

**RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE**

ENERĢĒTIKAS UN ELEKTROTEHNIKAS FAKULTĀTE  
INDUSTRIĀLĀS ELEKTRONIKAS UN ELEKTROTEHNIKAS INSTITŪTS

**Inna Rodionova**

**MAIŅSTRĀVAS ELEKTROVILCIENU LĪDZSTRĀVAS  
ELEKTROPIEDZINU EFEKTIVITĀTES IZPĒTE**

Promocijas darba kopsavilkums

ESF atbalstīts darbs

Darba zinātniskais vadītājs  
Dr. Habil. Sc. Ing., prof.  
**Ivars Raņķis**

RĪGA  
2005

## DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS

### TĒMAS AKTUALITĀTE

Puse no bijušās PSRS elektrificēto dzelzceļu kopgaruma ir elektrificēti ar kontakttīkla vienfāzes maiņspriegumu 25 kV un frekvenci 50 Hz. Uz maiņsprieguma kontakttīkla bāzes, gan ar nedaudz citiem sprieguma parametriem, elektrificēti daudzu Eiropas valstu dzelzceļi, kā tas ir, piemēram, Zviedrijā, Francijā, Šveicē, Vācijā un citur. Tādēļ maiņstrāvas elektrovilcienu pilnveidošana ir aktuāls uzdevums daudzās valstīs, gan ražotājvalstīs, gan tajās, kur tiek veikta tikai vilcienu ekspluatācija.

Pilnveidošana tiek veikta divos virzienos:

- veidojot jaunus vilcienus ar uzlabotiem parametriem;
- rekonstruējot esošos ekspluatējamus vilcienus.

Abos virzienos viens no galvenajiem aspektiem ir elektropiedziņas pilnveidošana. Radot jaunus vilcienus, ir iespējams pielietot dažādus piedziņas realizācijas veidus, pie tam veicot optimizāciju. Rekonstruējot, nepieciešams nomainīt novecojušās elektroiekārtas ar jaunām, taču praktiski šajos gadījumos nav iespēju nomainīt galveno piedziņas elementu -elektromotoru, kas šodien rekonstruējamās sistēmās ir līdzstrāvas (LDZ). Ja rekonstruējamajā sistēmā mainītu arī dzinēju, tad pie pašreizējās eksistējošās pārvades mehānikas vienalga varētu uzstādīt tikai LDZ.

Tādēļ uzdevums par elektrovilcienu iekārtu modernizāciju ar LDZ ir aktuāls tieši ar līdzstrāvas elektrodzinēju saglabāšanu.

Jaunu maiņstrāvas elektrovilcienu veidošana ir saistīta ar maiņstrāvas elektropiedziņu pielietošanu. Visplašāk pielieto asinhronos dzinējus ADZ ar frekvences pārveidotājiem, kas realizē līdzstrāvas pārveidošanu maiņstrāvā - šis risinājums šodien skaitās optimālākais, kaut arī pārveidotājs ir sarežģīts un dārgs, to nav iespējams šuntēt pēc regulēšanas procesa beigām vai to izslēgt no piedziņas sastāva. Tomēr šāda dzinēja masa sastāda tikai 70 % no tādas pašas jaudas līdzstrāvas vilces dzinēja masas. Asinhronā dzinēja samazinātie gabarīti ļauj palielināt motora jaudu pie ierobežotās un dotās starprīteņu telpas. Asinhronais motors ir pilnīgi bezkontakta un tas raksturojas ar augstu drošumu.

Tomēr arī piedziņai ar ADZ nepieciešams kvalitatīvs ieejas līdzstrāvas posms. Šim posmam nepieciešams nodrošināt labu elektromagnētisko piedziņas saskaņu ar barojošo maiņstrāvas tīklu. Tas pieprasa realizēt tādu maiņsprieguma pārveidošanu līdzspriegumā, kas nodrošinātu praktiski sinusoidālu motorvagona no tīkla patērēto strāvu pie vieninieka vērtības jaudas koeficienta.

Šī noteikuma realizācija ir kopīgs visu moderno maiņstrāvas elektrovilcienu piedziņām, kā ar ADZ, tā arī ar LDZ. Tāpēc pētījumi, kas vērsti uz šī ieejas posma pilnveidošanu, ir ļoti aktuāli. Pašreizējie tehniskie risinājumi neļauj veikt šādu pārveidošanu vienlaikus ar kvalitatīvu tīkla strāvu un elektroniski regulējamu līdzspriegumā līmeni. Tāpēc šeit ļoti aktuāli ir salīdzināšanas un optimizācijas uzdevumi.

Savukārt salīdzināšanas un izvēles uzdevumi nevar tikt veikti bez skaidra priekšstata par dažādu pārveidotāju darbības raksturojumiem, pie tam jāatzīmē, ka šie raksturojumi daudzos gadījumos ir nepietiekami izpētīti. Šī arī ir dotā pētījuma galvenā aktualitāte, jo pētījums vērsts uz procesu analīzi ar tīklu labi elektromagnētiski saderošos kontakttīkla maiņsprieguma pārveidotājos maz regulējamā līdzspriegumā.

Ja piedziņās ar ADZ neregulējamais līdzspriegums ar sprieguma invertoru tiek pārveidots trīsfāzu maiņsprieguma ar regulējamu frekvenci un sprieguma efektīvo vērtību, tad

piedziņās ar LDZ faktiski vienīgais veids ir pielietot impulsregulatorus LDZ ātruma regulēšanai.

Atbilžu meklēšana uz uzstādītajiem jautājumiem, kā arī atsevišķu variantu realizācijas iespēju un īpatnību novērtējums arī nosaka šī pētījuma aktualitāti. Faktiski aktualitāte vēl palielinās, ievērojot, ka Rīgas elektromašīnbūves rūpnīca ir galvenais maiņstrāvas elektrovilcienu piedziņu ražotājs NVS valstīm.

## DARBA MĒRĶIS

1. Izpētīt maiņstrāvas - līdzstrāvas ar kontakttīklu elektromagnētiski savietojamu pārveidotāju realizācijas iespējas līdzstrāvas vilces piedziņai ar līdzstrāvas dzinēju.
2. Izpētīt šādu pārveidotāju elektromagnētiskos procesus ar mērķi iegūt aprēķinu un salīdzināšanas inženieru metodes.
3. Izpētīt pilnveidošanas iespējas maiņstrāvas-līdzstrāvas ar kontakttīklu elektromagnētiski savietojamu pārveidotāju izveidē, nodrošinot regulēšanas realizāciju vilces līdzstrāvas dzinēju darbības režīmos.

## DARBA ZINĀTNISKĀ NOVITĀTE

Zinātniskā novitāte ir:

- pamatojumā, ka taisngrieža pārveidotāja elektromagnētisko ietekmi praktiski ir neiespējami samazināt ar reaktīvās jaudas kompensatora ieviešanu, tā kā pie fāzes regulēšanas mainās fāze starp strāvas pamatharmonisko un spriegumu;
- pamatojumā, ka harmonisko filtru ieviešana nedaudz uzlabo elektromagnētisko savietojamību, bet pie tam stipri pieaug iekārtas gabarīti;
- pamatojumā, ka alternatīvi vadāmo taisngriežu sistēmām maiņstrāvas elektrovilcienu var izmantot līdzstrāvas dzinēju impulsregulēšanu no nemainīga līdzsprieguma avota, kas nodrošina kontakttīkla strāvu, kas sakrīt fāzē ar spriegumu un sinusoidālu strāvu;
- pamatojumā, ka vienkāršākais risinājums, lai iegūtu neregulējamo līdzstrāvas avotu ir sistēma nevadāmais taisngriezis - pasīvais  $LC$  filtrs;
- tajā, ka iegūtas visas  $LC$  filtra aprēķinu sakarības, kā arī tiek aprēķināti reaktoru masas un gabarītu rādītāji. Ierosināts pielietot nelineāras droseles.
- tajā, ka izstrādātas elektrovilcienu sekcijas automatizētas palaišanas un bremsēšanas datormodelēšanas programmas ar dažādiem ieejas līdzstrāvas avotu variantiem;
- tajā, ka tiek salīdzināti pārejas procesu laika integrālie jaudas koeficienti dažādiem ieejas līdzstrāvas avotu variantiem;
- tajā, ka tiek ierosināts un ir izpētītas divas līdzstrāvas avota realizācijas shēmas ar sinusoidālu ieejas strāvu.

## DARBA PRAKTISKĀ VĒRTĪBA

Pētījuma rezultāti var tikt izmantoti praktiskai izlietošanai jaunas maiņstrāvas elektrovilcienu piedziņu shēmas izveidošanā Rīgas elektromašīnbūves rūpnīcā.

Izstrādātas elektrovilcienu kustības datorpētījumu programmas var tikt izmantotas dažādu piedziņu shēmu realizācijas variantu praktiskai novērtēšanai.

Iegūtas analītiskas izteiksmes, kas novestas līdz inženieru izteiksmju formai un kas ļauj tās izmantot iekārtu aprēķinam.

## AIZSTĀVĒŠANAI TIEK IZVIRZĪTS

1. Maiņstrāvas elektrovilcienu ieejas  $LC$  filtra aprēķinu metodes.
2.  $LC$  filtra masas un gabarītu parametru novērtēšanas rezultāti.
3. Vadāmā taisngrieža piedziņas ar kompensāciju un filtriem elektromagnētiskās savietojamības novērtēšanas rezultāti.
4. Tehniskie priekšlikumi par maiņstrāvas elektrovilcienu neregulējama līdzstrāvas ieejas posma un regulējamas līdzstrāvas piedziņas realizāciju.
5. Maiņstrāvas elektrovilcienu modulējamo taisngriežu parametru novērtēšanas rezultāti.
6. Maiņstrāvas elektrovilcienu ar dažādiem līdzstrāvas posmiem integrālo enerģētisko parametru pārejas procesu laikā novērtēšanas rezultāti.

## DARBA SASTĀVS UN APJOMS

Promocijas darbs sastāv no ievada, 4 nodaļām, slēdziena un bibliogrāfijas. Darba apjoms ir 111 lappuses, 88 zīmējumi, 9 tabulas un literatūras saraksts, kas satur 138 nosaukumus.

## DARBA APROBĀCIJA UN PUBLIKĀCIJAS

Promocijas darba rezultāti ziņoti un apspriesti starptautiskajās konferencēs:

1. Rīgā, RTU, 43. starptautiskajā zinātniskajā konferencē 2002. gadā un nopublicēts ziņojums Strāvas kropļojumu kompensācija maiņstrāvas elektrovilcienu piedziņā -Rīga: Enerģ. un elektron., sēr. 4, sējums 7, 2002. - 33-41 lpp.
2. Rīgā, RTU, 44. starptautiskajā zinātniskajā konferencē 2003. gadā un nopublicēts ziņojums Maiņstrāvas elektrovilcienu reaktīvās jaudas kompensācija. RTU zin. rakstu krāj. "Enerģ. un elektrotehn.", sēr.4, sējums 10, Rīga 2003, 29-34 lpp
3. Rīgā, RTU, 44. starptautiskajā zinātniskajā konferencē 2003. gadā un nopublicēts ziņojums Maiņstrāvas elektrovilcienu impulsveida līdzstrāvas elektropiedziņa. RTU zin. rakstu krāj. "Enerģ. un elektrotehn.", sēr.4, sējums 10, Rīga 2003, 97-101 lpp
4. Kauņā, 9. starptautiskajā zinātniskajā konferencē Electronics 2005. gadā un nopublicēts ziņojums Investigation of Filtering Equipment for AC Railway trains// the 9<sup>th</sup> International Conference ELECTRONICS - Kaunas, May 18, 2005.

Galvenie darba rezultāti izklāstīti 9 publikācijās.

## DARBA SATURS

### 1. MAIŅSTRĀVAS ELEKTROVILCIENU (LOKOMOTĪVJU) GALVENĀS PIEDZIŅAS ESOŠO ELEKTRISKO SHĒMU IZVEIDES PRINCIPU APSKATS

Pirmajā nodaļā dota klasifikācijas tabula, no kuras redzams, ka visas esošās sistēmas var sadalīt divās lielās grupās: ar līdzstrāvas vilces dzinējiem un taisngriežiem, un ar maiņstrāvas dzinējiem ar invertoriem.

Regulēšana transformatora primārajā tinumā tiek pielietota ļoti reti. Pēdējā laikā transformatora primārajā tinumā ir mēģināts izvietot augstfrekvences pārveidotāju, kas ļautu

izveidot transformatoru ar maziem gabarītiem, kā arī ļautu realizēt divvirziena enerģijas plūsmu caur ieejas pārveidotāju.

Galvenokārt pielieto regulēšanu transformatora sekundārajā tinumā, pie tam ir ļoti liela realizācijas dažādība. Līdzstrāvas elektromotoriem pielieto gan diožu taisngriežus, gan diožu-tiristoru taisngriežus, gan tiristoru taisngriežus. Mainstrāvas elektromotoriem pielieto gan ventiļu dzinēju variantu, gan asinhronā elektromotora piedziņu ar invertoriem.

Tiristoru un tiristoru-diožu taisngriešanas - invertēšanas pārveidotāji, kurus lieto pulsējošās strāvas līdzstrāvas dzinējiem, strādā vilces režīmā kā taisngrieži, bet bremsēšanas - kā tīkla invertori. Šo pārveidotāju shēmas, galvenokārt vienfāzes tiltveida, var tikt veidotas gan simetriskas, gan nesimetriskas. Pirmajā gadījumā tiristori ieslēgti visos tilta plecos, otrajā - tikai divos plecos, bet divos citos ieslēdz diodes.

Simetriskā shēma ļauj izveidot bezkontakta spēka ķēdi, kurā nav pakāpju pārslēdzēju, kontaktoru un pārejas reaktoru, kā arī nodrošināt plūstošu sprieguma regulēšanu gan vilces, gan bremsēšanas režīmos. Shēma ļauj arī vienkāršot komutācijas aparatūru vai arī ļauj pilnīgi no tās atteikties. Bez tam ir vieglāk arī izveidot rekuperatīvās bremsēšanas ķēdes invertora režīmā, pie tam ļaujot uzlabot vilces raksturlielnes un nodrošināt maksimālu vilces spēka izmantošanu pēc riteņu saķēdējuma ar sliedēm.

Lai paaugstinātu jaudas koeficientu un samazinātu negatīvo ietekmi uz sakaru līnijām, tiristoru taisngriežu-invertoru pārveidotājiem parasti paredz četrzonu taisngrieztā sprieguma regulēšanu gan vilces, gan elektriskās bremsēšanas režīmā.

Kā tiristoru regulēšanas priekšrocības jāuzskata plūstošā procesa gaita, izmantojot vairākas darbības zonas, ir iespējama kontaktu skaita samazināšana un to slodzes atvieglošana, regulēšanas ātrdarbības paaugstināšanās, vadības atvieglošana.

Kā trūkumi jāuzskata transformatora sarežģītība vairākzonu shēmā, kā arī augstāko harmonisko iepļūšanu vilces kontaktīklā un traucējošās iedarbes uz sakaru līnijām eksistence. Strāvas harmonisko iedarbības rezultātā tiek kropļota tīkla sprieguma forma.

Kā piemērs aplūkotas elektrolokomotives VL80<sup>k</sup> un elektrovilcienu ER9M un ER9E diožu shēmas, kā arī elektrolokomotīvju VL80 un VL85 tiristoru shēmas.

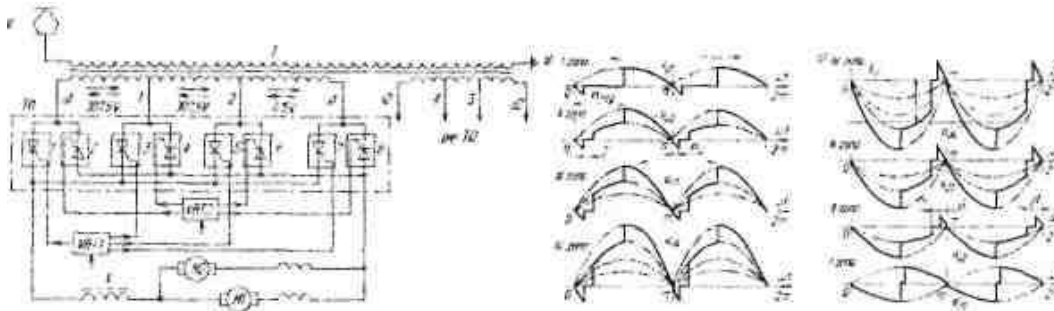
Diožu-tiristoru taisngriežus pielieto sprieguma plūstošai regulēšanai, pie tam sistēmas daļa plūstošajās ar ventiļu starppakāpju pāreju un pilnīgi bezkontakta. Pirmā tipa realizējamās gan ar transformatora nullpunktu, gan ar tiltiņa shēmu. Tika aplūkota tilta shēma, kurā izmantota ventiļu starppakāpju pāreja (VL60<sup>KU</sup>).

Kā diožu-tiristoru shēmu priekšrocība uzskatāma pakāpju skaita samazināšanas iespēja, transformatora konstrukcijas un pārslēdzēju vienkāršošanās.

Kā trūkums uzskatāms nevadāmo plecu pārslodze pirmajā zonā ar divkāršu palaišanas strāvu, kas vienlaikus samazina arī jaudas koeficientu.

Impulsu-fāzu regulēšana (ER29) ļauj pacelt jaudas koeficientu pie pilna taisngrieztā sprieguma līdz 0,95 un samazināt tīkla strāvas traucējošo ietekmi uz sakaru līnijām. Tādā sistēmā reaktīvā jauda tiek samazināta ar tiristoru piespiedu komutāciju katra pusperioda beigās. Taču piespiedu komutācijas ķēdes ir ļoti sarežģītas un aizņem daudz vietas.

Visos gadījumos taisngriežu shēmu pielietošanā ir kontaktīkla strāvas kropļojumi, bet tiristoru taisngriežu gadījumā - mainīga leņķa strāvas pamatharmoniskās nobīde tiristoru atvēršanas regulēšanas leņķa dēļ. Viena no labākajām shēmām ir daudzlīmeņu taisngrieža shēma, kur realizētas 4 regulēšanas zonas (1. zīm.). Šī shēma izpētīta šajā darbā uz tīkla strāvas harmonisko filtrāciju iespēju, kā arī pētīta reaktīvas jaudas kompensācijas iespēja.



1. zīm. Elektrolokomotīves VL80<sup>R</sup> vienkāršota sprieguma regulēšanas shēma (a) un sprieguma diagrammas vilces (b) un rekuperatīvās bremsēšanas (c) režīmos

Sākot ar 80-ajiem gadiem, maiņstrāvas elektrovilcienu sistēmās tika ieviesti asinhronie elektrodzinēji ar viena vai cita tipa pusvadītāju frekvenču pārveidotājiem. Shēmas ar asinhronajiem dzinējiem un sprieguma invertoriem tika izstrādātas elektrolokomotīvēm **VL80<sup>A</sup>**, **VL80<sup>F</sup>**, kur barošanas avotu sprieguma regulēšanai pielietots impulsu platuma modulēšana IPM.

Vienlaicīgi izstrādātas sistēmas ar sinhroniem dzinējiem (**VL80<sup>V</sup>**). Šeit izmantoti invertori ar tiristoru dabīgo komutāciju, t.i., tā darbība sinhronizēta ar dzinēja *EDS*.

Maiņstrāvas piedziņu pielietošana ļauj palielināt vilces dzinēju jaudu. Pie tam maksimālie pieļaujamie dzinēja gabarīti ir pastāvīgi un tos nosaka starpasu telpa. Taču pārveidotāji ir daudz sarežģītāki.

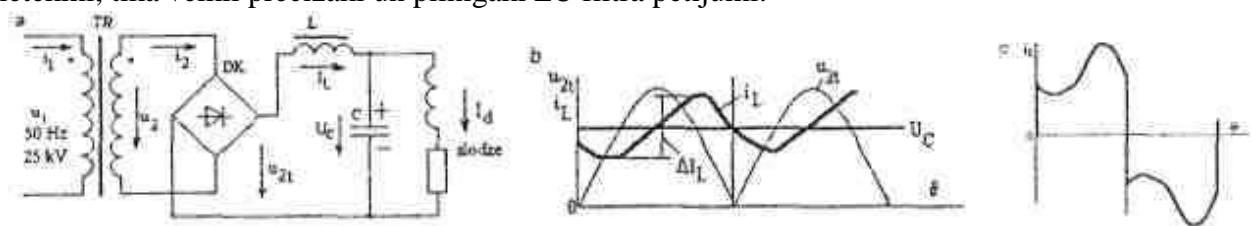
Lai uzlabotu maiņstrāvas tīkla harmonisko sastāvu, kā arī likvidētu reaktīvās jaudas patēriņu, modernajās maiņstrāvas vilces sistēmās pielieto tā saucamo četrvadrantu pārveidotāju. Visplašāk šādus pārveidotājus pielieto vairākspriegumu vilces sistēmās. Piemēram, tāds ir vilcienā Rc484 Eiropas dzelzceļiem

Līdzstrāvas elektropiedziņas kopumā ir daudz vienkāršākas, plaši apgūtas un ekspluatācijā ērtākas, jo to pārveidotāji ir vienkāršāki. Tāpēc joprojām pasaulē tiek veikti darbi šādu piedziņas sistēmu efektīvākai pielāgošanai maiņstrāvas tīkliem. Galvenais virziens ir no elektromagnētiskās saderības viedokļa pilnīga ieejas līdzstrāvas mezgla ieviešana, bet līdzstrāvas dzinēja spriegumu regulēšana nerealizēt ar vadāmo taisngriezi. Faktiski, šeit paliek tikai viena iespēja ātrumu regulēšanai - ievest spriegumu impulsregulatorus.

Tādu modernizētu ieejas līdzstrāvas mezglu var realizēt

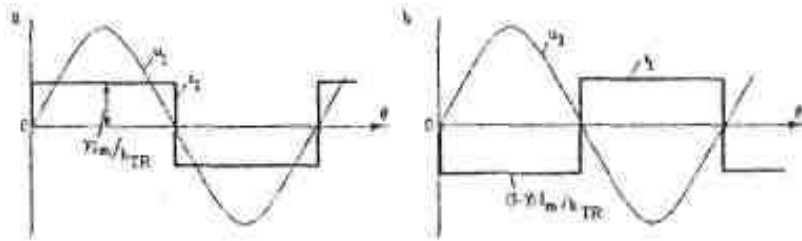
- pielietojot pilnīgi nogludinātas strāvas filtru pēc nevadāmā taisngrieža;
- ievēdot sistēmā ar līdzstrāvas dzinēju neregulējamu līdzstrāvas mezglu ar četrvadrantu pārveidotāju.

Ta kā ieejas *LC* filtrs ir viens no galvenajiem elementiem arī elektrovilcienu ar asinhronajām elektropiedziņām, pirmajā nodaļā tiek aplūkoti ieejas *LC* filtra realizācijas aspekti (2. zīm.). Viens no lielākiem trūkumiem ir ieejas *LC* filtra lielle gabarīti. Tas saistīts ar to, ka tīkla sprieguma frekvence ir zema (50 Hz) un, lai iegūtu nogludinātu droseles *L* strāvu, nepieciešama drosele *L<sub>f</sub>* ar ļoti lielu induktivitāti. Pie tam stipri pieaug droseles gabarīti un svārs. Tā kā literatūrā maz apskatīti procesi šādā filtrā, tad, lai spētu pilnā apjomā novērtēt filtra ietekmi, tika veikti precīzāki un pilnīgāki *LC* filtra pētījumi.



2. zīm. Ieejas filtra pieslēgums tīkla transformatoram: a) shēma; b) filtra droseles strāvas  $i_L$  forma pie taisngrieztā sprieguma  $u_{z1}$ , iedarbes; c) tīkla strāvas reālā forma

2. zīm., *a* parādīts ieejas LC filtra pieslēgums pie tīkla transformatora. Filtra darbību šajā shēmā būtiski apgrūtina taisngrieztā sprieguma  $u_{2t}$  forma. 2. zīm., *b* parādīta filtra droseles strāvas  $i_L$  forma pie taisngrieztā sprieguma  $u_{2t}$  iedarbes. Tāda droseles strāvas forma atbilst taisngrieztā tīkla sprieguma pulsācijām pusperioda laikā. 2. zīm., *c* parādīta tīkla strāvas reālā forma ar ieejas filtru.



3. zīm. Tīkla strāvas idealizēta rorma vilces (*a*) un bremsēšanas (*b*) režīma

Ja strāva būtu ideāli nogludināta, tad no maiņstrāvas kontakttīkla patērētu taisnstūra formas maiņstrāvu  $i_I$ ; (3. zīm.). Šādas formas strāvas jaudas koeficients ir 0,9 un pirmās harmoniskās nobīdes leņķis ir nulle. Tas nozīmē, ka tīkla strāvai ir nemainīgs harmoniskais sastāvs ar konstantu harmonisko amplitūdu attiecības skaitli:

$$\chi = \frac{P_1}{S_1} = 0,9 \quad . \quad I_{1(1)} = 0,9I_1 \quad \cos\varphi_{(1)} = 1 \quad (1)$$

Tomēr reāli ir grūti panākt pilnīgi nogludinātu droseles strāvu, jo vienfāzes tiltiņa taisngrieža taisngrieztā sprieguma  $u_{2t}$  pulsācijas ir ļoti lielas (2. zīm., *b*) un to frekvence ir ļoti zema- 100Hz.

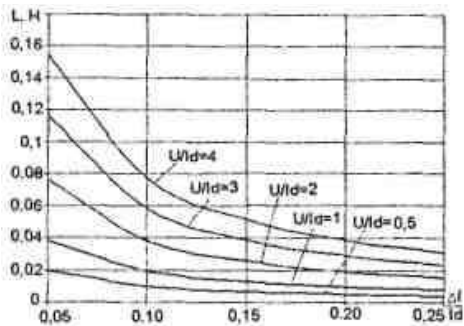
Sakarā ar to, ka reālie procesi filtrā atšķiras no idealizētajiem, tika veikts filtra procesu precizēts aprēķins. Pie tam, iegūtas izteiksmes droseles strāvas pilnas plnsācijas un kondensatora sprieguma pilnas pulsācijas aprēķinam:

$$\Delta I_L = \frac{1,92U}{10^3 L} \quad . \quad \Delta U_C = \frac{0,304U}{\omega^2 LC}, \quad (2)$$

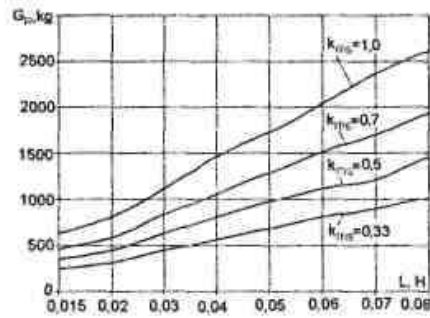
šeit  $U$  - sekundārā tinuma sprieguma efektīvā vērtība, bet tīkla frekvence ir 50 Hz.

Lai pārbaudītu iegūtās izteiksmes, tika veikta datormodelēšana. Rezultātu sakritība ir pieņemamā tehniskā līmenī.

Lai varētu izvēlēties droseles induktivitāti atkarībā no pieļaujamās strāvas pulsācijas, 4. zīm. attēlotas līknes  $L = f(\Delta I_L / I_d)$ . Kā redzams, jo lielāka pieļaujamā strāvas pulsācija, jo mazāka varētu būt droseles induktivitāte. Pieaugot  $U/I_d$  attiecībai, pieaug arī nepieciešamā induktivitāte. Praktiskai izvēlei nepieciešams  $I_d$  vērtību pieņemt pēc slodzes strāvas maksimuma, bet  $\Delta I_L$  pieņemt kā 2 minimālās  $I_d$  vērtības, kas nodrošinātu strāvas nepārtrauktību droselē. Kā redzams no grafika, jo pulsācijas attiecība ir mazāka, jo jāpielieto drosele ar lielāku induktivitāti. Praktiski, ja minimālā  $I_d$  ir 0,05 no maksimālās, tad jāpielieto pulsācijas attiecība 0,1, un pie sprieguma un maksimālās strāvas attiecības, piemēram, divi, (kā tas varētu būt elektrovilcienam) jāpieņem drosele ar induktivitāti tuvu 40 mH. Svarīgi ir novērtēt šādas droseles masu, kuru jānosaka pēc aprēķina strāvas, kas sastāda daļu no maksimālās strāvas.



4. zīm. Līknes  $L = f(\Delta I_L / I_d)$  pie dažādām  $U/I_d$  vērtībām

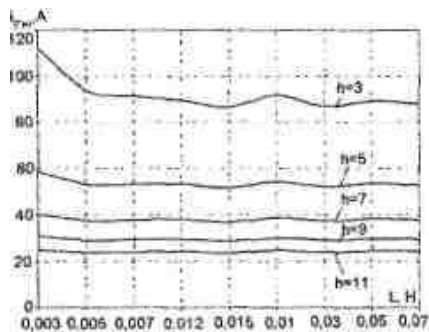


5. zīm. Līknes  $G_R = f(L)$  pie dažādām  $k_{ms}$  vērtībām (datormodelēšanas rezultāti), aprēķinātas pie maksimālās strāvas 300 A

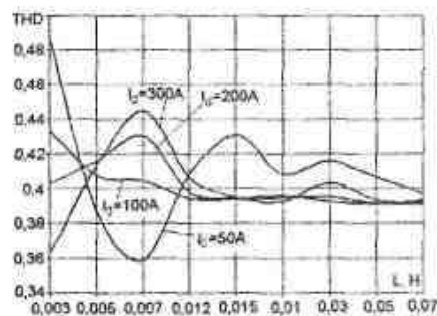
5. zīm. attēlotas šādi aprēķinātu reaktoru masas atkarībā no nepieciešamās induktivitātes  $L$  pie maksimālās strāvas 300 A un pie dažādām aprēķina strāvas attiecības pret maksimālo strāvu koeficienta  $k_{ms}$  vērtībām. Pie tam  $k_{ms} = I_N / I_d$

Kā redzams no 5. zīm., jo  $L$  lielāka, jo droseles masa un attiecīgi gabarīti ir lielāki. Pie tam gabarīti un masa pieaug, ja strāvu attiecības koeficients  $k_{ms}$  pieaug. Reāli filtram šai attiecībai vajadzētu būt tuvai 0,5, un tad, piemēram, pie nepieciešamās induktivitātes 0,04 H droseles masa var sasniegt 700-1000 kg. Kā redzams, droseles svars ir iespaidīgs.

Svarīgi ir pētīt šādas strāvas harmonisko sastāvu. 6. zīm. attēlotas augstāko harmoniku efektīvās vērtības ( $nh = 3, 5, 7, 9, 11$ ) atkarībā no induktivitātes  $L$  pie  $C = 0,01$  F. Zīmējums izpildīts pēc datormodelēšanas datiem pie slodzes strāvas 300 A. Pēc datormodelēšanas datiem varam noteikt vispārīgo strāvas harmonisko kropļojumu faktoru  $THD$  atkarībā no induktivitātes  $L$ . 7. zīm. attēlotas  $THD$  sakarības ar  $L$  vērtību pie  $C = 0,01$  F (t.i., ļoti lielas kapacitātes).  $THD$  aprēķināts arī pie dažādām slodzes strāvām. Kā redzams, vidēji var pieņemt, ka  $THD$  ir 0,4 līmenī, kas nav slikts parametrs.



6. zīm. Strāvas augstāko harmonisko efektīvo vērtību izmaiņas pie  $C = 0.01$  F un strāvas 300A (datormodelēšanas rezultāti)



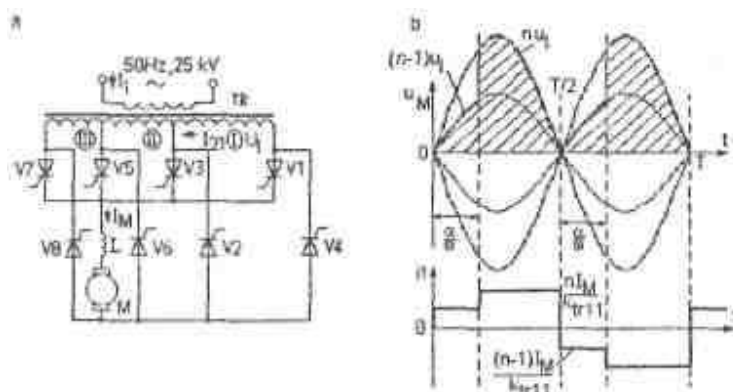
7. zīm. Līkne  $THD = f(L)$  pie  $C = 0.01$  F (datormodelēšanas rezultāti)

Šajā nodaļā iegūtās izteiksmes filtra izvēlei izmantotas turpmāk impulsregulēšanas sistēmas ar ieejas filtra realizācijas variantu novērtēšanai. Pirmajā nodaļā veikts situācijas novērtējums. Maiņstrāvas elektrovilcienu piedziņas attīstās divos virzienos: ar līdzstrāvas elektromotoriem; ar maiņstrāvas elektromotoriem. Katram virzienam ir savas priekšrocības un savi trūkumi. Galvenās priekšrocības līdzstrāvas piedziņai ir labi izstrādāta piedziņa, vienkāršs pārveidotājs un vadības algoritms. Līdzstrāvas elektromotoru galvenie trūkumi ir kolektora īpašību dēļ ierobežotā palaišanas strāva un moments, zemāka ekspluatācijas drošība, lielāka masa un gabarīti uz jaudas vienību. Galvenās priekšrocības maiņstrāvas piedziņai ir zemāka dzinēju masa, dzinēju drošība, liels moments palaišanas sākumā. Galvenie trūkumi ir sarežģīts pārveidotājs un vadības algoritms.





bremsēšanas režīmos (9. zīm., b). Pie tam, ir nepārtraukta zonas pāreja. Shēmai ir šādi trūkumi: kropļota strāva tīklā; mainīgs strāvas pamatharmonikas nobīdes leņķis.



9. zīm. Elektromotora sprieguma regulēšanas shēma (a), motora sprieguma un tīkla strāvas diagrammas (b)

Tika izpētīts tīkla strāvas harmoniskais sastāvs. Aprēķinātas tīkla strāvas harmonisko efektīvās vērtības visās četrās zonās. Tās dotas 1. tabulā.

Kā arī noteikta izteiksme tīkla strāvas harmonisko efektīvās vērtības aprēķinam vispārējā gadījumā:

$$I_{1(h)ef} = \frac{2I_M}{\pi k_{TR11} \cdot h} \sqrt{2n^2 - 2n + 1 + (2n - 1) \cos(h \cdot \alpha)} \quad , \quad (3)$$

kur  $h$  - harmoniskas numurs,  $n = 1, 2, 3, 4$  - zonas numurs,  $kritu = 62,5$  - transformācijas

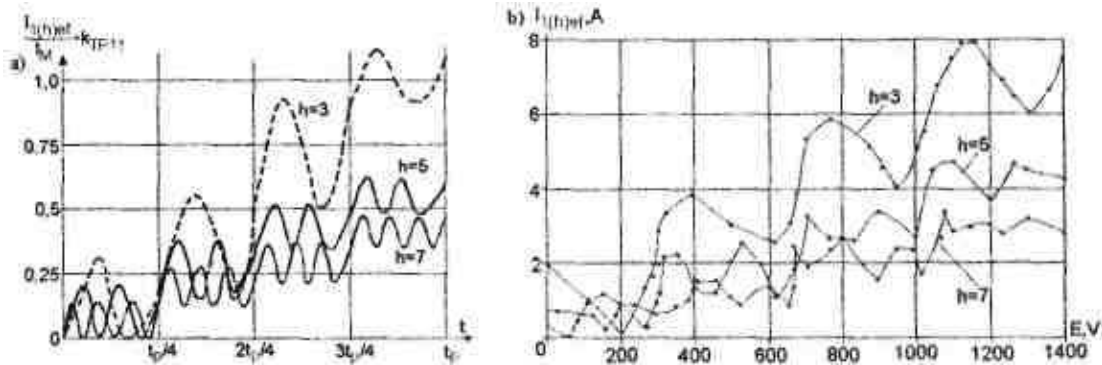
koeficients pirmajā zonā,  $\alpha = \arccos\left(\frac{8t}{t_p} - 1\right)$  - regulēšanas leņķis,  $0 < t < t_p$  - laiks katra zonā.

### Transformatora primārā tinuma strāvas harmonisko efektīvās vērtības

1. tabula

Zone	$h=1$	$h=3$	$h=5$	$h=7$
I	$\frac{2I_M \sqrt{1 + \cos \alpha}}{\pi k_{TR11}}$	$\frac{2I_M \sqrt{1 + \cos 3\alpha}}{3\pi k_{TR11}}$	$\frac{2I_M \sqrt{1 + \cos 5\alpha}}{5\pi k_{TR11}}$	$\frac{2I_M \sqrt{1 + \cos 7\alpha}}{7\pi k_{TR11}}$
II	$\frac{2I_M \sqrt{5 + 3 \cos \alpha}}{\pi k_{TR11}}$	$\frac{2I_M \sqrt{5 + 3 \cos 3\alpha}}{3\pi k_{TR11}}$	$\frac{2I_M \sqrt{5 + 3 \cos 5\alpha}}{5\pi k_{TR11}}$	$\frac{2I_M \sqrt{5 + 3 \cos 7\alpha}}{7\pi k_{TR11}}$
III	$\frac{2I_M \sqrt{13 + 5 \cos \alpha}}{\pi k_{TR11}}$	$\frac{2I_M \sqrt{13 + 5 \cos 3\alpha}}{3\pi k_{TR11}}$	$\frac{2I_M \sqrt{13 + 5 \cos 5\alpha}}{5\pi k_{TR11}}$	$\frac{2I_M \sqrt{13 + 5 \cos 7\alpha}}{7\pi k_{TR11}}$
IV	$\frac{2I_M \sqrt{25 + 7 \cos \alpha}}{\pi k_{TR11}}$	$\frac{2I_M \sqrt{25 + 7 \cos 3\alpha}}{3\pi k_{TR11}}$	$\frac{2I_M \sqrt{25 + 7 \cos 5\alpha}}{5\pi k_{TR11}}$	$\frac{2I_M \sqrt{25 + 7 \cos 7\alpha}}{7\pi k_{TR11}}$

Tīkla strāvas harmonisko pētījumi rāda, ka bez pamatharmoniskās, izteikti lielas ir 3., 5. un 7. harmonikas. Šo harmoniku efektīvo vērtību izmaiņas palaišanas laikā attēlotas 10. zīm. Zīmējums rāda, ka trešās harmoniskās efektīvās vērtības vidējais lielums palaišanas laikā ir 0,608 no  $I_M/k_{TR11}$ , 5. harmoniskās efektīvās vērtības vidējais lielums palaišanas laikā ir 0,377 no bāzes strāvas, bet 7. harmoniskās - 0,269 no bāzes strāvas. Kā redzam, teorētiski aprēķinātās līknes un iegūtās datormodelēšanas rezultātā visumā sakrīt.



10. zīm. Tīkla strāvas harmonisko efektīvo vērtību izmaiņas palaišanas laikā bez kompensācijas:  
 a) - teorētiskie rezultāti attiecībā uz bāzes strāvu pirmajā zonā ; b) - datormodelēšanas rezultāti pie dzinēja strāvas 300 A

Tika izpētīti elektromagnētiskie procesi shēmā ar vairāklīmeņu vadāmo taisngriezi. Vispārīgā gadījumā motora spriegums katrā zonā šai shēmai nosakāms kā

$$U_{Mn} = \frac{\sqrt{2}U_1}{\pi} [(2n-1) + \cos \alpha], \quad (4)$$

tīkla strāvas efektīvā vērtība - kā

$$I_{ln} = \frac{I_M}{k_{TR11}} \sqrt{n^2 - \frac{(2n-1)\alpha}{\pi}}, \quad (5)$$

Tādējādi no tīkla patērēta kopēja jauda ir

$$S_n(t) = \frac{U_1 I_M}{k_{TR11}} \sqrt{n^2 - \frac{(2n-1)}{\pi} \arccos\left(\frac{8t}{t_p} - 1\right)}, \quad (6)$$

bet aktīvā jauda aprēķināma kā

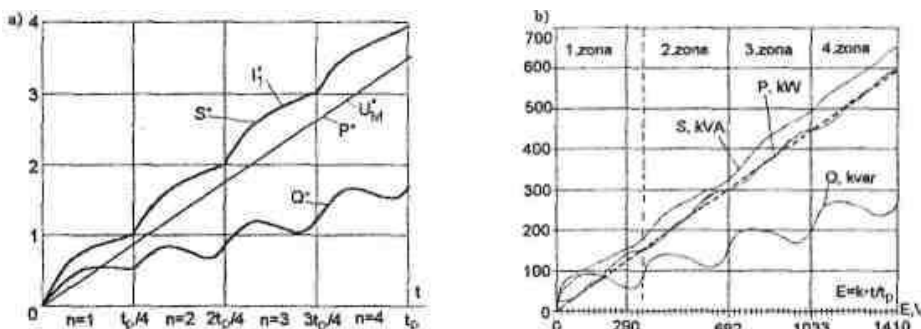
$$P_n(t) = I_{M \max} U_{M \max} \left[ \frac{n-1}{4} + \frac{t}{t_p} \right], \quad (7)$$

kur  $U_{M \max}$  - maksimālais motoru spriegums.

Reaktīvā jauda ir

$$Q_n(t) = \sqrt{S_n^2(t) - P_n^2(t)}, \quad (8)$$

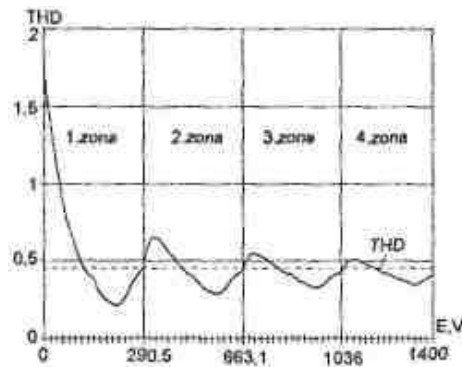
Analītiski aprēķināt  $Q_c$  ir apgrūtināts, tāpēc var lietot grafiskās metodes. 11. zīm., a attēlotas teorētiski aprēķinātas līknes  $S_n^*(t) = f(t)$ ,  $P_n^*(t) = f(t)$  un  $Q_n^*(t) = f(t)$ , par bāzes lielumu pieņemot jaudu  $U_1 I_M / k_{TR11}$ . Kā redzam, reaktīvā jauda ir pietiekami liela.



11. zīm. a) relatīvo jaudas (bāze  $U_1 I_M / k_{TR11}$ ), tīkla strāvas (bāze  $I_M / k_{TR11}$ ) un motora sprieguma (bāze  $U_1 / (k_{TR11} \cdot \pi)$ ) izmaiņas palaišanas laikā  
 b) kopējās jaudas ( $S$ ), aktīvās ( $P$ ) un reaktīvās jaudas ( $Q$ ) izmaiņas elektrovilcienu palaišanas laikā pēc modelēšanas rezultātiem; — aktīvās jaudas tuvināts aprēķins

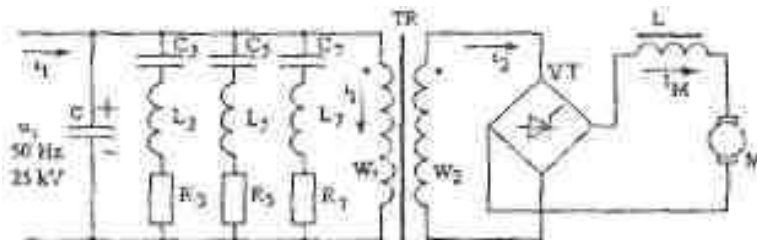
Lai pārbaudītu teorētiskos aprēķinus, tika veikta datormodelēšana pie šādiem parametriem: motoru strāva  $I_M = 400$  A,  $R = 0,21$   $\Omega$ ,  $k_{TRI1} = 62,5$ ,  $U_{Mmax} = 1490,7$  V. Regulēšanas leņķis katras zonas ietvaros tika mainīts no  $\alpha = 180^\circ$  līdz  $\alpha = 0$ . Rezultātā iegūtas līknes  $P=f(t)$ ,  $Q=f(t)$ ,  $S=f(t)$ , kuras attēlotas 11. zīm., b. Kā redzam, rezultāti sakrīt.

Pēc datormodelēšanas datiem varam noteikt vispārīgo strāvas harmonisko kropļojumu faktoru  $THD$  (12. zīm.). Vidēji var pieņemt, ka  $THD$  ir 0,47. Pie tam redzams, ka pirmajā zonā  $THD$  ir slikts.



12. zīm. Līkne  $THD - f(E)$  palaišanas laikā (datormodelēšanas rezultāti)

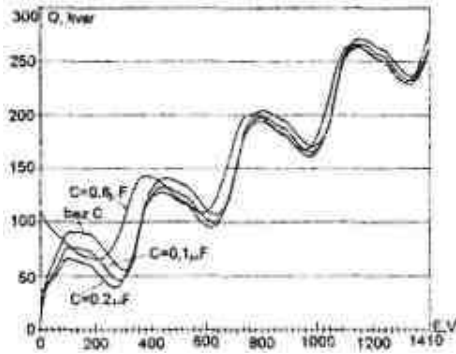
Otrajā nodaļā tika veikti un novērtēti kompensācijas un filtrācijas pasākumi. 13. zīm. parādīta pieslēgšana ar kapacitīvo reaktīvās jaudas kompensatoru kondensatora  $C$  veidā, kā arī harmonisko rezonanses ( $L-C-R$ ) filtrus un trim dažādām strāvas harmonikām paralēli transformatora primārajam tinumam.



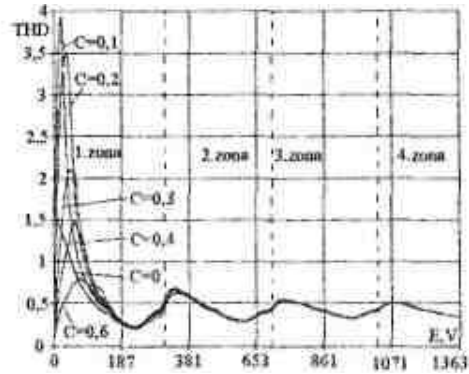
13. zīm. Transformatora pieslēgums tīklam ar reaktīvas jaudas kompensatoru un harmoniku filtriem

Lai minimizētu no tīkla patērējamo kopējo jaudu, ir racionāli veikt reaktīvās jaudas kompensāciju. Kā viens no variantiem varētu būt kondensatoru pieslēgšana transformatora tīkla sprieguma pusē. Kā to apstiprināja pētījumi, šāds risinājums var būt kaut cik efektīgs tikai pirmajā zonā, kad eksistē reāla strāvas pirmās harmoniskās nobīde. Kā redzams no 14. zīm, pirmajā zonā patiešām iespējams samazināt reaktīvo jaudu. Pie tam labākais variants ir pie kapacitātes 0,2  $\mu$ F, kad vidēji pirmajā zonā reaktīvā jauda samazinās par aptuveni 40%. Taču 1. zonā patērētā reaktīvā jauda ir maza daļa no visā palaišanas procesā patērētās, bet kondensatoru pieslēgšana praktiski neietekmē reaktīvās jaudas patēriņu pārējās zonās, t.i., kondensatoru pieslēgums praktiski neuzlabo reaktīvās jaudas situāciju.

15. zīm. attēlotas  $THD$  līknes palaišanas laikā visās četrās zonās ar dažādām kompensācijas kondensatora vērtībām. Ja salīdzina kompensētas sistēmas  $THD$  ar nekompensētas, tad redzam, ka pirmajā zonā kompensētā gadījumā  $THD$  ir vēl pat pasliktinājies. Pārējās zonās  $THD$  praktiski ir tāds pats, t.i., reaktīvas jaudas kompensācijai ar kondensatoru pieslēgšanu nav jūtama efekta.



14. zīm. Reaktīvās jaudas atkarība no motoru EDS (t.i., palaišanas laikā) ar dažādas kapacitātes kondensatoriem



15. zīm. Līkne  $THD = f(E)$  palaišanas laikā četrās zonās pie dažādām kompensācijas kondensatora  $C$  vērtībām (datormodelēšanas rezultāti)

Lai uzlabotu tīkla strāvas formu, nepieciešams pieslēgt trīs  $L-C-R$  ķēdes, kuras noskaņotas atbilstoši:

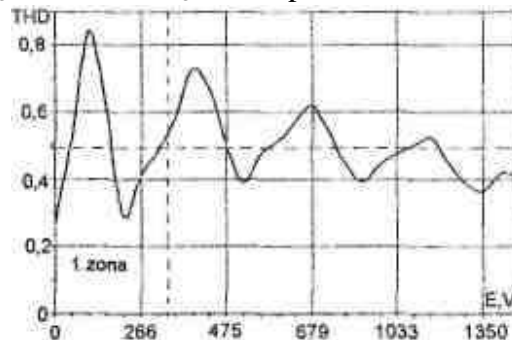
$$L_{(3)}C_{(3)} = \frac{1}{4\pi^2 \cdot 9f^2}; L_{(5)}C_{(5)} = \frac{1}{4\pi^2 \cdot 25f^2}; L_{(7)}C_{(7)} = \frac{1}{4\pi^2 \cdot 49f^2} \quad (9)$$

Savukārt, lai filtri darbotos efektīvi, to labumam jābūt ar vērtību  $Q = \sqrt{\frac{L_h}{C_h}} / R_h = 30 \dots 50$ .

Ievērojot harmonisko strāvas ģenerators aizstāšanas shēmu, filtra rezistora pretestību var noteikt kā

$$R_{(h)} = \frac{h \cdot k \cdot X}{\sqrt{1 - k^2}},$$

kur  $k$  - vēlamais harmoniskās strāvas samazināšanas koeficients,  $X$  - kontaktīkla induktīvā pretestība, kas atkarīga no attāluma no apakšstacijas. Ievērojot šīs attiecības, pie  $k=0,1$  un  $X=12\Omega$  ķēdei  $R_3 = 3,6 \Omega$ ,  $L_3 = 0,114 \text{ H}$ ,  $C_3 = 9,83 \text{ pF}$ .

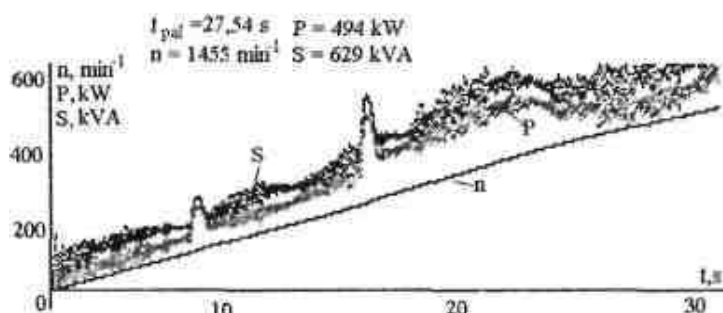


36. zīm. Līkne  $THD = f(E)$  palaišanas laikā ar pieslēgtu trešās harmoniskas filtru (datormodelēšanas rezultāti)

Pēc datormodelēšanas rezultātiem aprēķinātas  $THD$  līknes palaišanas gaitā ar pieslēgtu trešās harmoniskas filtru. Minētās līknes attēlotas 16. zīm. Kā redzams no līknēm,  $THD$  līkne ir daudz labāka, nekā ar kondensatora kompensatoru un bez kompensācijas. Sevišķi tas attiecas uz pirmo zonu. Citās zonās ietekme ir minimāla. Vidējā  $THD$  vērtība ar trešās harmonikas filtru ir 0,49.

Tomēr jāatzīmē, ka uz tīkla frekvences filtra ķēde ir praktiski kapacitatīvā pretestība un strāva, piemēram, caur 3-ās harmonikas filtra ķēdi sastāda ap 70 A, t.i., filtra ķēde pārkompensē barošanas sistēmu. Pie tam filtra gabarīti ir ievērojami pie ierobežotajiem elektrovilcienu iekārtu izvietojuma noteikumiem. Tāpēc var atzīt, ka kompensēšana un filtrācija neļauj uzlabot enerģētiskos rādītājus taisngrieža piedziņā.

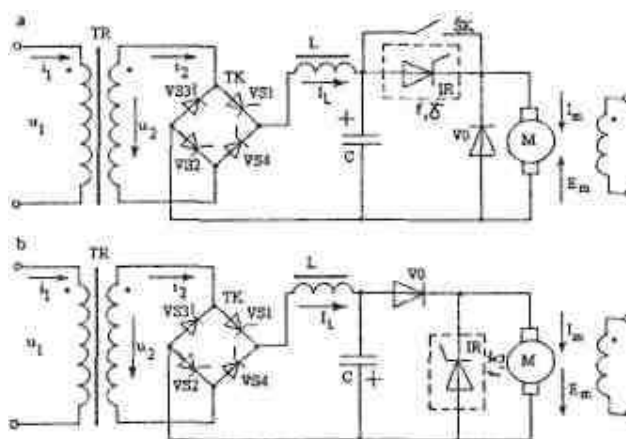
Lai novērtētu iegūtos datus, tika veikta maiņstrāvas elektrovilcienu palaišanas procesa datormodelēšana ar četrzonu vadāmo taisngriezi bez papildus filtrācijas un kompensācijas pasākumiem (17. zīm.). Šeit attēlota motoru enkuru rotācijas ātruma, patērētās aktīvās un kopējās jaudas efektīvo vērtību izmaiņas palaišanas procesa laikā no  $n=0$  līdz  $\approx 1455 \text{ min}^{-1}$ . Ļoti labi redzamas zonu pārejas. Pie tam tika noteikts jaudas attiecības integrālais rādītājs  $P/S$ , t.i., integrālais jaudas koeficients un šeit tas ir 0,78.



17. zīm. Palaišanas procesa datormodelēšanas diagrammas;  $P$  — aktīvā jauda,  $S$  — kopējā jauda,  $n$  — rotācijas ātrums

### 3. MAIŅSTRĀVAS ELEKTROVILCIENA AR IMPULSREGULĒTU LĪDZSTRĀVAS PIEDZIŅU SISTĒMU SINTĒZE UN ANALĪZE

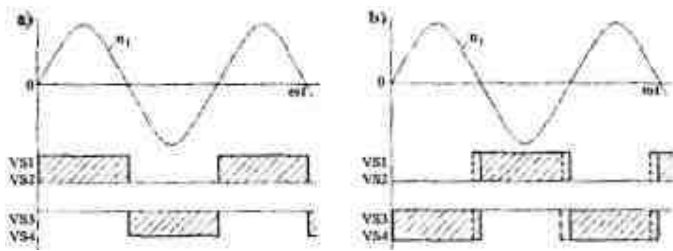
Līdzstrāvas piedziņu var uzlabot, ja ievieš impulsregulatorus. Tas ļauj izmantot gan enerģētiski pilnveidotu līdzstrāvas mezglu, gan palielināt vilces motoru strāvas pulsācijas frekvenci. Pie tam līdzsprieguma mezglu var izveidot gan ar LC filtru un taisngriezi-komutatoru, gan ar četrkvadrantu modulējamu ieejas taisngriezi.



18. zīm. Maiņstrāvas elektrovilcienu līdzstrāvas piedziņa ar LC filtru un impulsregulatoru vilces (a) un rekuperatīvās bremzēšanas (b) režīmā

Vilces režīmā impulsregulators ieslēgts virknē ar slodzi (elektromotoru) (18. zīm., a), un slodzes spriegumu izmaina, regulējot impulsveida slēdža relatīvo ieslēguma laiku  $\gamma$  komutācijas periodā  $T = 1/f$ , kur  $f$  ir slēdža komutācijas frekvence. Praktiski var tikt pielietoti gan tiristoru impulsregulatori, kuri ir ļoti izpētīti un samērā droši darbā, un var darboties ar frekvenci  $f = 400 \text{ Hz}$ , nodrošinot  $\gamma$  izmaiņas robežās starp 0,07 un 1, gan tranzistoru impulsregulatori ar platāku regulēšanas diapazonu. Ja spriegumi būtu ap 800-900 V, tad varētu pielietot IGBT tranzistoru impulsregulatorus. Vilces režīmā iespējama impulsregulatora šuntēšana ar kontaktoru ŠK. Bremzēšanas režīmā impulsregulators tiek slēgts paralēli dzinējiem, kas strādā ģeneratora režīmā, kad enkuru EDS un strāvas virzieni sakrīt (18. zīm., b).

Pirmajā variantā ar ieejas filtru, lai realizētu vilces un bremsēšanas režīmu ar komutējamu taisngriezi, nepieciešams ieviest taisngrieža tiristoru komutācijas mezglu, kas darbojas pēc algoritma, kas attēlots 19. zīm.



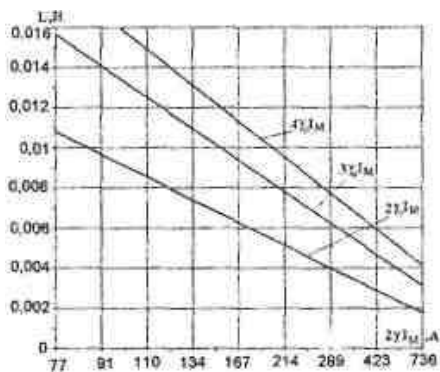
19. zīm. Ieejas taisngrieža vadības diagrammas vilces (a) un rekuperatīvās bremsēšanas (b) režīmā

Ja tiristoru tilts darbojas kā komutators, tad sākoties tīkla sprieguma pozitīvajam pusperiodam, vilces režīmā tiek atvērti tiristori VS1 un VS2 (bremzēšanas režīmā VS3 un VS4), bet negatīvajam - tiristori VS3 un VS4 (bremzēšanā attiecīgi VS1 un VS2). Filtra kondensatora spriegums ir praktiski nemainīgs un vienāds ar  $U_c = 0,9U_2 = 0,9U_1 / k_{TR}$ , kur  $U_1$  un  $U_2$  ir attiecīgi transformatora primārā un sekundārā sprieguma efektīvās vērtības, bet motora spriegums vilces režīmā ir  $U_{MV} = \gamma U_c$  bremzēšanas režīmā  $U_{MB} = (1 - \gamma)U_c$ , taču filtra kondensatora spriegumi abos režīmos ir ar pretēju zīmi. Šeit  $\gamma$  ir impulsregulatora slēdža relatīvais ieslēguma ilgums periodā. Savukārt, droseles strāva abos gadījumos ir ar nemainīgu zīmi atbilstoši  $I_{LV} = \gamma I_m$  un  $I_{LB} = (1 - \gamma)I_m$ , kur  $I_m$  ir motora strāvas vidējā vērtība. Bremzēšanas režīmā jāievieš zināma komutatora pārslēgšanas apsteidze, lai pārslēgšanas momentā uz līdz tam ieslēgtajiem tiristoriem radītu pretēju spriegumu. Principā, komutators var būt arī tranzistoru.

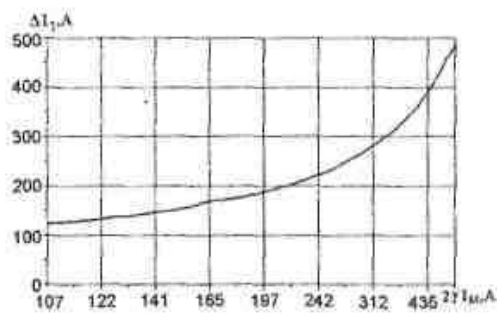
Rīgas Elektromašīnbūves rūpnīcas sistēmās tiek pielietoti divi pulsējošās strāvas motori - 1 DT.004 un 1 DT.008, kuru nominālie spriegumi ir 825 V katrs.

Ir divas realizācijas shēmas:

- divi motori virknē zarā un ar diviem paralēliem zariem, tas ir, četri dzinēji vienā motorvagonā; katrā zarā ķēdē ir savs impulsregulators: viens ieejas filtrs;
- atsevišķais impulsregulators katram motoram; nepieciešami divi filtri.



20. zīm. Nelineāro droseļu induktivitātes izmaiņas motoru regulēšanas diapazonā



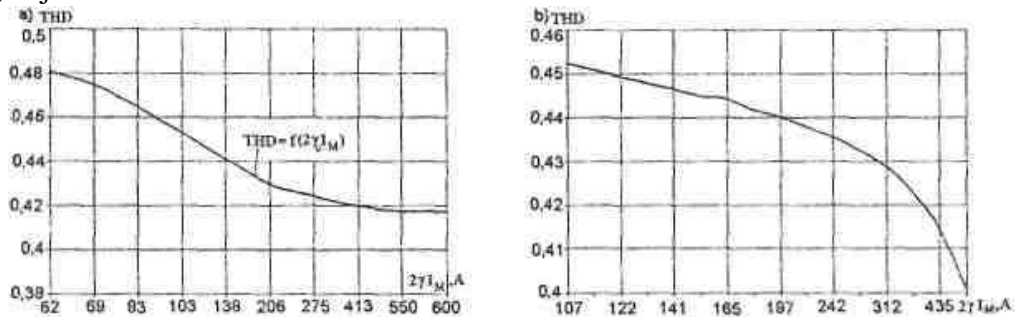
21. zīm. Filtra droseļu strāvas pulsāciju diapazons motoru regulēšanas diapazonā ar nelineāro droseļu induktivitātes izmaiņu

Izmantojot dzinēju nominālos datus, tika aprēķinātas filtra droseles masas un induktivitātes abiem realizācijas variantiem. Droseļu gabarīti ir iespaidīgi

Filtra droseļu gabarītus varētu samazināt, pielietojot droseles ar ļoti mazu gaisa spraugu vai arī bez tās. Šādas droseles būs ar maksimālo induktivitāti pie droseļu minimālās strāvas un ar samazinātu induktivitāti pie lielākām strāvām (20. zīm.). Tas nozīmē, ka strāvas

pulsācijas diapazons regulēšanas laikā nebūs konstants, bet pieaugs pie lielākām droseļu strāvām (21. zīm.). Pulsācijas aprēķinātas pie  $2I_{Lmin}$ .

Tika uzzīmētas tīkla strāvas THD izmaiņas līknes motoru regulēšanas diapazonā ar lineāro droseļu (22. zīm., a) un ar nelineāro droseļu induktivitātes izmaiņu (22. zīm., b). Abos gadījumos THD atrodas robežā 0,48 un 0,42, tas ir samērā labs parametrs. Pie tam, nelineāras droseles gadījumā masa ir 5 reizes mazāka nekā lineāras.

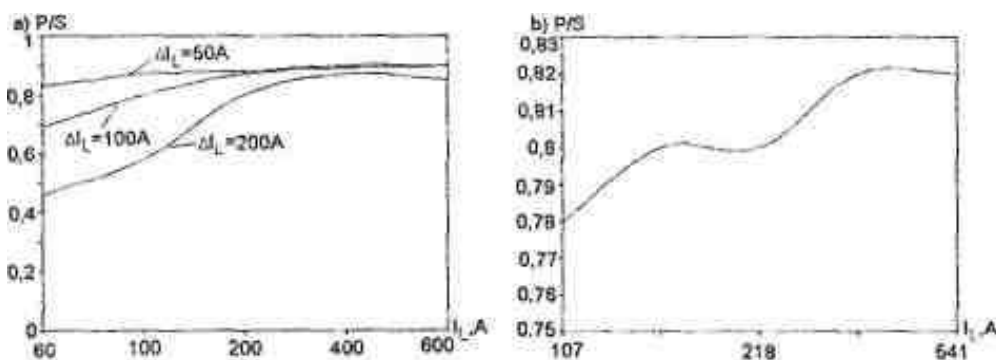


22. zīm. Tīkla strāvas THD izmaiņas motoru regulēšanas diapazonā ar lineāro droseļu (a) un ar nelineāro droseļu induktivitātes izmaiņu (b)

Tika izveidota izteiksme (10) jaudas koeficientu aprēķinam  $J = P/S$ . Kā redzams, jaudu attiecība ir atkarīga no droseles pulsāciju lieluma. Ja  $\Delta I_L = 0$ , tad  $P/S$ , kā jau tika minēts, ir 0,9. Bet kopējās jaudas attiecība ir

$$\chi = \frac{P}{S} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi \sqrt{1 + 0,25 \left( \frac{\Delta I_L}{I_L} \right)^2}} \quad (10)$$

Aprēķinātas jaudas attiecības līknes atkarībā no droseles strāvas pie dažādām  $\Delta I_L$  vērtībām lineāras droseles (23. zīm., a), kā arī nelineāras droseles gadījumos (23. zīm., b). 23. zīm., b līkne atbilst apmēram lineāras droseles gadījumam ar  $\Delta I_L = 100A$ , t.i.,  $P/S \approx 0,8$ .



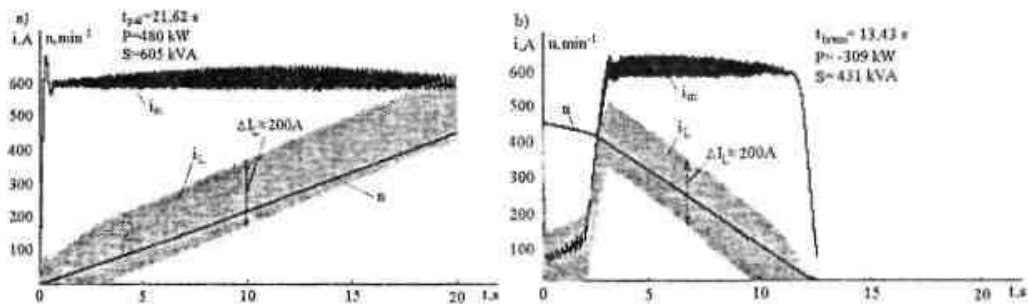
23. zīm. Līknes  $P/S$  ar konstantām  $\Delta I_L$  vērtībām (a) un ar pulsācijām atbilstoši 21. zīm. pie nelineāras droseles

Lai pārbaudītu reālo attiecību starp  $P$  un  $S$ , tika veikta vilciena sekcijas palaišanas un bremsēšanas datormodelēšana ar četriem vilces dzinējiem, katru uz 825 V, kas saslēgti divas paralēlās ķēdēs ar diviem virknē slēgtiem motoriem. Kopējā motoru palaišanas strāva ir 600 A, bet impulsregulatora darba frekvence ir 400 Hz. Pārejas procesa oscilogramma palaišanas procesam attēlota 24. zīm., o, bet bremsēšanas - 24. zīm., b.

Kā redzams no 24. zīm., a, visā palaišanas laika intervālā  $P/S$  attiecība ir vienāda ar  $480/605=0,793$ . Bremsēšanas laikā šī attiecība ir sliktāka ( $P/S=309/431=0,72$ ), jo lielu bremsēšanas procesa daļu aizņem motora ierosināšanas process, kura laikā no nulles pieaug

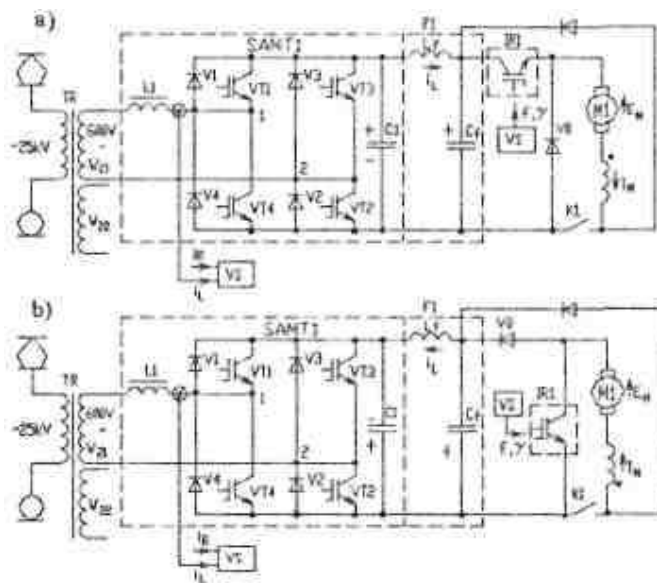


gan motora strāva, gan filtra droseles strāva  $i_L$  un ilgu laiku pastāv filtra droseles pārtrauktās strāvas režīms.



24. zīm. a) maiņstrāvas elektrovilciena palaišanas diagrammas ar motora beigu rotācijas ātrumu 1300 min<sup>-1</sup> (57 km/h); b) maiņstrāvas elektrovilciena bremsēšanas diagrammas pie sākotnējā ātruma 1300 min<sup>-1</sup> (57 km/h)

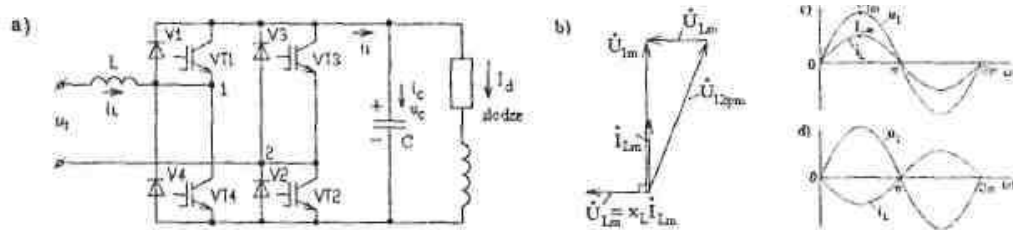
Maiņstrāvas elektrovilciena sistēma ar impulsu regulatoru var tikt izmantota arī piedziņai ar asinhrono elektromotoru. Lai pārbaudītu šādas piedziņas enerģētiskos raksturojumus, tika veikta datormodelēšana ar asinhronā dzinēja palaišanu ar impulsregulatoru. Ja salīdzina motora vidējo realizēto aktīvo jaudu un tā realizēto kopējo jaudu, tad redzam, ka šī attiecība ir 0,59, tas ir, tā ir sliktāka nekā elektrovilciena sistēmai ar ieejas impulsregulatoru un līdžstrāvas piedziņu. Tas izskaidrojams ar to, ka asinhronais dzinējs patērē gan aktīvo, gan reaktīvo jaudu. Tādējādi var secināt, ka piedziņai ar asinhrono motoru ir tikai priekšrocības dzinēja drošuma un masas samazināšanas ziņā. Gan pēc enerģētiskajiem rādītājiem, gan pēc pārveidotāju noslodzes šis piedziņas veids ir sliktāks kā līdžstrāvas piedziņa



25.zīm. Maiņstrāvas elektrovilciena līdžstrāvas piedziņa ar impulsregulatoru vilces (a) un rekuperatīvās bremsēšanas (b) režīmā un ieejas četrkvadrantu SAMT pārveidotāju

Otrais variants maiņstrāvas elektrovilciena ar līdžstrāvas piedziņu uzlabošanai ir četrkvadrantu sprieguma avota modulējamā taisngrieža SAMT (25. zīm.) ieviešana. Sistēma sastāv no transformatora, reaktora  $LI$ , vienfāzes modulējama tranzistoru-diožu taisngrieža (t.i., četrkvadranta pārveidotāja). Taisngrieža izejā pieslēgts kondensators  $C1$ , bet pie tā-  $LC$  filtrs un impulsu regulators ar slodzi (eksperimenti pierādīja, ka  $LC$  filtrs var arī nebūt). Ja transformatora tinumu induktivitāte ir pietiekami liela, tad ieejas reaktors nemaz nav jāuzstāda, bet pie pietiekamas kondensatora kapacitātes var iztikt bez  $LC$  filtra.

26. zīm., a) dota SAMT shēma. Tā bija darbā detalizēti izpētīta. Vilces režīmā ieejas droseles strāva  $i_L$  sakrīt fāzē ar tīkla spriegumu  $u_1$ , bet bremzēšanas režīmā atrodas pretfāzē (26. zīm., c, d). Vilces režīmā pozitīvā pusperiodā darbojas tranzistori VT4, VT5 un diodes VI, V2 (bremzēšanas režīmā - VT1, VT2, V4, Vi), negatīvā pusperiodā otrādi - VT1, VT2, V4, V3 (bremzēšanas režīmā - VT4, VT3, VI, V2).



26. zīm. SAMT shēma (a); vektoru diagramma (b); tīkla strāvas forma vilces (c) un bremzēšanas (d) režīmā

Shēmai, kas attēlota 26. zīm., a) tika izveidotas sekojošas izteiksmes: - relatīvais pieslēguma laiks punktos 1 un 2

$$\frac{t_A}{T} = \frac{\sin \omega t - U_L^* \cos \omega t + \sqrt{1 + U_L^{*2}}}{2\sqrt{1 + U_L^{*2}}} \quad (11)$$

- izejas kondensatora strāvas pamatharmoniskā aprakstās kā

$$i_{Cp} = -I_d (\cos 2\omega t + U_L^* \sin 2\omega t); \quad (12)$$

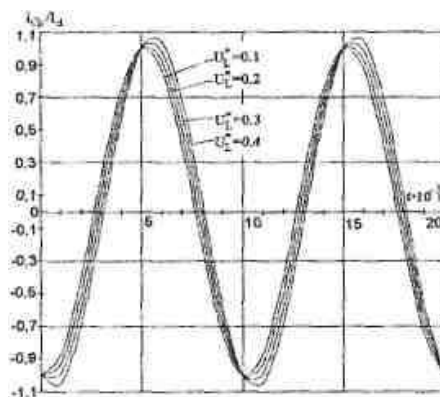
- sprieguma momentāno izmaiņu līkne

$$u_{Cp} = U_{C0} - \frac{I_d}{2\omega C} \cos 2\omega t - 0,5\Delta U_C + \frac{I_d}{2\omega C}; \quad (13)$$

- komutācijas frekvences izmaiņas pusperiodā laikā

$$f = \frac{[\sin \omega t - U_L^* \cos \omega t + \sqrt{1 + U_L^{*2}}] \cdot |U_{Lm} \sin \omega t - U_{C0}|}{2\sqrt{1 + U_L^{*2}} \cdot L\Delta I_L}, \quad (14)$$

Frekvences izmaiņas ir reversi proporcionālas  $\Delta I_L$  un ieejas droseles induktivitātei L. Šeit  $U_L^* = \omega L I_{Lm} / U_{Lm}$ .

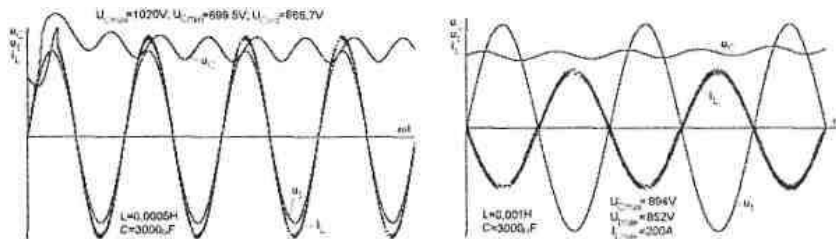


27. zīm. Kondensatora relatīvās strāvas pamatharmoniskās izmaiņas  $i_{C1}/I_d = f(t)$  pie dažādām  $U_L$

27. zīm. attēlotas kondensatora relatīvās strāvas pamatharmoniskās izmaiņas attiecībā pret slodzes strāvu tīkla sprieguma perioda laikā. Kā redzams, strāva mainās ar divkārtu tīkla sprieguma frekvenci un amplitūdu vienādu ar slodzes strāvu.

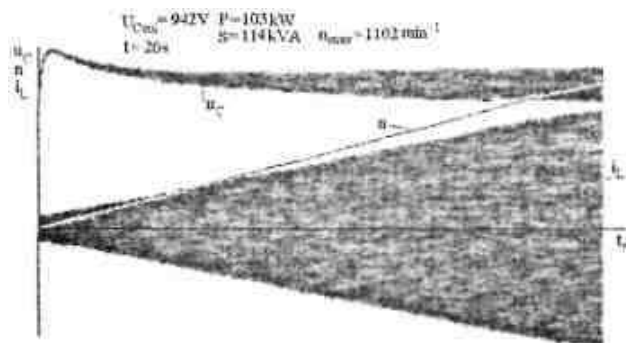
28. zīm., *a* attēlota elektromagnētiskā procesa diagrammas palaišanas režīmā bez tīkla strāvas nobīdes. Datormodelēšana tika veikta pie noteikuma, ka tīkla strāvas amplitūdai ir divkārt jāpārsniedz slodzes strāvu, kas pieņemta vienāda ar motora palaišanas strāvu. Kā redzams, strāva un spriegums sakrīt fāzē, kondensatora sprieguma vidējā vērtība ir aptuveni vienāda ar vilces motora nominālo spriegumu 825 V. Sprieguma pulsācijas diapazons ir 320V un ir atkarīgs no kondensatora kapacitātes.

28. zīm., *b* attēlota elektromagnētiskā procesa diagrammas rekuperatīvās bremsēšanas režīmā ar kondensatora ieejas strāvas vidējo vērtību 100 A. Strāva un spriegums atrodas pretfāzē.



28. zīm. Elektromagnētiska procesa diagrammas vilces režīmā (*a*) bez tīkla strāvas nobīdes un rekuperatīvās bremsēšanas režīmā (*b*) ar kondensatora ieejas strāvas vidējo vērtību 100 A

Lai novērtētu četrkvadrantu ieejas pārveidotāju ietekmi uz palaišanas procesu, tika veikta elektrovilciena palaišanas datormodelēšana (29. zīm.). Tika pieņemts, ka no viena četrkvadrantu ieejas pārveidotāja ar tīkla spriegumu 600 V tiek barots viens vilces motors ar impulsregulatoru. Kā redzams no zīmējuma, palaišanas procesā ar konstantu motora strāvu 300 A tiek plūstoši palielināta ieejas droseles strāvas amplitūda pēc noteikuma  $I_{Lm} = 2\gamma I_M$ , kur  $\gamma$  ir impulsregulatora relatīvais ieslēgšanas laiks, kas plūstoši pieaug palaišanas procesā. Palaišanas procesā pieaug arī četrkvadrantu pārveidotāja izejas kondensatora sprieguma pulsācijas  $U_C$  (tā kā pieaug pārveidotāja slodzes strāva  $\gamma I_M$ ). Šinī gadījumā attiecība  $P/S = 0,904$ , tā ir daudz lielāka nekā visos citos piedziņas realizācijas gadījumos. Tas nozīmē, ka ar četrkvadranta pārveidotāju no tīkla patērē gandrīz sinusoidālu strāvu, kas nav nobīdīta fāzē pret spriegumu. Tomēr strāva nav pilnīgi sinusoidāla, jo notiek tās piespiedu modulācija ar strāvas svārstībām.

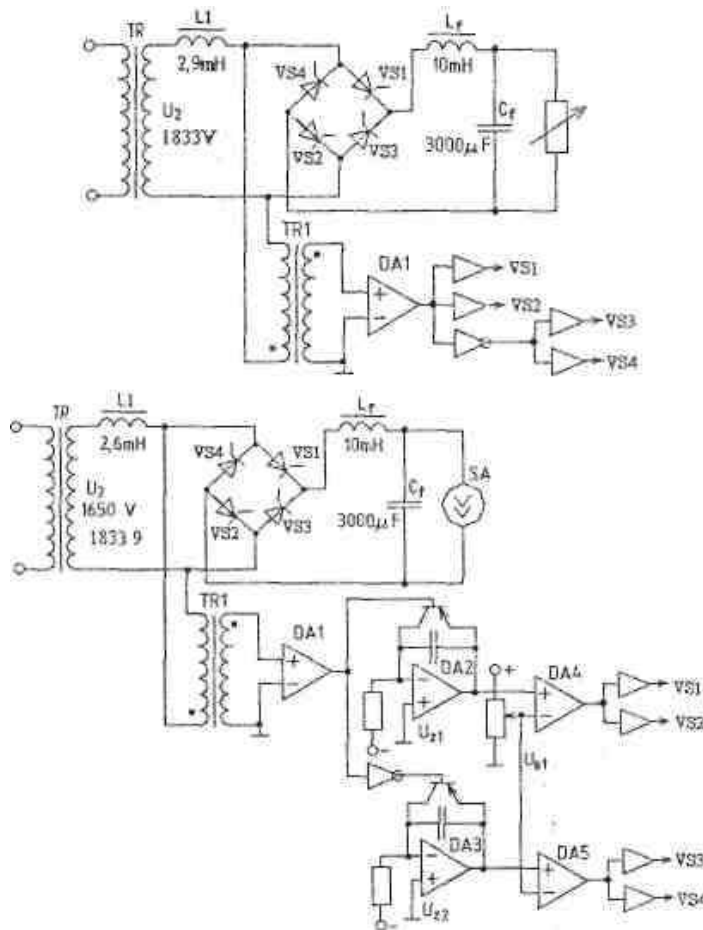


29. zīm. Elektrovilciena palaišanas diagrammas ar četrkvadrantu ieejas pārveidotāju

#### 4. REALIZĀCIJAS PRINCIPI UN EKSPERIMENTĀLĀ PĀRBAUDE

Lai pārbaudītu piedāvāto realizācijas sistēmu darba spēju un novērtētu reālos parametrus, tika veikta sistēmu datormodelēšana ar programmu PSIM6.0, kurā jāatveido visi

vadības sistēmas elementi kopā ar spēka shēmu. 30. zīm. dotas sistēmas ar LC ieejas filtru modelēšanas shēmas vilces un bremzēšanas režīmā. Šajās shēmās ir ieviesta transformatora sekundārā tinuma izkliedes inductivitāte  $L_I$ , kas paņemta divreiz lielāka par nominālo, jo modelēšana veikta slodzei, kas atbilst vienai paralēlai divu dzinēju ķēdei ar impulsregulatoru, kas vienkāršotam attēlam vilces režīmā aizvietotas ar slodzes rezistoru, bet bremzēšanas - ar strāvas avotu. Taču, modelējot, rezistora vietā tika ievietots impulsregulators ar motora slodzi un slodzes strāvas vidējo vērtību 300 A.

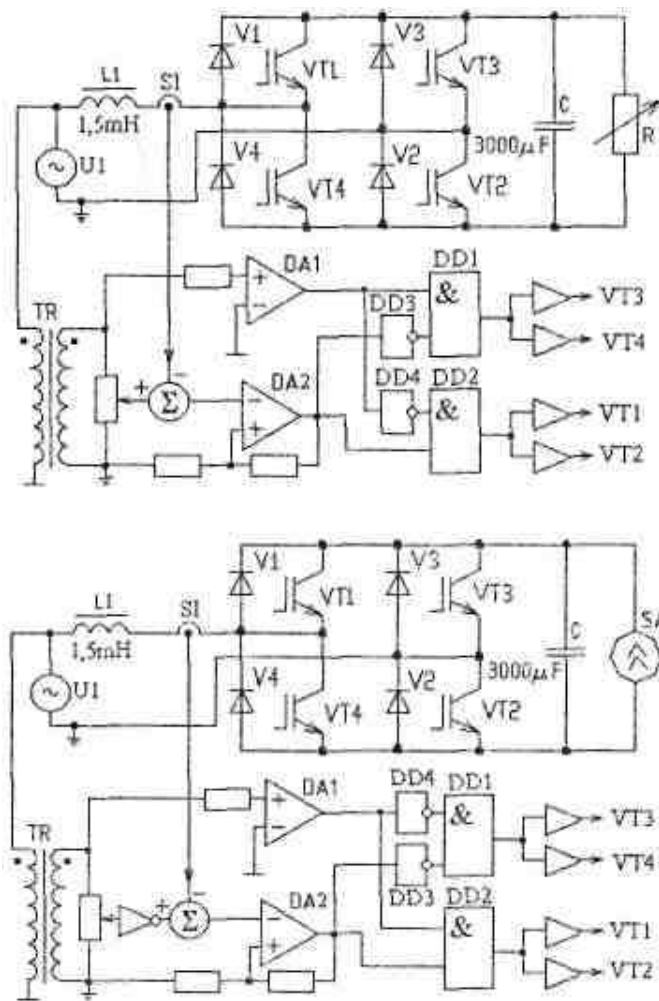


30. zīm. Shēmas modelēšanai ar LC ieejas filtru vilces (augšēja) un bremzēšanas režīmā

Pētot šo shēmu atklājās, ka liela nozīme ir inductivitātei  $L_I$ , kas netika ievērota teorētiskajā pētījumā. Inductivitāte izraisa strāvas komutāciju, kas savukārt izraisa fāzes nobīdi starp sprieguma un strāvas pamatharmoniskajām. Sevišķi nozīmīgi tas ir bremzēšanas režīmā, jo ieejas tiristoru tiltnā jāievieš apsteidzoša par komutācijas leņķi tiristoru pārslēgšana.

Kas attiecas par strāvas pulsācijām filtra droselē un kondensatora sprieguma pulsācijām, tad to eksperimentālas noteikšanas rezultāti ļoti labi sakrīt ar aprēķina rezultātiem vilces režīmā. Taču bremzēšanas režīmā kļūdas ir lielas un it sevišķi strāvas pulsācijām, kad kļūda sasniedz 30-40%. Tas nozīmē, ka teorētiskās izteiksmes būtu jāprecizē, ieviešot bremzēšanas režīmā apsteidzošo tiristoru pārslēgšanu.

Sistēmu ar četrkvadrantu pārveidotāju eksperimentālās shēmas vilces un bremzēšanas režīmos attēlotas 31. zīm. Arī šeit impulsregulators ar slodzes motoriem aizvietots ar ekvivalento slodzi rezistora veidā vilces režīmā, bet ar strāvas avotu - bremzēšanas režīmā. Taču modelējot, tika ieviesti impulsregulatori ar motoru slodzi, kas gan shēmas procesu būtību praktiski neietekmēja.



31. zīm. Modelēšanas shēmas ar četrvadrantu pārveidotāju vilces (augšējā) un bremzēšanas režīmos

Kas attiecas uz procesu apraksta matemātiskajām izteiksmēm, tad visas parametru aprēķinu izteiksmes uzrādīja labu sakritību ar eksperimentu, izņemot komutācijas frekvences aprēķina izteiksmes, kas deva lielāku (ap 30%) kļūdu pret eksperimentu, uzrādot teorētiski lielāku pārslēgšanās frekvenci.

## SECINĀJUMI

1. Maiņstrāvas elektrovilcienu taisngriežu līdzstrāvas piedziņas rada stipru tīkla strāvas kropļojumu, ko grūti nofiltrēt, un reaktīvās jaudas patēriņu, ko grūti kompensēt. Tas saistīts ar mainīgu regulēšanas leņķi pārejas procesos.
2. Perspektīvi būtu ieviest maiņstrāvas vilcienu līdzstrāvas piedziņās līdzsprieguma mezglu ar uzlabotiem enerģētiskajiem parametriem un veikt motoru impulsregulēšanu
3. Impulsregulēšanas sistēmu var realizēt ar
  - ieejas pasīvo LC filtru
  - ar četrvadranta sprieguma avota modulējamo taisngriezi SAMT ieejā

4. Ieejas filtru realizācijas pētījumi parādīja, ka LC filtrs ar lineāru droseli ir pārlietu smags. Filtra svaru, nedaudz pasliktinot enerģētiskos parametrus, var uzlabot ieviešot filtrā nelineāro droseli (droseles masa samazinās ap 5 reizēm).
5. Piedziņas enerģētiskās efektivitātes novērtēšanai tika ieviesta integrālais parametrs  $P/S$  palaišanas laikā
6. Salīdzinot taisngriežu shēmas un impulsregulatora shēmas ar filtru integrālos enerģētiskos parametrus  $P/S$  palaišanas laikā, redzam, ka šis parametrs abās sistēmās ir aptuveni vienāds ar 0,78. Tieši tāds pats šis parametrs būs arī asinhronajai piedziņai ar sprieguma invertoru.
7. Parametru  $P/S$  var uzlabot vismaz līdz 0,9 ieviešot ieejā SAMT pārveidotāju. Izpētīti visi nepieciešamie SAMT darbības raksturojumi elektrovilciena piedziņas realizācijai
8. Iegūts SAMT vadības racionāls algoritms ar sinusoidālās ieejas strāvas amplitūdas divkārtu vērtību pret izejas kondensatora slodzes strāvas vidējo vērtību.
9. Pašreizējo IGBT tranzistoru parametri atbilst elektrovilciena motora parametru nodrošināšanai ( $U_N = 825$  V,  $I_{pal} = 300$  A) . Tāpēc reāli ir izveidot maiņstrāvas elektrovilciena impulsregulētu piedziņu ar SAMT pārveidotājiem ieejā
10. Izveidotie vadības algoritmi un to realizācija nodrošina piedāvāto sistēmu normālu darbību.

## PUBLIKĀCIJU SARAKSTS

1. Rodionova I., Raņķis I. Vienfāzes invertora impulsu platuma regulēšana, *Enerģētika un elektrotehnika*, "Rīga, RTU, 2000 , 1.sēj. 40-46 lpp.
2. Žiravecka A., Rodionova I. Reaktīvās jaudas individuālās kompensācijas iespējas asinhronajiem dzinējiem. RTU zin.raksti *Enerģ. un elektrotehn.*, sēr. 4, sējums 4, 2001, 80-85 lpp.
3. Rodionova I., Raņķis I., Simakovs A. Strāvas kropļojumu kompensācija maiņstrāvas elektrovilciena piedziņā. - Rīga: *Enerģ. un elektron.*, sēr. 4, sējums 7, 2002. - 33-41 lpp.
4. Rodionova I., Raņķis I., Žiravecka A. Maiņstrāvas elektrovilciena reaktīvas jaudas kompensācija. RTU zin. rakstu krāj. "*Enerģ. Un elektrotehn.*", sēr.4, sējums 10. Rīga 2003, 29-34 lpp
5. Rodionova I., Raņķis I. Maiņstrāvas elektrovilciena impulsveida līdzstrāvas elektropiedziņa. RTU zin. rakstu krāj. "*Enerģ. Un elektrotehn.*", sēr.4, sējums 10, Rīga 2003, 97-101 lpp
6. Raņķis I., Rodionova I., Žiravecka A. Elastīgās reaktīvās jaudas kompensācijas sistēmas pētīšana. RTU zin.raksti *Enerģ. un elektrotehn.*, sēr. 4, sējums 11, 2004, 63-68 lpp.
7. Rodionova I. Vilces pārveidotāja sasaiste ar maiņstrāvas konlaktfīklu. RTU zin.raksti "*Enerģ. un elektrotehn.*", sēr. 4, sējums 11, 2004, 111-117 lpp.
8. Rodionova I., Žiravecka A., Ieejas filtra darbības režīmi - Rīga: RTU zin.raksti "*Enerģ. un elektron.*", sēr. 4, sējums 13 , 2004. - 121-129 lpp.
9. Rodionova I., Raņķis I. Operational Regimes of Input Filters // *Electronics and Electrical Engineering*. - Kaunas: Technologija, 2005. - N. 4 (60). - P. 33-36.