknes slēguma pilno pretestību.

2. Sprieguma komplekss. Pieņemsim, ka ķēdes sprieguma komplekss ir vienāds ar tā moduli 

3. Strāvas komplekss:

a) 

b) 

4. Sprieguma kritumu kompleksi:

a) 



b) 



5. Jaudas komplekss. Saistīto kompleksu iegūst, ja kompleksa skaitļa imaginārās daļas zīmi maina uz pretējo.

*a*) 

*P* = 1200 W, *Q = QC* = 1600 VAr, VA.

*b*) 

*P* = 1200 W, *Q = QL* = 1600 VAr, VA.

6. Vektoru diagramma. Maiņstrāvas ķēdes (8.9. att. *a*) sprieguma vienādojums  bet ķēdes (8.9. att. *b*) sprieguma vienādojums 

Šo vektoru summu konstruējam ģeometriski mērogā *MU* = 20 V/cm un *MI* = 10 A/cm (8.10. att.).

|  |  |
| --- | --- |
| ***a*** | ***b*** |

8.10. att. Vektoru diagramma un sprieguma trīsstūris shēmai 8.9. att.

7. Pretestību trīsstūris (8.11. att.). Vektoru diagramma (8.10. att. *a* un *b*) sprieguma vektorus izdalot ar strāvu kompleksu, iegūst pretestību trīsstūri, kura malas mērogā izsaka apskatāmas ķēdes reaktīvo *R*, aktīvo *X* un pilno pretestību *Z*.

|  |  |
| --- | --- |
| ***a*** | ***b*** |

8.11. att. Pretestību trīsstūris elektriskai ķēdei 9.9. attēlā

***8.6. piemērs.*** Spoles aktīvā pretestība *Rsp* = 8 Ω un induktīvā pretestība *xL* = 22 Ω. Virknē ar spoli ieslēgta aktīvā pretestība *R* = 4 Ω un kondensators ar kapacitatīvo pretestību *xC* = 6 Ω (8.12. att.). Aprēķināt: ķēdes strāvu; jaudas koeficientu; aktīvo, reaktīvo un pilno jaudu; sprieguma zudumu katrā pretestībā. Ķēde pieslēgta spriegumam *U* = 200 V. Uzzīmēt mērogā vektoru diagrammu. Kā jāizmaina kondensatora kapacitatīvā pretestība, lai ķēdē iestātos spriegumu rezonanse. Noteikt strāvu rezonanses gadījumā.

|  |
| --- |
| 8.12. att. |

Atrisinājums.

1. Ķēdes pilnā pretestība. Praktiski gandrīz vienmēr, izveidojot aizvietošanas shēmu ar kompleksam pretestībām, lieto formulu  Mūsu gadījumā



Kompleksās pretestības moduļa *Z* vērtība ir vienāda ar virknes slēguma pilno pretestību.

2. Doto spriegumu *U* aizstājam ar kompleksu lielumu . Sprieguma sākuma fāzi varam izvēlēties brīvi, tāpēc visvienkāršāk pieņemt to vienādu ar nulli. Citiem vārdiem, uzskatām, ka kompleksajam spriegumam ir tikai reāla daļa

 (V).

3. Strāvu ķēdē var izteikt ar kompleksu

(A).

Saistītais komplekss



4. Sprieguma kritumi











5. Jaudas komplekss

 (VA).

Aktīvā jauda *P* = 1200 W= 1,2 kW, reaktīvā jauda *Q* = 1600 VAr = 1,6 kVAr un pilnā jauda VA.

6. Vektoru diagramma. Maiņstrāvas ķēdes (8.12. att.) sprieguma vienādojums



Šo vektoru summu konstruējam ģeometriski mērogā *M* = 40 V/cm un *M* = 5 A/cm (8.13. att.).

|  |
| --- |
|  |

8.13. att. Vektoru diagramma

**8.7. KĒDES AR PARALĒLI SLĒGTĀM PRETESTĪBĀM**

Ja ķēde sastāv no vairākiem paralēliem zariem, tad, pamatojoties uz pirmo Kirhofa likumu, strāva nesazarotajā ķēdes daļā (8.14. att.):



Saskaņā ar Oma likumu



Ievietojot šīs strāvu izteiksmes iepriekšējā vienlīdzībā, iegūstam



|  |
| --- |
|  |

8.14. att. Sazarota ķēde ar paralēli slēgtām pretestībām.

jeb, vienkāršojot ar 



jeb



t.i., kopējais vadītspējas komplekss ķēdei, kura sastāv vairākiem paralēliem zariem, ir vienlīdzīgs atsevišķo zaru vadītspēju kompleksu summai.

Ja ķēde sastāv no diviem paralēliem zariem, tad



no kurienes



***8.7. piemērs***. Aprēķināt kopējo pretestību ķēdei, kura sastāv no diviem paralēliem zariem, ja  

Atrisinājums.



***8.8. piemērs***. Maiņsprieguma avotam ar spriegumu *U* = 220 V pieslēgta ķēde ar 3 paralēliem zariem (8.15. att.). Dotie lielumi: *R*11 = 5 Ω; *R*12 = 15 Ω; *R*2 = 4 Ω; *X*L2 = 3 Ω; *R*3 = 6 Ω; *X*C3 = 8 Ω. Ar simbolisko metodi aprēķināt strāvas , spriegumu , jaudas  un fāzu nobīdes leņķi *φ* starp spriegumu un strāvu ķēdes nesazarotā posmā. Mērogā konstruēt vektoru diagrammu.

|  |  |
| --- | --- |
| ***a*** | ***b*** |

8.15. att. Patērētāju paralēlā slēguma shēma (*a*) un aizvietošanas shēma (*b*)

Atrisinājums.

Shēma ir trīs zari. Katru no tiem aizstājam ar komplekso pretestību (8.15. att. *b*.). Komplekso pretestību vērtības:





Doto spriegumu *U* aizstājam ar komplekso lielumu. Sprieguma sākuma fāzi varam izvēlēties brīvi, tāpēc visvienkāršāk pieņemt to vienādu ar nulli. Citiem vārdiem, uzskatām, ka kompleksajam spriegumam ir tikai reāla daļa (V).

Aizvietošanas shēmu aprēķinām līdzīgi līdzstrāvas ķēdei: tā kā spriegums uz katras pretestības ir zināms, atrodam zaru strāvas, un pēc tam kopējo strāvu.







Reālas daļas sakrīt ar strāvu aktīvajām un imaginārās daļas ar strāvu reaktīvajām komponentēm.

Kopējo strāvu kompleksā formā atrodam, izmantojot pirmo Kirhofa likumu:

 A.

Atrodam strāvu efektīvās vērtības – tās ir komplekso strāvu moduļi



4. Atsevišķu zaru kompleksās jaudas atrodam, sareizinot sprieguma kompleksu ar attiecīgā zara strāvas saistīto kompleksu



Visas shēmas patērētā jauda



vai



Aktīvā jauda *P* ir attiecīgās kompleksās jaudas reālā daļa. Reaktīvā jauda *Q* ir kompleksās jaudas imaginārā daļa. Pie tam pozitīva imaginārā daļa norāda, ka reaktīvā jauda ir ar induktīvu raksturu, bet negatīva – uz reaktīvas jaudas kapacitīvu raksturu.







Vektoru diagramma (8.16. att.).

|  |
| --- |
|  |

8.16. att. Vektoru diagramma kompleksu plaknē

Simboliskās metodes priekšrocība ir tā, ka jebkuru strāvu, jaudu vai spriegumu iespējams atrast, neizmantojot tādus vektoru diagrammu metodes atribūtos kā fāžu nobīdes leņķus, jaudas koeficientu un vektoru diagrammu. Vēl vairāk, vektoru diagrammu iespējams uzzīmēt, vienkārši attēlojot iegūtos rezultātus kompleksu plaknē (8.16. att.).

**8.8. SAZAROTU MAIŅSTRĀVAS ĶĒDES JAUKTAIS SLĒGUMS**

Simboliskā metode ievērojami vienkāršo maiņstrāvas ķēžu ap­rēķinus, jo šo ķēžu aprēķināšanai var lietot visas lineāro līdz­strāvas ķēžu aprēķināšanas metodes un likumsakarības, pie tam aprēķināšanas gaita paliek tāda pati kā līdzstrāvas ķēžu aprē­ķinos.

|  |
| --- |
| 8.17. att. Sazarota maiņstrāvas ķēde ar vienu avotu. |

8.17. attēlā parādīto maiņstrāvas ķēdi ar vienu avotu, ja dots ķēdei pievienotais spriegums *U*, ķēdes aktīvās un reaktīvās pretestības un jāatrod zaru strāvas *I*0, *I*1, *I*2 aprē­ķina šādi.

Vispirms izsaka ķēdes zaru kompleksās pretestības:



Tad visa slēguma kompleksā pretestība



un ķēdes nesazarotā posma strāvas komplekss



Aprēķinos parasti pieņem, ka ķēdes vai ķēdes posma dotā sprieguma vai dotās strāvas komplekss ir vienāds ar tā moduli, t. i., pieņem, ka šī lieluma vektors virzīts pa reālo vērtību asi pozitīvajā virzienā. Iztirzājamā piemērā pieņem, ka (8.18. att.).

Тā kā ķēdes nesazarotajā posma sprieguma krituma kom­plekss



tad ķēdes paralēlo zaru sprieguma komplekss



un zaru strāvu kompleksi

 un 

Strāvu un spriegumu efektīvās vērtības ir vienādas ar strāvu un spriegumu kompleksu moduļiem.

Spriegumu un strāvu vektoru diagrammu zīmē kompleksu plaknē pēc dotā lieluma kompleksa un aprēķinātajiem sprieguma un strāvu kompleksiem (8.18. att.).

|  |  |
| --- | --- |
|  | 8.18. att. Vektoru diagramma kompleksu plaknē 8.17. attēlā parādītajai shēmai |

***9.9. piemērs***. Maiņsprieguma avotam ar spriegumu *U* = 50 V pieslēgta 8.19. att. parādīta shēma. Dotie lielumi: *R*1 = *R*2 = 10 Ω; *XL*1 = *XL*2 = 30 Ω; *XC*1 = *XC*2 = 20 Ω.

Aprēķināt visas strāvas, patērēto aktīvo, reaktīvo un pilno jaudu.

|  |  |
| --- | --- |
| ***a*** | ***b*** |

8.19. att. Maiņstrāvas ķēde ar jaukto slēgumu (*a*) un

aizvietošanas shēma ar kompleksām pretestībām (*b*).

Atrisinājums.

1. Shēma ir 3 zari. Uzrakstām komplekso pretestību izteiksmes:



Aizvietošanas shēma ar kompleksām pretestībām redzama 8.19. *b*. att. Shēmas struktūra ir tāda pati kā līdzstrāvas ķēdei, tāpēc arī aprēķina metode ir līdzīga, tikai lietojot kompleksos lielumus.

2. Doto spriegumu pārveidojam kompleksā formā:  V.

3. Sākam aprēķinu, ekvivalenti pārveidojot pretestību paralēlslēgumu posma *bc*. Pēc tam atrodam visas ķēdes kopējo ekvivalento pretestību *Z*:



Strāvu nesazarotajā ķēdes daļa atrodam, izdalot avota spriegumu ar ķēdes kopējo pretestību:



Lai aprēķinātu abas strāvas posmā *bc*, vispirms atrodam šī posma spriegumu:



Aprēķinām arī spriegumu posmā *ab*:



Strāvas posmā *bc*:





Kompleksā jauda, ko ģenerē avots vai patērē visas kompleksās pretestības:



Pēdējais rezultāts nozīmē, ka shēma patērē aktīvo jaudu *P* = 106,5 W un reaktīvo jaudu *Q* = 78 Var. Reaktīvā jauda ir kapacitīva rakstura, uz ko norāda mīnusa zīme kompleksās jaudas izteiksmē. Pilna jauda  VA.

4. Pārejam no strāvu un spriegumu kompleksiem uz to efektīvajām vērtībām, piemēram:

A.

Līdzīgi tam atrodam arī pārējās efektīvās vērtības:

*I*2 = 1,92 A, *I*3 = 0,904 A, *U*ab = 58,95 ≈ 59 V, *U*bc = 27,11 V.

5. Aprēķinātas shēmas vektoru diagramma parādīta 8.20. att. Tā uzzīmēta, izvēloties strāvas un sprieguma mērogus, un atliekot aprēķinātos kompleksos lielumus kompleksu plaknē.

Vispār, aprēķinot shēmu ar simbolisko metodi, vektoru diagramma noder iegūto rezultātu pārbaudei. Piemēram, tā kā kompleksā pretestība *Z*1 ir aktīvi kapacitīvu raksturu, tad strāvai *I*1 jāapsteidz fāzē spriegums *U*ab .

Uzzīmējot posmam *ab* pretestību trijstūri, iespējams pat novērtēt leņķi, par kuru šī strāva apsteidz spriegumu *U*ab un arī to izmantot pārbaudei.

Vēl piemēram, pretestība *Z*3 ir tīri induktīva, tāpēc strāvai *I*3 jāatpaliek no sprieguma *U*bc tieši par 900.

|  |  |
| --- | --- |
|  | 8.20. att. Vektoru diagramma kompleksu plaknē. |

Pretestības *Z*2 raksturs ir aktīvi induktīvs, tāpēc vektoru diagramma noder, lai pārliecinātos, vai tiešām strāva *I*2 atpaliek fāzē no sprieguma *U*bc par leņķi, ko nosaka attiecīgā zara (*R*2, *L*2 un *C*2) pretestību trīsstūris.

**8.9. SAREŽĢĪTAS MAIŅSTRĀVAS ĶĒDES**

Lai aprēķinātu sazarotas maiņstrāvas ķēdes ar vairākiem EDS avotiem, lieto kādu no lineāro līdzstrāvas ķēžu aprēķināšanas metodēm.

Pieņemsim, ka 8.21. attēlā parādītajai maiņstrāvas ķēdei doti elektrodzinējspēki *E*1 un *E*2 un paralēlo zaru kompleksās pretes­tības, bet jāatrod zaru strāvas.

Aprēķināšanai izmantojot Kirhofa likumus, sastāda vienu vienādojumu ķēdes mezglam A un divus vienādojumus diviem kontūriem:







|  |  |
| --- | --- |
|  | 8.21. att. Sazarotā maiņstrāvas ķēde ar  diviem avotiem |

Atrisinot šo vienādojumu sistēmu, dabū triju meklējamo strāvu kompleksus un no tiem — strāvu efektīvās vērtības.

To pašu uzdevumu atrisinot ar mezglu sprieguma metodi, vis­pirms atrod paralēlo zaru kompleksās vadītspējas:



Mezglu sprieguma kompleksu  aprēķina saskaņā ar izteiksmi:

.

Tad strāvu kompleksi



***8.10. piemērs***. Aprēķināt strāvas visos ķēdes posmos (8.21. att.), ja pirmā ģeneratora EDS *e*1 = 142 sin *ωt* (V), bet otrā *e*2 = 149 sin *ωt* (V). Ģeneratoru iekšējās pretestības ir tīri induktīvas: *X*1 = *X*2 = 0,1Ω. Nesazarotās ķēdes daļas aktīvā pretestība *R* = 1Ω, induktīvā pretestība *X* = 0,5 Ω.

*Atrisinājums.*

Aprēķināšanai izmantojot mezglu sprieguma metodi, vispirms atrod paralēlo zaru kompleksās vadītspējas:



EDS amplitūdas vērtības:

*E*1*m* = 142 (V), *E*2*m* = 149 (V).

EDS efektīvas vērtības



EDS kompleksi:

= 100 + *j*0 (V),  = 105 + *j*0 (V).

Spriegums starp mezgliem A un B:



Strāvas atsevišķos ķēdes posmos:



Strāvu momentānās vērtības:

*i*1 = 55,7 sin (*ωt* + 4050') A

*i*2 = 86,3 sin (*ωt* – 500) A;

*i*3 = 127 sin (*ωt* – 390) A.

**9. NODAĻA**

**TRĪSFĀZU STRĀVAS ĶĒDES**

**9.1. TRĪSFĀZU SISTĒMA**

Vienfāzes maiņstrāvu (maiņstrāva ar vienu izejas spriegumu) loti plaši pielieto apgaismošanas un mazas jaudas radiotehnisko iekārtu, sadzīves vajadzībām izmantojamo elektroaparātu, elektronikas un signalizācijas iekārtu barošanai u. c.

Tomēr enerģētisko sistēmu elektropārvades līnijās, pārvadot vienfāzes maiņstrāvu, rodas lieli jaudas zudumi. Būvējot vienfāzes maiņstrāvas elektropārvades līnijas, patērē apmēram par 25% vairāk krāsainā metāla (varš, alumīnijs) salīdzinājumā ar trīsfāzu elektropārvades līnijām. Tāpēc lielu jaudu pārvadīšanai būvē trīsfāzu elektropārvades līnijas, kuras ir ekonomiski izdevīgākas.

Tātad elektriskās sistēmas, kas sevī ietver elek­trostaciju ģeneratorus, transformatorus, enerģijas pārvades līni­jas un sadales tīklus, mūsu dienās ir gandrīz tikai trīsfāzu strāvas sistēmas. Trīsfāzu strāvas sistēma ir atsevišķs daudzfāzu sistēmu veids.

Par daudzfāzu strāvas sistēmu sauc maiņstrāvas ķēžu kopumu, kurās darbojas vienādas frekvences sinusoidāli EDS, kas iegūti vienā enerģijas avotā un nobīdīti fāzē viens pret otru.

Katru daudzfāzu sistēmas maiņstrāvas ķēdi sauc par fāzi. Atkarībā no ķēžu jeb fāzu skaita izšķir divfāzu, trīsfāzu, sešfāzu u. c. sistēmas. Visā pasaulē izmanto simetrisku trīsfāzu sistēmu.

Trīsfāzu sistēma sastāv no trijām vienādas frekvences maiņ­strāvas ķēdēm, kuru EDS nobīdīti fāzē viens pret otru par 120°. Ja turklāt sistēmas EDS maksimālās vērtības savstarpēji vienā­das, tad tādu sistēmu sauc par simetrisku trīsfāzu sis­tēmu.

Trīsfāzu strāvas sistēmas galvenās priekšrocības salīdzinā­jumā ar vienfāzes maiņstrāvu ir šādas:

1. iespēja vienkāršā veidā iegūt rotējošo magnētisko lauku un reizē ar to — iespēja izveidot ļoti vienkāršas konstrukcijas trīs­fāzu asinhronos dzinējus, kas ir lēti, darbā droši un vienkārši apkalpojami;

2. iespēja četrvadu sistēmā izmantot divus dažādus darba spriegumus;

3. 25% krāsainā metāla ekonomija elektriskās enerģijas pār­vades līnijām (salīdzinājumā ar vienfāzes maiņstrāvu vienādos apstākļos).

Trīsfāzu strāvas tehnikas pamatu izveidotājs ir krievu elektriķis M. Doļivo-Dobrovoļskis, kas 1889. gadā izveidoja pirmo trīsfāzu asinhrono dzinēju ar īsi slēgto rotoru, bet 1890. gadā — pirmo trīsfāzu transformatoru.

**9.2. SIMETRISKA TRĪSFĀZU EDS IEGŪŠANA**

Trīsfāzu maiņstrāvu iegūst ar trīsfāzu ģeneratoru, kura darbības pamatā ir elektromagnētiskās indukcijas parādība. Trīsfāzu ģenerators sastāv no trim atsevišķiem tinumiem (spolēm), kas novieto tā, ka spoļu plaknes telpā veido 120° leņķus, ja magnētiskajam laukam ir l polu pāris, t.i., divi poli — *N* un *S*. Trīs tinumus (spoles), kuras sauc par fāzu tinumiem (9.1. att.), novieto uz nekustīgas feromagnētiskas serdēs 1 (statorā). Lai fāzu tinumos iegūtu mainīgu EDS, nepieciešams radīt mainīgu magnētisko plūsmu Ф, t. i., rotējošu magnētisko lauku, kurš pēc kārtas šķeltu nekustīgos ģeneratora tinumus *AX*, *BY*, CZ.

Šādu mainīgu magnētisko lauku var iegūt, griežot elektromagnētu (rotoru), ar tam uztītu ierosmes spoli (magnētisko lauku rada šī spole, ja tajā plūst strāva *I*), piemēram, pretī pulksteņa radītāj kustības virzienā. Elektromagnēta polu magnētiskajam speķa līnijām šķeļot fāzu tinumus AX, BY, CZ*,* tajos inducējas sinusoidāli EDS, kuri nobīdīti fāzē viens pret otru par 120°, pie tam EDS maksimālās vērtības vienādas, t. i., *Ε Am = Ε Bm = Ε Cm = Em*. Šādu ģeneratoru ar trim neatkarīgiem tinumiem — fāzēm — sauc par trīsfāzu ģeneratoru.

|  |  |
| --- | --- |
| ***a*** | ***b*** |
| 9.1. att.Trīsfāzu maiņstrāvas iegūšanas princips | |

Ģeneratora katras fāzes tinumam ir divi gali — sākums un beigas. Fāzu tinumu sākumus apzīmē ar А, B, С un beigas ar X, Y, Z.

Pieņemtajam fāzu tinumu griešanas virzienam fāzu sākumus apzīmē ar burtiem *fāzu secībā* (A → B → C → A) tā, ka В fāzē inducētais EDS atpaliek fāzē par 120° no Α fāzē inducētā EDS un С fāzē inducētais EDS atpaliek fāzē par 120° no В fāzē inducētā EDS (9.1. att. *a*).

Ja laiku sāk skaitīt no momenta, kad Α fāzē inducētais elektrodzinējspēks *eA* = 0, tad fāzēs inducēto EDS momentānās vēr­tības ir šādas:

*eA* = *EAm* sin*ωt*;

*eB* = *EBm* sin (*ωt* –1200); (9.1)

*eC* = *ECm* sin (*ωt* – 2400).

Ģeneratora fāzēs inducēto simetrisko EDŠ momentāno vērtību līknes parādītas 9.1. attēlā *b*.

Simetriskas EDS (spriegumu, strāvu) sistēmas galvenā īpašība ir tā, ka katrā mirkli EDS (spriegumu, strāvu) momen­tāno vērtību algebriskā summa ir vienāda ar nulli, kā tas redzams arī no EDS mo­mentāno vērtību līknēm (9.1. att. *b*):

*еА + еB + еC* = 0.

Šo sakarību attiecinot uz simetriskas trīsfāzu sistēmas EDS efektīvajām vērtī­bām *EA = EB = EC*, tās jāsummē ģeomet­riski (9.2. att.):

 (9.2)

Tātad simetrisku trīsfāzu EDS ģeometriskā summa ir vienāda ar nulli.

***9.1. piemērs***. Trīsfāžu maiņstrāvas sistēmas *A* fāzes EDS momentāna vērtība nosaka pēc izteiksmes *eA* = 310,2 sin (314*t* + 900), V. Uzrakstīt fāžu *B* un *C* EDS momentāno vērtību izteiksmes, kā arī aprēķināt EDS efektīvās vērtības un konstruēt vektoru diagrammu.

Atrisinājums.

1. Fāžu *B* un *C* EDS momentāno vērtību izteiksmes, ievērojot, ka EDS ir nobīdīti viens pret otru par 1200:

*eB* = 310,2 sin (314*t* + 900 – 1200) = 310,2 sin (314*t* – 300), V.

*eC* = 310,2 sin (314*t* – 300 - 1200) = 310,2 sin (314*t* – 1500), V.

2. Fāžu EDS efektīvās vērtības



|  |  |
| --- | --- |
|  | 9.2. att. Simetriskas trīs­fāzu sistēmas EDS  vek­toru diagramma. |

3. Vektoru diagramma, pieņemot, ka *ME* = 55 V/cm (9.3. att.)



|  |  |
| --- | --- |
|  | 9.3. att. Vektoru diagramma 9.1. piemēram |

***Piezīme***. Lai atliktu EDS vektorus, kuru fāžu nobīdes leņķis ir 1200 uz horizontālās (0*x*) ass abos virzienos no nullpunkta (0) atliek 6 cm (vai 12 rūtiņas), tad no punkta (6) atliek 3,5 cm (vai 7 rūtiņas) vertikāli uz leju. Pēc tam nullpunktu (0) un punktus (3,5) savieno ar taisnēm no nullpunkta (0) uz tam atliek EDS vektorus noteikta garumā (aprēķinātu, ievērojot mērogu).

EDS, kuru fāzu nobīdes leņķi nav 120° vai kuru efektīvās vēr­tības ir dažādas (*EA ≠ EB ≠ ≠EC*), vai arī — kuru fāzu nobīdes leņķi un arī efektīvās vērtības ir dažādas, veido nesimetrisku trīsfāzu sistēmu.

Katrs apskatāmā ģeneratora fāzes tinums ir neatkarīgs EDS avots, un katram no tiem ar diviem vadiem var pievienot savu vienfāzes patērētāju (9.4. att.).

Par ģeneratora fāzēs inducēto EDS pozitīvo virzienu pieņem virzienu no fāzes beigām (Χ, Υ, Z) uz fāzes sākumu (А, В, C).

Trīsfāzu sistēmu, kurā ģeneratora katru fāzi neatkarīgi no citām fāzēm divi vadi savieno ar vienfāzes patērētāju, sauc par nesaistītu trīsfāzu sistēmu.

Nesaistītā trīsfāzu sistēmā ģeneratora katra fāze darbojas neatkarīgi no pārējām, tātad pastāv trīs neatkarīgas vienfāzes maiņstrāvas ķēdes, un enerģijas pārvadīšanai nepieciešami 6 vadi.

Praksē nesaistītu trīsfāzu sistēmu nelieto, jo tai nav nekādu tehniski ekonomisku priekšrocību salīdzinājumā ar vienfāzes sis­tēmu, bet izmanto tikai saistītu trīsfāzu sistēmu, ko iegūst, ģeneratora fāzu tinumus elektriski savienojot, t. i., tos saslēdzot zvaigznes vai trīsstūra slēgumā.

|  |
| --- |
|  |

9.4. att. Nesaistīta trīsfāzu sistēma.

Jāpiezīmē, ka trīsfāzu ģeneratora praktiskais izveidojums at­šķiras no 9.1. attēlā parādītā: ģeneratora fāzu tinumi ir ievie­toti nekustīgā statorā, kura cilindriskajā dobumā rotē elektro­magnēti — poli.

**9.3. ZVAIGZNES SLĒGUMS**

Trīsfāzu sistēmas zvaigznes slēgumā izmanto divus varian­tus — četrvadu sistēmu un trīsvadu sistēmu.

*Četrvadu sistēma*. Tā kā trīsfāzu ģeneratora fāzēs inducētie EDS skaitliski vienādi un nobīdīti fāzē viens pret otru par 120°, tad, ģeneratora fāzu tinumu vienāda nosaukuma galus saslēdzot kopā, ģeneratorā elektriski nekas neizmainās. Ģeneratoram pie­vienojamo vadu skaitu samazina, visus trīs strāvu atpakaļvadus (10.4. att.) apvienojot vienā kopīgā vadā. Reizē ar to iegūst sais­tītu trīsfāzu četrvadu sistēmu — tā saukto zvaigznes slē­gumu (9.5. att.), ko saīsināti apzīmē ar zīmi Y.

Trīsfāzu strāvas ģeneratora fāzu tinumus saslēdz zvaigznē, tinumu vienāda nosaukuma galus, piemēram, tinumu beigas Χ, Υ un Z, savienojot kopā vienā mezglā 0', ko sauc par ģeneratora nullpunktu. Tāpat zvaigznē saslēdz trīs patērētājus, izvei­dojot patērētāja nullpunktu 0.

Kopīgo atpakaļvadu, kas savieno ģeneratora un patērētāja nullpunktus, sauc par nullvadu, bet fāzu tinumu sākumiem А, В un С pievienotos trīs vadus — par līnijas vadiem. Shēmās līnijas vadus apzīmē ar А, В, С un nullvadu — ar 0.

Spriegumus starp jebkuru līnijas vadu un nullvadu vai starp ģeneratora vai patērētāja fāzu spailēm sauc par fāzes sprie­gumiem un apzīmē ar *UA, UB, UC*.

|  |
| --- |
| 9.5. att. Ģeneratora un patērētajā zvaigznes slēgums ar nullvadu (četrvadu sistēma). |

Spriegumus starp līnijas vadiem sauc par līnijas sprie­gumiem un apzīmē ar *UAB*, *U*BC un *UCA* indeksu burtu secība norāda šo spriegumu pozitīvos virzienus.

Saistītā trīsfāzu četrvadu sistēmā izšķir ne tikai divējādas sprieguma vērtības — līnijas spriegumu *Ul* un fāzes spriegumu *Uf*, bet arī divējādas strāvas vērtības — līnijas strāvu *Il* un fāzes strāvu *If*.

Par līnijas strāvām sauc līnijas vados plūstošās strāvas *IA*, *IB* un *IC*, bet par fāzu strāvām — ģeneratora vai patērētāja fāzēs plūstošās strāvas. Par patērētāja fāzu strāvu un fāzu spriegumu pozitīvo virzienu pieņem virzienu no fāzes sākuma uz fāzes bei­gām. Tādēļ līnijas strāvu pozitīvais virziens ir no ģeneratora uz patērētāju, bet nullvada strāvas *I*0 pozitīvais vir­ziens — tam pretējs.

Ja ģenerators un patērētājs saslēgti zvaigznē (9.5. att.), tad ģeneratora katra fāze, līnijas vads un patērētāja fāze savienoti virknē. Tāpēc zvaigznes slēgumā līnijas strāva vienāda ar fāzes strāvu:

*Il = If*. (9.3)

Līnijas sprieguma momentānā vērtība vienāda ar divu attie­cīgo fāzu spriegumu momentāno vērtību algebrisko summu. Tā, piemēram, līnijas sprieguma momentānā vērtība starp patērētāja spai­lēm Α un В

*uAB = uA* + (– *uB*) = *uA – uB*.

Patērētāja *В* fāzes sprieguma momentānā vērtība *uB* ņemta ar mīnusa zīmi tāpēc, ka šīs fāzes sprieguma pozitīvais virziens ir pretējs līnijas sprieguma *uAB* pozitīvajam virzienam. Līdzīgi dabu, ka *uBC = uB — uC* un *uCA = uC — uA*.

Pārejot no spriegumu momentānajām vērtībām uz to efektī­vajam vērtībām, fāzu spriegumi jāsummē ģeometriski:



 (9.4)



Līnijas spriegumu grafiska atrašana no dotajiem fāzu sprie­gumiem, izmantojot izteiksmes (9.4), parādīta 9.6. attēlā *a*.

|  |  |
| --- | --- |
| ***a*** | ***b*** |

9.6. att. Trīsfāžu ģeneratora vektoru diagramma (*a*) un topogrāfiskā diagramma (*b*)

Līnijas spriegumu vektori arī veido simetrisku zvaigzni, kas pagriezta pozitīvā virzienā par 30° pret fāzu spriegumu simet­risko zvaigzni. No grafiskās konstrukcijas redzam, ka līnijas spriegumu vektorus grafiski var iegūt arī vienkāršāk, t. i., fāzu spriegumu vektoru bultiņas savienojot ar taisnēm un tā iegūstot vienādmalu trīsstūri, ko sauc par *līnijas spriegumu trīsstūri*. Šo trīsstūri veidojošo līnijas spriegumu vektoru bultiņas virzītas pretī pulksteņa rādītāja kustības virzienam (9.6. att. *b*).

No viena fāzu sprieguma vektora, piemēram,  galapunkta *A* velkot perpendikulu pret līnijas sprieguma vektoru (9.6. att. *a*), iegūst taisnleņķa trīsstūri *ODA*, no kura izsaka sakarību starp līnijas un fāzu spriegumiem:



Tā kā *UAB = Ul* un *UA = Uf*, tad

 (9.5)

t. i., zvaigznes slēgumā līnijas spriegumsreizes lielāks par fāzes spriegumu. Šī sakarība saista valsts standarta noteiktas maiņsprieguma nominālās vērtības 660, 380, 220 un 127 V:

ja *Ul* = 660 V; *Ul* = 380 V; *Ul* = 220 V,

tad *Uf* = 380 V; *Uf* = 220 V; *Uf* = 127 V.

Līnijas spriegumu trīsstūri (9.6. att. *b*) elektrotehnikā sauc par *topogrāfisko diagrammu*. Katrs punkts šādā diagramma raksturo kāda shēmas punkta potenciālu, bet attālums starp diviem punktiem – šī sprieguma vērtību. Tādējādi topogrāfiskā diagramma visai kompakti satur informāciju par visiem shēmas spriegumiem. Punkti *A*, *B* un *C* izvietoti vienādmalu trīsstūra virsotnēs, bet punkts 0 (0' – ģeneratoram) – tā simetrijas centrā. Šāda diagramma ir raksturīga jebkuram zvaigznē slēgtam trīsfāžu ģeneratoram – diagrammas atšķiras vienīgi ar mērogu.

Topogrāfiskajā diagramma ir divi spriegumu tipi. Visi fāžu spriegumi *UA*, *UB* un *UC* ir vienāda lieluma. Savstarpēji vienādi ir arī līnijas spriegumi *UAB*, *UBC* un *UCA*. Topogrāfiskā diagramma rāda, ka līnijas sprieguma *Ul* vērtība ir lielāka par ģeneratora fāzes sprieguma *Uf* vērtību. Tā kā diagrammā sastopamās leņķu vērtības ir tikai 300, 600 un 1200, tad viegli iegūt sakarību starp līnijas spriegumu un ģeneratora (ne patērētāja !) fāzes spriegumu (9.5).

**9.4. PATĒRĒTĀJU SLĒGŪMS ZVAIGZNĒ.**

Pieņemsim, ka dota trīsfāžu maiņstrāvas ķēde, un jārisina parastais uzdevums: doti avota spriegumi (šeit pietiekami zināt tikai vienu lielumu – līnijas spriegumu, jo ar to ir norādīts mērogs ģeneratora topogrāfiskajai diagrammai ar visiem sešiem spriegumiem), dota arī patērētāja slēguma shēma un tā fāžu pretestības. Jāatrod visas strāvas.

Risinot šādus uzdevumus vai analizējot dažādus trīsfāžu patērētāja darba režīmus, būs vieglāk orientēties tajos, ja ņemsim vērā, ka jebkurā gadījumā realizējas šāds plāns:

1. patērētāju topogrāfiskā diagramma,

2. patērētāju fāžu spriegumi topogrāfiskā diagrammā,

3. patērētāju fāžu strāvas,

4. pārējās strāvas.

Šo plānu var lietot, aprēķinot jebkuru trīsfāžu patērētāja slēguma shēmu. Katra tā punkta izpilde nozīmē vektoru diagrammas (sākuma - topogrāfiskās diagrammas) pakāpenisku veidošanu, pie tam katrai izmaiņai diagramma atbilst kārtējais analītiska aprēķina posms.

Tātad analīzi vai aprēķinu sāk, zīmējot konkrētā patērētāja topogrāfisko diagrammu. Pēc tam, kad fāžu spriegumi tajā ir noteikti, katru patērētāja fāzi var aplūkot atsevišķi kā vienfāzes maiņstrāvas ķēdi ar zināmu spriegumu, un atrast tajā attiecīgās fāzes strāvu. Pārejas strāvas (ja tādas shēma ir) atrod, izmantojot attiecīgās shēmas strāvu vienādojumus.

Trīsfāžu patērētāja topogrāfiskajā diagrammā jāparāda visu tā punktu potenciāli. Zvaigznes slēgumā patērētājam ir 4 punkti A, B, C un 0, trīsstūra slēgumā – 3 punkti: A,B un C. Patērētāja topogrāfisko diagrammu zīmē, izmantojot ģeneratora topogrāfisko diagrammu. Tā kā pārvades līniju var uzskatīt par ideālu (bez pretestības), tad pamatprincips šeit vienkāršs: ja shēmā attiecīgie ģeneratora un patērētāja punkti ir savienoti (ar līnijas vai neitrāles vadu), tad to potenciāli ir vienādi un arī topogrāfiskajā diagrammā šiem punktiem jāsakrīt. Citiem vārdiem, patērētāja topogrāfiskajā diagrammā ir zināmi tik punkti, cik vadu savieno patērētāju ar ģeneratoru.

Ģeneratora spriegumi vienmēr ir simetriski (neatkarīgi no patērētāja fāžu noslodzes) un starp vektoriem vienmēr ir 1200 leņķis.

Patērētāja topogrāfiskā diagramma ar tajā parādītiem patērētāja fāžu spriegumiem redzama 9.7. att. No diagrammas redzams, ka visas patērētāja fāzes saņem skaitliski vienādus, bet fāzē savstarpēji par 1200 nobīdītus spriegumus *UA0*, *UB0* un *UC0*, kas skaitliski vienādi ar ģeneratora fāzes spriegumu *Uf*:

 (9.6)

|  |  |
| --- | --- |
| 9.7. att. Simetriskā patērētāja topogrāfiskā  diagramma | 9.8. att. Nesimetriskā patērētāja topogrāfiskā diagramma |

Nākošais solis: diagramma iezīmē fāžu strāvas vektorus. Ja patērētājas ir simetrisks, t.i., ja visu trīs fāžu pretestības ir vienādas (pēc lieluma un rakstura):

*ZA = ZB = ZC = Z* (tātad *RA = RB = RC* = *R* un *XA = XB = XC* = *X*).

Tad visās fāzes strāvas ir vienāda lieluma

 (9.7)

un vienādi nobīdītas pret attiecīgo fāžu spriegumiem

 vai . (9.8)

Summējot šādu fāžu strāvu vektorus, iegūsim nulli

 (9.9)

Ja patērētāja fāzu pretestības ir dažāda lieluma un rakstura, t. i., ja patērētāja fāzu kompleksās pretestības  (tātad *RA ≠ RB ≠ RC* un *XA ≠ XB ≠ XC*), tad tādu patērētāju (slodzi) sauc par nesimetrisku. Zinot fāžu sprieguma vērtību un patērētāja fāžu pretestības, var aprēķināt fāžu strāvu efektīvās vērtības. Nesimetriskas slodzes režīmā patērētāja fāzēs plūst dažāda lieluma strāvas

 (9.10)

Tātad nesimetriskas slodzes režīmā patērētāja fāzēs plūst dažāda lieluma strāvas.

Fāzes nobīdes leņķus starp patērētāju fāžu strāvām un fāžu spriegumiem nosaka pēc tā kosinusiem vai sinusiem

 (9.11)



Zinot fāzu nobīdes leņķus *φA ,* *φB* un *φC* fāžu strāvu vektorus atliek diagrammā (9.8. att.).

Un pēdējais solis, zīmējot vektoru diagrammu: tajā parāda strāvu neitrāles vadā.

Saskaitot vektoru diagrammā (tikai ne skaitliski!) fāžu strāvu vektorus, atrodam neitrāles vada strāvas vektoru (9.8. att.).

Strāvu vienādojums šai shēmai

 (9.12)

No šiem diviem piemēriem izriet, ka četrvadu sistēmā patērētāja fāzes vienmēr saņem vienāda lieluma spriegumus, bet strāva neitrāles vadā ir atkarīga no patērētāja fāžu pretestību nesimetrijas pakāpes. Jā patērētājs ir simetrisks, tad neitrāles vadā strāva neplūst: *I*0 = 0.

Nesimetrisku slodzi rada trīsfāzu sistēmai pievienoti vien­fāzes patērētāji — kvēlspuldzes, sildierīces, vienfāzes elektrodzinēji, vienfāzes elektriskās krāsnis u. c.

**9.5. TRĪSFĀZU ĶĒDES JAUDAS**

Trīsfāzu ķēdes aktīvo un reaktīvo jaudu atrod, summējot patē­rētāja atsevišķo fāzu atbilstošās jaudas (neatkarīgi no patērētāja slēguma veida).

Ja patērētājs pieslēgts četrvadu sistēmai (zvaigznes slēgums), tad katras fāzes aktīvo un reaktīvo jaudu atrod saskaņā ar izteik­smēm:

*PA = UAIA* cos *φA*, *QA = UA IA* sin *φA*,

*PB = UBIB* cos *φB*, *QB = UB IB* sin *φB*, (9.13)

*PC = UCIC* cos *φC*, *QC = UC IC* sin *φC*,

kur *UA, UB, UC* — patērētāja fāzu spriegumi;

*IA, IB, IC* — patērētāja fāzu strāvas;

*φA*, *φB*, *φC* — fāzu nobīdes leņķi starp fāzu strāvām un fāzu spriegumiem.

Trīsfāzu ķēdes aktīvā jauda *Ρ* ir vienāda ar atsevišķo fāzu aktīvo jaudu aritmētisko summu:

*P =* *PA* + *PB + PC,* (9.14)

bet trīsfāzu ķēdes reaktīvā jauda *Q* ir vienāda ar atsevišķo fāzu reaktīvo jaudu algebrisko summu:

*Q =* *QA* + *QB +QC.* (9.15)

Trīsfāzu ķēdes pilnā jauda

 (9.16)

Ja slodze simetriska, tad

*PA* + *PB + PC* = *Pf*, *QA* + *QB +QC* = *Qf*, *φA* = *φB* = *φC* = *φ*

un trīsfāzu ķēdes jaudas

*P =* 3*Pf =* 3*UfIf* cos *φ,*

*Q =* 3*Qf =* 3*UfIf* sin *φ,*

*S =* 3*UfIf .*

Tā kā zvaigznes slēgumā *Il = If* un tad



 (9.17)



Izteiksmes (9.17) izmantojamas arī trīsstūri slēgtai simetris­kai slodzei. Tikai jāiegaumē, ka šajās izteiksmēs leņķis *φ* ir fāzu nobīdes leņķis starp fāzes strāvu un fāzes spriegumu.

Var pierādīt, ka trīsstūri slēgtas simetriskas slodzes pretes­tības patērē 3 reizes vairāk aktīvās jaudas nekā tam pašam līni­jas spriegumam pievienotas tās pašas zvaigznē slēgtas slodzes pretestības, t. i.,

 (9.18)

**9.6. NULLVADA NOZĪME NESIMETRISKAS SLODZES ZVAIGZNES**

**SLĒGUMĀ**

Iztirzājot četrvadu sistēmu, netika ņemtas vērā patērē­tāju un ģeneratoru savienojošo vadu pretestības, un tādēļ uzska­tījām, ka nesimetriskas slodzes režīmā patērētāja fāzu spriegumi ir simetriski, skaitliski vienādi un sakrīt fāzē ar atbilstošajiem ģeneratora fāzu spriegumiem. Īstenībā tomēr šīs pretestības ir jāievēro.

Taču līnijas vadu pretestības vienmēr var ietvert tiem virknē pievienotajās patērētāja fāzu pretestības. Tādēļ jāievēro tikai null­vada kompleksā pretestība  (9.9. att.), t. i., pretestība starp ģeneratora nullpunktu 0 un patērētāja nullpunktu 0'.

|  |
| --- |
| 9.9. att. Trīsfāzu četrvadu sistēma ar nesimetrisku slodzi. |

Bet, tā kā četrvadu ķēdē ar nesimetrisku slodzi nullvada strāva > 0, tad nullvada pretestībā  pastāv sprieguma kritums  Šī iemesla dēļ patērētāja fāzu spriegumi ,  un  vairs nav vienādi ar atbilstošajiem ģeneratora fāzu spriegumiem ,  un .

Tā kā iztirzājamā shēmā ir tikai divi mezgli — 0 un 0' tad sprieguma aprēķināšanai izdevīgi lietot mezglu sprieguma metodi, pieņemot, ka ģeneratora ,  un , jo ģeneratora fāzu pretestības ir neievērojami mazas. Tad sprieguma kritums nullvada

 (9.19)

kur

 (9.20)

ir patērētāja fāzu un nullvada kompleksās vadītspējas un , ,  — patērētāju fāzu kompleksās pretestības. Tad patērētāja fāzu spriegumi



 (9.21)



fāzu strāvas

 (9.22)

un nullvada strāva



Simetriskai slodzei , un sprieguma kritums starp avota un patērētajā nullpunktiem 0 un 0' ir vienāds ar nulli:



Bet tas nozīmē, ka nullvada nav strāvas ( = 0), tātad nullvads simetriskai slodzei nav vajadzīgs.

Ja slodze nesimetriska, tad nullvada strāva > 0, un tādēļ arī spriegums > 0. Sprieguma  skaitliskā vērtība ar noteiktu nullvada strāvu  ir jo lielāka, jo lielāka ir nullvada pretestība . Spriegumssasniedz maksimālo vērtību tad, kad nullvada nav vai nullvads ir pārtraukts, jo tad = ∞ un = 0.

Nesimetriskas slodzes režīma, pārtraucot nullvadu, ievērojami izmainās patērētāja fāzu strāvas (, jo ) un fāzu spriegumi, kuriem tagad ir dažādas skaitliskās vērtības , ,  un dažādi fāzu nobīdes leņķi starp tiem, kā tas redzams 9.10. attēla paradītajā spriegumu topogrāfiskajā vektoru dia­grammā. Spriegumu sauc par nullpunkta nobīdi.

|  |  |
| --- | --- |
|  | 9.10. att. Spriegumu to­pogrāfiskā vektoru dia­gramma nesimetriskas slo­dzes zvaigznes slēgumam bez nullvada. |

Bet režīms ar dažāda lieluma fāzu spriegumiem, kuri ievēro­jami atšķiras no patērētāja nominālā sprieguma *UN*, nav pieļaujams.

Tādēļ nullvada nedrīkst ievietot slēdzi vai kustošo drošinātāju.

Lai nesimetriskas slodzes režīmā patē­rētajā fāzēm nodrošinātu simetriskus spriegumus *UA = UB = UC* (9.10. att.), tad nullpunkta nobīdi jātiecas samazināt līdz nullei. Praktiski to panāk, zvaig­zne slēgtu nesimetrisku slodzi pievieno­jot četrvadu ķēdei, kurai ir tik maza null­vada pretestība *Z*0, ka var neievērot sprieguma kritumu nullvada . Bet, tā ka praksē nullvada pretestība salīdzi­nājuma ar patērētāja fāzu pretestībām tiešam ir ļoti maza, tad praktiski null­punkta nobīde četrvadu sistēmā = 0, t. i., patērētāja fāzu sprie­gumi praktiski ir simetriski ar jebkurām patērētāja fāzu strāvu vērtībām.

Tātad nullvads nodrošina zvaigznē slēgtai nesimetriskai slo­dzei simetriskus fāzu spriegumus.

***9.2. piemērs.*** 9.11. att. parādīts zvaigznē slēgts nesimetrisks patērētājs, kas enerģiju saņem no trīsfāžu ģeneratora pa četrvadu līniju (līnijas vadi A, B, C; neitrāles vads N). Dots līnijas spriegums *Ul* = 380 V. Patērētāja A - fāzē virknē slēgtas spole ar aktīvo pretestību *RA* = 11 Ω un induktīvo pretestību *XLA* = 34 Ω un kondensators ar kapacitīvo pretestību *XCA* = 53 Ω; B - fāzē ir spole ar aktīvo pretestību *RB* = 11 Ω un induktīvo pretestību *XLB* = 19 Ω; C - fāzē ir kondensators ar kapacitīvo pretestību *XCC* = 22 Ω.

|  |
| --- |
| 9.11. att. Nesimetrisks patērētājs, četrvadu sistēma |

1. Aprēķināt fāzu strāvas;

2. Aprēķināt strāvu nullvadā;

3. Aprēķināt aktīvo, reaktīvo un pilno jaudu katrai fāzei un visai ķēdei;

4. Aprēķināt fāzu nobīde starp spriegumu un strāvu katrā fāze;

5. Mērogā uzkonstruēt vektoru diagrammu un topogrāfisko diagrammu

Atrisinājums.

Vispirms uzdevumu risināsim ar vektoru diagrammu (grafoanalītisko) metodi

1. Patērētāja topogrāfiskā diagramma ir tāda pati kā ģeneratoram, jo pārvades līnija ir 4 vadi, kas patērētajam piegādā visu ģeneratora punktu *A*, *B*, *C* un *0* potenciālus. Tas nozīme, ka patērētāja neitrāles potenciāls sakrīt ar ģeneratora neitrāles potenciālu. Arī visu patērētāja fāžu spriegumi (*UA, UB, UC*) ir tādi paši kā ģeneratora fāžu spriegumi

 V.

Tagad visu fāžu spriegumi ir zināmi *UA* = *UB* = *UC* = 220 V, tāpēc nākošajā risinājuma posmā varēsim risināt trīs atsevišķus vienfāzes maiņstrāvas uzdevumus. Trīsfāžu specifika no jauna parādīsies tikai aprēķina nobeigumā – aprēķinot strāvu neitrāles vadā.

2. Atrodam fāžu pilnās pretestības, fāžu strāvas un to nobīdes leņķus attiecībā pret saviem spriegumiem.

*A* – fāzē elementi slēgti virknē. Šādā gadījumā slēguma pilno pretestību atrod no pretestību trīsstūra (10.12. att. *a*):

 Ω.

Pretestību trīsstūrī leņķis *φA* ir negatīvs, jo reaktīva pretestība *XA = XLA – XCA* ir kapacitīva. Šī leņķa skaitlisko vērtību atrod no pretestību trīsstūra



Strāva apsteidz spriegumu *A* – fāzē par 600.

*A* – fāzes strāvas efektīvā vērtība

 A.

*B* – fāzē elementi slēgti virknē. Šādā gadījumā slēguma pilno pretestību arī atrod no pretestību trīsstūra (9.12. att. *b*):

 Ω.

Pretestību trīsstūrī leņķis *φB* ir pozitīvs, jo reaktīva pretestība *XB = XLB – XCB = XLB*  ir induktīva. Šī leņķa skaitlisko vērtību atrod no pretestību trīsstūra (9.12. att. *b*)



Strāva atpaliek no sprieguma par 600.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| ***a*** | ***b*** | ***c*** |

9.12. att. Vektoru diagrammas 9.2 piemēram

B – fāzes strāvas efektīvā vērtība

 A.

C – fāzē ieslēgts kondensators, tāpēc šīs fāzes strāva apsteidz šīs fāzes spriegumu par *φC* = – 900 (9.12. att. c). Strāvas vērtība:

 A.

3. Trīsfāžu patērētāja topogrāfiskajā diagrammā jāparāda visu tā punktu potenciāli. Zvaigznes slēgumā patērētājam ir 4 punkti *A*, *B*, *C* un *0*. Patērētāja topogrāfisko diagrammu zīmē, izmantojot ģeneratora topogrāfisko diagrammu. Tā kā pārvades līniju var uzskatīt par ideālu (bez pretestības), tad pamatprincips šeit vienkāršs: ja shēmā attiecīgie ģeneratora un patērētāja punkti ir savienoti (ar līnijas vai neitrāles vadu), tad to potenciāli ir vienādi un arī topogrāfiskajā diagrammā šiem punktiem jāsakrīt. Citiem vārdiem, patērētāja topogrāfiskajā diagrammā ir zināmi tik punkti, cik vadu savieno patērētāju ar ģeneratoru.

Ģeneratora spriegumi vienmēr ir simetriski (neatkarīgi no patērētāja fāžu noslodzes) un starp vektoriem vienmēr ir 1200 leņķis.

Vispirms zīmē patērētāja topogrāfisko diagrammu. No diagrammas (9.13. att.) redzams, ka visas patērētāja fāzes saņem skaitliski vienādus, bet fāzē savstarpēji par 1200 nobīdītus spriegumus *UA0*, *UB0* un *UC0*, kas skaitliski vienādi ar ģeneratora fāzes spriegumu *Uf*:



Nākošais solis: zinot fāžu nobīdes leņķus *φA*, *φB*, *φC*, diagrammā iezīmē fāžu strāvu vektorus.

Un pēdējais solis, zīmējot vektoru diagrammu: tajā parāda strāvu neitrāles vadā. Strāvu vienādojums šai shēmai

*I*0 *= IA + IB + IC.*

(Saskaņa ar pirmo Kirhofa likumu patērētāja nullpunktam 0 nullvada strāva vienāda ar līnijas (fāžu) strāvu ģeometrisko summu). Saskaitot vektoru diagrammā (tikai ne skaitliski!) fāžu strāvu vektorus, atrodam neitrāles vada strāvas vektoru (9.13. att.).

|  |
| --- |
| 9.13. att. Vektoru diagrammas 9.2 piemēram |

Mērogs M = 2,5 A/cm. Vektoru garumi:





un  A, bet *φN* = 1650.

4. Jaudas aprēķins

Katras fāzes aktīvā jauda

*PA = UA·IA·cosφA* = 220·10·cos(–600) = 1100 W,

*PB = UB·IB·cosφB* = 220·10·cos 600 = 1100 W,

*PC = UC·IC·cosφC* = 220·10·cos(–900) = 0 W,

Visas ķēdes aktīvā jauda

*P = PA + PB + PC* = 1100 + 1100 + 0 = 2200 W

Katras fāzes reaktīvā jauda

*QA = UA·IA·sinφA* = 220·10·sin(–600) = –1905 VAr,

*QB = UB·IB·sinφB* = 220·10·sin 600 = 1905 VAr,

*QC = UC·IC·sinφC* = 220·10·sin(–900) = –2200 VAr,

Visas ķēdes reaktīvā jauda

Q *= QA + QB + QC* = –1905 + 1905 + (–2200) = –2200 Var.

Pilnā jauda

S*A = UA·IA* = 220·10 = 2200 VA,

S*B = UB·IB* = 220·10 = 2200 VA,

S*C = UC·IC* = 220·10 = 2200 VA,

 VA.

***9.3. piemērs.*** *Uzdevuma risinājums ar simbolisko metodi*

1.Izveidojam aizvietošanas shēmu (9.14. att.), aizstājot katru elementu vai elementu virknes slēgumu ar kompleksu pretestību. Fāžu komplekso pretestību vērtības:



kur *ZA* = 22 Ω – A –fāzes pilnā pretestība, *φA* = – 600 – fāzu nobīde starp spriegumu un strāvu *A* – fāzē.

Ω,

kur *ZB* = 22 Ω – B –fāzes pilnā pretestība, *φB* = 600 – fāzu nobīde starp spriegumu un strāvu B – fāzē.

Ω,

kur *ZC* = 22 Ω, *φC* = – 900.

|  |  |
| --- | --- |
| 2. Lai pareizi aizstatu ģeneratora EDS ar to kompleksiem, labi jāpārzina, ģeneratora topogrāfiskā diagramma. Ievērojot, ka ģeneratora EDS vienādi ar to fāžu spriegumiem, varam atrast to skaitlisko vērtību:  *UA = UB = UC = Uf =*  Tāda būs arī moduļa vērtība visiem kompleksajiem spriegumiem (EDS). Vēl jāparāda, ka spriegumi (EDS) savstarpēji nobīdīti fāzē par 1200. | 9.14. att. Aizvietošanas shēma |

Pieņemot, ka A – fāzes EDS sākuma fāze ir 00:

*UA = Uf =* 220 V,

un, zinot, ka, piemēram B – fāzes EDS atpaliek fāzē par 1200, uzrakstām, trigonometriskā formā visus EDS kompleksus, ko pēc tam pārveidojam algebriskā formā:

 =  220 [cos(–1200) + *j* sin(–1200)] = –110 – *j* 190,5 V,

 220 [cos(1200) + *j* sin(1200) ] = – 110 + *j* 190,5 V.

3. Tagad aizvietošanas shēmas (9.14. att.) dati sagatavoti. Zināmi spriegumi uz fāžu pretestībām, un varam aprēķināt fāžu strāvas kompleksus:





4. Strāva nullvadā: saskaņā ar 1.Kirhofa likuma: 

*=* 5,02 *+ j* 8,67– 9,98 – *j* 0,01 – 8,66 – *j*5 =

= –13,62 + *j* 3,66 =  A.

Moduļa vērtība *I*0 = 14,1 A, argumenta vērtība *φN* = 1650.

Aprēķinām patērētāja katras fāzes un kopējo patērēto jaudu:

 VA,





VA.

1. Vektoru diagramma (9.15. att.).

Aktīvā jauda ir kompleksās jaudas reālā daļa. Iegūtie rezultāti nozīme, ka patērētāja A– fāzes patērētā aktīvā jauda *PA* = 1104,4 W, *B* – fāzē patērē *PB* = 1095,9 W, bet C – fāzē patērē jaudu *PC* = 0,1 W. Kopējā patērētā aktīvā jauda ir *P* = 2200,4 W. Rezultātu pareizību visvienkāršāk pārbaudīt šādi. Aktīvo jaudu patērē tikai rezistīvie elementi. Katram no tiem aktīvo jaudu var atrast sareizinot tā pretestību ar strāvas efektīvās vērtības kvadrātu.

Reaktīvā jauda ir kompleksās jaudas imaginārā daļa. Iegūtie rezultāti nozīme, ka patērētāja *A* – fāzes patērētā reaktīvā jauda *QA* = –1907,4 VAr, *B* – fāzē patērē *QB* = 1902,3 VAr, bet *C* – fāzē patērē jaudu *QC* = – 2199,7 VAr. Kopējā patērētā reaktīvā jauda ir *Q* = – 2204,8 VAr. Rezultātu pareizību visvienkāršāk pārbaudīt šādi. Reaktīvo jaudu patērē tikai reaktīvie elementi. Katram no tiem reaktīvo jaudu var atrast sareizinot tā pretestību ar strāvas efektīvās vērtības kvadrātu.

|  |
| --- |
|  |

9.15. att. Ģeneratora un patērētāja fāžu spriegumi un strāvas kompleksu plaknē.

Visas ķēdes pilnā jauda

 VA.

**9.7. TRĪSVADU SISTĒMA**.

Šāda slēguma shēma redzama 9.16 att. Atšķirībā no četrvadu sistēmas šeit neitrāles vada nav, un patērētāja neitrāles 0 potenciāls vispārīga gadījumā nav vienāds ar ģeneratora neitrāles 0' potenciālu. Topogrāfiskajā diagrammā tad patērētāja neitrāle 0 būs nobīdīta un patērētāja fāžu spriegumi  un  būs dažāda lieluma. Vienīgais izņēmuma gadījums – ja patērētājs ir simetrisks.

**9.7.1. Zvaigznē slēgts simetrisks patērētājs bez neitrāles vada**.

Tā kā patērētāju fāžu pretestības ir vienāda lieluma un rakstura, t. i., ja *ZA = ZB = ZC = Z* (tātad *RA = RB = RC = R*, *XA = XB = XC = X* un *φA = φB = φC = φ*), tad nav pamata domāt, ka uz kādas no tām sprieguma vērtība atšķirtos no citām. Simetrisku slodzi rada trīsfāzu patērētāji — trīsfāzu elektrodzinēji, trīsfāzu elektriskas krāsnis u. c.

|  |
| --- |
| 9.16. att. Trīsvadu sistēma ar patērētāju zvaigznē. |

Ja simetriskai trīsfāzu spriegumu sistēmai pievieno simetrisku slodzi, tad patērētāja fāzu spriegumi  un  ir simetriski un skaitliski vienādi ar ģeneratora fāzes spriegumu *Uf*



Visās fāzes strāvas ir vienāda lieluma un vienādi nobīdītas pret attiecīgo fāžu spriegumiem

*IA = IB = IC = If* =



Tātad fāzes strāvas arī veido simet­risku strāvu sistēmu (9.17. att.). Tādēļ nullvada strāva



t. i., ja slodze simetriska, tad nullvada nav strāvas.

|  |  |
| --- | --- |
|  | 9.17. att. Vektoru dia­gramma  simetriskas slo­dzes zvaigznes slēgu­mam. |

Patērētāja topogrāfiskajā diagramma ir tāda pati kā iepriekšējā gadījumā (simetrisks patērētājs, bet četrvadu sistēma).

Turpinot zīmēt patērētāja vektoru diagrammu pēc plāna (patērētāja topogrāfiskā diagramma – fāžu spriegumi – fāžu strāvas – pārējo strāvu šeit nav), iegūstam to pašu vektoru diagrammu kā 9.7. att.

Tā kā diagrammas abiem gadījumiem pilnīgi sakrīt, tad varam secināt: *ja patērētājs ir simetrisks, tad zvaigznes slēgumā neitrāles vads nav nepieciešams*.

Tādējādi zvaigznē saslēgtai simetriskai slodzei enerģiju patērētājam pievada tikai ar trim līnijas vadiem, tā vēl vairāk ietaupot vadu materiālu (9.16. att.).

Ja zvaigznē saslēgts elektriskas enerģijas avots baro simet­risku un nesimetrisku slodzi, tad izmanto četrvadu sistēmu un vienfāzes patērētājus slēdz starp līnijas vadiem un nullvada, bet trīsfāzu patērētājus — pie līnijas vadiem (9.18. att.).

|  |  |
| --- | --- |
|  | 9.18. att. Četrvadu līnija ar pievienotiem  vienfāzes un trīsfāzu patērētajiem. |

Zvaigznes slēgumā atsevišķo fāzu slodzes jāizkārto iespējami vienmērīgi, lai nullvada strāva būtu mazāka par katra līnijas vada strāvu. Sakara ar to nullvada šķērsgriezuma laukums pa­rasti ir divas reizes mazāks nekā līnijas vadam.

**9.7.2. Zvaigznē slēgts nesimetrisks patērētājs bez neitrāles vada**.

Ja patērētāja fāžu pretestības nav vienādas, tad topogrāfiskajā diagrammā punkts 0 nesakrīt ar punktu 0' – tas nozīmē, ka starp šiem shēmas punktiem pastāv spriegums  (neitrāles nobīde), kas ir jo lielāks, jo lielāka ir patērētāja fāžu nesimetrija.

Lai aprēķinātu neitrāles nobīdes vektoru, nepieciešams lietot kompleksos lielumus (simbolisko metodi). Šeit aprobežosimies ar aptuvenu norādījumu par patērētāja neitrāles 0 nobīdes virzienu: ja kādā no fāzēm (A, B vai C) pretestību samazina, punkts 0 topogrāfiskajā diagrammā pārvietojas attiecīgās fāzes punkta virzienā. Piemērs: ja fāzē B pretestību samazina līdz nullei, tad punkts 0 diagrammā sakrīt ar punktu B.

Pēc tam, kad neitrāles nobīde atrasta, patērētāja fāžu sprieguma vektorus atliek savienojot diagrammā punktu 0 ar punktiem *A*, *B* un *C*. Bultiņas – punktu *A*, *B* un *C* virzienā.

Atšķirībā no visiem iepriekšējiem gadījumiem aprēķinā tagad fāžu spriegumu vērtības ir dažādas, kas jāievēro, aprēķinot fāžu strāvu vērtība:



Zinot fāžu nobīdes leņķus *φA*, *φB* un *φC*, fāžu strāvu vektorus diagrammā (9.19. att.) atliek attiecībā pret patērētāja fāžu spriegumiem.

|  |  |
| --- | --- |
|  | 9.19. att. Spriegumu vektoru diagramma nesimetriskas slodzes zvaigznes slēgumam (bez nullvada) |

No aplūkotajiem piemēriem ir redzama neitrāles vada nozīme: shēma ar neitrāles vadu nodrošina arī zvaigznē slēgtam nesimetriskam patērētājam vienādus (simetriskus) fāžu spriegumus.

Jo lielāka ir slodzes nesimetrija, jo lielāka ir atšķirība starp patērētāja fāžu spriegumiem. Tas, protams, var radīt lielus spriegumus uz patērētāja fāzēm (pārspriegums), resp. avārijas.

Bet režīms ar dažāda lieluma fāžu spriegumiem, kuri ievērojami atšķiras no patērētāja nomināla sprieguma *UN* nav pieļaujams. Tādēļ nullvadā nedrīkst ievietot slēdzi vai kūstošo drošinātāju.

**9.7.3. Avārijas režīmi trīsvadu sistēma.**

Aplūkosim nesimetriska patērētāja robežgadījumus – ja vienas fāzes pretestība ir bezgalīgi liela (fāzes pārtraukums) vai vienāda ar nulli (fāzes īsslēgums) – trīsvadu sistēmā.

Četrvadu sistēmā fāzes saņem ģeneratora fāžu spriegumus, tāpēc vienas fāzes pārtraukuma gadījumā abu pārējo fāžu spriegumi paliktu bez izmaiņām, bet fāzes īsslēgums būtu pārāk bīstams avārijas režīms (izsekojiet tam shēmā!).

Kā redzēsim no vektoru diagrammām (9.20. att.), trīsvadu sistēmā vienas fāzes īsslēguma gadījumā patērētājs vēl varētu turpināt darboties.

|  |  |
| --- | --- |
| ***a*** | ***c*** |
| ***b*** | ***d*** |

9.20. att. Patērētāja topogrāfiskā diagramma avārijas režīmos:

*a, b* - fāzes pārtraukuma gadījumā, *c, d* - īsslēgumā.

Izpētīsim, kas notiek ar fāžu spriegumiem abos minētajos avārijas gadījumos ar zvaigznē slēgtu patērētāju trīsvadu sistēma.

9.20., *a* att. shēmā *C*–fāze ir pārtraukta, piemēram, pārdeg drošinātājs vadā *C* (t.i., fāzes pretestība *Z*C ir bezgalīgi liela: *Z*C = ∞, *Y*C = 0). Topogrāfiskajā diagrammā (9.20., *b* att.) punkts 0 attālinās no *C*. Ja visas patērētāja pretestības ir rezistīvas, tad tas atrodams uz taisnes *AB*.

Šajā gadījumā nullvada nav (*Z*0 = ∞, *Y*0 = 0) un spriegums starp patērētāja un ģeneratora neitrāli

,

tā kā *Y*C = 0 un *Z*A = *Z*B tad spriegums starp patērētāja un ģeneratora neitrāli

,

jeb, ievietojot , iegūsim

.

Spriegums uz patērētāja *C* fāzē ir vienlīdzīgs nullei, jo lūzuma gadījumā strāva vadā vienlīdzīga nullei, tomēr starp pārdegušā drošinātāja spailēm rodas spriegums

.

Starp citu šajā slēgumā patērētāja fāzes pārtraukums nozīmē to pašu, ko pārrāvums vienā līnijas vadā.

Topogrāfiskā diagramma rāda, ka spriegumi uz pārējām fāzēm samazinās. Spriegums uz patērētāja *A* fāzes



Spriegums uz patērētāja *B* fāzes



Pārējas divas fāzes tagad faktiski ir pieslēgtas vienfāzes avotam ar spriegumu *U*AB un veido virknes slēgumu (sprieguma dalītāju). Iegūtos rezultātus ilustrē topogrāfiskā diagramma.

Ja ģeneratora spriegumu simetriskas sistēmas un patērētāja fāzu vienādu pretestību gadījumā notiek īsslēgums *C* fāzē (*Z*C = 0) (9.20. att. *d*) un nullvada nav (*Z*0 = ∞ un attiecīgi *Y*0 = 0), tad reizinot formulas



skaitītāju un saucēju ar *Z*C, iegūstam



Spriegums uz patērētāja *A* fāzes spailēm



Spriegums uz patērētāja *B* fāzes spailēm



Iegūtos rezultātus ilustrē topogrāfiskā diagramma. Shēmas punkts 0 un *C* tagad savienoti, tiem ir vienādi potenciāli, tāpēc diagrammā tie sakrīt. Redzams, ka spriegums uz *C* fāzes vienāds ar nulli, bet spriegumi uz abām pārējām fāzēm pieaug – kļūst vienādi ar līnijas spriegumiem, tātad palielinās  reizes. Vēl viena ilustrācija neitrāles vada nozīmei – četrvadu sistēmā avarējusī fāze (teiksim viena dzīvokļa patērētāji) tiktu atslēgta, bet pārējās divas turpinātu normāli darboties.

***9.4. piemērs.*** Trīsfāžu trīsvadu tīklā ar līnijas spriegumu 380 V zvaigznes slēgumā ieslēgts simetrisks patērētājs: spole ar aktīvo pretestību *R* = 30 Ω un induktīvo pretestību *XL* = 40 Ω (9.21. att.). Aprēķināt fāžu spriegumu, strāvas un jaudas, konstruēt vektoru diagrammu.

|  |  |
| --- | --- |
| *a* | *b* |

9.21. att. Trīsfāžu maiņstrāvas ķēde (*a*); aizvietošanas shēma (*b*)

*Uzdevuma risinājums ar vektoru diagrammu metodi*

Fāžu spriegumi

 V.

Fāžu pilnās pretestības

 Ω.

Fāžu (līnijas) strāvas

A.

Fāžu nobīdes leņķi





Aktīvā, reaktīvā un pilnā jauda

 W.

 Var.

 VA.

*Vektoru diagramma*. Konstruē topogrāfisko diagrammu, ja *MU* = 44 V/cm un *MI* = 1,1 A/cm (10.22. att.).

***9.5. piemērs.*** *Uzdevuma risinājums ar simbolisko metodi*

Izveidojam aizvietošanas shēmu (9.21. att., *b*), aizstājot katru elementu vai elementu virknes slēgumu ar kompleksu pretestību. Fāžu komplekso pretestību vērtības:

*ZA = ZB = ZC* = 30 + *j*40 (Ω).

Lai pareizi aizstatu ģeneratora EDS ar to kompleksiem, labi jāpārzina, ģeneratora topogrāfiskā diagramma. Ievērojot, ka ģeneratora EDS vienādi ar to fāžu spriegumiem, varam atrast to skaitlisko vērtību:

*U*A = *U*B = *U*C = *Uf* = 

Tāda būs arī moduļa vērtība visiem kompleksajiem spriegumiem (EDS). Vēl jāparāda, ka spriegumi (EDS) savstarpēji nobīdīti fāzē par 1200. Pieņemot, ka *A*–fāzes EDS sākuma fāze ir 00:

*E*A = *U*A = 220 V,

un, zinot, ka, piemēram *B* – fāzes EDS atpaliek fāzē par 1200, uzrakstām, trigonometriskā formā visus EDS kompleksus, ko pēc tam pārveidojam algebriskā formā:

 = 220 [cos(-1200) + *j* sin(-1200)] = –110 – *j* 190,5 V,

 = 220 [cos(1200) + *j* sin(1200) ] = –110 + *j* 190,5 V.

|  |  |
| --- | --- |
|  | 9.22. att. Topogrāfiskā diagramma simetriskā patērētāja gadījumā. |

Tagad aizvietošanas shēmas (9.21. att., *b*) dati sagatavoti. Zināmi spriegumi uz fāžu pretestībām, un varam aprēķināt fāžu strāvas kompleksus:







Pārbaude: saskaņa ar 1.Kirhofa likuma: .

 *=* 10,63 + *j*1,38 – 6,5 – *j*8,53 – 4,13 + *j*7,15 = 0.

Vektoru diagramma kompleksu plaknē parādīta 9.23. att.

|  |  |
| --- | --- |
|  | 9.23. att. Vektoru diagramma kompleksu plaknē |

Aprēķinām patērētāja katras fāzes un kopējo patērēto jaudu:

 = 220 (2,64 + *j*3,52) = 580,8 + *j*774,4 VA,

= (–110 – *j*190,5) (–4,37 + *j*0,53) = 581,7 + *j*774,2 VA,



= (–110 + *j*190,5) (1,73 – *j*4,05) = 581,2 + *j*775,1 VA,



1743,7 + *j*2323,7 VA.



Aktīvā jauda ir kompleksās jaudas reālā daļa. Iegūtie rezultāti nozīme, ka patērētāja *A*– fāzes patērētā aktīvā jauda *PA* = 580,8 W, *B* – fāzē patērē *PB* = 581,7 W, bet *C* – fāzē patērē jaudu *PC* = 581,2 W. Kopējā patērētā aktīvā jauda ir *P* = 1743,7 W. Rezultātu pareizību visvienkāršāk pārbaudīt šādi . Aktīvo jaudu patērē tikai rezistīvie elementi. Katram no tiem aktīvo jaudu var atrast sareizinot tā pretestību ar strāvas efektīvās vērtības kvadrātu

Reaktīvā jauda ir kompleksās jaudas imaginārā daļa. Iegūtie rezultāti nozīme, ka patērētāja *A*– fāzes patērētā reaktīvā jauda *QA* = 774,4 VAr, *B* – fāzē patērē *QB* = 774,2 VAr, bet *C* – fāzē patērē jaudu *QC* = 775,1 Var. Kopējā patērētā reaktīvā jauda ir *Q* = 2323,7 VAr. Rezultātu pareizību visvienkāršāk pārbaudīt šādi. Reaktīvo jaudu patērē tikai reaktīvie elementi. Katram no tiem reaktīvo jaudu var atrast sareizinot tā pretestību ar strāvas efektīvās vērtības kvadrātu.

Visas ķēdes pilnā jauda



I. *Uzdevuma papildjautājums*. Kā ķēdē izmainās strāvas un spriegumi, ja notiek fāzes A īsslēgums? Aprēķināt fāžu spriegumi, fāžu strāvas un jaudas, konstruēt vektoru diagrammas.

*Uzdevuma risinājums ar vektoru diagrammu metodi.*

Vektoru diagrammā punkts 0 savienojas ar punktu A (9.24. att.). Spriegumi *U*B0, *U*C0 vienādi ar līnijas spriegumiem, t.i., pieaug reizes:



*UA*0 = 0; *UB*0 = *U*C0 = *Uℓ* = 380 V

un fāžu (līnijas) strāvas arī palielinās reizes.



|  |  |
| --- | --- |
| ***a*** | ***b*** |

9.24. att. Trīsfāžu maiņstrāvas ķēde īsslēguma gadījumā (*a*) un aizvietošanas shēma (*b*)

Fāžu (līnijas) strāvas

A.



Fāžu nobīdes leņķi



Tā kā abu fāžu pretestības nemainās, tad *IB*, *IC* atpaliek fāzē no attiecīgiem spriegumiem par 53,10.

Saskaņā ar 1. Kirhofa likumu



un ievērojot strāvu virzienus (9.25. att.), iegūstam



No vektoru diagrammas (9.25. att.) iegūstam, ka vektora *IA* efektīvā vērtība ir *IA* ≈ 14 A

Ķēdes aktīvā jauda

*P = P*1 + *P*2 + *P*3 = *IAUA0*cos*φ* + *IBUB0*cos*φ* + +*ICUC0*cos*φ* = 0 + 7,6·380·0,6 +

+ 7,6·380·0,6 = 0 + 1732,8 +1732,8 = 3465,6 W

palielināsies gandrīz 2 reizes.

|  |  |
| --- | --- |
| 9.25. att. | 9.26. att. |

Ķēdes reaktīvā jauda

*Q = Q*1 + *Q*2 +*Q*3 = *IAUA*0 sin*φ* + *IBUB*0sin*φ* + *ICUC*0 sinφ = 0 + 7,6·380·0,8 + 7,6·380·0,8 =

= 0 + 2310,4 + 2310,4 = 4620,8 VAr.

Ķēdes pilnā jauda

*S* = *S*1 + *S*2 + *S*3 = *IAUA0*  + *IBUB0* + *ICUC*0 = 0 + 7,6·380 + 7,6·380 =

*=* 0 + 2888 + 2888 = 5776 VA

I. *Uzdevuma risinājums ar simbolisko metodi*

9.24. att. *b*. shēmā *A* - fāzē ir īsslēgums (t.i., šīs fāzes pretestība *ZA* ir nulle). Punkts 0 savienojas ar punktu *A*, tiem ir vienādi potenciāli, tad reizinot formulas



skaitītāju un saucēju ar *ZA*, iegūstam



Mezglu spriegums vienāds ar fāzes A spriegumu:

*U*00’ = *U*A = 220 V.

Aprēķinām fāžu spriegumus, izmantojot spriegumu vienādojumu un EDS vienādojumu:

= 220 – 220 = 0 V,



= – 110 – *j*190,5 – 220 = – 330 – *j*190,5 = 381,04 V,



= – 110 + *j*190,5 – 220 = – 330 + *j*190,5 = 381,04 V.



Tātad spriegumi *U*C0 un *U*B0 patērētāja fāzēs B un C ir vienādi ar līnijas spriegumiem *U*AC un *U*BA, t.i., pieaug reizes.



Tagad zināmi spriegumi uz fāžu pretestībām, un varam aprēķināt fāžu strāvu kompleksus:

= (–330 – *j*190,5) (0,012 – *j*0,016) = – 7,01 + *j*2,99 = 7,621 A,



= (–330 + *j*190,5) (0,012 – *j*0,016) = 0,91 + *j*7,57 = 7,6245 A.



Tā kā abu fāžu pretestības nemainās, tad vektori *I*B un *I*C atpaliek fāzē no attiecīgajiem spriegumiem par iepriekš aprēķināto leņķi 53,10.

Ievērojot, ka vektors *U*A vērsts reālo skaitļu ass pozitīvajā virzienā, saskaņā ar 1.Kirhofa likuma, iegūstam

6,1 *– j*10*,*56 *=* 12,2A.



Aprēķinām patērētāja katras fāzes un kopējo patērēto jaudu:

*=* 0·(6,1 *– j*10,56) *=* 0 VA,



*=* (–330 – *j*190,5) (–7,01 – *j*2,99) = 1743,7 + *j*2322,1 VA,



*=* (–330 + *j*190,5) (0,91 – *j*7,57) = 1141,8 + *j*2671,5 VA,



2885,5 + *j*4993,6VA*.*



*P* = 2885,5 W, *Q* = 4993,6 VAr, *S* = 5767,3 VA

Konstruē topogrāfisko diagrammu, ja *MU* = 44 V/cm un *MI* = 1,1 A/cm (9.26. att.)

II. *Uzdevuma papildjautājums*

Kā izmainās stāvas un spriegumi ķēdē, ja fāzes *A* līnijas vads pārtrūcis? Šāds režīms var iestāties ne tikai līnijas pārāvuma gadījumā, bet arī tad, ja pārdedzis drošinātājs (9.27 att. nosacīti parādīts ar atslēgtu slēdzi; *Z* – fāzes pilnā pretestība).

*Uzdevuma risinājums ar vektoru diagrammu metodi.*

9.27. att., *a* shēmā A–fāze ir pārtraukta, t.i., fāzes pretestība *ZC* ir bezgalīgi liela *ZC* = ∞, *YC* = 0, pie tam *Z*0 = ∞, *Y*0 = 0. Topogrāfiskā diagrammā (9.28. att.) punkts 0 attālinās no punkta A. Ja visas patērētāja pretestības ir vienādas, tad tas atrodams uz taisnes BC.

Šajā gadījumā



Spriegums starp drošinātāja spailēm

*UA0 = UA* – *(–U*00’) = 220 + 110 = 330 V

|  |  |
| --- | --- |
| ***a*** | ***b*** |

9.27. att.

Patērētāja fāžu spriegumi



Fāžu strāvas



Fāžu nobīdes leņķi



Tā kā abu fāžu pretestības nemainās, tad vektori *I*B un *I*C atpaliek fāzē no attiecīgajiem spriegumiem par iepriekš aprēķināto leņķi 530.

Konstruē topogrāfisko diagrammu, ja *MU* = 44 V/cm un *MI* = 1,1 A/cm (9.28. att.).

Ķēdes aktīvā jauda

*P = P*1 + *P*2 + *P*3 = *IAUA0*cos*φ* + *IBUB0*cos*φ* + +*ICUC0*cos*φ* = 0 + 3,8·190·0,6 +

+ 3,8·190·0,6 = 0 + 433,2 + 433,2 = 866,4 W

samazināsies gandrīz 2 reizes.

Ķēdes reaktīvā jauda

*Q = Q*1 + *Q*2 +*Q*3 = *IAUA*0 sin*φ* + *IBUB*0sin*φ* + *ICUC*0 sin*φ* = 0 + 3,8·190·0,8 + 3,8·190·0,8 =

= 0 + 577,6 + 577,6 = 1155,2 VAr.

Ķēdes pilnā jauda

*S* = *S*1 + *S*2 + *S*3 = *IAUA0*  + *IBUB0* + *ICUC*0 = 0 + 3,8·190 + 3,8·190 =

*=* 0 + 722 + 722 = 1444 VA

II. *Uzdevuma risinājums ar simbolisko metodi*

Fāžu komplekso pretestību vērtības:

ZA = ∞, ZB = ZC = 30 + *j*40 Ω.

Fāžu komplekso vadītspēju vērtības:

*YA* = 0,



Jāatceras ka barošanas avota (ģeneratora) spriegumi *U*A, *U*B un *U*C vienmēr simetriski (neatkarīgi no patērētāja fāžu nobīdes) un starp vektoriem vienmēr ir 1200 leņķis (9.29. att.)

Pieņemot, ka A - fāzes EDS sākuma fāze ir 00:

*EA = UA =* 220 V,

un, zinot, ka, piemēram B – fāzes EDS atpaliek fāzē par 1200, uzrakstām, trigonometriskā formā visus EDS kompleksus, ko pēc tam pārveidojam algebriskā formā:

*EB = UB =* 220 [cos(–1200*) + j* sin(–1200)] *=* –110 *– j* 190,5 V,

*EC = UC =* 220[cos(1200*) + j* sin(1200)] *=* –110 *+ j* 190,5 V.

Aprēķinājām mezglu sprieguma *U*00’ kompleksu



Aprēķinām fāžu spriegumus, izmantojot spriegumu vienādojumu un EDS vienādojumu:



Uzzīmētā topogrāfiskā diagramma atļauj pārbaudīt, vai iegūtie rezultāti atbilst spriegumu vektoru virzieniem.

Tagad zināmi spriegumi uz fāžu pretestībām, un varam aprēķināt fāžu strāvu kompleksus:

*=* 330∙0 = 0 (A),



*= – j*190,5 (0,012 *– j*0,016) *= –* 3,05 *– j*2,29 A,



*= j*190,5 (0,012 *– j*0,016) = 3,05 *+ j*2,29 A.



Pārbaude: saskaņa ar 1.Kirhofa likuma: .



*=* 0 *–* 3,05 – *j*2,29 + 3,05 + *j*2,29 = 0.



Aprēķinām patērētāja katras fāzes un kopējo patērēto jaudu:

*=* 330∙0 = 0 VA,



= *–j*190,5 (*–*3,05 + *j*2,29) = 436,2 + *j*581,025 VA,



= *j*190,5) (3,05 + *j*2,29) = 436,2 + *j*581,025 VA,



872,5 + *j*1162,05 VA.



*P* = 872,5 W, *Q* = 1162,05 VAr, *S* = 1453,1 VA

Konstruē topogrāfisko diagrammu, ja *MU* = 44 V/cm un *MI* = 1,1 A/cm (9.29. att.).

***9.6. piemērs.*** 9.30. att. parādīts zvaigznē slēgts nesimetrisks patērētājs shēma bez neitrāles vada. Dots līnijas spriegums *Uℓ* = 208 V. Patērētāja *A*–fāzē ir virknē slēgtas aktīvā un induktīvā pretestība: *RA* = 8 Ω, *XLA* = 6 Ω. *B*–fāzē ir virknē slēgtas aktīvā un kapacitīvā pretestība: *RB* = 8 Ω, *XCB* = 6 Ω. *C*–fāzes aktīvā pretestība *RC* = 25 Ω. Aprēķināt visas strāvas un spriegumus shēmā, kā arī aktīvo, reaktīvo un pilno jaudu.

|  |  |
| --- | --- |
| 9.28. att. | 9.29. att. |

Atrisinājums.

1. Izveidojam aizvietošanas shēmu, aizstājot katru elementu vai elementu virknes slēgumu ar kompleksu pretestību. Fāžu komplekso pretestību vērtības:



|  |  |
| --- | --- |
| *a* | *b* |

9.30. att. *Z*vaigznē slēgts patērētājs trīsvadu sistēmā (*a*); aizvietošanas shēma ar

kompleksām pretestībām (*b*)

Fāžu komplekso vadītspēju vērtības:



Vadītspēju summa

*s.*



2. Ievērojot, ka ģeneratora EDS vienādi ar to fāžu spriegumiem, varam atrast to skaitlisko vērtību:

V.



Tāda būs arī moduļa vērtība visiem kompleksajiem EDS. Pieņemot, ka A–fāzes EDS sākuma fāze ir 00:

V,



uzrakstām trigonometriskā formā visus EDS kompleksus, ko pēc tam pārveidojam algebriskā formā:

V,



V.



Attēlojiet šos spriegumus kā vektorus kompleksu plaknē. Ar ko šī diagramma atšķiras no ģeneratora topogrāfiskā diagrammas? Vai šī atšķirība ir principiāla?

3. Tagad aizvietošanas shēmas (9.30. att., *b*) dati sagatavoti. Varam sākt tās aprēķinu. Pirmo aprēķina posma. Aprēķinājām mezglu spriegumu *UnN* kompleksu

V.



Atliekam arī šo komplekso spriegumu (kas atbilst neitrāles nobīdei) kompleksu plaknē (9.31. att.). Koordinātu sākuma punkts un visu četru vektoru galapunkti (n, A, B, C un N) veido shēmas topogrāfisko diagrammu. 9.31. att. parādīti arī patērētāja fāžu spriegumu *UAn*, *UBn* un *UCn* vektori. Izmantosim tos, lai kontrolētu sekojošo aprēķinu pareizību.

4. Aprēķinām patērētāja fāžu spriegumus, izmantojot spriegumu vienādojumu

V,



V,



V.



Uzzīmētā topogrāfiskā diagramma (9.31. att.) atļauj pārbaudīt, vai iegūtie rezultāti atbilst spriegumu vektoru virzieniem.

|  |  |
| --- | --- |
|  | 9.31. att. Ģeneratora un patērētāja fāžu  spriegumi, neitrāles nobīde un strāvas  kompleksu plaknē |

5. Tagad zināmi spriegumi uz fāžu pretestībām, un varam aprēķināt fāžu strāvu kompleksus:

A,



A,



A,



Aprēķinām komplekso strāvu moduļus – tie ir attiecīgo fāžu strāvu efektīvās vērtības

A,



līdzīgi atrodam arī

A,



A.



Kā pārbauda rezultātu pareizību: vai mezgla *n* komplekso strāvu summai, vai varbūt to efektīvo vērtību summai jābūt vienādai ar nulli? Vai varbūt abām? Pārbaudiet to.

6. Vektoru diagramma (9.31. att.).

Mērogs *MU* = 20 V/cm, *MI* = 2 A/cm.

Vektoru garumi:



7. Aprēķinām patērētāja katras fāzes un kopējo patērēto jaudu

(W),



(W).



Aktīvā jauda ir kompleksās jaudas reālā daļa. Iegūtie rezultāti nozīme, ka patērētāja A-fāzes patērētā aktīvā jauda *PA* = 9216 W, reaktīva jauda *QA* = – 8976 Var, *B*–fāzē aktīvas jaudas *PB* = 919,9 W, reaktīvā jauda *QB* = – 690,5 Var, bet *C*–fāzē patērē jaudu *PC* = 1767,2 W, *QC* = 35,6 Var. Kopējā patērētā aktīvā jauda ir *P* = 11903,1 W un reaktīvā jauda *Q* = – 9630,9 Var. Kopējā pilnā jauda *S* = VA. Rezultātu pareizību visvienkāršāk pārbaudīt šādi. Aktīvo jaudu patērē tikai rezistīvie elementi, bet reaktīvo jaudu patērē reaktīvie elementi. Katram no tiem aktīvo jaudu var atrast sareizinot tā aktīvo vai reaktīvo pretestību ar strāvas efektīvās vērtības kvadrātu.



**9.8. TRĪSSTŪRA SLĒGUMS**

**9.8.1. Ģeneratora slēgums trīsstūrī.**

Trīsfāzu ģeneratora fāzu tinumus saslēdz trīsstūrī, pirmās fāzes tinuma beigas savienojot ar otras fāzes tinuma sakumu, otrās fāzes beigas — ar trešās fāzes sākumu un trešās fāzes bei­gas — ar pirmās fāzes sākumu, t. i., fāzu tinumus noteikta secībā saslēdz virknē un izveido noslēgtu kontūru (9.32. att.).

Shēmās trīsstūra slēgumu pa lielākajai daļai attēlo tā, ka fāzu gali X un B, Y un С, Ζ un A saslēgti kopā un fāzu tinumi veido regulāra trīsstūra malas (no tā nosaukums «trīsstūra slēgums», ko saīsināti apzīmē ar zīmi ∆); trīsstūra virsotnēm А, В un С pievienojot līnijas vadus (9.33. att.), izveidojas trīsvadu sistēma.

Ja trīsfāzu ģeneratorā iegūst sinusoidālus EDS, tad katrā mirkli to momentāno vērtību algebriskā summa ir vienāda ar nulli, t. i., *еA + еB + еC* = 0, un tādēļ slēgums trīsstūrī ģeneratora nerada īsslēguma režīmu vai izlīdzinošas strāvas fāzu tinumu kontūrā.

Triju simetrisko EDZ efektīvas vērtības ģeometrisko summa ir vienāda ar nulli, jo saskaitot divus fāžu EDZ vektorus, piemēram un , iegūsim vektoru , kas pēc lieluma ir vienāds un pēc zīmes pretējs trešajam vektoram



un



Ģeneratora tinumus nedrīkst savienot nepareizā trīsstūra slēguma, piemēram, saslēdzot pareizi spailes *X* ar *B* (9.32. att.), bet nepareizi spailes *Y* ar *Z* un *C* ar *A*, iegūstam

 un 

|  |  |
| --- | --- |
| 9.32. att. Trīs­fāzu tinuma sa­slēgšana trīs­stūra slēgumā. | 9.33. att. Ģeneratora un patērētajā trīsstūra slēgums. |

Tādējādi noslēgtā kontūra EDS summa pēc lieluma ir vienāda ar divkāršotu fāzes EDS vērtību un kontūrs darbojas tāpat kā īsslēguma gadījumā.

Tomēr reāla ģeneratora fāzēs inducētie EDS nav pilnīgi sinusoidāli, bet gan nedaudz kropļoti, un tādēļ ģenera­torā *еA + еB + еC* ≠ 0. Lai tukšgaitas režīma ģeneratora fāzēs neplūstu izlīdzinošās strāvas, kas karsē ģeneratora fāzu tinumus un darba režīmā pazemina ģeneratora lietderības koeficientu, ka arī lai līnijas spriegumā nebūtu 3., 9. utt. harmoniskas, praksē trīsfāzu ģeneratoru tinumus slēdz tikai zvaigznē. Turpre­tim transformatoriem lieto kā zvaigznes, tā trīsstūra slēgumu.

**9.8.2. PARĒRĒTĀJU SLĒGUMS TRĪSSTŪRĪ.**

Spriegumu skaitā ziņā trīsstūra slēgums ir vienkāršāks nekā zvaigznes slēgums, jo patērētājam ir tikai 3 punkti: A, B un C. Katrai no fāzēm tieši pievadīts līnijas spriegums, tātad patērētāju fāžu pretestību izmaiņas šos spriegumus ietekmēt nevar.

Enerģijas patērētāju trīsstūra slēgumā (9.33. att.) katru patērētāja fāzi pieslēdz līnijas vadiem, kas vienlaikus ir arī patērētāja fāzes spriegums (*UAB = UA*; *UBC = UB*; *UCA = UC*). Trīsfāzu patērētājiem stingri jāievēro paskaidrotā fāzu saslēgšana. Slēdzot trīsstūrī trīs vienfāzes patērētājus, tos tikai saslēdz virkne un pēc tam savieno slēguma abas brīvas spailes.

9.33. attēlā parādītie līniju un fāzu spriegumu un strāvu pozi­tīvie virzieni atbilst zvaigznes slēguma pieņemtajiem.

Trīsstūra slēguma līnijas un fāzes spriegumi ir vienādi, jo pa­tērētāja katra fāze ieslēgta starp diviem līnijas vadiem:

*Ul = Uf*. (9.23)

Toties strāvu skaits ir ievērojami lielāks: 3 fāžu strāvas un 3 līnijas strāvas. Patērētāja fāžu pretestības apzīmē ar *ZAB*, *ZBC* un *ZCA*, patērētāja fāžu strāvas – ar tiem pašiem indeksiem: *IAB*, *IBC* un *ICA*. Līnijas strāvas apzīmē ka parasti: *IA*, *IB* un *IC*.

Ja doti līnijas spriegumi un patērētāja fāzu pretestības un tad fāzu strāvas



(9.24)



Fāžu strāvas vektori ir nobīdīti fāzē attiecībā pret fāžu spriegumiem par leņķiem *φAB*, *φBC* un *φCA,* kurus nosaka fāžu pretestības vērtības un raksturs.

No pirmā Kirhofa likuma izteiksmēm patērētajā mezgliem *A*, *B* un *С* var atrast līnijas strāvas vektorus:



(9.25)



Redzam, ka līnijas strāva vienāda ar līnijai pievienoto fāzu strāvu ģeometrisko starpību.

Summējot vienādojumu (10.25) kreisās un labās puses, iegūst, ka

(9.26)



t. i., trīsstūra slēgumā kā simetriskai, tā nesimetriskai slodzei līnijas strāvu ģeometriskā summa ir vienāda ar nulli.

9.34. attēlā parādīta spriegumu un strāvu vektoru diagramma induktīva rakstura nesimetriskai slodzei. Līnijas strāvas atrod gra­fiski no fāzu strāvām saskaņā ar izteiksmēm (9.25). Strāvu vektoru diagramma arī ilustrē izteiksmi (9.26). Līnijas strāvas var atrast gra­fiski no strāvu trīsstūra. Ja fāžu strāvas atliktas no viena punkta, tad to vektoru starpību atrast ļoti viegli – savienojot abu vektoru galapunktus. Līnijas strāvu *IA*, *IB* un *IC* vektori parādīti ar raustītu līniju (9.34. att. *b*).

|  |  |
| --- | --- |
| ***a*** | ***b*** |

9.34. att. Vektoru diagramma (*a*) un strāvu trīsstūris (*b*) nesimet­riskai slodzei trīsstūra slēgumā.

Simetriskam patērētājam fāžu pretestības ir vienādas pēc lieluma un rakstura: *ZA* = *ZB* = =*ZC* un *φAB* = *φBC =* *φCA = φ.* Vektoru diagramma (9.35. att.) atšķiras no iepriekš aplūkotās tikai ar to, ka fāžu strāvu vektori ir vienāda garuma un vienādi nobīdīti pret attiecīgo fāžu spriegumiem. Tātad, ja slodze simetriska, tad fāzu strāvu vektori veido simetrisku zvaigzni (9.35. att.). Arī līnijas strāvas tad skaitliski vienādas (*IA = IB = IC = Il*), un to vektori veido simetrisku zvaigzni, kas pagriezta par 30° pret fāzu strāvu zvaigzni pulksteņa rādītāja kustības virzienā.

|  |  |
| --- | --- |
| ***a*** | ***b*** |

9.35. att. Vektoru diagramma (*a*) un strāvu trīsstūris (*b*) sime­triskai slodzei trīsstūra slēgumā.

No vektoru diagrammas redzam, ka līnijas strāvu vektorus var iegūt arī, fāzu strāvu vektoru bultiņas savienojot ar taisnēm un iegūtā līnijas strāvu trīsstūra malām pievienojot bultiņas pulksteņa rādītāja kustības virzienā.

No vektoru diagrammas (9.35. att.) viegli nosakāma sakarība starp līnijas un fāzes strāvām simetriskai slodzei trīsstūra slē­gumā:

 (9.27)

t. i., trīsstūra slēgumā līnijas strāva reizes lielāka par fāzes strāvu.

Patērētāju trīsstūra slēgumam raksturīgs tas, ka, mainot kā­das patērētāja fāzes pretestību, patērētāja fāzu spriegumu vērtī­bas nemainās, jo patērētāja katra fāze pievienota līnijas sprie­gumam, t. i., simetriskai trīsfāzu spriegumu sistēmai, kuru neietekmē patērētāja fāzu pretestības. Tādēļ trīsstūra slēgums ir lietderīgs nesimetriskas slodzes, t i., vienfāzes patērētāju pievie­nošanai trīsvadu ķēdei. Simetrisku slodzi trīsvadu ķēdei pievieno zvaigznē vai trīsstūrī slēgtu (9.36. att.).

|  |
| --- |
| 9.36. att. Trīsvadu līnija ar pievienotiem vienfāzes un trīsfāzu pa­tērētājiem. |

Patērētājus slēdz zvaigznē vai trīsstūrī neatkarīgi no EDS avota slēguma veida, jo patērētāju slēgšanas veidu nosaka, no vienas puses, patērētāja fāzes nominālais spriegums un, no otras puses, līnijas sprieguma skaitliskā vērtība. Tā, piemēram, trīsfāzu līnijai ar līnijas spriegumu , = 220 V (9.36. att.) var pievienot 220 V kvēlspuldzes trīsstūra slēguma un trīsfāzu maiņstrāvas dzinējus ar zvaigznē vai trīsstūrī saslēgtām fāzēm: 380/220 V elektrodzinēju slēdz trīsstūrī, bet 220/127 V elektrodzinēju — zvaigznē, jo dzinēja spriegumu mazāka vērtība (aiz slīpas svīt­ras) ir dzinēja fāzes nominālais spriegums.

***9.7. piemērs***. Trīs vienādas aktīvas pretestības *R* = 100 Ω savienoti zvaigznē un pieslēgtas tīklam ar spriegumu *Ul* = 380 V. Kā izmainās līnijas strāvas un aktīvā jauda, ja tas pašas pretestības savieno trīsstūrī?

Atrisinājums.

1. Zvaigznes slēguma aprēķins:

1.1. Fāžu spriegums



1.2. Fāžu (līnijas) strāvas



1.3. Aktīvā jauda



2. Trīsstūra slēguma aprēķins:

2.1. Fāžu spriegums *Uf*Δ = *Ul* = 380 V.

2.2. Fāžu strāvas



2.3. Aktīvā jauda



3. Līniju strāvu un aktīvās jaudas salīdzinājums



Tātad, savienojot pretestības no zvaigznes slēguma trīsstūrī, neizmainoties līnijas spriegumam, līnijas strāvas un aktīvā jauda palielinās 3 reizes.

***9.8. piemērs.*** Nesimetrisks trīsfāžu patērētājs (9.37. att.) pieslēgts trīsfāžu līnijas spriegumu *Ul* = 380 V. Patērētāja AB-fāzē ir rezistora un kondensatora virknes slēgums: *RAB* = 19 Ω, *XCAB* = 11 Ω. BC-fāzē ir ieslēgta spole ar aktīvo pretestību *RBC* = 12 Ω un induktīvo pretestību *XLBC* = 16 Ω, CA-fāzē ir tikai aktīvā pretestība (rezistors) *RCA* = 22 Ω.

|  |
| --- |
| 9.37. att. Nesimetriskā trīsfāžu patērētāja slēguma shēma. |

1. Uzzīmēt ķēdes shēmu un aizvietošanas shēmu.

2. Aprēķināt fāžu un līnijas strāvas;

3. Aprēķināt aktīvo, reaktīvo un pilno jaudu katrai fāzei un visai ķēdei;

4. Aprēķināt fāzu nobīde starp spriegumu un strāvu katrā fāze;

5. Mērogā uzkonstruēt vektoru diagrammu un topogrāfisko diagrammu.

Atrisinājums.

1. Pierakstām dotos spriegumus kompleksā formā. Lai to izdarītu pareizi, jāzina sprieguma vektoru novietojums diagrammā. 9.38. att. un 9.39. att. redzams, ka spriegumu *UAB*, *UBC* un *UCA* vektoru sākuma fāzes ir attiecīgi 00, –1200 un 1200. Visu šo spriegumu vērtības ir 380 V, tāpēc:



2. Šie spriegumi pielikti trim zariem, kuru kompleksās pretestības ir šādas:

Ω,



kur *ZAB* = 22 Ω, *φAB* = – 300;

Ω,



kur *ZBC* = 20 Ω, *φBC* = 530;

Ω,



kur *ZCA* = 22 Ω, *φCA* = 00.

3. Aprēķinām fāžu strāvas šajos zaros:

A,



kur efektīvā vērtība (modulis)A, arguments *ψAB*= 300;



A,



kur efektīvā vērtība *IBC* = 19 A, *ψBC* = –1730;

A,



kur efektīvā vērtība *ICA* = 17,27 A, *ψCA* = 1200.

4. Vienādojumus līnijas strāvu vektoru atrašanai uzraksta, izmantojot pirmā Kirhofa likuma izteiksmes mezgliem A, B un C (9.38. att. un 9.39. att.):

A,



kur modulis *IA* = 24,43 A, arguments *ψA* = –150;

A,



kur modulis *IB* = 35,55 A, arguments *ψB* = 1980;

A,



modulis *IC* = 20,1 A, arguments *ψC* = 59,40.

|  |  |
| --- | --- |
| 9.38. att. | 9.39. att. |

5. Aprēķinām patērētāja katras fāzes un kopējo patērēto jaudu:

VA,



kur *SAB* = 6563 VA, *PAB* = 5684 W, *QBC* = -3282 Var;

VA,



kur *SBC* = 7220 VA, *PBC* = 4345 W, *QBC* = 5766 Var;

VA,



kur *SCA* = *PCA* = 6563 W, *QCA* = 0 Var;



kur *S* = 16777 VA, *P* = 16592 W, *Q* = 2484 Var.

1. Konstruē vektoru diagrammu, ja *MI* = 4 A/cm



**9.9. Trīsstūra pārveidošana zvaigznē**

Aplūkosim trīsfāzu ķēdes aprēķinu trīsstūra saslēgtam patērētājam, ievērojot papildu pretestības elektriskajā ķēdē (9.40. att.). Šo aprēķinu var vienkāršot, pretestību trīsstūra slēguma aizstājot ar ekvivalentu zvaigznes slēgumu. Kā zināms, starp zvaigznes slēguma pretestībām un trīsstūra pretestībām pastāv šādas sakarības:



(9.28)



|  |
| --- |
| 9.40. att. |

Ja fāzes slogotos vienādi, t.i., *ZAB = ZBC = ZCA = Z*∆, tad zvaigznes slēguma pretestības var aprēķināt pēc izteiksmes

(9.29)



tātad ekvivalentās zvaigznes slēguma pretestībai jābūt 3 reizes mazākai par trīsstūra slēguma pretestību.

Šāda pārveidojuma rezultātā iegūstam 9.41. attēlā parādīto ķēdi, ko aprēķina ka nevienmērīgi noslogotu zvaigzni. Piemērā aplūkosim sīkāk šādas ķēdes aprēķina gaitu.

***9.9. piemērs.*** Starp līnijas vadiem А, В un C trīsstūra slēgumā ieslēgti patērētāji, kuru fāzu pretestības ir: *ZAB* = 10 Ω, *ZBc* = 20 Ω un ZCA = 20 Ω (9.30. att.). Katra līnijas pretestība ir *Z"A = Z"b = =Z"c =* 1 Ω. Līnijas spriegumi uz ģeneratora spailēm, ir simetriski un vienlīdzīgi *Uℓ* = 208 V.

Aprēķināt fāžu un līniju strāvas, kā arī katras fāzes un kopējo patērēto aktīvo, reaktīvo un pilno jaudu. Mērogā uzkonstruēt vektoru diagrammu.

Uzdevuma risinājums.

Aizstājam trīsstūra slēgumu ar ekvivalentu zvaigznes slēgumu (9.41. att.)

|  |
| --- |
| 9.41. att. |



Līnijas pretestības ir ieslēgtas virknē ar atbilstošajiem zvaigznes pretestībām. Tāpēc katras fāzes pilnā pretestība un vadītspēja ir:



Ģeneratora fāzu spriegums

V.



Aprēķināsim to pašu piemēru izmantojot simbolisko metodi. Šajā gadījumā sprieguma kompleksi ir V, tad



Mezgla spriegums (neitrāles nobīde)



Līnijas strāvas



Līnijas strāvas efektīvās vērtības



Lai atrastu fāzu strāvas pretestības *ZAB*, *ZBC* un *ZCA*, vispirms jāaprēķina līnijas spriegumi *U’AB*, *U’BC* un *U’CA* starp punktiem *A'B', B'C'* un *C'A’*. Tāpēc vispirms aprēķinām fāzu spriegumus zvaigznes slēgumā:



Līnijas spriegumi



Fāzu strāvas trīsstūra slēgumā:



Fāzu strāvas efektīvās vērtības



Aprēķinām patērētāja katras fāzes un kopējo patērēto jaudu:



Konstruē vektoru diagrammu, ja *MI* = 4,4 A/cm un *MU* = 30 V/cm (9.42. att.).

|  |  |
| --- | --- |
|  | 9.42. att. |

**9.10. Rotējošais magnētiskais lauks**

Trīsfāzu strāvas visvērtīgākā īpašība izpaužas relatīvi vienkāršā iespējā radīt telpā rotējošu magnētisko lauku. To izmanto maiņstrāvas mašīnās, mēraparātos u.c. aparātos. Priekšstatu par šo īpatnējo fizikālo parādību – rotējošo (skrejošo) magnētisko lauku – var iegūt izmantojot grafisko iztirzājumu.

Trīs vienādas nekustīgas spoles statorā novieto tā, ka to plaknes viena ar otru veido 1200. Spoļu beigas *X*, *Y* un *Z* savieno kopā, t.i., saslēdz zvaigznē (9.43 att. a). Spoles ass pozitīvais virziens no A uz X, no B uz Y un no C uz Z. Spoļu sākumus *A*, *B* un *C* pievienojot simetriskai trīsfāzu spriegumu sistēmai, spolēs plūdīs simetriskas sinusoidālas strāvas *iA*, *iB* un *iC*

*iA = Im* sin*ωt*,

*iB = Im* sin(*ωt* - 120°),

*iC = Im* sin(*ωt* - 240°),

kur *ω* = 2π*f*1 , а *f*1 – tīkla frekvence.

Katra strāva rada pulsējošu magnētisko plūsmu Ф*A*, Ф*B* un Ф*C*.

Katras spoles magnētiskās plūsmas ass ir perpendikulāra attiecīgās spoles plaknei un sakrīt ar šīs spoles ģeometrisko asi.

Spoļu strāvu maksimālās vērtības ir vienādas, t.i., *IAm= IBm= ICm = Im*, tāpēc vienādas ir arī spoļu plūsmu maksimālās vērtības: Ф*Am=* Ф*Bm=* Ф*Cm=* Ф*m*.

Spoļu ietvertajā telpā katrā mirklī pastāv noteikta virziena un lieluma rezultējošā magnētiskā plūsma kā triju spoļu plūsmu momentāno vērtību ģeometriskā summa:



Izrādās, ka jebkurā mirklī rezultējošās plūsmas skaitliskā vērtība ir viena un tā pati (Ф *= const*), bet rezultējošās plūsmas virziens telpā nepārtraukti mainās.

Noteiksim grafiski rezultējošās magnētiskās plūsmas skaitlisko vērtību un virzienu patvaļīgi izvēlētos laika momentos *t*1, *t*2, *t*3, *t*4, *t*5 un *t*6 (9.43. att. *b*).

|  |  |
| --- | --- |
| ***a*** | ***b*** |

9.43. att. Trīsfāzu strāvas rotējošā magnētiskā lauka iegūšanas shēma (a) un spolēs plūstošo strāvu grafiki (b).

Laika momentā *t*1 strāva *iA* ir pozitīva *iA = Im*, tāpēc Ф*A =* Ф*m*, strāvas *iB* un *iC* ir negatīvas un skaitliski vienādas *iB = iC = - Im/*2unФ*B =* Ф*C =* Ф*m/*2.

Iezīmējot attēlā mērogā visu triju plūsmu vektorus un tos ģeometriski summējot, dabū rezultējošo plūsmas vektoru Ф laika momentam *t*1 (9.44. att.). Rezultējošā plūsma skaitliski vienāda ar 3/2 no vienas spoles plūsmas maksimālās vērtības Ф*m* (Ф *=* 3 Ф*m /*2).

Katra strāva rada pulsējošu magnētisko plūsmu Ф*A*, Ф*B* un Ф*C*.

Katras spoles magnētiskās plūsmas ass ir perpendikulāra attiecīgās spoles plaknei un sakrīt ar šīs spoles ģeometrisko asi.

Spoļu strāvu maksimālās vērtības ir vienādas, t.i., *IAm= IBm= ICm = Im*, tāpēc vienādas ir arī spoļu plūsmu maksimālās vērtības: Ф*Am=* Ф*Bm=* Ф*Cm=* Ф*m*.

Spoļu ietvertajā telpā katrā mirklī pastāv noteikta virziena un lieluma rezultējošā magnētiskā plūsma kā triju spoļu plūsmu momentāno vērtību ģeometriskā summa:



|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| ***t*1** | ***t*2** | ***t*3** |
| ***t*4** | ***t*5** | ***t*6** |

9.44. att. Rotējoša magnētiskā lauka iegūšanas princips.

Izrādās, ka jebkurā mirklī rezultējošās plūsmas skaitliskā vērtība ir viena un tā pati (Ф *= const*), bet rezultējošās plūsmas virziens telpā nepārtraukti mainās.

Noteiksim grafiski rezultējošās magnētiskās plūsmas skaitlisko vērtību un virzienu patvaļīgi izvēlētos laika momentos *t*1, *t*2, *t*3, *t*4, *t*5 un *t*6 (9.43. att. *b*).

Laika momentā *t*4 *= t*1 *+ T/*2 strāva *iA* ir negatīva *iA = - Im* un Ф*A =* Ф*m*, strāvas *iB* un *iC* ir pozitīvas un skaitliski vienādas *iB = iC = Im/*2, tādēļ Ф*B =* Ф*C =* Ф*m/*2. Rezultējošās magnētiskās plūsmas skaitliskā vērtība ir 3·Ф*m/*2, bet plūsmas vektors Ф laika sprīdī *t*4 *- t*1 *= T/*2 pagriezies par 1800.

Laika momentā *t*5 *= t*1 *+* 2*T/*3 strāva *iC* ir pozitīva *iC = - Im* un Ф*C =* Ф*m*, strāvas *iA* un *iB* ir negatīvas un skaitliski vienādas *iA = iB = -Im/*2, tādēļ Ф*A =* Ф*B =* Ф*m/*2. Rezultējošās magnētiskās plūsmas skaitliskā vērtība ir 3·Ф*m/*2, bet plūsmas vektors Ф laika sprīdī *t*5 *- t*1 *=* 2*T/*3 pagriezies par 2400.

Laika momentā *t*6 *= t*1 *+ T* strāva *iB* ir negatīva *iB = - Im* un Ф*B =* Ф*m*, strāvas *iA* un *iC* ir pozitīvas un skaitliski vienādas *iB = iC = Im/*2, tādēļ Ф*A =* Ф*C =* Ф*m/*2. Rezultējošās magnētiskās plūsmas skaitliskā vērtība ir 3·Ф*m/*2, bet plūsmas vektors Ф laika sprīdī *t*6 *- t*1 *= T* pagriezies par 3600.

No iztirzātā secinām, ka rezultējošās magnētiskās plūsmas Ф skaitliskā vērtība nemainās: Ф *=* 3·Ф*m/*2= const, bet nepārtraukti mainās tās stāvoklis telpā, t.i., rezultējošās plūsmas vektors Ф telpā rotē ar nemainīgu rotācijas frekvenci fāzu secības virzienā: *A-B-C-A*....

Tā kā laika sprīdī *T* plūsmas vektors Ф pagriežas par 3600, tad viena perioda laikā rezultējošā plūsma Фizdara vienu pilnu apgriezienu.

Tātad ar trīsfāzu strāvu barotu triju spoļu ietvertajā telpā iegūstam rotējošu magnētisko lauku, kas šajā gadījumā ir divpolīgs.

Plūsmas Ф griešanās virzienu var mainīt, izmainot strāvu pozitīvo maksimumu *Im* secību spolēs. To realizē, apmainot vietām divus spoļu sākumiem pievienotos tīkla vadus.

Maiņstrāvas ar frekvenci *f*1*=50 Hz* radītā rotējošā magnētiskā plūsma Ф izdara 50 apgriezienus sekundē, bet vienā minūtē *n*1 *=* 60*·f*1 *=* 60·50 = 3000 apgr./min.

Rotējošā magnētiskā lauka rotācijas frekvenci, kas ar doto maiņstrāvas frekvenci *f*1 ir nemainīga, sauc par *sinhrono rotācijas frekvenci* un apzīmē ar *n*1.

**9.11. ROTĒJOŠĀ MAGNĒTISKĀ LAUKA GRIEŠANĀS ĀTRUMS**

Triju spoļu strāvu radītam rotējošam magnētiskajam laukam (9.43. att.) ir divi poli (2*p* = =2) jeb viens polu pāris (*p* = l), un lauka sinhronais griešanās ātrums *n*1 = 3000 apgr./min, ja maiņstrāvas frekvence *f*1 = 50 Hz.

Lai ar to pašu maiņstrāvas frekvenci iegūtu rotējošu magnē­tisko lauku ar mazāku griešanās ātrumu *n*1 tad 3 spoļu vietā jā­izmanto 6 vai 9, vai 12 utt. spoles; tas nozīmē, ka katrā fāzē jā­ieslēdz 2, 3 vai vairāk virknē savienotas spoles, tās izvietojot telpā vienu pret otru noteiktā likumsakarībā.

Cetrpolu (2*p* = 4) rotējošo magnētisko lauku iegūst ar 6 spo­lēm, katrā fāzē ieslēdzot 2 virknē savienotas spoles. Spoļu izvie­tojums rotējošā četrpolu lauka (*p* = 2) iegūšanai parādīts 9.45. at­tēlā; vienkāršības dēļ pieņemts, ka katrai spolei tikai viens vijums. Katra spole veido taisnstūrveida kontūru, un rotējošo lauku rada zīmējuma plaknei perpendikulārās spoļu aktīvās malas. A fāzē ieslēgtas virknē 1. un 4. spole, B fāzē — 2. un 5. spole un C fāzē — 3. un 6. spole. Atstatums starp vienas spoles malām ir tikai ¼ aploces, un starp fāzu spoļu sākumiem ir 60° leņķis. 1., 2. un 3. spoles sākumus pievieno trīsfāzu strāvās tīklam, bet 4., 5. un 6. spoles beigas savieno kopā, t. i., trīsfāzu veidojumu saslēdz zvaigznē (vai trīsstūrī).

Laika momentiem *t*1 un (9.43. att. *b*) atbilstošo strāvu virzieni spolēs un rezultējošo plūsmu virzieni parādīti 9.46. attēlā (vadi, kas savieno spoļu aktīvās malas, nav parādīti).



Redzam, ka laika sprīdī magnētiskais lauks pagriežas tikai par 30°, tātad četrpolu lauka griešanās ātrums ir divas reizes mazāks nekā divpolu laukam.



Iegūtajam četrpolu laukam, tāpat kā jebkuram vairākpolu laukam, raksturīgs ir tas, ka lauks vairs neskar spoļu veidojuma ģeometrisko asi 0, bet tas izvietots tikai ap spoļu malām un tā­pēc atgādina pa aploci skrejošu magnētisko lauku.

Sešpolu rotējošā lauka (*p* = 3) iegūšanai nepieciešamas 9 spo­les (katrā fāzē 3), astoņpolu (*p* = 4) — 12 spoles (katrā fāzē 4) utt.

Tādējādi rotējošā magnētiskā lauka polu pāru skaits *p* atbilst viena fāzē virknē savienoto spoļu skaitam.

|  |  |
| --- | --- |
| 9.45. att. Spoļu izvietojums  četr­polu rotējošā magnētiskā  lauka iegūšanai. | 9.46. att. Rotējošais četrpolu magnētiskais lauks. |

Tā kā divpolu (*p* = 1) rotējošā magnētiskā lauka griešanās ātrums ir *n*1 = 60·*f*1, tad vispārīgā gadījumā rotējošā magnētiskā lauka ar *p* polu pāriem sinhronais griešanās ātrums

(9.30)



t. i., rotējošā magnētiskā lauka griešanās ātrums ir tieši propor­cionāls maiņstrāvas frekvencei *f*1 un apgriezti proporcionāls trīsfāzu tinuma polu pāru skaitam *p*.

Rotējošā magnētiskā lauka sinhronie ātrumi *n*1 dažādam polu pāru skaitam *p*, ja pievadītās maiņstrāvas frekvence *f*1 =50 Hz, ir šādi:

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| ***p*** | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| *n*1, apgr./min | 3000 | 1500 | 1000 | 750 | 600 | 500 |

Tātad ar *f*1 = 50 Hz maksimālais sinhronais griešanas ātrums ir 3000 apgr./min.

**9.12. ASINHRONĀ DZINĒJA UZBŪVE UN DARBĪBAS PRINCIPS**

Asinhronos dzinējus, kuros rotējošo magnētisko lauku rada trīsfāzu strāva, sauc par trīsfāzu asinhronajiem dzi­nējiem. Turpmāk tos sauksim vienkārši par asinhronajiem dzi­nējiem.

Asinhronā dzinēja konstruktīvā shēma paradīta 9.47. attēla, kurā 1 — dzinēja stators, 2 — rotors, 3 — apvalks, 4 — gultņu vairogi, 5 — vārpsta, 6 — gaisa sprauga starp statoru un rotoru, 7 — gultņi.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  |  |
| 10.47. att. Asinhronā dzinēja konstruktīvā shēma. | 10.48. att. Statora skārds ar  pusslēgtam rievām. | 10.49. att. Stators bez ti­numa. |

Asinhronā dzinēja galvenās sastāvdaļas ir stators un rotors.

Stators — asinhronā dzinēja nekustīgā sastāvdaļa — ir dobs cilindrisks ķermenis (9.49 att.), kam gar iekšējo cilindrisko virsmu izveidotas garenvirziena rievas. Lai statora ierobežotu virpuļstrāvas, statoru saliek no gredzenveida 0,35 vai 0,5 mm bie­ziem savstarpēji izolētiem elektrotehniskā tērauda skārdiem, kam gar iekšējo aploci izštancētas rievas (9.48. att.).

Dzinējos ar jaudām zem 100 kW statoriem parasti ir pusslēgtas rievas (9.51. att. *a*), bet, sākot ar 100 kW, — parasti vaļējas taisnstūrveida rievas (9.51. att. *b*), kurās var ievietot jau gatavas šablonspoles.

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| 9.50. att. Dzinēja ap­valkā iestiprināts stators bez tinuma. | 9.51. att. Asinhronā dzinēja pusslēgtā (*a*) un  vaļēja rieva (*b*). |

Stators 1 cieši iestiprināts čuguna, tērauda vai alumīnija sakau­sējuma cilindriskā apvalka 2 (9.50. att.), kuru ar bultām pie­stiprina pamatnei. Statora rievas izvietots statora trīsfāzu tinums, kura 6 gali pa apvalkā atstāto caurumu 3 izvadīti ārpus apvalka.

Dzinējiem ar jaudu virs 100 kW statora tinums izveidots no izolēta taisnstūrveida šķērsgriezuma vara vada, bet dzinējiem ar jaudu zem 100 kW — no izolēta apaļa vara vada.

Statora tinumu pievienojot trīsfāzu strāvas tīklam, dzinējā iegūst rotējošo magnētisko lauku.

Rotors 2 (9.47. att.) — asinhronā dzinēja rotējošā daļa — ir no 0,35 vai 0,5 mm bieza elek­trotehniskā tērauda skārda sa­likts cilindrisks ķermenis, kas nekustīgi nostiprināts uz dzi­nēja vārpstas 5 un cen­triski ievietots statora cilindris­kajā dobumā.

Dzinēja vārpstas 5 (9.47. att.) gali balstās divos gul­tņos 7 (lodīšu vai rullīšu), kuri cieši iestiprināti gultņu vairogos 4. Pēdējie ar bul­tām stingri pievilkti apvalka 3 galiem.

Starp statoru un rotoru ir neliela gaisa sprauga 6 (9.47. att. un 9.52. att.). Tā kā ar statoru un rotoru saķēdētās rotējošās plūsmas Ф) ceļā ir divas gaisa spraugas 6 (9.52. att.), tad, lai samazinātu dzinēja mag­nētisko ķēžu magnētisko pretestību un reizē ar to arī dzinēju tukšgaitas strāvu, gaisa sprauga starp statoru un rotoru ir iespējami maza: 0,2—2 mm (jo mazāka dzinēja nominālā jauda, jo mazāka ir arī gaisa sprauga).

Asinhrono mašīnu būtiska īpatnība ir tā, ka ārējam maiņstrā­vas tīklam pievieno tikai statora tinumu, bet rotora tinumam nav nekādas elektriskās saites ar ārējo tīklu.

Iztirzājot asinhronā dzinēja darbības principu, pie­ņemsim, ka statora ir tikai 3 pilnīgi vienādas šauras spoles, kuru plaknes telpā veido 120° leņķus (9.52. att.) un kuru aktīvās malas ievietotas statora sešās rievās. Spoles sa­slēdzot zvaigznē vai trīsstūrī un pievienojot to sākumus A, B un C trīsfāzu strāvas tīklam, iegūst divpolu rotējošo magnētisko lauku. Pieņemam arī, ka rotora virsmā ir tikai divas diametrāli pretējas rievas, kurās ievietots īsi slēgts vadītāja kontūrs.

Pieņemsim, ka 9.52. attēlā parādītajā momentā strāvas mak­simums ir spolē A—X. Tad rotējošā magnētiskā plūsma Ф, kas magnētiski saista statoru ar rotoru, virzīta horizontāli pa kreisi un griežas pulksteņa rādītāja kustības virzienā ar sinhrono ātrumu *n*1.

Statora tinumu pieslēdzot trīsfāzu strāvas tīklam (rotors vēl nekustīgs), rotējošās plūsmas Ф magnētiskās līnijas šķeļ rotora īsi slēgtā kontūra aktīvās malas un inducē tajās elektrodzinējspēku *E*2, kas rotora noslēgtajā kontūrā uztur indukcijas strāvu *I*2. Pirmajā tuvinājumā var pieņemt, ka *I*2 un *E*2 sakrīt fāzē.

Inducētā *E*2 resp. *I*2 virzienu rotora kontūrā nosaka pēc labās rokas likuma, pieņemot, ka plūsma ir nekustīga, bet rotors rotē pretī plūsmas griešanās virzienam ar kādu relatīvo ātrumu *vr*, jo ĒDS iegūšanai nepieciešama tikai magnētiskās plūsmas un va­dītāja relatīvā kustība.

|  |  |
| --- | --- |
|  | 9.52. att. Asinhrona dzinēja izveido­juma un  darbības princips. |

Starp rotējošo magnētisko plūsmu Ф un rotora kontūrā plūs­tošo indukcijas strāvu *I*2 pastāv savstarpēja mijiedarbība: magnē­tiskais lauks darbojas ar elektromagnētisku spēku *F* uz katru rotora kontūra aktīvo malu, radot elektromagnētisko griezes momentu

*MP = F·a,*

kur *a* — spēka plecs.

Ja *MP* ir lielāks par dzinēja vārpstu bremzējošo mo­mentu *Mbr*, tad rotors sāk paātrināti griezties rotējošā magnē­tiskā lauka griešanās virzienā.

Pieaugot rotora griešanās ātrumam *n*2, samazinās rotējošās plūsmas Ф relatīvais ātrums pret rotoru, tādēļ samazinās arī *E*2 un *I*2, tātad samazinās arī rotora griezes moments.

Beidzot iestājas līdzsvars starp dzinēja elektromagnētisko spēku radīto griezes momentu *M* un bremzējošo momentu *Mbr*, ko rada piedzenamā darba mašīna un berzes spēki dzinējā:

*M = Mbr*,

un rotora ātrums vairs nemainās, t. i., *n*2 = const, ja *Mbr* = onst.

Tādējādi asinhronā dzinēja darbības pamatā ir rotējošā mag­nētiskā lauka un rotorā plūstošo indukcijas strāvu mijiedarbība.

Bet EDS rotora kontūrā inducējas tikai tad, kad ir relatīva kustība starp rotējošo plūsmu Ф un rotoru.

No teiktā secinām, ka asinhronā dzinēja rotējošais magnētis­kais lauks un rotors rotē vienā virzienā ar dažādiem ātrumiem, turklāt rotora ātrums vienmēr mazāks par magnētiskā lauka sin­hrono griešanās ātrumu, t. i., *n*2 < *n*1.

Ja pieņem, ka kādā laika momentā tomēr *n*2 = *n*1, tad magnē­tiskā plūsma Ф nešķeļ rotora kontūru, un tādēļ kontūra *E*2 = 0 un *I*2 = 0 un uz dzinēja rotoru nedarbojas griezes moments (*M* = 0). Bet, tā kā uz rotora vārpstu vienmēr darbojas bremzējošais mo­ments — kaut vai tikai berzes spēku radītais, — tad rotora ātrums tūliņ samazinās (*n*2 < *n*1) un vienlaicīgi rodas griezes moments *M* > 0.

Jāuzsver, ka reālam rotoram, protams, ir daudzas rievas, ku­rās ievietoti daudzi īsi slēgti kontūri vai tinums.

**9.13. FĀZU SECĪBA**

Par fāzu secību sauc kārtību, kādā trīsfāzu sistēmas strā­vas vai spriegumi sasniedz pozitīvos maksimumus.

Izšķir fāzu tiešo secību, kad strāvas pozitīvais maksimums vispirms iestājas Α fāzē, pēc tam В fāzē, С fāzē, atkal Α fāzē utt., un apgriezto secību, kad strāvas maksimumi iestājas ci­tādā kārtībā: vispirms Α fāzē, pēc tam С fāzē, В fāzē, atkal А fāzē utt.

Bieži jāzina fāzu secība trīsfāzu ķēdes vados, piemēram, lai noteiktu tīklā ieslēgta asinhronā motora griešanās virzienu. Fāzu secības noteikšanai var izmantot fāzu indikatoru, kura darbības principa pamatā ir rotējošā magnētiskā plūsma.

Fāzu indikators sastāv no trim spolēm, kuru sākumi apzīmēti ar burtiem А, В un С (vai cipariem 1, 2 un 3). Šos sākumus pievieno trīsfāzu ķēdes vadiem, turklāt spoli A pievieno vadam, kuru izvēlas par A fāzi. Spoles B un C pievieno pārējiem diviem vadiem.

Virs spolēm uz smailes uzlikts viegls alumīnija disks, kas rotē magnētiskās plūsmas griešanās virzienā. Griešanās cēlonis ir tas pats, kas rada rotora griešanos asinhronajā motorā. Uz diska uz­zīmēta bulta (9.53. att.). Ja disks griežas bultas norādītajā vir­zienā, tad fāzu secība ir tieša, t. i, spole B pievienota B fāzei, bet spole С — С fāzei. Ja disks rotē pretējā virzienā, tad fāzu secība ir apgriezta, t. i., spole В pievienota С fāzei, bet spole С — В fāzei.

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

9.53. att. Shēma fāzu indikatoram ar rotējošu disku.

Fāzu secības noteikšanai var izmantot arī citādu fāzu indika­toru. Pievienojam trīsfāzu ķēdes vadiem divas kvēlspuldzes un kondensatoru, kas savienoti zvaigznē (9.54. att.), pieņemot par Α fāzi to, kurā ieslēgts kondensators.

|  |  |
| --- | --- |
| 9.54. att. Shēma fāzu indika­toram ar  kondensatoru. | 9.55. att. Shēma fāzu indikatoram ar  reaktīvo spoli. |

Pieņemsim, ka vadītspējas absolūtās vērtības abām kvēlspul­dzēm un kondensatoram ir vienādas. Apzīmēsim fāzu vadītspējas ar kompleksiem skaitļiem:



Ņemot vērā, ka līnijas spriegumu ir simetriski, bet ģeneratora fāzu spriegumi vienlīdzīgi *Uf*, aprēķinām mezgla spriegumu



Spriegums uz spuldzes, kas ieslēgta В fāzē



Spriegums uz spuldzes, kas ieslēgta С fāzē



Pēc spilgtās lampas viegli nosakām В fāzi.

Lai noteiktu fāzu secību, kondensatora vietā var lietot spoli, kurai ir liela reaktīva pretestība, salīdzinot ar aktīvo pretestību (9.55. att.). Uzskatot, ka spole pieslēgta Α fāzei, В fāzi nosaka pēc vāji kvēlojošās spuldzes un С fāzi — pēc spilgtās spuldzes.

Principā trīsfāzu patērētāja fāzu secību var noteikt izmantojot speciālus digitālos mēraparātus, piemēram, daudzfunkcionālo testeri Fluke 1653B (9.56. att.). Ar tādiem mēraparātiem var izmērīt spriegumu, frekvence, izolācijas pretestību, noplūdes strāvu, elektriskās ķēdes pilno pretestību (L-N, L-PE un N-PE) un īsslēguma strāvu. Pie tam mēraparāts atspoguļo uz ekrāna fāzu secību trīsfāžu sistēmai.

|  |  |
| --- | --- |
| ***a*** | ***b*** |

9.56. att. Daudzfunkcionālais testeris Fluke 1653B (a) un funkcionālo režīmu pārslēdzis (b).

**9.14. NESIMETRISKAS TRISFĀZU SISTĒMAS SIMETRISKAS KOMPONENTES**

Nevienādas fāzu slodzes gadījumā trīsfāzu ķēdē strāvas līnijas vados nav vienādas un tātad arī sprieguma kritumi tajos ir dažādi. Patērētāja fāzu un līnijas spriegumu vektori arī nav vienādi pēc absolūtās vērtības, un leņķi starp tiem ir dažādi. Skaidrs, ka fāzu un līnijas strāvu vektoru sistēma tādā gadījumā arī ir nesimetriska. Spriegumu un strāvu asimetrijas cēlonis var būt ne tikai fāzu slodzes nevienmērība, bet arī EDS asimetrija ģeneratorā, kas baro trīsfāzu ķēdi; tas gan praksē gadās reti.

Jebkuru nesimetrisku triju vektoru sistēmai var sadalīt trīs sis­tēmās: 1) triju skaitliski vienādu vektoru simetriskā sistēmā, kurā В (vai ВС) fāzes vektors atpaliek par 120° no Α (vai AB) fāzes vektora, bet С fāzes vektors par 120° apsteidz Α (vai AB) fāzes vektoru; 2) simetriskā triju skaitliski vienādu vektoru sistēmā, kurā В (vai ВС) un С (vai CA) fāzu vektori nobīdīti attiecībā pret A (vai AB) fāzes vektoru par 120° virzienā, kas pretējs pirmajā gadījuma aplūkotajam virzienam; 3) triju skaitliski vienādu un viena virziena verstu vektoru sistēmā (9.57. att.).

Pirmo no šīm sistēmām sauc par fāzu tiešās secības sistēmu, otro — par fāzu apgrieztās secības sistēmai, bet trešo — par fāzu nulles secības sistēmu. Tiešās se­cības vektorus apzīmē ar indeksu 1, apgrieztās — ar indeksu 2 un nulles — ar indeksu 0.

Īsuma labad apzīmējam

(9.26)



|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| ***a*** | ***b*** | ***c*** |

9.57. att. Tiešās (*a*), apgrieztās (*b*) un nulles (*c*) secības vektori.

|  |  |
| --- | --- |
|  | 9.58. att. Simetriskas trīsfāzu sistēmas vektori. |

Vektora reizinājums ar šo «operatoru» atbilst vektora pagrie­zienam par 120° uz priekšu (vektoru griešanās virzienā). Tā kā pagrieziens par 120° atpakaļ ir vienlīdzīgs divkāršam pagriezienam uz priekšu par 120°, tad

(9.27)



Vēl jāatzīmē, ka vektoru reizinājums ar *a*3 atbilst trīskāršam pagriezienam par 120° un rezultātā vektors, atgriežas sākuma stāvoklī. Tāpēc

*a*3 = 1; (9.28)

*a*4 = *a*3∙*a* = *a*. (9.29)

Tā kā, summējot trīs skaitliski vie­nādus vektorus, kuri veido simetrisku zvaigzni ar 120° lieliem leņķiem, rezul­tāts vienlīdzīgs nullei (10.58. att.), tad

1 + *a* + *a*2 = 0. (9.30)

Lai pierādītu, ka jebkuru nesimetrisku sistēmu var sadalīt simetriskās kom­ponentēs, un iegūtu nepieciešamās for­mulas, pieņemam, ka sistēma jau sadalīta un trīs nesimetriskie vektori (kompleksi) izteikti ar simetriskajam komponentēm šādi:

(9.31)



(9.32)



(9.33)



kur un ir fāzu tiešās secības simetriskie vektoru; un — apgrieztās secības simetriskie vektori un — nulles secības vektori.



Izmantojot šīs sakarības, pārveidojam iepriekš uzrakstīto vie­nādojumu sistēmu

(9.34)



(9.35)



(9.36)



Atrisinot šo triju vienādojumu sistēmu, t. i., aprēķinot trīs nezināmos vektorus un iegūstam meklējamās formulas vektoru sistēmas sadalīšanai; līdz ar to tiek pierādīta iespēja sa­dalīt jebkuru sistēmu simetriskajās komponentes.



Saskaitot vienādojumu (9.34), (9.35) un (9.36) labās un kreisās puses, iegūstam:



no kurienes nulles secības komponente

(9.37)



Lai noteiktu tiešās secības komponenti reizinām vienādojumu (9.35) ar *a*, bet vienādojumu (9.36) ar *a*2; tad vienādojumu sistēma uzrakstāma šādi:



Saskaitot labās un kreisās puses, iegūstam



no kurienes fāzu tiešās secības komponente

(9.38)



Lai aprēķinātu fāzu apgrieztās secības komponenti, reizinām vienādojumu (9.35) ar *a*2, bet vienādojumu (9.36) ar *a*; šajā gadījumā iegūstam vienādojumu sistēmu:



Saskaitot vienādojumu labās un kreisās puses, iegūstam



no kurienes

(9.39)



***9.10. piemērs***. Aprēķināt simetriskās komponentes trīsfāzu ķēdes līnijas spriegumiem:



Nulles secības komponente



Tiešās secības komponente



ievērojot, ka



Apgrieztās secības komponente



Tā kā triju līnijas spriegumu summa trīsfāzu ķēdē visos gadī­jumos ir vienlīdzīga nullei, tad

(9.40)



t. i., līnijas spriegumiem nekādos apstākļos nav nulles secības komponentes. Jo nesimetriskāka līnijas spriegumu sistēma, jo lielāka ir tās apgrieztās secības komponente. Tāpēc procentos izteikta apgrieztās un tiešās secības komponentu attiecība līnijas spriegumu sistēmā

(9.41)



raksturo šīs sistēmas nesimetriskumu; to sauc par asimetrijas pakāpi. Saskaņā ar elektrotehniskajiem noteikumiem un normām asimetrijas pakāpe nedrīkst pārsniegt 5%.

***9.11. piemērs***. Līnijas spriegumi *U*1*l* = 116 V un *U*2*l* = 5 V. Aprēķināt līnijas asimetrijas pakāpi.

Atrisinājums.



**10 NODAĻA**

**NESINUSOIDALAS STRĀVAS**

10.1. PAMATJĒDZIENI

Iepriekšējās nodaļās aplūkojām parādības maiņstrāvas ķēdēs, pieņemot, ka strāvas un spriegumi ir sinusoidāli.

Pa lielākai daļai strāvas un spriegumus elektriskajās ķēdēs tiešām var uzskatīt par sinusoidāliem, jo šajā nolūkā tiek veikti speciāli pasākumi. Tomēr daudzos gadījumos strāvas un spriegumi vairāk vai mazāk atšķiras no sinusoidāli mainīgiem lielumiem (10.1. un 10.2. att.). Nesinusоidālus spriegumus un strāvas var radīt kā ģeneratori, tā arī enerģijas patērētāji.

|  |  |
| --- | --- |
| 10.1. att. No pamata (pirmās) un trešās harmoniskās sastāvoša nesinusoidāla līkne. | 10.2. att. No pamata un trešās harmoniskās sastāvoša nesinusoidāla līkne. |

Viens no iemesliem, kāpēc tiek izkropļota ģeneratora EDS līkne, ir nesinusoidāls magnētiskās indukcijas sadalījums gaisa spraugā enkura zobu un rievu dēļ, enkura reakcijas rezultātā utt.

Enerģijas patērētājos, kuriem ir tērauda serdes, nesinusoidālas strāvas un spriegumi rodas tāpēc, ka sakarība starp magnetizē­jošo strāvu (un magnētisko plūsmu ir nelineāra. Nesinusoidālas strāvas rodas visos gadījumos, kad ķēdē darbojas enerģijas pa­tērētāji, kuros starp strāvu un spriegumu nepastāv tieša propor­cionalitāte (piemēram, taisngriežos). Sinusoidālam spriegumam pievienotas spoles ar tērauda serdi strāvas līkne *i* = *f*(*t*) parādīta 10.3. attēlā. Ja ķēdi pievieno nesinusoidālam spriegumam, tad arī lineārā ķēdē strāva ir nesinusoidāla.

|  |  |
| --- | --- |
|  | 10.3. att. Strāvas līkne spolei ar tērauda  serdi. |

Tādējādi maiņstrāvas ķēžu aprē­ķinos daudzos gadījumos jāievēro periodiski mainīgo lielumu nesinusoidālais raksturs. Tikai pārzinot nesinusoidālu strāvu teorijas elemen­tus, var izprast elektronu, pusvadī­tāju un citu modernās tehnikas ierīču darbību.

Aplūkojot procesus elektriskajās ķēdēs, kurās ir nesinusoidālas strāvas un spriegumi, lietderīgi izmantot Furjē teorēmu: ikvienu periodisku mainīgu lielumu var uzskatīt par konstanta (no laika neatkarīga) lieluma un sinusoidālu (harmonisku) lielumu rindas summu; turklāt visu sinusoīdu frekvences ir viena un tā paša lieluma, t. s. pamatfrekvences daudzkārtņi.

Harmonisko komponenti, kuras periods vienlīdzīgs nesinusoidālā lieluma periodam, sauc par pamata jeb pirmo har­monisko; pārējās harmoniskās, kuru periodi ir 2, 3 utt., reizes mazāki, sauc par augstākajām harmoniskajām, t. i., par otro harmonisko, trešo harmonisko utt.

|  |
| --- |
| 10.4. att. Nesinusoidāla līkne, kas sastāv no pamata un trešās harmoniskās ar dažādām sākuma fāzēm. |

Ja nesinusoidālo strāvu cēlonis ir nesinusoidāls avotā EDS vai spriegums, tad doto periodisko spriegumu var sadalīt pastāvīgajā komponentē un harmoniskajās (sinusoidālās) komponentēs. Ja enerģijas patērētāja voltampēru raksturlīkne ir lineāra, tad strāvu jebkurā zarā var aprēķināt pēc superpozīcijas principa, saskaitot atsevišķo sprieguma komponentu izsauktās strāvas. Tas ļauj nesinusoidālo strāvu pētīšanai izmantot jau zināmo sinusoidālo strāvu teoriju.

Kā piemērs 10.1. - 10.4. attēlos redzamas nesinusoidālu EDS līknes, kuri sastāv no divām sinusoidālām komponen­tēm (pārtrauktās līknes): pamata sinusoīdas, kurai ir tā pati frek­vence, kas apskatāmai nesinusoidālajai līknei, un trešās harmonis­kās, kurai ir trīs reizes augstāka frekvence.

Šīs trīs līknes atšķiras cita no cita ar trešās harmoniskās sākuma fāzēm:

1. *e = e*1 + *e*2 = *E*1*m* sin *ωt* + *E*3*m* sin 3*ωt*;

2. *e = e*1 + *e*2 = *E*1*m* sin *ωt* — *E*3*m* sin 3*ωt*;

3. *e = e*1 + *e*2 = *E*1*m* sin *ωt* + *E*3*m* sin (3*ωt —* ψ3*).*

Vispārīgā gadījumā, kā jau minēts, katru periodiski mainīgu funkciju *f*(x) var izvirzīt Furjē rindā, kas satur pastāvīgo komponenti A0 un sinusoīdu virkni, t. i.,

*f*(*x*) = *A*0 + *A*1m sin (*x* + ψ1) + *A*2m sin (2*x* + ψ2) + *A*3m sin (3*x* + ψ3) + … (10.1)

vai

*f*(*ωt*) = *A*0 + *A*1m sin (*ωt* + ψ1) + *A*2m sin (2*ωt* + ψ2) + *A*3m sin (3*ωt* + ψ3) + … , (10.2)

kur *A*1m, *A*2m un *A*3m — pirmās, otrās un trešās harmoniskās ampli­tūdas;

ψ1, ψ2 un ψ3 — attiecīgo harmonisko sākuma fāzes leņķi.

Harmoniskās ar frekvencēm ω, 3ω, 5ω, … sauc par nepāra harmoniskajām, bet ar frekvencēm 2ω, 4ω, 6ω, … - par pāra harmoniskajām.

Izmantojot no trigonometrijas zināmo divu leņķu summas sinusa izteiksmi, jebkuru (*k*-to) harmonisko var pārveidot šādu:

*Akm* sin (*kx* + ψ*k*) = *Akm* sin *kx* cos ψ*k* + *Akm* cos *kx* sin ψ*k*, (10.3)

kur *k* — jebkurš vesels pozitīvs skaitlis.

Pieņemot

*Akm* cos ψ*k* = *Bkm*; *Akm* sin ψ*k* = *Ckm*,

iegūstam

*Akm* sin (*kx* + ψ*k*) = *Bkm* sin *kx* + *Ckm* cos *kx*. (10.4)

Tātad rindu (13.1) var uzrakstīt kā sinusu un kosinusu summu ar sākuma fāzēm, kas vienlīdzīgas nullei:

*f*(*x*) = *A*0 + *B*1m sin *x* + *B*2m sin 2*x* + *B*3m sin 3*x* + …

+ *C*1m cos *x* + *C*2m cos 2*x* + *C*3m cos 3*x* + … (10.5)

**10.2. PERIODISKO LĪKŅU VEIDI**

Periodisku nesinusoidālu funkciju izvirzot Furjē rindā, ir lietderīgi zināt šo funkciju attēlojošās līknes simetrijas raksturu.

1. Ja nesinusoidālās līknes ordinātu vidējā vērtība vienā periodā T ir vienāda ar nulli, tad Furjē rindā nav nemanīgās komponentes (*A*0 = 0).

Tā kā sinusoīdas vidējā ordināta perioda laikā vienlīdzīga nul­lei, t. i.,

(10.6)



tad vidējā ordināta perioda laikā periodiskai līknei, kas sastāv no sinusoīdu rindas un nesatur pastāvīgo komponenti, arī ir vienlī­dzīga nullei:

(10.7)



Tātad, ja periodiskas līknes vidējā ordināta ir vienlīdzīga nullei, tad šādas līknes pastāvīgā komponente arī ir vienlīdzīga nullei.

*f*(*ωt*) = *A*1 sin (*ωt* + ψ1) + *A*2 sin (2*ωt* + ψ2) + *A*3 sin (3*ωt* + ψ3) + … . (10.8)

Vidēja ordināta periodiskai līknei, kas sastāv no pastāvīgās komponentes un sinusoīdu rindas, ir vienlīdzīga pastāvīgajai kom­ponentei:

(10.9)



2. Ja nesinusoidālā līkne simetriska pret abscisu asi (10.5. att.), t.i., ja *f*(*ωt*) = – *f*(*ωt +π*), tad rinda nav nemainīgās komponentes un pāra harmonisko

*f*(*ωt*) = *A*1 sin (*ωt* + ψ1) + *A*3 sin (3*ωt* + ψ3) + … (10.10)

Periodisku līkni sauc par simetrisku attiecībā pret abscisu asi, ja kaut kurām divām abscisām, kas atšķiras par pusperiodu, atbilst pēc absolūtās vērtības vienādas ordinātas, bet to zīmes ir pretējas (10.5. att.), t. i., ja līknes vienādojums ir

*f*(*x*) = – *f*(*x + π*) jeb *yx = – yx+π*. (10.11)

Šādas līknes var raksturot arī tā: negatīvais pusperiods, pabī­dīts par pusperiodu uz priekšai gar abscisu asi, ir pozitīvā pusperioda spoguļattēls.

Tiešām, ja

*f*(*x*) = *A*0 + *A*1 sin(*x + ψ*1) + *A*2 sin(2*x + ψ*2) + *A*3 sin(3*x + ψ*3) + … .

tad

*f*(*x + π*) = *A*0 – *A*1 sin(*x + ψ*1) + *A*2 sin(2*x + ψ*2) + *A*3 sin(3*x + ψ*3) + … .

Tā kā pret abscisu asu simetriskām līknēm ir spēkā vienādojums

*f*(*x*) = – *f*(*x + π*)

jeb

*f*(*x*) + *f*(*x + π*) = 0,

tad

2*A*0 + 2*A*2 sin(2*x + ψ*2) + … = 0.

|  |
| --- |
|  |

10.5. att. Pret abscisu asi simetriska nesinusoidāla līkne.

Pēdējai vienlīdzībai jābūt spēkā jebkurām *x* vērtībām, bet tas iespējams tikai tad, ja

*A*0 = 0; *A*2 = 0; *A*4 = 0 utt.

Tātad pret abscisu asi simetriskas līknes vienādojums ir šāds:

*f* (*x*) = *A*1 sin(*x + ψ*1) + *A*3 sin(3*x + ψ*3) + … . (10.12)

jeb

*f* (*x*) = *B*1 sin *x* + *B*3 sin 3*x* + … + *C*1 cos *x* + *C*3 cos 3*x* + … . (10.13)

Elektrotehnikā šāda veida līknes jāaplūko bieži.

3. Ja nesinusoidālā līkne simetriska pret koordinātu sākumu (13.5. att.), t. i., ja *f*(*ωt*) = – *f*(– *ωt*), tad rinda nav nemainīgās komponentes un visu harmonisko sākuma fāzes leņķi ir vienādi ar nulli

*f*(*ωt*) = *A*1 sin *ωt* + *A*2 sin 2*ωt* + *A*3 sin 3*ωt* + … . (10.14)

Periodisku līkni sauc par simetrisku attiecībā pret koordinātu sākumu, ja jebkurām divām abscisām ar vie­nādām absolūtām vērtībām, bet pretējām zīmēm atbilst ordinātas, kas pēc absolūtās vērtības ir vienādas, bet to zīmes — pretējas (10.6. att.), t. i., ja līknes vienādojums ir

*f* (*x*) = – *f* (– *x*). (10.15)

|  |
| --- |
|  |

10.6. att. Pret koordinātu sakuma punktu simetriska nesinusoidāla līkne.

Vispārīgā gadījumā

*f* (*x*) = *A*0 + *B*1 sin *x* + *B*2 sin 2*x* + *B*3 sin 3*x* + … + *C*1 cos *x* + *C*2 cos 2*x +* *C*3 cos 3*x* + … ;

*f* (–*x*) = *A*0 – *B*1 sin *x* – *B*2 sin 2*x* – *B*3 sin 3*x* + … + *C*1 cos *x* + *C*2 cos 2*x +* *C*3 cos 3*x* + … ,

jo, mainoties argumenta zīmei, sinusu vērtībām zīmes mainās, bet kosinusu — ne.

Ievērojot, ka aplūkojamo līkņu vienādojumam jāapmierina sakarība *f*(x) = — *f*(—x) jeb *f*(x) + *f*(—x) = 0, iegūstam

*A*0 + *B*1 sin *x* + *B*2 sin 2*x* + *B*3 sin 3*x* + … + *C*1 cos *x* + *C*2 cos 2*x +* *C*3 cos 3*x* + …

*… + A*0 – *B*1 sin *x* – *B*2 sin 2*x* – *B*3 sin 3*x* + … + *C*1 cos *x* + *C*2 cos 2*x +* *C*3 cos 3*x* + … = 0

jeb

2*A*0 + 2*C*1 cos *x* +2*C*2 cos 2*x +* 2*C*3 cos 3*x* + … = 0

no kurienes

*A*0 = 0; *C*1 = 0; *C*2 = 0; *C*3 = 0 utt.

Tātad pret koordinātu sakumu simetriskas līknes nav pastāvī­gās komponentes un kosinusoīdu; tās var uzrakstīt šādi:

*f* (*x*) = *B*1 sin *x* + *B*2 sin 2*x* + *B*3 sin 3*x* + … . (10.16)

4. Ja nesinusoidālā līkne simetriska pret ordinātu asi (10.7. att.). t. i., ja f(*ωt*) = f(– *ωt*), tad rindā nav sinusoīdu:

*f*(*ωt*) = *A*0 + *A*1 cos *ωt* + *A*2 cos 2*ωt* + *A*3 sin 3*ωt* + … (10.17)

|  |
| --- |
|  |

10.7. att. Pret ordinātu asi simetriska nesinusoidāla līkne

5. Līknes, kas ir simetriskas kā pret abscisu asi, tā arī pret ko­ordinātu sākumu, sastāv no nepāru kārtas sinusoīdām, un to vie­nādojums ir

*f* (*x*) = *B*1 sin *x* + *B*3 sin 3*x* + … . (10.18)

10.1. un 10.2. attēlos parādītas tādas līknes.

Jāievēro, ka simetriju vai asimetriju attiecībā pret abscisu asi nosaka līknes forma, un tāpēc šeit neko mainīt nevar. Simetriju attiecībā pret koordinātu sākumu daudzos gadījumos var panākt ar mērķtiecīgu laika skaitīšanas sākuma momenta izvēli.

Izmantojot priekšstatu par periodisku nesinusoidālu lielumu sadalīšanu harmoniskajās komponentēs, nesinusoidālu spriegumu *u* = *f*(*ωt*) var izteikt ar šādu rindu:

*u = U*0 + *U*1m sin (*ωt + ψ*1) + *U*2m sin (*ωt + ψ*2) + *U*3m sin (3*ωt + ψ*3) + … , (10.19)

kur *U*0 – sprieguma nemainīgā komponente:

*U*1m – sprieguma pirmās jeb pamatharmoniskās amplitūda (šīs harmoniskās periods vienāds ar nesinusoidālā sprieguma *u* periodu *T*);

*U*2m, *U*3m - sprieguma augstāko harmonisko amplitūdas;

ψ1, ψ2 un ψ3 —harmonisko sākuma fāzes leņķi, kuru lielums atkarīgs no laika skaitīšanas sākuma momenta (*t* = 0) izvēles.

No izteiksmes (10.19) secinām, ka EDS avotu, kas lineārai ķēdei nodrošina nesinusoidālu spriegumu, var aizstāt ar vairākiem virknē slēgtiem avotiem, no kuriem viens dod nemainīgu sprie­gumu *U*0 = const (līdzspriegumu), bet pārējie — sinusoidālus spriegumus *u*1, *u*2, *u*3,... ar amplitūdām *U*l*m*, *U*2*m*, *U*3*m*,... un leņķiskajām frekvencēm ω, 2ω, 3ω, … :

78

*u* = *U*0 + *u*1 + *u*2 + *u*3 +... .

Saskaņā ar superpozīcijas principu ķēdes nesinusoidālās strāvas momentānā vērtība *i* ir vienāda ar katra avota šajā ķēdē uzturēto strāvu *I*0 un *i*1, *i*2, *i*3, ... momentāno vērtību algeb­risko summu:

*i* = *I*0 + *i*1 + *i*2 + *i*3 +... .

Tādēļ ķēdes nesinusoidālās strāvas *i* rindu, piemēram, induk­tīva rakstura slodzei var uzrakstīt šādi:

*i = I*0 *+ I*1*m* sin (*ωt* + ψ1 *–* φ1) + *I*2*m* sin (2*ωt* + ψ2 *–* φ2) +

= *I*3*m* sin (*ωt* + ψ3 *–* φ3) + …, (10.20)

kur — strāvas nemainīgā komponente, kas atkarīga no *U*0 un ķēdes ekvivalentās pretestības līdzstrāvai R0;



*I*1*m*, *I*2*m*, *I*3*m*, … — strāvas harmonisko amplitūdas;

φ1, φ2, φ3, … — fāzu nobīdes leņķi starp atbilstošām sprieguma un strāvas harmoniskajām.

Tādējādi, analizējot nesinusoidālās ķēdes, doto periodisko nesinusoidālo funkciju vispirms izvirza Furjē rindā, no kuras tad parasti izmanto tikai nedaudzus pirmos locekļus; tālākam aprē­ķinam tad lieto līdzstrāvas un sinusoidālas maiņstrāvas ķēžu ap­rēķina metodes.

10.1. attēlā parādītas divu nesinusoidālu elektrodzinējspēku *e* līknes (simetrija pret abscisu asi) un to harmoniskās. Abas nesinusoidālās līknes satur tikai pirmo (*e*1) un trešo (*e*3) harmo­nisko, pie tam trešās harmoniskās ir pretējās fāzēs:

*a*) *e* = *E*1*m* sin *ωt* + *E*3*m* sin 3*ωt*, *b*) *e* = *E*1*m* sin *ωt* – *E*3*m* sin 3*ωt*.

**10.3. NESINUSOIDĀLAS STRĀVAS UN SPRIEGUMI ELEKTRISKAJĀS ĶĒDĒS**

Ja ķēdē darbojas nesinusoidāls EDS (vai spriegums), kas sa­stāv no vairākām harmoniskajām, tad ķēdē ar patērētājiem, kuriem ir lineāras voltampēru raksturlīknes, strāva sastāv no tik daudz sinusoidālām strāvām, cik ir atbilstošo harmonisko elektrodzinējspēkam.

Vispirms aplūkosim nesazarotu ķēdi.

Neievērojot skinefektu, var uzskatīt, ka ķēdes aktīvā pretestība visām harmoniskajām ir vienāda.

Ķēdes induktīvā pretestība dažādām harmoniskajām ir atšķi­rīga. Tā palielinās proporcionāli harmoniskās kārtas skaitlim, jo

*XLk = kωL*. (10.21)

Piemēram, ja *L* = 0,0318 Η un , pirmajai harmoniskajai (*k* = 1)



*XL*1 *=* 1∙314∙0,0318 = 10 Ω;

trešajai harmoniskajai (*k* = 3)

*XL*3 *=* 3∙314∙0,0318 = 30 Ω;

piektajai harmoniskajai (*k* = 5)

*XL*5 *=* 5∙314∙0,0318 = 50 Ω.

Карcitatīvā pretestība tāpat dažādām harmoniskajām ir at­šķirīga: tā mainās apgriezti proporcionāli harmonisko kārtas skait­ļiem, jo

(10.22)



Piemēram, ja *С* = 31,8 μF un , pirmajai harmoniskajai



trešajai harmoniskajai



piektajai harmoniskajai



Pieņemsim, ka ķēdei ir aktīvā pretestība, induktivitāte un kapa­citāte. Harmoniskajai ar kārtas skaitli k ķēdes pilnā pretestība

(10.23)



un strāvas atbilstošās harmoniskās amplitūda

(10.24)



Fāzu nobīdes leņķis starp spriegumiem un strāvām katrai har­moniskajai ir savs, jo, mainoties kārtas skaitlim, aktīvā pretestība *R* nemainās, bet reaktīvā pretestība mainās. Strāvas harmoniskās fāzu nobīdes leņķi attiecībā pret atbilstošo EDS (sprieguma) harmonisko var aprēķināt pēc sakarības



(10.25)



Ja EDS sadalījums harmoniskajās ir jau dots, piemēram, zināms vienādojums

*e = e*1 + *e*3 + *e*5 = *E*1*m* sin (*ωt* + ψ1) + *E*3*m* sin (3*ωt* + ψ3) + *E*5*m* sin (5*ωt* + ψ5),

tad strāva ķēde

*i = i*1 + *i*3 + *i*5 = *I*1*m* sin (*ωt* + ψ1 – *φ*1) + *I*3*m* sin (3*ωt* + ψ3 – *φ*3) + *I*5*m* sin (5*ωt* + ψ5 – *φ*5),

turklāt



un



Ķēdē, kurā ir tikai aktīvās pretestības, kas visām harmoniska­jām ir vienādas, strāvas un sprieguma attiecība ir viena un tā pati visām harmoniskajām. Tātad strāvas līkne ir līdzīga sprieguma līknei.

Ķēdē, kurā ir aktīvā pretestība un induktivitāte, pieaugot har­moniskās kārtas skaitlim, pilnā pretestība palielinās, t. i., strāvas harmoniskās attiecība pret sprieguma harmonisko samazinās. Citiem vārdiem, jo lielāks ir harmoniskās kārtas skaitlis, jo vājāk izteikta strāvas līknē ir attiecīgā harmoniskā, salīdzinot ar sprie­guma līkni. Tātad strāvas un sprieguma līknes nav līdzīgas; strā­vas līknes forma mazāk atšķiras no sinusoīdas nekā sprieguma līknes forma.

Ķēdē, kurā ir aktīvā pretestība un kapacitāte, pilnā pretestība samazinās, palielinoties harmoniskās kārtas skaitlim, t. i., ampli­tūdu attiecība starp strāvas un sprieguma harmonisko palielinās. Citiem vārdiem, jo lielāks harmoniskās kārtas skaitlis, jo stiprāk izteikta ir attiecīgā harmoniskā strāvas līknē, salīdzinot ar sprie­guma līkni. Strāvas un sprieguma līknes nav līdzīgas; strāvas līk­nes forma vairāk atšķiras no sinusoīdas nekā sprieguma līknes forma.

Ja ķēdei ir aktīvā pretestība, induktivitāte un kapacitāte, var gadīties, ka ķēde noskaņota rezonansē kādai no augstākajām har­moniskajām; šai harmoniskajai pilnā pretestība ir vismazākā, un strāvas līknē tā ir stiprāk izteikta nekā sprieguma līknē.

**10.4. NESINUSOIDĀLAS STRĀVAS UN SPRIEGUMU APRĒĶINS**

Pieņemam, ka ķēdei ar virknē slēgtiem *R* un *L* pievadīts nesinusoidāls spriegums

*u = U*0 + *U*1*m* sin *ωt* + *U*3*m* sin (3*ωt* + ψ3)

un ka jāaprēķina ķēdes strāvas momentānā un efektīvā vērtība un ķēdes aktīvā jauda.

Tā kā induktivitāte neietekmē strāvas nemainīgo komponenti *I*0, tad



Sprieguma pirmā harmoniskā uztur ķēdē strāvas pirmo har­monisko ar amplitūdu



kur



*ω* — sprieguma pirmās harmoniskās leņķiskā frekvence. Strāvas pirmā harmoniskā atpaliek fāzē no sprieguma pir­mās harmoniskās par leņķi *φ*1, pie tam



Tad ķēdes strāvas pirmās harmoniskās momentānā vērtība

*i*1 = *I*1*m* sin (*ωt* – φ1)

un efektīvā vērtība



Sprieguma trešā harmoniskā ķēdē uztur strāvas trešo harmo­nisko

*i*3 = *I*3*m* sin (*ωt* + ψ3 – φ1),

kurai

un



kur



Strāvas trešās harmoniskās efektīvā vērtība



Ķēdes strāvas momentāna vērtība

*i = I*0 + *i*1 + *i*3 = *I*0 + *I*1*m* sin (*ωt* – φ1) + *I*3*m* sin (*ωt* + ψ3 – φ1)

un efektīvā vērtība



Ķēdes aktīvā jauda

*P = U*0*I*0 + *U*1*I*1cosφ1 + *U*3*I*3cosφ3.

Strāvas līknes forma atšķiras no sprieguma līknes formas, kā to rāda amplitūdu attiecību salīdzinājums:



Tā kā ķēdē ar *R* un *L*, pieaugot harmonisko kārtas skaitlim, pilna pretestība *Z* harmoniskajām palielinās, tad strāvas tālākās harmoniskās ir aizvien mazāk izteiktas; tātad induktivitāte slāpē strāvas augstākas harmoniskās. Tādēļ ķēdēs ar induktivitāti strā­vas līkne mazāk atšķiras no sinusoīdas nekā ķēdei pievadītā sprie­guma līkne.

Ja nesinusoidāls spriegums pievienots ķēdei ar virknē slēg­tiem *R* un C, tad ķēdes aprēķins līdzīgs iepriekšējam. Tikai strā­vas nemainīgā komponente *I*0 = 0, jo attiecībā pret nemainīgo (līdzstrāvas) komponenti kondensators ir līdzvērtīgs ķēdes pār­traukumam. Sprieguma nemainīgā komponente *U*0 pastāv tikai starp kondensatora spailēm.

Tā kā, pieaugot harmonisko kārtas skaitlim *k*, kapacitīvā pre­testība samazinās, tad ķēdē ar *R* un *C* strāvas augstākās harmo­niskās ir stipri izteiktas un tādēļ ļoti ietekmē strāvas līknes formu — strāvas līkne ievērojami vairāk kropļota nekā sprieguma līkne.

10.8. attēlā *a* parādīta nesinusoidāla sprieguma līkne, kas ietver pirmo, trešo un piekto harmonisko; atbilstošā strāvas līkne un tās harmoniskās ķēdē ar *C* un ķēdē ar *L* parādītas 10.8. attēlā *b* un *c*, kur pieņemts, ka skaitliski *XL*1 = *XC*1.

***10.1. piemērs***. Aprēķināt strāvu nesazarotā ķēdē, kuras parametri ir *R* = 10 Ω; *L* = 0,05 H un *С* = 22,5 μF.

|  |  |
| --- | --- |
| ***a*** | ***b*** |
| ***c*** | 10.8. att. Nesinusoidāla sprieguma (*a*) un nesinusoidālu strāvu (*b, c*) līknes un to 1., 3. un 5. harmoniskā. |

Ķēdes spriegums (10.9. att.) *u* = 180 sin *ωt* + 60 sin 3*ωt* + 40 sin (5*ωt* + 180) V.

Pirmās harmoniskās frekvence *f* = 50 Hz.

Atrisinājums.



*φ*1 = arctg (– 12,53) = – 85020';



*φ*3 = arctg 0 = 00;

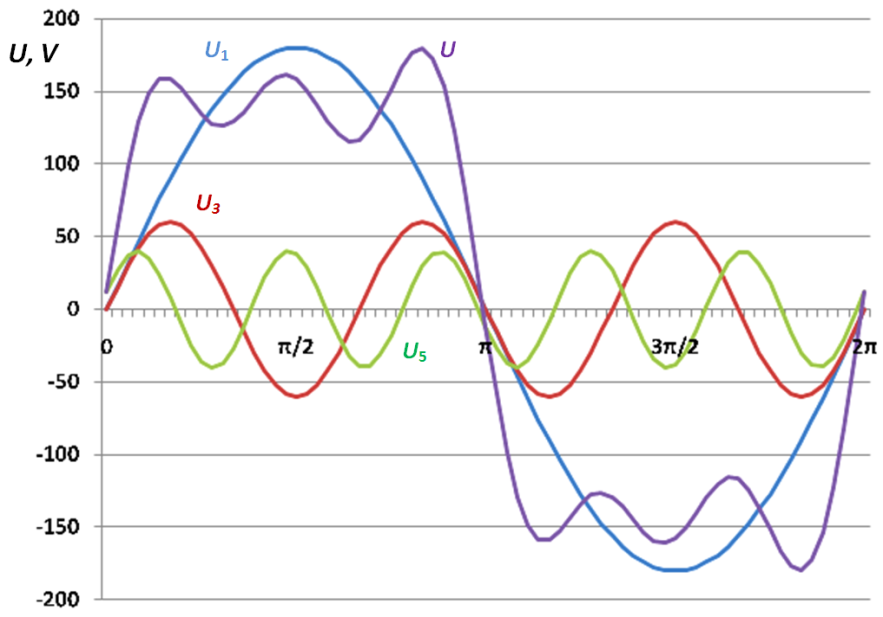


*φ*1 = arctg 5,02 = 780;

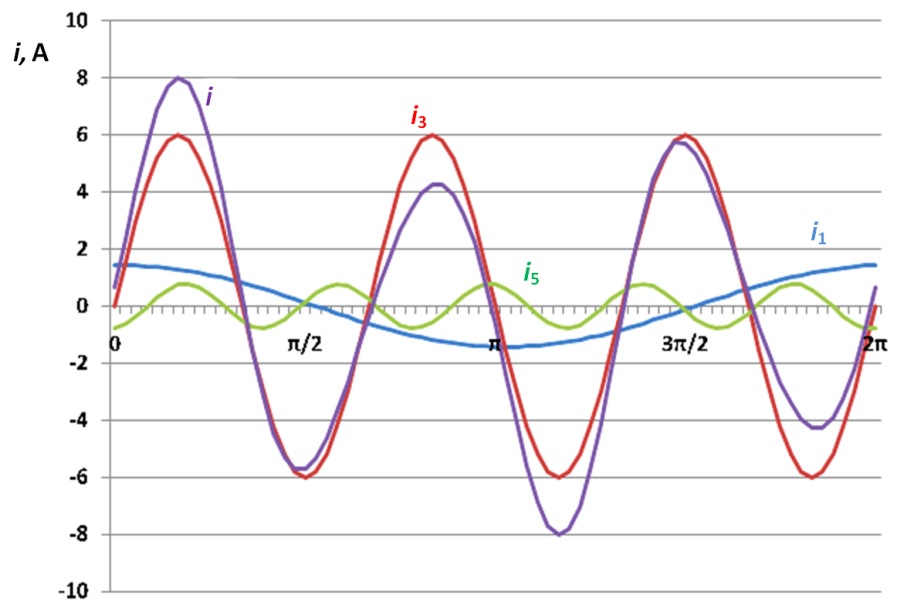


*i = i*1 + *i*3 + *i*5 = 1,43 sin (*ωt* + 85020') + 6 sin 3*ωt* + 0,78 sin (5*ωt* – 780) A.

10.9. attēlā konstruētas un sasummētas strāvas atsevišķās harmoniskās.



***a***



***b***

10.9. att. Nesinusoidālas sprieguma (*a*) un strāvas (*b*) līknes un harmo­niskās, no kurām tās sastāv.

Šajā piemērā ķēde noskaņota rezonansē trešajai harmoniskajai; tāpēc ķēdes pilnā pretestība šai harmoniskajai ir vienāda ar aktīvo pretestību; trešā har­moniskā ir stiprāk izteikta strāvas līknē nekā sprieguma līknē, kā tas redzams no grafika un no attiecībām



kamēr



Ja nesinusoidāls spriegums pieslēgts ķēdei ar vairākiem pa­ralēliem zariem, kuriem visiem ir aktīvās un reaktīvās pretestības, strāvas līkņu formas paralēlajos zaros vispārīgā gadījumā ir da­žādas un tātad atšķiras no strāvas līknes formas nesazarotajā ķē­des daļā. Strāvu nesazarotajā ķēdes daļā, kā arī strāvas paralēla­jos zaros var aprēķināt saskaņā ar superpozīcijas principu.

**10.5. NESINUSOIDĀLAS STRĀVAS UN SPRIEGUMA EFEKTIVĀS VĒRTIBAS**

Jebkuras formas spriegumu un strāvu efektīvās vērtības ir

(10.26)



Тā kā nesinusoidālu maiņspriegumu var izvirzīt rinda

*u = U*0 + *u*1 + *u*2 + *u*3 + … = *U*0 + *U*1*m* sin (*ωt* + ψ1) + *U*2*m* sin (2*ωt* + ψ2) +

+ *U*3*m* sin (3*ωt* + ψ3) + … ,

tad, ievietojot iegūto izteiksmi efektīvas vērtības formāla, iegūstam

(10.27)



Kāpinot kvadrātā izteiksmi kvadrātiekavās, iegūstam polinomu, kas satur:

*a*) visu locekļu kvadrātu summu; *b*) katra locekļa divkāršotu reizinājumu ar visiem pārējiem, t. i., izteiksmes ar divējādiem saskaitāmajiem:

*a*) un



*b*) 2*Ukm* sin (*kωt* + *ψk*) *Unm* sin (*nωt* + *ψn*) un 2*U*0*Ukm* sin (*kωt* + *ψk*).

Šīs izteiksmes integrējot, iegūstam



Tātad nesinusoidāla maiņsprieguma efektīvā vērtība

(10.28)



kur *U*0 — pastāvīgā komponente, bet utt. ir sinusoidālo komponentu efektīvo vērtību kvadrāti. Analoģiski nesinusoidālas strāvas efektīvā vērtība



(10.29)



Spriegumu un strāvu efektīvās vērtības nav atkarīgas no atse­višķo harmonisko sākuma fāzēm.

***10.2. piemērs***. Aprēķināt strāvas *i* = 282 sin *ωt* + 141 sin 3*ωt* + 71 sin (5*ωt* + 300) A efektīvo vērtību.

Atrisinājums.



**10.6. NESINUSOIDĀLAS STRĀVAS JAUDA**

Vidējā jeb aktīvā jauda nesinusoidālas, tāpat kā sinusoidālas strāvas gadījumā ir perioda laikā ķēdē patērētās enerģijas attie­cība pret laiku, kurā tā patērēta, t. i.,

(10.30)



Izsakot nesinusoidālo strāvu un spriegumu momentānās vērtī­bas ar harmonisko komponentu momentānajām vērtībām, iegūstam



Reizinot kvadrātiekavās esošos polinomus, iegūstam divējādus integrāļus:

*a*) divu vienādu frekvenču sinusoīdai vai divu pastāvīgu lielumu reizinājumu integrāļus



*b*) divu dažādu frekvenču sinusoīdu vai pastāvīga un sinusoi­dāla lieluma reizinājumu integrāļus



Tātad

*P = U*0*I*0 + *U*1*I*1 cos *φ*1 + *U*2*I*2 cos *φ*2 + *U*3*I*3 cos *φ*3 + … =

= *P*0 + *P*1 + *P*2 + *P*3 + … , (10.31)

t. i., nesinusoidālas strāvas vidējā jeb aktīvā jauda vienlīdzīga atsevišķo harmonisko vidējo (aktīvo) jaudu summai. Analoģiski sinusoidālām strāvām nesinusoidālu strāvu vidējo jaudu var izteikt ar strāvas un sprieguma efektīvajām vērtībām (*U* un *I*).

Tā kā vispārīgā gadījumā reizinājums *UI* ir lielāks par *P*, tad, lai ar tā palīdzību uzteiktu jaudu, *UI* jāreizina ar kādu koeficientu, kas ir mazāks par vienu un ko pēc analoģijas ar sinusoidālām strāvām sauc par jaudas koeficientu un apzīmē ar cos φ.

Tātad

*P = P*1 + *P*2 + *P*3 + … = *UI* cos *φ.*  (10.32)

Jāievēro, ka šajā izteiksmē cos *φ* nav trigonometriskais kosinuss fāzes nobīdes leņķim starp spriegumu un strāvu. Nesinusoidālas strāvas vai spriegumus nevar attēlot ar rotējošiem vektoriem; strā­vas un sprieguma līknes nav pat līdzīgas; tāpēc nav iespējams lietot fāzes nobīdes jēdzienu tā, kā sinusoidālai strāvai.

Praksē nesinusoidālu spriegumu un strāvu līknes bieži aizstāj ar ekvivalentām sinusoīdām, kam ir tādas pašas efektīvas vērtī­bas; šādā gadījumā iespējams izmantot vektoru diagrammas.

Aizstājot nesinusoidālo sprieguma un strāvu līknes ar sinu­soīdām, tās jānobīda fāzē viena pret otru par tādu leņķi *φ*, lai vidējā jauda, ko aprēķina pēc formulas *Ρ = UI* cos *φ*, būtu vien­līdzīga ķēdes aktīvajai jaudai; citiem vārdiem sakot, nepieciešams, lai ekvivalento sinusoīdu fāzes nobīdes leņķa kosinuss būtu vien­līdzīgs jaudas koeficientam.

***10.3. piemērs***. Aprēķināt sprieguma un strāvas efektīvās vērtības, aktīvo jaudu un jaudas koeficientu 13.1. piemērā aplūkotajai ķēdei.

Atrisinājums.



cos *φ*1 = 0,081; cos *φ*3 = 1; cos *φ*5 = 0,194;

*P*1 = *U*1*I*1 cos *φ*1 = 127∙1,01∙0,081 = 10,39 W;

*P*3 = *U*3*I*3 cos *φ*3 = 42,5∙4,25∙1 = 180,62 W

*P*5 = *U*5*I*5 cos *φ*5 = 28,4∙0,55∙0,194 = 3,03 W

*P =* *P*1 + *P*3 + *P*5 = 10,39 + 180,62 + 3,03 = 194,04 W.



**10.7. PERIODISKO ĻĪKŅU SADALĪŠANA HARMONISKAJĀS**

**KOMPONENTES**

Maiņstrāvai un maiņspriegumu var reģistrēt ar aparātiem, ko sauc par oscilogrāfiem.

Iegūtās līknes pēc tam ar dažādiem paņēmieniem var izvirzīt Furjē rindā (sadalīt harmoniskajās komponentēs). Šīs metodes aplūko matemātikas kursā. Turpmāk apskatīti piemēri dažu elek­trotehnikā biežāk sastopamo līkņu sadalījumam harmoniskajās komponentēs.

1. 10.10. attēlā redzama trapeces formas periodiska līkne. Tai ir slīps posms no *x* = 0 līdz *x* = α un abscisu asij paralēls posms ar konstantu ordinētu *у = A*. Šo līkni var izvirzīt sinusoidālu līkņu rindā:

(10.33)



|  |  |
| --- | --- |
|  | 10.10. att. Trapecveida periodiska līkne. |

Speciālgadījumā, kad , rinda (10.33) nesatur nevienu harmonisko, kuras kārtas skaitlis dalās ar 3:



šāda trapece maz atšķiras no sinusoīdas.

2. Trīsstūra formas līkni (10.11. att.) var izvirzīt šādu sinusoidālu līkņu rindā:

. (10.34)



3. Taisnstūra formas periodisku līkni (10.12. att.) var izvirzīt šādu likņu rindā:

. (10.35)



4. Vienpusīgi taisngrieztas sinusoidālas strāvas līkni (10.13. att.) var izvirzīt šādā rindā:

(10.36)



|  |  |
| --- | --- |
| 10.11. att. Trīsstūrveida periodiska līkne. | 10.12. att. Taisnstūrveida periodiska līkne. |

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

10.13. att. Strāvas līkne un taisngrieža slēguma shēma viena pusperioda taisngriešanas gadījumā

6. Divpusīgi taisngrieztas sinusoidālas strāvas līkni (10.14. att.) var izvirzīt šādā rindā:

(10.37)



|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

10.14. att. Strāvas līknes un taisngrieža slēguma shēma divu pusperiodu taisngriešanas gadījumā.

6. Taisngrieztas trīsfāzu strāvas līkni (10.15. att.) var izvirzīt šādā rindā:

(10.38)



|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

10.15. att. Taisngrieztas trīsfāzu sinusoidālas strāvas līkne un taisngrieža slēguma shēma.

|  |  |
| --- | --- |
| ***10.4. piemērs.*** Avots, kura spriegums mainās atbilstoši trapeces likumam (10.16. att.), baro patērētāju ar tīri aktīvo pretestību *R* = 8 Ω.  Aprēķināt strāvas un sprieguma efektīvo vērtību un patērētāju jaudu. Aprēķināt sprieguma un strāvas augstāko harmonisko procentuālo saturu attiecība pret pamatharmonisko. Izvirzot rindā, aprobežoties ar 7. harmonisko.  Atrisinājums.  Trapeces veida funkciju var izvirzīt šādā rindā: | 10.16. att. Trapecveida periodiska līkne. |



Dotajai trapecei



Tāpēc trešās harmoniskās amplitūda būs vienāda ar nulli un sprieguma rinda saturēs tikai pirmo, piekto un septīto harmonisko:



vai

*u* = (105 sin *ωt* – 4,2 sin 5*ωt* + 2,14 sin 7*ωt*), V.

Patērētāja aktīvā pretestība jebkurai harmoniskajai ir viena un tā pati, tāpēc strāvas rindu var iegūt, izdalot katru sprieguma rindas komponenti ar pretestību *R* = 8 Ω. Tad

*i* = (13,1 sin *ωt* – 0,526 sin 5*ωt* + 0,268 sin 7*ωt*), A.

Sprieguma un strāvas efektīvās vērtības



Patērētāja jauda ir atsevišķo harmonisko jaudu summa



Augstāko harmonisko procentuālais saturs attiecība pret pamatharmonisko:



Strāvas līkne būs līdzīga sprieguma līknei.

***10.5. piemērs***. Atrisināt 10.1. piemēru divos gadījumos, kad aktīvais patērētājs aizstāts ar ideālu reaktīvu patērētāju: 1. *L* = 25,5 mH un 2. *C* = 398 μF. Sprieguma frekvence *f* = 50 Hz.

Atrisinājums.

1. Induktīvo pretestību *k*-tai harmoniskajai nosaka ar formulu *XLk = kωL*, tāpēc, ja *ω* = 314 rad/s, *XL*1 = 1∙314∙25,5∙10–3 = 8 Ω, *XL*5 = 5∙314∙25,5∙10–3 = 40 Ω, *XL*7 = 7∙314∙25,5∙10–3 = 56 Ω.

10.1. piemērā iegūtai sprieguma rindai

*u* = (105 sin 314*t* – 4,2 sin 1570*t* + 2,14 sin 2198*t*), V.

atbilst šāda strāvas rinda

*i* = [13,125 sin (*ωt –* 900*)* – 0,105 sin (5*ωt* – 900) + 0,0382 sin (7*ωt* - 900)], A.

Strāvas efektīvā vērtība



Strāvas augstāko harmonisko procentuālais saturs attiecība pret pamatharmonisko:



Tātad strāvas līkne induktivitātē ir mazāk izkropļota nekā ķēdei pieliktā sprieguma līkne.

2. Kapacitīvo pretestību *k*-tai harmoniskajai nosaka ar formulu tāpēc apskatāmajā gadījumā



Iegūstam šādu momentānās strāvas izteiksmi:

*i* = [13,125 sin (*ωt +* 900*)* – 2,625 sin (5*ωt* + 900) + 1,872 sin (7*ωt* + 900)], A.

Strāvas efektīvā vērtība



Strāvas augstāko harmonisko procentuālais saturs attiecība pret pamatharmonisko:



Tātad kapacitātē strāvas līkne tiek vairāk kropļota salīdzinājumā ar sprieguma līkni.

***10.6. piemērs***. Spole ar aktīvo pretestību *R* = 10 Ω un induktivitāte *L* = 25 mH pieslēgta avotam, kura sprieguma maiņas grafika attēlota 10.17. attēlā. Sprieguma frekvence *f* = 50 Hz.

Aprēķināt sprieguma un strāvas harmoniskās; izmantot tās, uzzīmēt sprieguma un strāvas momentāno vērtību līknes *u*(*t*) un *i*(*t*) un nosacīt ķēdes jaudas koeficientu. Aprobežoties ar sprieguma izvirzījuma trim pirmajiem locekļiem.

Atrisinājums.

Trapeces veida funkciju var izvirzīt šādā rindā:



Dotajai trapecei



|  |  |
| --- | --- |
|  | 10.17. att. Trapecveida periodiska līkne. |

Tāpēc 5. harmoniskās amplitūda būs vienāda ar nulli un sprieguma rinda saturēs tikai pirmo, piekto un septīto harmonisko:

*u* = (59,6 sin *ωt* + 10,7 sin 3*ωt* - 1,97 sin 7*ωt*), V.

10.18. att. *a* uzzīmētas atsevišķo harmonisko un rezultējošā sprieguma līknes. Līknes *u*(*t*) atšķirība no dotās trapeces izskaidrojama ar to, ka izvirzījumā ņemts ierobežotos locekļu skaits.

|  |
| --- |
|  |
|  |

10.18. att. Nesinusoidālas sprieguma un strāvas līknes un harmo­niskās, no kurām tās sastāv.

Lai aprēķinātu strāvu, noteiksim spoles pilnās pretestības atsevišķajām harmoniskajām:



Strāvas harmonisko amplitūdas un efektīvās vērtības



Atsevišķo harmonisko jaudas koeficientu un fāzu nobīdes leņķi:



Strāvas rinda

*i* = [4,01 sin (*ωt –* 47045'*)* + 0,31 sin (3*ωt* – 73010') – 0,025 sin (7*ωt* + 82035')], A.

10.18. att. *b* parādītas atsevišķo harmonisko līknes un rezultējošā strāvas līkne *i*(*t*). Salīdzinot līknes *u*(*t*) un *i*(*t*), redzam, ka induktivitāte nogludina strāvas līkni.

Lai noteiktu jaudas koeficientu aprēķināsim sprieguma un strāvas efektīvās vērtības un ķēdes aktīvo jaudu:



Tad



**10.8. SPRIEGUMU UN STRĀVU REZONANSES NESINUSOIDĀLU STRĀVU ĶĒDĒS**

Rezonanses parādības elektriskajās ķēdēs ar nesinusoidāliem spriegumiem un strāvām ir komplicētākas, jo rezonanses režīmi iespējami ne tikai pirmajai harmoniskajai, bet arī augstākajām harmoniskajām. Pie tam, ja rezonanses režīms iestājas kādai augstākajai harmoniskajai, tad tās spriegums vai strāva var pat pārsniegt pirmās harmoniskās spriegumu vai strāvu tajā pašā ķēdes posmā.

Ķēdē ar virknē slēgtiem *R*, *L* un *C* spriegumu rezo­nanses noteikums *k*-tai harmoniskajai ir

*XLk = XCk* vai (10.39)



t. i., spriegumu rezonanses režīmā atrodas tā harmoniskā (*k*-tā), kurai ķēdes induktīvā un kapacitīvā pretestība ir vienāda, *k*-tās harmoniskās rezonanses strāvas efektīvā vērtība

(10.40)



Atkarībā no aktīvās pretestības *R* skaitliskās vērtības rezo­nanses režīmā *k*-tās harmoniskās strāvas sinusoīda ir vairāk vai mazāk krasi izteikta.

Ķēdē ar paralēli slēgtiem *R*, *L* un *C* (10.19. att.) strāvu re­zonanses režīmā atrodas tā harmoniskā (*k*-tā), kurai ķēdes Induktīvā vadītspēja un kapacitīvā vadītspēja ir vienāda:

*BLk = BCk*. (10.41)

Ķēdes nesazarotajā posmā tad *k*-tās harmoniskās strāva sakrīt fāze ar spriegumu. Paralēlā slēguma pilnā vadītspēja *k*-tai har­moniskajai rezonanses režīma ir vismazākā:

(10.42)



|  |  |
| --- | --- |
|  | 10.19. att. *R*1L un R2C para­lēlais slēgums. |

10.19. attēla paradītas ķēdes aktīva va­dītspēja *Gk = G*1*k +G*2*k*. Ja abu paralēlo zaru aktīvas pretestības *R*1 un *R*2 ir neievēro­jami mazas (*R*1 = 0 un *R*2 = 0, kā to bieži var pieņemt), tad zaru aktīvās vadītspē­jas *G*1*k = G*2*k* =0, un tādēļ rezonanses re­žīma paralēlā slēguma vadītspēja *k*-tai harmoniskajai vienāda ar nulli (*Yk* = 0), citiem vārdiem, paralēli slēgti *L* un *C* re­zonanses režīmā rada bezgalīgi lielu pre­testību *k*-tās harmoniskās strāvai. Tāpēc ķēdes nesazarotā posma strāvai *i* nav *k*-tās harmoniskās.

Ķēdēs ar nesinusoidāliem spriegumiem un strāvām rezonan­ses parādības izmanto, lai dzēstu augstākās harmoniskās ar ne­vēlamam frekvencēm vai izceltu harmoniskās ar vēlamām frek­vencēm.

**10.9. FILTRI**

Ja ķēde satur induktivitātes un kapacitātes, tad tās pretestība strāvas harmoniskajām ar dažādiem kārtas skaitļiem ir atšķirīga. Tāpēc varam izmainīt enerģijas patērētājā strāvas līknes formai, salīdzinot ar ģeneratora sprieguma līknes formu; to izdara, ieslē­dzot starp patērētāju un ģeneratoru speciālas iekārtas — elek­triskos filtrus.

Spoļu un kondensatoru slēguma shēmas filtros ir visai dažā­das atkarībā no filtru uzdevuma.

Ja slodzei *Z* nepieciešama strāva ar krasi izteiktu *k*-to harmo­nisko, tad slodzei virkne pievieno kondensatoru un spoli (ar iespējami mazu aktīvo pretestību *R*), kas noskaņoti rezonansē k-tai harmoniskajai (13.20. att.). Šis visvienkāršākais filtrs — *LC* posms — rada lielāku vai mazāku pretestību visām strāvas har­moniskajam, atskaitot *k*-to harmonisko.

|  |  |
| --- | --- |
|  | 13.20. att. Vienkāršākais elektriskais filtrs. |

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  |  |

10.21. att. Patērētajam paralēli pievienots filtrs.

Ja no nesinusoidālas strāvas jāatdala kāda noteikta harmo­niskā, tad lieto patērētājam *Z* paralēli pieslēgtu filtru, kurš sa­stāv no spoles un kondensatora (kuras aktīvā pretestība ir pēc iespējas niecīga), kas slēgti virkne (10.21. att.). Ja ķēdes strāva *i* satur, piemēram, pirmo un trešo harmonisko, tad strā­vas trešo harmonisko *i*3 gandrīz pilnīgi atdala šai harmoniskajai spriegumu rezonansē noskaņotais zars ar *L* un *C*, un patērētājs *Z* saņems praktiski tikai strāvas pirmo harmonisko *i*1. Filtra pretestība *k*-tai harmoniskajai ir niecīga, salīdzinot ar patērētāja pretestību, un šīs harmoniskās strāva plūst caur zaru ar indukti­vitāti un kapacitāti, bet nevis caur patērētāju.

Ja ķēdei pievienotais spriegums *u* satur augstāko harmonisko, piem., trešo, kura patērētāja strāvas ķēde jāsamazina līdz mini­mumam, tad starp avotu un patērētāju slēdz sprostfi1tru (10.22. att.), kurš sastāv no spoles un kondensatora, kas slēgti paralēli. Ja *LC* kontūrs noskaņots strāvu rezonanse noteiktai har­moniskajai, piem., trešajai, tad tas šo harmonisko *u*3 praktiski ne­laiž cauri, un patērētājs apskatāma gadījuma praktiski saņems tikai sprieguma pirmo harmonisko *u*1; trešā harmoniska *u*3 pastāv starp sprostfiltra spailēm.



|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  |  |

10.22. att. Sprostfiltrs.

Saslēdzot virknē divus LC kontūrus, var atdalīt sprieguma divas augstākās harmoniskas, piem., trešo un piekto.

Apvienojot *LC* virknes un paralēlo slēgumu, iegūst augstvēr­tīgāku sprostfiltru (10.23. att.). Noskaņojot *L*l*C*1 kontūru un *L*2*C*2 zaru rezonansē *k*-tai harmoniskajai, *L*l*C*1 kontūrs šo harmonisko pilnīgi neaiztur, jo *R*1 ≠ 0. Bet, tā kā *L*2*C*2 zara pretestība šai strāvas harmoniskajai ir niecīga, tad patērētājs *k*-to harmonisko nesaņems.

10.24. attēla paradītais filtrs praktiski laiž cauri noteiktu frek­venču joslu, tādēļ to sauc par joslu filtru.

|  |  |
| --- | --- |
| 10.23. att. Sprostfiltrs. | 10.24. att. Joslu filtrs |

10.25. attēlā parādītais filtrs rada ļoti niecīgu pretestību *R* strā­vas nemainīgajai komponentei *I*0, vidēju pretestību — strāvas zemo frekvenču harmoniskajām un lielu pretestību — strāvas augsto frekvenču harmoniskajām, jo, pieaugot strāvas harmonis­kas kārtas skaitlim *k*, spoles induktīvā pretestība palielinās, bet paralēlo zaru kapacitīvās pretestības samazinās. Šādu zem­frekvences filtru slēdz, piemēram, starp maiņstrāvas taisngriezi un līdzstrāvas patērētāju: virknē ieslēgtā spole (vai spoles) aiztur pulsējošas līdzstrāvas mainīgās komponentes (tās noslē­dzas pa paralēli slēgtajiem kondensatoriem), un patērētājs sa­ņem izlīdzinātu līdzstrāvu.

10.26. attēlā parādītais filtrs rada bezgalīgi lielu pretestību strāvas nemainīgajai komponentei *I*0, lielu pretestību — strāvas zemo frekvenču harmoniskajām un mazu pretestību — strāvas augsto frekvenču harmoniskajām. Tādus filtrus sauc par augst­frekvences filtriem.

|  |  |
| --- | --- |
| 10.25. att. Zemfrekvences filtrs. | 10.26. att. Augst­frekvences filtrs. |

**10.10. AUGSTĀKĀS HARMONISKAS TRĪSFĀZU STRĀVAS ĶĒDE**

**10.10.1. Augstāko harmonisku īpašības trīsfāžu ķēdes**.

Simetrisku trīsfāžu ģeneratoru atsevišķās fāzēs inducēto EDS maiņas līknes laikā (laika diagrammas) ir vienādas, bet atpaliek laikā cita no citas par vienu trešdaļu no pamatharmoniskas perioda – Teiktais attiecas arī uz visām harmonikām katrā fāzē.



Tad katras fāzes augstāko harmoniku izteiksmes var uzrakstīt šādi

*eA* = *Ekm* sin (*kωt* + ψ*k*), (10.43)

(10.44)



(10.45)



Šo elektrodzinējspēku (spriegumu) īpašību noskaidrošanai pieņemsim ψ*k* = 0 un noteiksim visu fāžu EDS (spriegumu) harmoniku sākuma fāzes leņķus (pie *t* = 0).

A fāzē pie ψ*k* = 0 jebkuras harmonikas sākuma fāzes leņķis vienāds ar nulli.

Sākuma fāžu leņķus fāzēs B un C dažādām harmonikām nosakām pēc uzrakstītajām izteiksmēm (10.43 – 10.45) un rezultātus sakopojam tabulā.

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Harmonikas kārtas numurs | 1 | 3 | 5 | 7 | 9 |
| B fāze; sākuma fāzes leņķis | 1200 | (3600)  00 | (6000)  2400 | (8400)  1200 | (10800)  00 |
| C fāze; sākuma fāzes leņķis | 2400 | (7200)  00 | (12000)  1200 | (16800)  2400 | (21600)  00 |
| Vektoru diagramma |  |  |  |  |  |
| Fāzu sekošanas secība | tiešā | nulles | apgrieztā | tiešā | nulles |

Uzzīmējot katrai harmonikai fāzu EDS (spriegumu) vektoru diagrammas, redzam, ka elektrodzinējspēki veido tiešās, apgrieztās un nullsecības sistēma, atkarība no harmonikas kārtas skaitļa.

Šeit apkūkotas tikai nepāru harmonikas, jo rotējošu mašīnu inducētie EDS nesatur pārskaitļu harmonikas.

***10.10.2. Zvaigznes slēgums bez neitrālā vada.***

Pieņemsim, ka trīsfāzu ģeneratora tinumos rodas sarežģītas for­mas, simetriski EDS, kas satur pirmo, trešo un piekto harmonisko.

(10.46)



(10.47)



(10.48)



Šo trīs EDS harmoniskās komponentes parādītas 10.27. attēlā. Fāzu EDS efektīvās vērtības:

(10.49)



No 10.27. att. un formulām (10.46), (10.47) un (10.48) re­dzams, ka otrās (B) fāzes EDS nobīdīts attiecībā pret pirmās (A) fāzes EDS par ⅓ *Τ* (pamata sinusoīdas periodu), bet trešās (C) fāzes EDS par ⅔ *T*. Tā kā trešās harmoniskās periods (*T*3) ir 3 rei­zes mazāks par pamata sinusoīdas periodu, t. i., *T*3 = ⅓ *Τ*, tad otrās fāzes trešā harmoniskā attiecībā pret pirmās fāzes trešo harmonisko nobīdīta par veselu periodu (*T*3), bet trešās fāzes trešā harmoniskā attiecībā pret pirmās fāzes trešo harmonisko par diviem periodiem (2*T*3).

|  |  |
| --- | --- |
| 10.27. att. Trīsfāzu EDS sistēmas pirmās, trešās un piektās harmo­niskās. | 10.28. att. Ģeneratora tinuma slēgums zvaigznē. |
| 10.29. att. Trīsstūrī saslēgti trīsfāzu ģene­ratora tinumi. |

Bet nobīde par veselu periodu vai par vairākiem veseliem periodiem nozīmē, ka tās nemaz nav, un tātad atsevišķo tinumu trešās harmoniskās sakrīt fāzē.

Ja EDS līknes saturētu ne tikai trešo harmonisko, bet arī tās daudzkārtņus, t. i., 9., 15., 21. utt. harmonisko, tad arī tām varētu izdarīt analoģiskus secinājumus.

Saslēdzot ģeneratora tinumus zvaigznē (10.28. att.), līnijas spriegumi ir vienlīdzīgi attiecīgo fāzu EDS vai spriegumu starpī­bām (). Tā kā visos ģeneratora tinumos EDS trešās harmoniskās un to daudzkārtņi sakrīt fāzē, tad to starpība ir vienlīdzīga nullei. Tātad līnijas spriegumos nav trešās harmoniskās un tās daudz­kārtņu (9., 15. utt. harmoniskās).



Tātad līnijas sprieguma efektīva vērtība ir

(10.50)



Acīm redzot līnijas un fāzes sprieguma attiecība [formula (10.49)] ir mazāka par 13, t. i.,



Līnijas strāvas nesatur trešo harmoniku un tās daudzkārtņus, jo nullsecības pretestība zvaigznes slēguma bez neitrālā vada ir bezgalīga. Tādēļ

(10.51)



***10.7. piemērs***. Aprēķināt, cik lielus spriegumus rada voltmetrs, kas ieslēgts starp punktiem AB un ΑΧ (10.28. att.) un atrast līnijas un fāzes sprieguma attiecību, ja fāzes EDS vienādojums ir *ef* = 100 sin *ωt* + 40 sin 3*ωt* +10 sin 5*ωt* V.

Atrisinājums.

Fāzes sprieguma efektīvā vērtība



līnijas sprieguma harmoniskās



līnijas sprieguma efektīvā vērtība



līnijas un fāzes sprieguma attiecība



***10.10.3. Zvaigznes slēgums, četrvadu sistēma.***

Trīsfāzu sistēma ar četriem vadiem (10.30. att.), ja fāzu spriegumi ir simetriski un sinusoidāli un slodzes vienādas, strāva nullvadā, ka zināms vienlīdzīga nullei.

|  |
| --- |
|  |

10.30. att. Ģeneratora un patērētāja slēgums zvaigznē.

Ja fāzu spriegumi simetriski (), nesinusoidāli un satur trešās harmoniskās, bet slodzes ir vienādas (*ZA = ZB = ZC*), tad fāzu strāvas ir simetriskas un satur trešās harmoniskās.



Ja fāzu spriegumi satur visas nepāru harmoniskās, tad tās ietilpst arī strāvas sastāva un



Simetriskas slodzes gadījumā tiešās un apgrieztās secības sistēmas strāvu neitrālajā vadā nerada. Tādēļ arī neitrālā vada strāva simetriskas slodzes gadījumā sastāv no trešās harmonikas un tas daudzkārtņiem, pie kam atsevišķo fāzu strāvas summējas un



Spriegumu harmoniskās, kuru kārtas skaitlis nedalās ar 3, nerada strāvu nullvadā.

***10.8. piemērs***. Ģeneratora fāzes spriegums *u* = (310 sin *ωt* + 93 sin 3*ωt*) , V. Slodzes pretestības ZA = ZB = ZC = 20 Ω.

Aprēķināt mērīšanas aparātu rādījumus (10.31. att.).

|  |
| --- |
|  |

10.31. att.

Atrisinājums.



Tātad ampērmetru rādījumi *IA = IB = IC* = 11,5 A.

Fāzes spriegums



Līnijas spriegums



***10.9. piemērs***. Aprēķināt mērīšanas aparātu rādījumos iepriekšēja uzdevuma, ja ampērmetra A0 vietā ieslēgts voltmetrs V0.

Atrisinājums.

Tā kā voltmetra pretestība ir ļoti liela, tad nullvads atslēgts no tīkla, t.i., nullvada nav. Voltmetrs V0 rada potenciālu starpību (spriegumu) starp patērētāja un ģeneratora nullpunktiem 0 un 0'



Līnijas (fāzes) strāvas



Voltmetru V1 un V2 rādījumi neizmainīsies (*U*1 = 229 V, *U*2 = 380 V).

**10.10.4. Trīsstūra slēgums**.

***Nenoslogots ģenerators***. Saslēdzot ģeneratora tinumus trīsstūrī (10.29. att.), summā­rais EDS ir vienlīdzīgs fāzu trešo harmonisko un to daudzkārtņu EDS trīskāršotai summai, t. i.,

*e =* 3*e*3 + 3*e*9 + 3*e*15 + … = 3(*e*3 + *e*9 + *e*15 + …),

jo pārējo harmonisko summa vienlīdzīga nullei.

Summārā EDS efektīvā vērtība



Pat tukšgaitā noslēgtajā tinumu kontūrā rodas strāva

*i =* *i*3 + *i*9 + *i*15 + … .

Strāvas harmonisko efektīvās vērtības ir

utt.,



kur *Z*3, *Z*9, *Z*15, ... — ģeneratora katras fāzes pilnā pretestība atbilsto­šajai harmoniskajai.

Strāvas efektīva vērtība



Sprieguma kritums, kas radies no strāvas atsevišķajām harmo­niskajām, ikvienā fāzē ir vienlīdzīgs šīs harmoniskās elektrodzinējspēkam:

*I*3*Z*3 = *E*3; *I*9*Z*9 = *E*9; *I*15*Z*15 = *E*15.

Tātad EDS trešās harmoniskās un to daudzkārtņi līdzsvarojas pašā ģeneratorā un līnijas spriegumi, tāpat kā zvaigznes slēgumā, ne­satur šīs harmoniskās.

Līnijas sprieguma efektīvā vērtība

(10.52)



kur — fāzu spriegumi noslēgtā trīsstūrī; šie spriegumi nav vienlīdzīgi fāzu EDS *ЕA*, *ЕB*, *ЕC*.



***Slogots ģenerators simetriskā režīmā***. Pieņemsim, ka trīsstūrī saslēgtam ģeneratoram pievienota ārējā ķēde (10.32. att.). Tā kā fāzu spriegumi nesatur trešās harmo­niskās un to daudzkārtņus nullsecības sistēmu veidojošas harmoniskās (3, 9, …) un

(10.53)



Tad arī līnijas strāvās nesatur šīs harmo­niskās un to efektīvā vērtība vienādi slogotu fāzu gadījumā

(10.54)



|  |
| --- |
| 10.32. att. Ģeneratora un patērētajā slēgums trīsstūrī. |

Slogota ģeneratora fāzu strāvas ģeneratora tinumos satur visas harmoniskās un to efektīvā vērtība

(10.55)



Salīdzinot pēdējās izteiksmes (10.55) un (10.54) redzam, ka atšķirībā no sinusoidāla režīma simetriskā slodzes gadījumā trīsfāzu ģeneratorā



***10.10. piemērs***. Trīsfāzu ģeneratora tinumi saslēgti trīsstūrī; tas baro ener­ģijas patērētāju, kura fāzu pretestības ir vienādas. Ģeneratora fāzu strāvas satur pirmo, trešo un piekto harmonisko: *I*1 = 40 A; *I*3 = 20 A; *I*5 = 20 A. Aprēķināt fāzes un līnijas strāvu efektīvās vērtības un līnijas un fāzes strāvu attiecību.

Fāzes strāvas efektīvā vērtība



Līnijas strāvas efektīvā vērtība



Līnijas un fāzes strāvu attiecība



Ja ģeneratora tinumus savieno zvaigznē (10.33. att.), bet pa­tērētājus — trīsstūrī un līniju spriegumos nav trešās harmoniskās un tās daudzkārtņu, minētās harmoniskās nav arī līniju strāvās. Ja ģeneratoru un enerģijas patērētāju savieno zvaigznē un nullvada nav, tad neitrālas nobīde, t. i., nobīde starp ģeneratora un patērētāja neitrālajiem punktiem, nav vienlīdzīga nullei pat tad, ja fāzu spriegumi ir simetriski un patērētāja fāzu pretestības vienādas.

|  |
| --- |
| 10.33. att. Zvaigznē saslēgts ģenerators, kas baro trīsstūrī saslēgtu patērētāju. |

Ģeneratora fāzu spriegumu ikviena harmoniskā ir par cēloni atbilstošai neitrāles nobīdes harmoniskajai. Neitrāles nobīdes pirmā harmoniskā (paragrāfs 9.6.)



jo pamata harmoniskajai



Neitrāles nobīdes trešā harmoniskā

(10.56)



jo trešās harmoniskās sakrīt fāzē:



Analoģiski arī citas fāzu spriegumu harmoniskās, kuru kārtas skaitlis nedalās ar 3, nerada neitrāles nobīdi, bet fāzu spriegumu harmoniskās, kuru kārtas skaitlis dalās ar 3, rada neitrāles nobīdes komponentes, kas vienlīdzīgas atbilstošajām fāzu spriegumu harmoniskajām. Tātad neitrāles nobīde ir

(10.57)



Fāzu (un tām vienlīdzīgās līnijas) strāvas šajā gadījumā ne­satur harmoniskās, kuru kārtas skaitlis dalās ar 3. Piemēram, strā­vas harmoniskās Α fāzē:



utt.



Strāvas efektīvā vērtība



Trīsfāzu sistēmā ar četriem vadiem (10.34. att.), ja fāzu sprie­gumi ir simetriski un sinusoidāli un slodzes vienādas, strāva nullvadā, kā zināms, vienlīdzīga nullei.

|  |
| --- |
| 10.34. att. Ģeneratora un patērētāja slēgums zvaigznē. |

Ja fāzu spriegumi ir simetriski, nesinusoidāli un satur trešās harmoniskās, bet slodzes ir vienādas, tad fāzu strāvas ir simetris­kas un satur trešās harmoniskās. Spriegumu harmoniskās, kuru kārtas skaitlis nedalās ar 3, nerada strāvu nullvadā; spriegumu, un tātad arī strāvu, trešās harmoniskās ir ar vienādām amplitū­dām un fāzēm; tāpēc nullvada strāvas momentānā vērtība ir vien­līdzīga ar 3 reizinātai fāzu strāvu trešajai harmoniskajai: *i*0 = 3*i*3.

Ja fāzu spriegumu satur ne tikai trešo harmonisko, bet arī tās daudzkārtņus, t. i., 9., 15., 21. utt. harmonisko, var secināt analoģiski. Tātad strāvas efektīvā vērtība neitrālajā vadā

(10.58)



**10.11. STRĀVA, SPRIEGUMS UN MAGNĒTISKĀ PLŪSMA ĶĒDE AR**

**TĒRAUDU**

Praksē bieži sastopamas elektriskās ķēdes, kas satur spoles ar tērauda serdēm: reaktīvās spoles, transformatori, elektriskās mašīnas.

Spolē ar tērauda serdi magnētiskā plūsma daļēji vai pilnīgi noslēdzas tēraudā (10.35. att.).

Maiņstrāvas gadījumā spolē, kurai ir serde no magnētiski mīksta materiāla, magnetizēšana un atmagnetizēšana norit pēc viena un tā paša likuma, t. i., histerēzes cikla augšupejošie un lejup­ejošie posmi gandrīz sakrīt (10.36. att.).

|  |  |
| --- | --- |
| 10.35. att. Spole ar noslēgtu tērauda serdi. | 10.36. att. Tērauda magnetizēšanas līkne,  neievērojot histerēzi. |

Ja plūsmas un strāvas maksimālās vērtības *Φm* un *Imax,* kas sasniegtas pārmagnetizēšanas ciklā, atrodas magnetizēšanas līknes lineārā posma robežās, ķēdes aprēķins neatšķiras no tā, kas apskatīts iepriekšējās nodaļās.

Bieži maksimālā magnētiskā plūsma un maksimālā magnētiskā indukcija serdē sasniedz vērtības, kas atrodas magnetizēšanas līknes izliekumā vai aiz tā. Šajā gadījumā sakarība starp mag­nētisko plūsmu un strāvu ir nelineāra, un tātad ķēdes induktivitāte ir atkarīga no strāvas.

Ķēdes aprēķins kļūst sarežģīts, jo nevar izmantot formulas, kas iegūtas, pieņemot, ka ķēdes induktivitāte ir konstanta. Acīm redzot nelineārā ķēdē ar sinusoidālu strāvu magnētiskā plūsma ir nesinusoidāla un otrādi, ja magnētiskā plūsma ir sinusoidāla, tad magnetizējošā strāva ir nesinusoidāla.

**10.12. MAGNETIZĒJOŠĀS STRĀVAS LĪKNES KONSTRUĒŠANA**

Vispirms aplūkosim magnetizējošās strāvas līknes konstruēšanu, pieņemot, ka spolei pieslēgts sinusoidāls spriegums un ka enerģi­jas zudumi tinumā un serdē vienlīdzīgi, nullei.

Ja spaiļu spriegums spolei ar tērauda serdi ir

(10.59)



magnētiskā plūsma arī ir sinusoidāla.

Tiešām, ja magnētiskā plūsma mainās pēc likuma

*Φ = Φm* sin *ωt*, (10.60)

tad pašindukcijas EDS

(10.61)



kur *Em = wωΦm*, bet pievadītais spriegums

(10.62)



Pēc līknes *Φ*(*t*) = *Φm* sin *ωt* un sakarības *Φ*(*i*), kas ir līdzīga magnetizēšanas līknei *B*(*H*), var grafiski konstruēt līkni magneti­zējošai strāvai *i*(*t*) spoles tinumā (10.37. att.).

|  |
| --- |
|  |

10.37. att. Strāvas un magnētiskās plūsmas grafiki.

Kaut kādam momentam 1 no līknes *Φ*(*t*) atrodam magnētiskās plūsmas vērtību (ordināta 1-2); iegūstot to pašu magnētiskās plūsmas vērtību uz magnetizēšanas līknes (ordināta 3-4), no­sakām atbilstošās strāvas vērtību (abscisa 0-3).

Atliekam šo strāvas vērtību uz augšu no punkta 1, ja strāvas vērtība pozitīva (vai uz leju, ja tā ir negatīva) un iegūstam strā­vas līknes *i*(*t*) ordinātai (1-5). Tādā veidā konstruējot vairākus punktus dažādiem momentiem un savienojot tos nepārtrauktā līknē, iegūstam meklējamo strāvas līkni. Strāvas līkne ir nesinusoidāla, simetriska attiecībā pret abscisu asi. No 10.37. att. izriet, ka strāva un magnētiskā plūsma vienlaicīgi sasniedz nulli un maksimālās vērtības. Salīdzinot strāvas līkni ar līkni, kas attēlota 10.2. attēlā, redzam, ka strāvas līknе satur krasi izteiktu trešo harmo­nisko, bet, ja tērauda serde ir stipri piesātināta, tā satur arī piekto un septīto harmonisko.

**10.13. JAUDA**

Ja tinumā un tērauda serdē nav enerģijas zudumu, tad magne­tizējot patērētā enerģija ir vienlīdzīga tai enerģijai, kura atmagnetizēšanas laikā atgriežas tīklā, bet ķēdes aktīvā jauda vienlīdzīga nullei.

Tiešām, saskaņā ar formulu (10.31) *P = U*1*I*1cos *φ*1 + *U*3*I*3 cos *φ*3, bet spriegums ir sinusoidāls; tāpēc *U*3 = 0 un, kā izriet no 10.37. un 10.2. attēla, *i = I*1*m* sin *ωt* – *I*3*m* sin 3*ωt*. Fāzu nobīde *φ* starp spriegumu (10.59) un strāvas pirmo harmonisko vienlīdzīga un *P = U*1*I*1cos 900 = 0.



Sprieguma, strāvas un jaudas *p = ui* momentāno vērtību līknes attēlotas 10.38. attēlā.

|  |
| --- |
|  |

10.38. att. Strāvas, sprieguma un jaudas grafiki.

**11. NODAĻA**

**PĀREJAS PROCESS LINEĀRĀS ĶĒDĒS**

**11.1. PĀREJAS PROCESI UN KOMUTĀCIJAS LIKUMI**

Ja elektriskās ķēdes zaru strāvas un spriegumi nemainās vai mainās periodiski pēc vienas un tās pašas likumsakarības, tad tādu elektriskas ķēdes režīmu sauc par stacionāru darba režīmu.

Ja elektrisko ķēdi vai ķēdes atsevišķus zarus pievieno sprie­gumam vai atvieno no sprieguma, vai maina ķēdes parametrus r, L vai C, tad šo pasākumu jeb, kā parasti saka, ķēdes ko­mutācijas rezultātā mainās ķēdes elektriskie un magnētiskie lielumi, t. i., ķēde pāriet no viena stacionāra režīma cita.

Elektriskās ķēdes pāreju no viena stacionāra režīma citā sta­cionārā režīmā sauc par *pārejas procesu* (režīmu), bet ar to saistītos spriegumus un strāvas ķēdes atsevišķos zaros — par pārejas spriegumiem un pārejas strāvām.

Tādējādi pārejas procesa cēlonis ir ķēdes komutācija, pie tam pieņem, ka tā noris momentāni.

Pārejas procesi elektriskajās ķēdēs parasti noris ļoti ātri, un to ilgums bieži vien ir desmitdaļas, simtdaļas, pat miljondaļas sekundes; samērā reti pārejas procesi ilgst vairākas sekundes.

Komutācija elektriskajās ķēdēs izraisa pārejas procesus tādēļ, ka magnētiskā un elektriskā lauka izmaiņas — enerģijas uzkrā­šana vai atdošana ķēdei — nevar notikt momentāni, bet tikai no­teiktā, kaut arī īsā laika sprīdī.

Tiešām, lai ķēdes zara ar induktivitāti L magnētiskajā laukā uzkrātos enerģijas daudzums tad strāvai šajā zarā jāpieaug no nulles līdz *I*, bet šī izmaiņa nevar notikt lēcienveidā. Ja strāva mainītos lēcienveidā, t. i., momentāni, tad strāvas iz­maiņas ātrums būtu bezgalīgi liels, tādēļ zarā pašindukcijas elektrodzinējspēks arī būtu bezgalīgi liels. Bet pēdējā pār­varēšanai būtu nepieciešams bezgalīgi liels spriegums uz šī zara galiem, kas nav iespējams, jo avota spriegumam ir kāda galīga vērtība.



Lai kondensatora (ar kapacitāti C) elektriskajā laukā uzkrā­tos enerģijas daudzums tad kondensatoram jāpievada lādiņš *Q = CU*. Bet tādu lādiņu kondensatoram momentāni varētu pievadīt tikai bezgalīgi liela strāva, kas nav iegūstama ar galī­gas vērtības spriegumu.



No šiem apsvērumiem izriet, ka ne tikai magnētisko un elek­trisko lauku rašanās un izzušana, bet arī jebkura to izmaiņa ne­var norisināties momentāni, lēcienveidā, bet, sakot ar komutāci­jas momentu, ķēdes zaru strāvas un spriegumi mainās pakāpe­niski līdz savām jaunajām stacionārajām vērtībām.

Šīs sakarības ir ietvertas divos *komutācijas likumos*, kurus izmanto pārejas procesu aprēķinos:

1. Jebkurā ķēdes zarā ar induktivitāti komutācijas momentā strāva saglabā savu pirmskomutācijas vērtību, un tālāka strāvas izmaiņa sākas tieši ar šo vērtību.

2. Jebkurā ķēdes zarā ar kapacitāti komutācijas momentā spriegums uz kapacitāti saglabā savu pirmskomutācijas vērtību, un tālākā sprieguma izmaiņa sākas tieši ar šo vērtību.

Katrai elektriskajai ķēdei jebkuram laika momentam var uz­rakstīt otrā Kirhofa likuma izteiksmi spriegumu un strāvu mo­mentānajām vērtībām.

Tā, piem., ja ķēdi ar pretestību *R* un induktivitāti *L*, t. i., spoli (11.1. att.), pievieno līdzspriegumam *U*, tad pārejas procesa laikā ķēdei pastāv sakarība *U + eL = ir* vai

(11.1)



Komutācijas procesos var pieņemt, ka katrs pārejas process sastāv no diviem atsevišķiem, vienlaicīgi notiekošiem procesiem — uzspiestā jeb stacionārā, kas iestājas momentāni, t. i., vienlaicīgi ar komu­tāciju, un brīvā jeb pārejošā, kas pastāv tikai pārejas procesa laikā.

Tātad pārejas strāvu *i* un pārejas spriegumu *u* var uzskatīt par šo lielumu stacionārās un brīvās komponentes summu:

*i = ist + ibr* un *u = ust + ubr*. (11.2)

Protams, fizikāli pastāv tikai pārejas strāva *i* un pārejas sprie­gums *u*, — šos lielumus var mērīt, iegūt to oscilogrammas, bet to sadalīšana stacionārajā un brīvajā komponentē atvieglo pār­ejas procesu analīzi un aprēķināšanu.

**11.2. ĶĒDES AR PRETESTĪBU *R* UN INDUKTIVITĀTI *L* (SPOLES)**

**PIESLĒGŠANA LĪDZSPRIEGUMAM**

Ķēdes induktivitāte ievērojami ietekmē pārejas procesu norisi, jo, ķēdi pieslēdzot līdzspriegumam, pārtraucot vai saslēdzot īsi, ķēdē inducētais pašindukcijas EDS pretojas ķēdes strāvās izmai­ņai, turklāt jo izteiktāks, jo lielāka ir *L* skait­liskā vērtība.

Ķēdi ar pretestību *R* un induktivitāti *L* (īsāk — *RL* ķēdi) pieslēdzot līdzspriegumam *U* (11.1. att.), komutācijas momentā (*t* = 0) saskaņā ar pirmo komutācijas likumu ķēdes strāva *i*(0) ir vienāda ar nulli, t. i., *i*(0) = 0, jo pirms komutācijas ķēdē neplūda strāva.

Bet saskaņā ar izteiksmi *i = ist + ibr* komu­tācijas momentā

*i*(0) = *ist*(0) + *ibr*(0) = 0 un *ibr*(0) = — *ist*(0).

Ķēdes uzspiesto jeb stacionāro strāvu *I* nosaka Oma likums:



Bet, tā kā



tad, brīvā strāva komutācijas momentā (*t* = 0)

(a)



|  |  |
| --- | --- |
|  | 11.1. att. Ķēdes ar *R* un *L* pieslēgšana  līdzspriegumam. |

11.1. attēlā parādītajā ķēdē pārejas procesā pārejas strāvu *i* izraisa ķēdei pievienotā sprieguma U un ķēdes pašindukcijas EDS kopējā darbība:



*U + eL = ir* vai



Šo lineāro diferenciālvienādojumu (bez labās puses) uzraksta brīvajai strāvai *ibr*:



Tad brīvo strāvu pārejās procesa izsaka pēdējā diferenciāl­vienādojumā vispārīgā atrisinājuma izteiksme:



kur *A* — integrēšanas konstante; *e* — naturālo logaritmu bāze.

Lielumu , ko mēra sekundēs



sauc par *RL* ķēdes laika konstanti un apzīmē ar *τ*:

(11.3)



Tātad pārejas procesā brīvā strāva

(11.4)



un ķēdes pārejas strāva



Integrēšanas konstantes Α aprēķināšanā izmanto sākuma ap­stākļus: no izteiksmes (11.4) dabū, ka komutācijas momentā (*t* = 0) *ibr*(0) = *A*. Bet saskaņā ar izteiksmi (a) un tādēļ integrēšanas konstante



Tad pārejās strāva

(11.5)



t. i., ķēdes strāva *i* pārejas pro­cesā pieaug pēc eksponenciālas likumsakarības no vērtības *i* = 0 līdz vērtībai (11.2. att.).



Izteiksme (11.5) rāda, ka pārejas strāvas *i* pieaugšanas straujums ir atkarīgs no τ resp. no ķēdes induktivitātes *L* un pretestības *R* attiecības: *jo lielāks L un jo mazāks R, jo lēnāk mainās strāva i pārejas procesā.* Tātad laika konstante τ raksturo *RL* ķēdes elektromagnētisko inerci.

Saskaņā ar izteiksmi (11.4) *brīvā strāva samazinās pēc eksponenciālas likumsakarības* (11.2. att.):



Pārejas strāvas *i* vērtības dažādos laika momentos var aprē­ķināt pēc izteiksmes (11.5). 11.1. tabulā dotas izlādes strāvas vērtības, bet 11.2. attēlā – grafiks *i(t).*

11.1. tabula

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| *t* | 0 | τ | 2τ | 3τ | 4τ | 5τ | ∞ |
| *i* | 0 | 0,632*I* | 0,865*I* | 0,95*I* | 0,982*I* | 0,993*I* | *I* |

|  |  |
| --- | --- |
|  | 11.2. att. Strāvas *RL* ķēdē, to pieslē­dzot  līdzspriegumam. |

Redzam, ka *laika konstante τ ir laika sprīdis, kurā pārejas strāva i sasniedz* 63,2% *no stacionārās strāvas I vērtības.*

*Teorētiski* pārejas strāva *i* sasniedz stacionārās strāvas *I* vērtību bezgalīgi ilgā laikā (*t* = ∞). Bet *praktiski* var pieņemt, ka pārejas strāva sasniedz vērtību *I* laika sprīdī *t* ≈ 4τ (kļūda nepārsniedz 2%).

Tātad *pārejas process ir jo ilgāks, jo lielāka ķēdes laika kon­stante τ.*

Ķēdēm bez koncentrētām induktivitātēm (*L* ≈ 0) laika kon­stante τ ir mikrosekundes daļas, tādēļ pārejas procesi tādās ķē­dēs noris *ļoti ātri,* praktiski — *momentāni.*

Laika konstanti τ var noteikt arī grafiski, ja strāvas *i* līknei tās sākuma punktā 0 velk pieskari (11.2. att.) līdz tās krustpun­ktam ar stacionārās strāvas *I* taisni. Pierādāms, ka *KN = τ.*

Iztirzāto pārejas procesu raksturo no avota saņemtās enerģi­jas uzkrāšanās spoles *magnētiskajā laukā.*

**11.3. LĪDZSTRĀVAS ĶĒDES AR INDUKTIVITĀTI L PĀRTRAUKŠANA**

Pārtraucot līdzstrāvas ķēdi, kurai ievērojama induktivitāte, ķēdē inducējas liels pašindukcijas EDS, kas var daudzkārt pār­sniegt tīkla spriegumu *U*: jo lielāka ķēdes (spoles) induktivitāte *L* un strāva *I* un jo īsākā laika sprīdi ķēdes strāva *I* samazinās līdz nullei, jo lielāks ir pašindukcijas EDS, ko parasti tad (attie­cībā pret tīkla spriegumu *U*) sauc par pārspriegumu.

Tādēļ slēdža atslēgšanas momentā starp tā kontaktiem ir liels spriegums, kas jonizē kontaktu starptelpu. Tā rezultātā starp kontaktiem rodas elektriskais loks, kas kontaktus stipri apdedzina (kausē). Bet darba (saslēgtā) stāvoklī kontakti ar apdegušām kontaktvirsmām nepieļaujami karst. Tādēļ līdzstrāvas ķēžu slēg­šanai izmanto slēdžus (kontaktorus) ar speciāli izveidotām loka dzēšanas ierīcēm.

Bez tam pārspriegums, kas daudzas reizes pārsniedz tīkla spriegumu *U*, ir bīstams apkalpes personālam un var caursist vadu izolāciju. Tādēļ ķēdes pārtraukšanas izraisītā pašindukcijas EDS vērtību bieži vien samazina ar izlādēšanās pretes­tību *Rizl*, kura pieslēgta paralēli ķēdei ar *L* (11.3. att.). Izlādē­šanās pretestība *Rizl* samazina ķēdes strāvas izmaiņas ātrumu , tātad samazina pašindukcijas EDS .



Izmanto arī shēmu, kurā ķēdes darba laikā pretestība *Rizl* at­slēgta un tikai pirms slēdža S atslēgšanas tā automātiski tiek pieslēgta paralēli ķēdei ar *L* (spolei).

Atslēdzot slēdzi *S* (11.3. att.), spoles (*RL*) magnētiskajā laukā uzkrātā enerģija uztur izlādēšanās (*R-L-Rizl*) kontūrā pirms komu­tācijas virziena izlādēšanās strāvu *i*, kura pārejas pro­cesā pakāpeniski samazinās līdz nullei, t. i., pārejas procesā spole darbojas kā elektriskās enerģijas avots, kura spriegums ir vie­nāds ar spoles pašindukcijas EDS.

Tā kā, sākot ar komutācijas momentu, izlādēšanās kontūrs ir atslēgts no avota (*U* = 0), tad pārejas procesā

*ist* = 0 un *i = ibr*.

Otrā Kirhofa likuma izteiksme izlādēšanās kontūrām, kurā plūst izlādēšanās strāva *i*, ir šāda:

*eL = iR + iRizl*. (11.6)

Brīvo strāvu *ibr* pārejas procesā izsaka saskaņā ar izteiksmi (11.6) brīvajai strāvai uzrakstīta lineārā diferenciālvienādojuma



vispārīgā atrisinājuma izteiksme



|  |  |
| --- | --- |
| 11.3. att. Līdzstrāvas ķēde ar spoli *RL* un ar  izlādēšanās pre­testību *Rizl*. | 11.4. att. Strāvas un sprieguma līknes, pārtraucot līdzstrāvas ķēdi ar *L* (ieslēgta *Rizl*) |

kur

(11.7)



ir izlādēšanās kontūra laika konstante.

Pirms slēdža *S* atslēgšanas spolē plūst uzspiestā jeb stacio­nārā strāva



Komutācijas momentā (*t* = 0) saskaņā ar pirmo komutācijas likumu



un izlādēšanās strāva

(11.8)



Tādējādi pēc ķēdes atslēgšanas strāva izlādēšanās kontūrā samazinās pēc eksponenciālas likumsakarības, pie tam, jo lielāka spoles induktivitāte *L*, jo lēnāk samazinās izlādēšanās strāva *i* (11.4. att.).

Pārejās spriegums *u*12 starp ķēdes spailēm 1—2

(11.9)



Tātad komutācijas momentā (*t* = 0) spriegums *u*l2 uz ķēdes spailēm 1—2 momentāni izmainās no pirmskomutācijas vērtības *U* līdz vērtībai un pēc tam samazinās līdz nullei pēc eksponenciālas likumsakarības (11.4. att.).



Spoles magnētiskajā laukā uzkrātā enerģija šajā pārejas procesā pārveidojas elektriskajā enerģijā, kura kontūra pretestības *Rizl* un *R* pārvēršas siltumā.



**11.4. LĪDZSTRĀVAS ĶĒDES POSMA AR PRETESTĪBU R UN INDUKTIVITĀTI L**

**SASLĒGŠANA ĪSI**

Pieņemsim, ka 11.5. attēlā parādītā ķēde ar pretestību *R* un induktivitāti *L*, t. i., ķēde ar spoli pievienota līdzspriegumam *U*.

Ja spoli ar slēdzi *S* saslēdz īsi (11.5. att.), tad pārejās strāva *i* spolē pakāpeniski samazinās līdz nullei; spoles magnētiskajā laukā uzkrātā enerģija spoles pretestībā *R* pārvēršas siltumā.

Līdz komutācijai spoles stacionāra jeb uzspiesta strāva



Ieslēdzot slēdzi *S*, sprieguma kritums šajā zarā ar slēdzi ir vienāds ar nulli, tātad spole ir atslēgta no sprieguma *U* (*U* = 0).

|  |  |
| --- | --- |
| 11.5. att. Līdzstrāvas ķēde ar īsi saslēdzamu spoli. | 11.6. att. Pārejas strāva īsi saslēgta spolē. |

Tādēļ pārejās procesa spoles stacionāra strāva *ist* = 0 un spoles pārejas strāva *i = ibr*·

Pēc komutācijas ķēdes strāvu *I* ierobežo pretestība *R*0. Saskaņā ar otro Kirhofa likumu īsi slēgtajam *RL* kontūrām

*eL = iR*. (11.10)

Tātad lineārais diferenciālvienādojums brīvajai strāvai ir šāds:



tā vispārīgā atrisinājuma izteiksme izsaka spoles brīvo strāvu:



kur ir īsi slēgtā *RL* kontūra laika konstante.



Komutācijas momentā (*t* = 0) saskaņā ar pirmo komutācijas likumu



un pārejas strāva spolē (11.6. att.)

(11.11)



Spoles pašindukcijas EDS

(11.12)



komutācijas momentā uztur spoles strāvu sākotnējā līmenī.

***11.1. piemērs.*** Ķēdei (11.7. att.) dots *U* = 60 V, *R = RP =* 10 Ω, *L* = 200 mH. Laika momentā *t* =0 notiek komutācija (noslēdz slēdzi stāvoklī 1) un sākas pārejas process.

Noteikt strāvas *i =f(t)* un pašindukcijas EDS *eL = f(t)* izmaiņas laikā (no slēdža noslēgšanas momenta) un konstruēt šo atkarību grafiku, kā arī aprēķināt magnētiska lauka enerģiju *Wm* pie *t = 2τ.*

Atrisinājums

1. *Strāvas stacionārā un brīva komponente*. Šajā gadījumā stacionāra strāva *iSt* ķēdē (11.7. att.) ir tad, kad slēdzis noslēgts (stāvoklis 1), t.i., procesam, bet pārejas procesa laikā, t.i., no slēdža noslēgšanas momenta (ja *t* = 0), ir pārejas strāva *i*, kuru, kā tālāk ir parādīts, var uzskatīt par jau zināmās stacionārās strāvas *iSt*un brīvās strāvas *ibr* komponenšu summu

*i = iSt + ibr.* (11.13)

|  |  |
| --- | --- |
| 11.7. att. | Lai iegūtu *ibr*, sastādām 11.7. attēla ķēdei ar noslēgtu slēdzi vienādojumu pēc otrā Kirhofa likuma:    no kurienes strāva  (11.14)  kur pārejas strāvas brīvā komponente *ibr = eL/R.* |

*Tātad brīvā strāva ibr pastāv spoles magnētiskā lauka indukcijas EDS rašanās dēļ.* Acīmredzot beidzoties pārejas procesam, kad ķēdē iestājas stacionāra strāva *iS* = 6 A, spoles magnētiskais lauks arī ir pastāvīgs, turklāt indukcijas EDS *eL =* 0 un attiecīgi *ibr* = 0.

*Brīvā strāva ibr ir pārejas strāvas i daļa un tā eksistē tikai pārejas procesā.*

Brīvā strāva



jo *dist/dt* = 0.

Iegūtajam diferenciālvienādojumam

(11.15)



ir atrisinājums

(11.16)



kur *A* - integrēšanas konstante (aprēķināta tālāk), *e* - naturālo logaritmu bāze (*e =* 2,71).

Atrisinājumu (11.16) viegli pārbaudīt, ievietojot - vienādojumā (11.15).

Jāatzīmē, ka brīvās strāvas noteikšanai dažādos pārejas procesa pētīšanas uzdevumus nav nepieciešams katru reizi sastādīt un atrisināt diferenciālvienādojumu, bet uzreiz var izmantot galarezultātu - izteiksmi (11.16).

*Strāvas noteikšana.* Ievietojot vienādojuma (11.14) *ibr* izteiksmi (11.16), iegūstam atrisinājumu pārejas strāvai

(11.17)



Izmantojam komutācijas likumu konstantes *A* noteikšanai. Pirmajā momentā pēc, slēdža noslēgšanas (*t*  = 0) pēc formulas (11.17) nosakāmā strāva

(11.18)



Tāpēc, ievietojot izteiksmē (11.18) strāvas *i*(0) = 0 vērtību iegūstam

0 = 6 + *A*, jeb *A* = ‒ *I* = ‒ 6.

Ievietojot iegūto *A* vērtību izteiksme (11.17) un ņemot vērā, ka laika konstante *s,* iegūstam



Pieņemot vairākus laika *t* momentus (*t* = 0, *t = τ, t =* 2*τ, t =* 3*τ, t =* 4τ, *t =* 5*τ)* un izmantojot eksponenciālo funkciju tabulu, aprēķinām ķēdes strāvas vērtības



un konstruējam tās grafiku (11.8. att.).

|  |  |
| --- | --- |
| 11.8. att. | 11.9. att. |

*Pašindukcijas EDS noteikšana.* EDS uz induktivitātes nosaka pēc formulas



Mūsu gadījumā



Aprēķinām pašindukcijas EDS *eL* laika momentiem *t* = 0, *t* = τ*, t = 2τ, t = Зτ, t = 4τ, t = 5τ.*



un konstruējam tās grafiku (11.9. att.).

***11.2. piemērs.*** Ķēdes RL (11.7. att.) atslēgšana no sprieguma. Ķēdes darba laika pretestība *RP* atslēgta un tikai pirms slēdža atslēgšanas tā automātiski tiek pieslēgta ķēdei ar *L* (slēdža stāvoklis 2). Pārtraucot līdzstrāvas ķēdi, kurai ievērojama induktivitāte, ķēde inducējas liels pašindukcijas EDS, kas var daudzkārt pārsniegt tīkla spriegumu *U*. Tādēļ ķēdes pārtraukšanas izraisītā pašindukcijas EDS vērtību bieži samazina ar izlādēšanās pretestību *RP*, kas pieslēgta paralēli ķēdei ar *L*.

Otrā Kirhofa izteiksme izlādēšanās kontūram (*R-L-RP*), kurā plūst izlādēšanas strāva *i*, ir

*eL = iR +iRP.*

Tad lineārais diferenciālvienādojums kontūra brīvajai strāvai *ibr = i* :



un tā vispārīgā atrisinājuma izteiksme



kur



ir izlādēšanas kontūra laika konstante.

Pirms slēdža pārslēgšanas posmā *RL* plūst stacionārā strāva

A



Ja *t* = 0, tad saskaņā ar pirmo komutācijas likumu

A



un izlādēšanās strāva

.



11.2. tabulā dotas izlādes strāvas vērtības, bet 11.10. attēlā – grafiks *i(t).*

11.2. tabula

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| *t*, s | 0 | τ | 2 τ | 3 τ | 4 τ | 5 τ |
| *i*, A | 6 | 2,2 | 0,81 | 0,294 | 0,108 | 0,012 |

*Pašindukcijas EDS noteikšana.* EDS uz induktivitātes nosaka pēc formulas



Mūsu gadījumā

V.



Aprēķinām pašindukcijas EDS *eL* laika momentiem *t* = 0, *t* = τ*, t = 2τ, t = Зτ, t = 4τ, t = 5τ.*

11.3. tabulā dotas pašindukcijas EDS *eL* vērtības, bet 11.11. attēlā – grafiks *eL(t).*

11.3. tabula

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| *t*, s | 0 | τ | 2 τ | 3 τ | 4 τ | 5 τ |
| *i*, A | 60 | 22,02 | 8,1 | 2,94 | 1,08 | 0,42 |

|  |  |
| --- | --- |
| 11.10. att. | 11.11. att. |

3. *Elektriskās enerģijas aprēķins*. Pārejas procesā, enerģijas avots atdod enerģiju *WAV* = =*E*2*L* = *U*2*L* = 502·200·10-3 = 5·102 = 500 J. Puse no šīs enerģijas *Wm = LU*2/2 = 250 J uzkrājas spoles magnētiskajā laukā. Enerģija *Wm* tiek patērēta, pēc spoles atslēgšanas siltuma veidā.

**11.5. ĶĒDES AR PRETESTĪBU *R* UN KAPACITĀTI *C* PIESLĒGŠANA**

**LĪDZSPRIEGUMAM**

Iepazīsimies ar pārejas procesu ķēdē ar *R* un *C* (īsāk — *RC* ķēdē), to pieslēdzot līdzspriegumam *U,* t. i., izsekosim kondensa­tora ar kapacitāti *C* uzlādēšanas procesam, ja virknē ar kondensatoru ieslēgta pretestība *R* (11.12. att.). Vispārīgā gadījumā pretestība *R* var būt tikai savienojošo vadu pretestība, kuru pašreiz neņemam vērā.

|  |  |
| --- | --- |
|  | 11.12. att. Ķēdes ar *R* un *C* pieslēgšana  līdzspriegumam. |

Kondensatora *uzlādēšanas laikā* nepār­traukti palielinās kondensatora lādiņš *q,* tātad pieaug spriegums *uc* uz kondensatoru un pa­stiprinās elektriskais lauks starp tā klājumiem.

Uzlādēšanas procesā pārejas spriegums *uc* palielinās līdz stacionārajai vērtībai *U*, bet kondensa­tora uzlādēšanas (pārejas) strāva *i* šajā procesā sama­zinās līdz nullei, kā tas izriet no otrā Kirhofa likuma izteiksmes apskatāmajai ķēdei:

*U = iR + uC*. (11.19)

Tā kā pārejas strāva tad pārejas procesam *RC* ķēdē iegūstam šādu lineāru diferenciālvienādojumu:



(11.20)



Pārejas spriegums *uc* uz kondensatoru

*uc = uc st + uc br·*

Kondensatora uzspiestais jeb stacionārais spriegums *uc st* ir vienāds ar ķēdei pievienoto spriegumu *U*, t. i., *uc st = U = uc st*(0).

Brīvo spriegumu *uc br* pārejas procesā izsaka brīvajam sprie­gumam uzrakstīta lineāra diferenciālvienādojuma bez labās puses



vispārīgā atrisinājuma izteiksme:



Lielumu *RC*, ko mēra sekundēs, sauc par *RC* ķēdes laika kon­stanti un apzīmē ar τ:

*τ = RC*. (11.21)

Tad brīvais spriegums



un kondensatora pārejas spriegums



Tā kā pirms pieslēgšanas spriegumam kondensators nebija uzlādēts, tad saskaņā ar otro komutācijas likumu arī komutācijas momentā (*t* = 0) spriegums uz kondensatoru *uc*(0) ir vienāds ar nulli, t. i., *uc*(0) = 0. Ievērojot, ka *uc br*(0) = *A*, komutācijas mo­mentā

*uc*(0) = *uc st*(0) + *uc br*(0) = 0 = *U + A*,

un integrēšanas konstante

*A = – U*.

Tādejādi, uzlādējot kondensatoru, spriegums *uc* uz kondensa­toru pieaug pēc eksponenciālas likumsakarības (11.13. att.):

(11.22)



Brīvais spriegums *uc br* pārejas procesā samazinās pēc eksponen­ciālas likumsakarības:



pie tam komutācijas momentā (*t* = 0) *uc br*(0) = *U*.

Kondensatora uzladēšanas pro­cess teorētiski ir bezgalīgi ilgs (*t* = ∞), bet praktiski kondensa­tors uzlādējas laika sprīdī *t* ≈ 4τ.

Tātad, palielinot *RC* ķēdes laika konstanti *τ*, t. i., palielinot ķē­des *C* vai *R*, kondensators uzlā­dējas līdz spriegumam *uc = U* ilgākā laikā.

No izteiksmēm (11.19) un (11.22) secinām, ka kondensatora uzlādēšanas strāva *i* samazinās pēc eksponenciālas likumsakarības (11.13. att.):

(11.23)



|  |  |
| --- | --- |
|  | 11.13. att. Kondensatora uzlādēšanas strāva *i,* spriegums *u*c un tā kom­ponentes. |

Komutācijas momentā (*t* = 0) uzlādēšanas strāva *i* momentāni (lēcienveidā) sasniedz maksimālo vērtību *i*(0), kuru ierobežo ķē­des pretestība *R*:



Kondensatora uzlādēšanas procesu raksturo no avota saņem­tās enerģijas uzkrāšanās kondensatora elektriskajā laukā.

**11.6. KONDENSATORA IZLĀDĒŠANAS CAUR PRETESTĪBU R**

Pieņemsim, ka līdzsprieguma avots uzlādējis kondensatoru ar kapacitāti *C* līdz spriegumam *uc = U* (11.14. att.). Slēdzi pārslēdzot no pirmā (1) stāvokļa uz otro (2), kondensators tiek atvienots no avota un pieslēgts pretestībai *R*.

Tā kā uzlādēts kondensators ir enerģijas avots, tad noslēg­tajā *RC* ķēdē sāk plūst kondensatora izlādēšanās strāva *i*, t. i., kondensators izlādējas caur pretestību *R*.

Izlādēšanas strāvas plūšana *RC* kontūrā (no kondensatora « + » spailes uz « —» spaili) saistīta ar kondensatora lādiņa *q* un kondensatora sprieguma *uc* pakāpenisku samazināšanos. Šis process turpinās, kamēr kondensators pilnīgi izlādējas, t. i., ka­mēr *uc* = 0; tad arī izlādēšanās strāva *i* = 0.

|  |  |
| --- | --- |
| 11.14. att. Kondensatora iz­lādēšanās caur  pretes­tību *R*. | 11.15. att. Kondensatora izlādēšanas  spriegums *uc* un strāva *i*. |

Kondensatora elektriskajā laukā uzkrātā enerģija izlādē­šanās procesā pārveidojas elektriskajā enerģijā, kura pretestībā *R* pārvēršas siltumā.



Tā kā pārejas procesā kondensators ir atslēgts no avota, tad kondensatoram stacionārais spriegums *uc st* = 0 un arī stacionārā strāva izlādēšanās kontūrā *ist* = 0. Tādēļ iztirzājamā pārejas pro­cesa, ievērojot, ka *uc = uc st + uc br*,

*uc = uc br* un *i = ibr*·

Otrā Kirhofa likuma izteiksme izlādēšanās (*RC*) kontūra brī­vajam komponentēm ir šāda:

*uc br = ibrR* vai *uc br – ibrR* = 0. (11.24)

Izlādēšanās jeb brīvā strāva, ievērojot, ka *duc* < 0,



Brīvo spriegumu *uc br* pārejas procesā izsaka saskaņā ar iz­teiksmi (11.24) brīvajam spriegumam uzrakstīta lineārā diferen­ciālvienādojuma



vispārīgā atrisinājuma izteiksme:



kur

*τ = RC* (11.25)

ir izlādēšanās kontūra laika konstante, kas raksturo *uc* un *i* iz­maiņas straujumu.

Komutācijas momentā (*t* = 0) saskaņā ar otro komutācijas likumu

*uc br*(0) = A = *uc*(0) = *U*,

jo pirms komutācijas uz kondensatoru bija spriegums *U*.

Tādējādi spriegums starp kondensatora klājumiem *uc* izlādē­šanās procesā samazinās pēc eksponenciālas likumsakarības (11.15. att.):

(11.26)



No izteiksmes (11.24) un kondensatora izlādēšanās strāva (11.15. att.)

(11.27)



Mīnusa zīme norāda, ka kondensatora izlādēšanās strāvas vir­ziens ir pretējs uzlādēšanas strāvas virzienam.

Komutācijas momentā (*t* = 0) izlādēšanās strāva *i* momentāni (lēcienveidā) sasniedz vislielāko vērtību *i*(0), kuru limitē izlādē­šanās pretestība *R*:



***11.3. uzdevums.*** Noslēdzot slēdzi (11.16. att.) stāvoklī 1, kondensators *C* = 10 μF uzlādējas no enerģijas avota, kura spriegums *U* = 50 V.

Pārslēdzot slēdzi stāvoklī 2, kondensators izlādējas caur pretestību *R=* 2 MΩ un pretestību *RP* = 8 MΩ.

Konstruēt kondensatora sprieguma un strāvas izmaiņas grafikus, tam uzlādējoties un izlādējoties. Aprēķināt enerģiju, ko patērē avots kondensatora uzlādēšanai, un enerģiju, ko kondensators atdod izlādējoties

|  |  |
| --- | --- |
| Atrisinājums  1. *Sprieguma stacionārā un brīvā komponente, kondensatoram uzlādējoties.* Sastādām kontūram (11.16. att., slēdzis stāvoklī 1) vienādojumu pēc otrā Kirhofa likuma:  *U = iR + uC*, (11.28)  kur *i* ir kontūra strāva (tā ir arī strāva kondensatorā *iC*), ko nosaka kā lādiņa | 11.16. att. |

uzkrāšanās ātrumu uz kondensatora klājumiem:

(11.29)



Aizvietojot vienādojumā (11.28) strāvu ar tās vērtību (11.29), iegūstam sprieguma izteiksmi:



Paskaidrosim pēdējo izteiksmi. Kad kondensators pilnīgi uzlādējies (stacionārs režīms), kontūra strāva *iC* = 0 un saskaņā ar pēdējo izteiksmi *uC = uCSt = U*.

Kondensatora sprieguma brīva komponente

(11.30)



Šeit ņemts vērā, ka un *τ = RC* – kondensatora uzlādes ķēdes laika konstante.



Iegūtajam diferenciālvinādojumam (11.30) ir atrisinājums

(11.310)



Tādējādi spriegums uz kondensatora pārejas procesa laikā

(11.32)



Lai noteiktu konstanti *A*, izmantojam otro komutācijas likumu.

Ņemot vērā mūsu uzdevuma nosacījumus, tas nozīmē, ka līdz slēdža noslēgšanai (11.16. att.) spriegums uz neuzlādētā kondensatora ir vienāds ar nulli un paliek tāds pats arī pirmajā momentā pēc slēdža noslēgšanas, t.i., ja *t* = 0, spriegums *uC* = 0, tādēļ no vienādojuma (11.32) iegūstam, ka



vai *A = - U* un

(11.33)



kur laika konstante



2. *Strāvas un sprieguma līknes, kondensatoram uzlādējoties*. Uzlādes procesā spriegums (voltos) uz kondensatora pieaug pēc likuma



kur *t* – sekundēs.

Aprēķināsim spriegumu *uC* vairākiem laika *t* vērtībām



un pēc šiem datiem 11.17. attēlā konstruēts grafiks *uC(t).*

Uzlādes strāva ir proporcionāla sprieguma izmaiņas ātrumam uz kondensatora klājumiem:



11.4. tabulā dotas uzlādes strāvas vērtības, bet 11.18. attēlā – grafiks *iC(t).*

|  |  |
| --- | --- |
| 11.17. att. | 11.18. att. |

11.4. tabula

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| *t*, s | 0 | τ | 2τ | 3τ | 4τ | 5τ |
| *i*, μA | 25 | 9,19 | 3,38 | 1,24 | 0,46 | 0,17 |

Teorētiski kondensatora uzlādes process turpinās bezgalīgi ilgi, bet praktiski to var uzskatīt par pabeigtu laika *t* = (4 ... 5) *τ*, tapāt kā strāvas augšanas procesu ķēdē ar pretestību un induktivitāti.

3. *Elektriskās enerģijas aprēķins*. Uzlādējot kondensatoru, enerģijas avots atdod enerģiju *WAV* = *E2C* = *U2C* = 502·10·10-6 = 2,5·10-2 = 0,025 J. Puse no šīs enerģijas *W = CU2/2 =* =0,0125 J uzkrājas kondensatora elektriskajā laukā. Enerģija W tiek patērēta, kondensatoram izlādējoties. Laika momentam *t = 3τ*

J.



***11.4. uzdevums.*** Ja pēc kondensatora uzlādes līdz spriegumam *uC = U* (stacionārs režīms) slēdzi pārslēdz stāvoklī 2, tad caur pretestību (*R + RP*) plūst izlādes strāva *i*, bet kondensatora *C* lādiņš, spriegums un elektriskā lauka enerģija samazinās.

Otrā Kirhofa likuma izteiksme izlādēšanās ((*R + RP*)·*C*) kontūra brīvajām komponentēm ir šāda:



Tā kā izlādēšanās jeb brīvā strāva



tad lineārais diferenciālvienādojums brīvajam spriegumam ir



un tā vispārīgā atrisinājuma izteiksme



kur

s



ir izlādēšanās kontūra laika konstante, kas raksturo *uC* un *i*  izmaiņas straujumu.

Sākuma momentā (*t* = 0)

V,



jo komutācijas momentā spriegums uz kondensatoru nevar mainīties momentāni.

Tādējādi spriegums uz kondensatora spailēm izlādēšanās procesā samazinās pēc eksponenciālas likumsakarības:

V



11.5. tabulā dotas izlādes sprieguma *uC* vērtības, un pēc šiem datiem 11.19. attēlā konstruēts grafiks *uC(t).*

11.5. tabula

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| *t*, s | 0 | τ | 2τ | 3τ | 4τ | 5τ |
| *uC*, V | 50 | 18,39 | 6,77 | 2,49 | 0,92 | 0,34 |

Kondensatora izlādēšanās strāva

A.



Mīnusa zīme norāda, ka kondensatora izlādēšanās strāvas pozitīvais virziens ir pretējs uzlādēšanas strāvas virzienam.

Ja *t* = 0, tad *i*(0) = – *U/(R +RP)* = – 50/10·106 = – 5·10-6 = – 5 μA.

11.6. tabulā dotas izlādes strāvas *i* vērtības, bet 11.20. attēlā – grafiks *i(t).*

11.6. tabula

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| *t*, s | 0 | τ | 2τ | 3τ | 4τ | 5τ |
| *i*, μA | - 5 | - 1,84 | - 0,68 | - 0,25 | - 0,092 | - 0,034 |

|  |  |
| --- | --- |
| 11.19. att. | 11.20. att. |

*Elektriskās enerģijas aprēķins*. Laika momentam *t* = 3*τ*

J.



**11.7. KONDENSATORA IZLĀDE CAUR SPOLI (SVĀRSTĪBU KONTŪRS)**

Aplūkosim parādības ķēdē, kas paradīta 11.21. attēlā. Kon­densatoru, kas uzlādēts līdz spriegumam *Um,* noslēdz caur spoli. *L,* kurai ir neievērojami maza pretestība.

|  |  |
| --- | --- |
|  | 11.21. att. Svārstību kontūrs. |

Sākuma momentā spriegumam uz kondensa­tora ir maksimāla vērtība, un kondensatora elektriskajā laukā ir uzkrata enerģija



Ieslēdzot slēdzi, kondensators, darbodamies kā barošanas avots, sāk izlādēties, un ķēdē plūst elektriskā strāva. Reizē ar strāvu, ro­das magnētiskais lauks un arī pašindukcijas *EDS,* kas katrā laika momentā ir skaitliski vienlīdzīgs spriegumam uz kondensatora tikai ar pretēju-zīmi. Saskaņā ar otro Kirhofa likumu šai ķēdei var uzrakstīt vienādojumu *uC* + *eL* = 0; tātad *uC = ‒ eL.*

Bet, tā kā tad un strāva ķēdē pieaug ar ātrumu



Kondensatoram izlādējoties un spriegumam *uC*, samazinoties, arī strāvas pieaugšanas ātrums samazinās, kamēr, beidzot, ja *uC* = 0, tas kļūst vienlīdzīgs nullei.

Bet, no otras puses, ja *u* = 0, tad arī kondensatora elektriskā lauka enerģija ir vienlīdzīga nullei. Tā kā šajā ķēdē enerģija nepārvēršas siltumā *(R =* 0), tad sākotnējais enerģijas krājums, kas vienlīdzīgs pāriet spoles magnētiskā lauka enerģijā. No tā izriet, ka momentā, kad *uC* = 0, strāvai ķēdē ir maksimālā vērtība *Im*; to var atrast, pielīdzinot sākotnējo enerģijas krājumu tai magnētiskā lauka enerģijas vērtībai, kāda spolē ir tad, kad strāva ir maksimumā:



no kurienes

(11.34)



Lielumam ir pretestības dimensija; to sauc par kon­tūra *viļņu pretestību*.



Kondensatora spriegumam samazinoties, no sākotnējās vērtī­bas līdz nullei, elektroni tiek pārnesti no negatīvā klājuma uz pozitīvo. Kondensatoram izlādējoties (ja *uC* = 0), šis process ne­beidzas, jo strāva ķēdē ar pašindukciju nevar pēkšņi samazināties līdz nullei. Ķēdē pašindukcijas *EDS* dēļ turpina plūst iepriekšējā virziena strāva, kuras skaitliskā vērtība pakāpeniski samazinās. Plūstot šādai strāvai, elektroni no klājuma, kas sākumā bija nega­tīvs, pāriet uz otru klājumu, kas sākumā bija pozitīvs, bet tagad kļūst negatīvs; klājums, kas bija negatīvs, kļūst pozitīvs.

Ja ķēdē nav pretestības *r,* tad pārlādēšanās process turpinās tik ilgi, kamēr strāva samazinās līdz nullei, t. i., visa magnētiskā lauka enerģija atkal pāriet elektriskā lauka enerģijā resp. kon­densators uzlādējas līdz spriegumam, kas skaitliski ir vienlīdzīgs sākotnējam, tikai ar pretēju zīmi. Pēc tam kondensators sāk iz­lādēties pretējā virzienā, bet tad — atkal uzlādēties; šis process turpinās tik ilgi, kamēr ķēdi pārtrauc.

Tātad aplūkojamā ķēdē elektriskā lauka enerģija periodiski pāriet magnētiskā lauka enerģijā un atpakaļ, t. i., ķēdē ir novēro­jamas enerģijas nerimstošas periodiskas svārstības.

Ķēdi, kurā var notikt elektriskās enerģijas svārstības, sauc par *svārstību ķēdi* vai *svārstību kontūru*.

**11.8. STRĀVAS UN SPRIEGUMA MAIŅAS LIKUMS SVĀRSTĪBU KONTŪRĀ**

Tā kā, kondensatoram izlādējoties, klājumu lādiņa samazinā­šanās ir

*— dq = — C duC = idt,*

tad strāva kontūrā



ir proporcionāla kondensatora sprieguma pirmajam atvasinājumam pēc laika (ar pretēju zīmi), bet kondensatora spriegums, kā pa­rādīts iepriekš,



t. i., proporcionāls strāvas pirmajam atvasinājumam pēc laika.

Tāda divu mainīgu lielumu savstarpējā atkarība iespējama, ja strāva mainās pēc sinusa likuma, jo leņķa sinusa pirmais atvasi­nājums ir vienlīdzīgs šī leņķa kosinusam,



bet spriegums uz kondensatora mainās pēc kosinusa likuma, jo leņķa kosinusa pirmais atvasinājums ar pretējo zīmi ir vienlīdzīgs tā paša leņķa sinusam:



Šīs pašas vienādojumu sistēmas otrs atrisinājums, kad strāva mainās pēc kosinusa likuma, bet spriegums uz kondensatora — pēc sinusa likuma (ar pretēju zīmi), aplūkojamā piemērā neder, jo strāvas sākuma vērtībai jābūt nullei.

Tātad

*I = Im*sin*α* = *Im*sin*ω*0*t*, (11.35)

kur *α = ω*0*t*, bet



kur

*Um =* *ω*0*LIm*. (11.36)

Strāvas *i*(*t*) un spriegumu *uC*(*t*) un *eL*(*t*) grafiki paradīti 11.22. attēlā.

**11.9. PAŠSVĀRSTĪBU PERIODS UN FREKVENCE**

Izteiksmēs (11.35) un (11.36) lielumu *ω*0 sauc par *svārstību kontūra leņķisko pašfrekvenci*. Šis lielums ir atka­rīgs no svārstību kontūra induktivitātes L un kapacitātes C.

Tā kā *Um* = *ω*0*LIm*, tad



No otras puses, tika konstatēts (11.34), ka

|  |  |
| --- | --- |
|  | 11.22. att. Svārstību kontūra strāvās, sprieguma un pašindukcijas *EDS* grafiki gadījumam, kad *R* = 0. |



Tātad



un

(11.37)



Svārstību periodu var izrēķināt no maiņstrāvas (enkura) rotācijas leņķiska ātruma:



bet svārstību frekvence



**11.5. piemērs**. Kondensators ar kapacitāti C = 40 μF uzlādēts līdz 150Vlielam spriegumam. Kondensators izlādējas caur spoli, kuras induktivitāte *L =* 0,1 H.

Aprēķināt viļņu pretestību un leņķisko pašfrekvenci.

Viļņu pretestība



Leņķiskā frekvence



**11.10. RIMSTOŠĀS SVĀRSTĪBAS**

Ja svārstību kontūrā ir ieslēgta pretestība, kuras lielums ne­pārsniedz divkāršotas viļņu pretestības lielumu (*R* < 2*Z*0), tad kondensatora izlāde caur pašindukcijas spoli atšķiras no agrāk aplūkotās tikai ar to, ka tagad svārstību process ir saistīts ar ne­pārtrauktu elektriskās enerģijas pārveidošanos siltuma enerģijā *(i2Rdt* laikā *dt).* Tāpēc strāvas un sprieguma amplitūdas (*Im* un *Um*) katrā pusperiodā samazinās, t. i., kontūrā notiek rimstošas svārstības (11.23. att.), kas pārtraucas, kad visa enerģija pārvei­dojas siltuma enerģijā (teorētiski šis process turpinās bezgalīgi ilgi tāpat kā agrāk aplūkotie pārejas procesi).

Un beidzot, ja *R*0 *≥ 2Z*0, kondensatora izlādēšanās kļūst aperiodiska (11.24. att.). Šajā gadījumā spriegums uz kondensatora, aplūkojot parādību no izlādes sākuma momenta, nepārtraukti samazinās līdz nullei, bet strāva ķēdē vispirms pieaug no nulles līdz noteiktai maksimālai vērtībai un pēc tam nepārtraukti sama­zinās līdz nullei.

|  |  |
| --- | --- |
|  | 11.23. att. Rimstoša periodiska  strāva. |

|  |  |
| --- | --- |
|  | 11.24. att. Grafiki strāvai un spriegumam uz  kondensatora svārstību kontūrā, kurā *R*0 *≥ 2Z*0 |

**11.11. SPOLĒS PIESLĒGŠANA SINUSOIDĀLAM SPRIEGUMAM**

Spoli ar aktīvo pretestību r un induktivitāti *L* pieslēdzot sinusoidālam spriegumam

*u = ust = Um*sin(*ωt* + ψ)

ķēdē sākas pārejas process, kura laikā ķēdes pārejas strāvu *i* arī var uzskatīt par divu komponenšu — uzspiestās (stacionārās) un brīvās strāvas — summu: *i = ist + ibr*·

Stacionārā strāva arī ir sinusoidāla, jo ķēdes elementi *R* un *L* ir lineāri:

*ist = Im* sin (*ωt* + ψ — φ),

kur bet



Komutācijas momentā (*t* = 0) ķēdes pārejas strāva *i*(0) = 0 un stacionārā strāva *ist*(0) = =*Im*sin (ψ —φ).

Tā kā *ibr = i — ist*, tad brīvā strāva komutācijas momentā

*ibr* (0) = *i*(0) - *ist*(0) = – *Im* sin (ψ – φ). (11.38)

Pārejas procesā brīvās strāvas izmaiņas likumsakarība ir at­karīga tikai no ķēdes parametriem, un tādēļ *ibr* te mainās pēc tas pašas likumsakarības ka *RL* ķēdē, to pieslēdzot līdzspriegumam:

kur



vai

(11.39)



Tad pārejas strāva

(11.40)



Redzam, ka, pieslēdzot spoli sinusoidālam spriegu­mam, pārejas procesā ķēdes strāva *i* katrā mirklī ir vie­nāda ar sinusoidālas strāvas (*ist*) un vienvirziena strāvas, kura samazinās pēc eksponenciālas likumsakarības (*ibr*), algebrisko summu (11.25. att.).

Brīvas strāvās vērtība un reizē ari pārejas procesa raksturs ir atkarīgi no tīkla sprieguma momentānās vēr­tības ķēdes pieslēgšanas mo­mentā, t. i., no sprieguma sā­kuma fāzes leņķa ψ.

|  |  |
| --- | --- |
|  | 11.25. att. Pārejas, uzspiestās un brīvās  strāvas līknes, spoli pieslēdzot sinusoi­dālam spriegumam. |

Ja ķēdi pieslēdz spriegumam momentā, kad uzspiestās strāvas vērtība ir nulle (ψ —φ = 0), tad saskaņā ar izteiksmi (11.39) *ibr* = 0, t. i., brīvās strāvas nav, un tādēļ komutācija neizraisa pārejas procesu, t. i., reizē ar komutāciju ķēdē iestājas stacionārs režīms ar sinusoidālu strāvu *i = ist* = *Im* sin*ωt*.

Bet, ja ψ — φ > 0, tad komutācija izraisa pārejas procesu.

Tā kā uzspiestā strāva ir sinusoidāla, bet brīvās strāvas vēr­tība samazinās pēc eksponenciālas likumsakarības, tad perioda vienā posmā strāvas komponentes *ist* un *ibr* summējas. Tādēļ pār­ejas strāvas *i* ordinātes palielinās, pārsniedzot uzspiestās strāvas *ist* ordinātu vērtības. Jo lielāka brīvās strāvas sākuma vērtība, jo vairāk atšķiras strāvu *i* un *ist* ordinātu vērtības.

Ja ķēdi pieslēdz spriegumam momentā, kad uzspiestajai strā­vai *ist* ir maksimālā vērtība (ψ — φ = 90°), tad ari brīvajai strāvai *ibr* šajā momentā ir maksimālā vērtība (11.39), skaitliski vienāda ar uzspiestās strāvas amplitūdu (11.25. att.).

Tad pārejas procesa pirmajā pusperiodā pārejas strāva i sa­sniedz savu vislielāko vērtību *I'm*, kas gandrīz divas reizes lie­lāka nekā stacionārās strāvas *ist* amplitūda *Im*. Šajā ziņā apstākļi ir visnelabvēlīgākie tad, kad maiņspriegumam pieslēdz ķēdi ar lielu induktivitāti *L >> R* brīvā strāva samazinās ļoti lēni) mirklī, kad sprieguma momentānā vērtība tuva nullei (φ ≈ 900, ψ ≈ 180°), bet vislabvēlīgākie — ja, ķēdi pieslēdzot, sprieguma momentānā vērtība tuva maksimālajai vērtībai Um, jo tad strāvas *ibr*(0) = – *ist*(0) vērtība ir tuva nullei.

**LITERATŪRAS SARAKSTS**

1. Popovs V., Nikolajevs S. Elektrotehnika. – R.: Zvaigzne, 1971. 583 lpp.
2. Zolbergs J. Vispārīgā elektrotehnika. – R.: Zvaigzne, 1974. 542 lpp.
3. Laganovskis J. Elektrotehnika. – R.: Zvaigzne, 1985. 284 lpp.
4. Mansurovs N., Popovs V. Teorētiskā elektrotehnika. – R.: LVI, 1960. 510 lpp.
5. Priednieks E. Elektriskās ķēdes un to vienādojumi. – R.: RTU, 2002.
6. Jansons J. Līdzstrāvas elektrisko ķēžu aprēķini un elektromagnētisms. – R.: 1985, 140

lpp.

1. Ozoliņš J. Vispārīgā elektrotehnika ar elektronikas pamatiem. 1 daļa. Vispārīgā

elektrotehnika. – R.: IZM, 1989. 163 lpp.

1. Zaičiks M. Teorētiskās uzdevumu un vingrinājumu krājums. R.: Zvaigzne, 1985, 294

lpp.

1. Vispārīgās elektrotehnikas uzdevumu krājums /V.Pantjušins – R.: Zvaigzne, 1970, 338

lpp.

1. Gaņeļins A., Kostruba S. Lauku elektriķa rokasgrāmata. – Rīga.: Avots, 1984, 238 lpp.
2. Klegeris I.Ž. Lietišķa elektrotehnika. – Jelgava: LLU, 2007, 81 lpp.
3. Meļņikovs V. Patstāvīga darba uzdevumu krājums elektrotehnikā. I daļa. Līdzstrāvas

elektriskās ķēdes. – R.: RVT, 2007. 63 lpp.

1. Meļņikovs V. Patstāvīga darba uzdevumu krājums elektrotehnikā. II daļa. Maiņstrāvas

elektriskās ķēdes. – R.: RVT, 2007. 81 lpp.

1. DOE fundamentals handbook.Electrical science. Vol. 2. U.S. Department of Energy FSC-6910. Washington, D.C. 20585, 1992. 118 p.
2. Thomas L. Floyd. Principles of electric circuits. – New Jersey: Pearson Prentice Hall, 2007, 948 p.
3. Александров К. Электротехнические чертежи и схемы. – М., 1990.
4. Жеребцов И. П. Электрические и маrнитные цепи: Основы электротехники. - Л. Энерrоатомиздат, 1982. 216 с.
5. Иванов И. И., Лукин А. Ф., Соловьев Г. И. Электротехника. Основные положения, примеры н задачи. — СПб.: Издательство «Лань», 2002.— 192 с.
6. Касаткин, А. С. Курс электротехники.— М.: Высш. шк., 2005.— 542 с.
7. Евдокимов, Ф.Е. Обшая электротехника: Учеб. для учащ. неэлектротехн. спец. техникумов.— М.: Высш.шк., 2004.— 367 с.