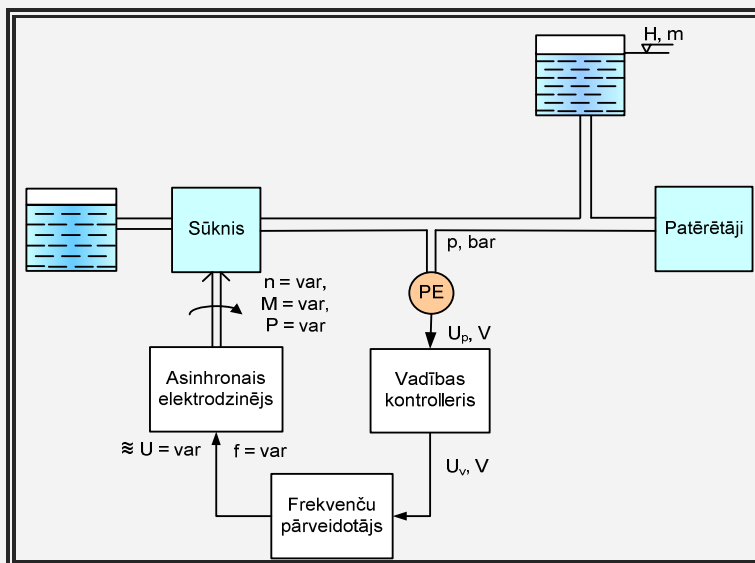


Andris Šnīders, Indulis Straume

AUTOMĀTISKĀ ELEKTRISKĀ PIEDZIŅA



Jelgava 2008

**LATVIJAS LAUKSAIMNIECĪBAS UNIVERSITĀTE
TEHNISKĀ FAKULTĀTE
LAUKSAIMNIECĪBAS ENERĢĒTIKAS INSTITŪTS**

Andris Šnīders, Indulis Straume

AUTOMĀTISKĀ ELEKTRISKĀ PIEDZIŅA

Mācību grāmata automātiskajā elektriskajā piedziņā

Jelgava 2008



Mācību grāmata sagatavota un izdota ESF projekta „Inženierzinātņu studiju satura modernizācija Latvijas Lauksaimniecības universitātē” ietvaros, projektu līdzfinansē Eiropas Savienība.

UDK 681.5

A.Šnīders, I.Straume. Automātiskā elektriskā piedziņa: Mācību grāmata. - Jelgava: LLU, 2008. – 164 lpp.

Mācību grāmata sagatavota atbilstoši LLU lauksaimniecības enerģētikas profesionālā bakalaura programmas studiju priekšmeta „Automātiskā elektriskā piedziņa” programmai. To varēs izmantot kā palīglīdzekli arī citu LLU bakalaura studiju programmu inženiertehnisko specialitāšu studenti tehnoloģisko procesu automatizācijas priekšmetu apguvei, kā arī lauksaimniecības inženierzinātnes enerģētikas novirziena specialitātes maģistranti ieskaites darba sagatavošanai izvēles kursa priekšmetā „Regulējamā automātiskā elektriskā piedziņa”.

Recenzenti:

Rīgas Tehniskās universitātes profesors Dr.habil.sc.ing. Jānis Greivulis.

LEEA valdes loceklis, energofirmas „Jauda” prezidents Jānis Šimins.

ISBN ISBN 978-9984-784-41-0

© Andris Šnīders, Indulis Straume
© LLU Tehniskā fakultāte

SATURS

levads.....	5
1. Elektriskās piedziņas enerģētika un mehānika.....	6
1.1. Pamatjēdzieni un klasifikācija.....	6
1.1.1. Neregulējamās elektriskās piedziņas funkcionālās shēmas.....	6
1.1.2. Regulējamās elektriskās piedziņas funkcionālās shēmas.....	6
1.2. Enerģijas pārvade un zudumi.....	16
1.2.1. Elektrodzinēja jaudas un siltuma bilance	16
1.2.2. Elektrodzinēja silšanas vienādojums un raksturīgnes	18
1.2.3. Elektrodzinēja silšanas procesa modelēšana Windows vidē	23
1.2.4. Tinumu izolācijas klases pēc termiskās izturības	28
1.3. Elektromehāniskie pārejas procesi.....	30
1.3.1. Asinhronā elektrodzinēja mehāniskās raksturīgnes.....	30
1.3.2. Mehānisko raksturīgu analītiskais apraksts	32
1.3.3. Mehānisko raksturīgu modelēšana Windows vidē.....	35
1.3.4. Asinhronās elektriskās piedziņas dinamiskās raksturīgnes	37
1.3.5. Elektromehānisko procesu modelēšana Windows vidē	41
1.4. Galvenie standartizētie darba režīmi un elektrodzinēja izvēle	44
1.4.1. Elektrodzinēja darbība un izvēle ilgstošā darba režīmā S1	45
1.4.2. Elektrodzinēja darbība un izvēle īslaicīgā darba režīmā S2.....	48
1.4.3. Elektrodzinēja darbība un izvēle atkārtoti-īslaicīgā režīmā S3	52
1.4.4. Cikliskais darba režīms ar rotācijas frekvences maiņu S8	55
2. Elektriskās piedziņas automātiskā palāide	56
2.1. Palāides veidu klasifikācija	56
2.2. Vadības un aizsardzības aparātūra.....	58
2.2.1. Automātslēdži, kontaktori un siltuma releji	58
2.2.2. Elektromagnētiskie un herkonu releji	67
2.2.3. Elektromehāniskie un elektroniskie laika releji	76
2.2.4. Ceļa-gala slēdži un rotācijas slēdži	82
2.3. Asinhronās elektriskās piedziņas tiešā palāide	90
2.3.1. Palāides strāvas un momenta raksturīgnes.....	90
2.3.2. Nereversējama asinhronā elektrodzinēja palāide.....	91
2.3.3. Reversējama asinhronā elektrodzinēja palāide.....	92
2.3.4. Asinhronā elektrodzinēja automātiskā reversīvā vadība	93
2.3.5. Secīgi bloķētu elektrisko piedziņu palāides shēma	95
2.3.6. Dēļu gatera mehānismu elektriskās piedziņas palāide.....	96
2.3.7. Plūsmas līnijas posmu secīgā palāide un apturēšana.....	98
2.3.8. Rezerves sūkņu iekārtas automātiskās palāides shēma.....	100
2.4. Palāide ar strāvas ierobežošanu elektrodzinēja statora ķēdē.....	101
2.4.1. Palāides strāvas un momenta raksturīgnes.....	103

2.4.2. Palaides shēma ar laika releju	104
2.4.3. Palaides shēma ar strāvas releju	105
2.4.4. Palaides shēma ar rotācijas slēdzi	106
2.5. Asinhronā elektrodzinēja palaide pie pazemināta sprieguma	107
2.5.1. Palaides strāvas un momenta raksturliķnes	107
2.5.2. Zvaigznes-trīsstūra palaides shēma ar laika releju	108
2.6. Asinhronās elektriskās piedziņas „mīkstā” palaide	109
2.6.1. „Mīkstās” palaides iekārtas uzbūve un raksturliķnes	110
2.6.2. „Mīkstās” palaides iekārtas izvēle un iestatīšana	113
2.6.3. Palaides shēma ar elektronisko un magnētisko palaidēju	117
2.6.4. Palaides un apturēšanas shēma ar laika releju	119
3. Elektriskās piedziņas bremsēšana un pozicionēšana	120
3.1. Trīsfāzu asinhrono elektrodzinēju bremsēšana ar pretslēgumu	121
3.1.1. Bremsēšanas princips, raksturliķnes un laiks	121
3.1.2. Nereversējama elektrodzinēja bremsēšana	124
3.1.3. Reversējama elektrodzinēja bremsēšana	125
3.2. Trīsfāzu asinhrono elektrodzinēju dinamiskā bremsēšana	128
3.2.1. Bremsēšanas princips, raksturliķnes un laiks	128
3.2.2. Dinamiskās bremsēšanas shēma ar laika releju	131
3.2.3. Bremsēšanas laika eksperimentāla noteikšana	133
3.3. Kondensatoru un magnētiskā bremsēšana	134
3.3.1. Kondensatoru bremsēšanas raksturliķnes un shēmas	134
3.3.2. Magnētiskās bremsēšanas raksturliķnes un shēmas	139
3.4. Trīsfāzu asinhrono elektrodzinēju kombinētā bremsēšana	141
3.4.1. Kondensatoru-magnētiskā bremsēšana	141
3.4.2. Kondensatoru-dinamiskā bremsēšana	143
4. Regulējamā asinhronā elektriskā piedziņa	146
4. 1. Rotācijas ātruma regulēšana ar polu skaita maiņu	146
4. 2. Rotācijas ātruma regulēšana ar frekvences maiņu	148
4. 3. Sprieguma un frekvences regulēšanas likumi	150
4.4. Pusvadītāju frekvenču pārveidotāji	152
4.4.1. Frekvenču pārveidotāju uzbūve un darbība	152
4.4.2. Sprieguma invertora darbība un raksturliķnes	154
4.4.3. Frekvenču regulējamās elektriskās piedziņas enerģētika	157
4.5. Sūkņu iekārtas ar frekvenču regulējamu elektrisko piedziņu	159
4.5.1. Centrālās sūkņa elektrodzinēja izvēles aprēķins	159
4.5.2. Regulējamās ūdensapgādes sistēmas vadības shēmas	160
4.5.3. Sūkņa vadības veida izvēle un elektroenerģijas patēriņš	162
LITERATŪRAS SARAKSTS	164

Ievads

Mūsdienu tehnoloģisko iekārtu un mehānismu darbināšanai plaši izmanto neregulējamo un regulējamo elektrisko piedziņu. Tās atbilstoša izvēle, pareiza ekspluatācija un optimāla vadība garantē ražošanas procesa norises drošumu un energoefektivitāti. Tādēļ katram inženierim lietderīgi apgūt pamatzināšanas par elektriskās piedziņas izvēles un automatizācijas principiem.

Mācību grāmata sastādīta atbilstoši LLU Lauksaimniecības enerģētikas bakalaurs studiju programmai priekšmetā „Automātiskā elektriskā piedziņa”. To var izmantot kā palīglīdzekli arī citu LLU bakalaurs studiju inženiertehnisko specialitāšu studenti tehnoloģisko iekārtu automatizācijas priekšmetu apguvei, kā arī Lauksaimniecības inženierzinātnes enerģētikas novirziena specialitātes maģistranti izvēles kursa priekšmetā „Regulējamā automātiskā elektriskā piedziņa”.

Lauksaimniecības stacionāro tehnoloģisko iekārtu un mehānismu darbināšanai praktiski izmanto tikai asinhronos elektrodzinējus. Tādēļ grāmatā nav apskatīta līdzstrāvas piedziņa, ar kuru var iepazīties beigās norādītajos literatūras avotos.

Pirmajā nodaļā apskatīti asinhronās elektriskās piedziņas pamatjēdzieni, mehāniskās raksturlīknes, darba režīmi, izvēles nosacījumi, silšana, dinamiskie pārejas procesi un to modelēšanas metodika **Matlab** vidē.

Otrā nodaļā veltīta asinhronās elektriskās piedziņas automātiskās palaides metodēm, palaides strāvas ierobežošanas paņēmieniem, to praktiskai realizācijai un vadības aizsardzības aparātūras izvēlei. Nozīmīga vieta ierādīta elektroniskās „mīkstās” palaides iekārtām.

Trešajā nodaļā apskatītas elektrodzinēju automātiskās bremsēšanas metodes, to efektivitāte, realizācija un praktiskā pielietošana elektriskās piedziņas pozicionēšanas sistēmās.

Ceturtnā nodaļā veltīta frekvenču regulējamai elektriskajai piedziņai, izmantojot pusvadītāju frekvenču pārveidotājus. Apskatīta frekvenču pārveidotāju uzbūve, darbības princips un pielietošana regulējamo tehnoloģisko iekārtu automatizācijā. Apskatīta frekvenču regulējamu sūkņu iekārtu elektriskā piedziņa un tās izmantošanas efektivitāte ūdensapgādes sistēmās.

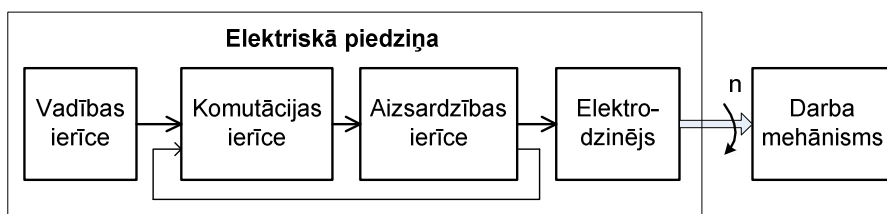
Mācību grāmatas 1., 2. un 3. nodaļu sastādījis LLU Tehniskās fakultātes Lauksaimniecības enerģētikas institūta profesors Andris Šnīders, bet 4. nodaļu - lektors Indulis Straume, kurš ieguldījis arī lielu darbu grāmatas attēlu maketēšanā.

1. Elektriskās piedziņas enerģētika un mehānika

1.1. Pamatjēdzieni un klasifikācija

1.1.1. Neregulējamas elektriskās piedziņas funkcionālās shēmas

Tradicionāli elektriskā piedziņa sastāv no **vadības ierīces**, **komutācijas ierīces**, **aizsardzības ierīces** un **elektrodzinēja** (1.1. att). Šāda struktūra ir neregulējamai elektriskajai piedziņai, kuras elektrodzinēja vārpstas rotācijas ātrums n (apgr./min) netiek regulēts. Rotācijas ātruma izmaiņa notiek neorganizēti, mainoties slīdei, kuru nosaka darba mehānisma pieprasītā mehāniskā jauda P_m un moments M , kā arī elektriskā tīkla spriegums U .



1.1. att. Elektriskās piedziņas struktūra un komponentes.

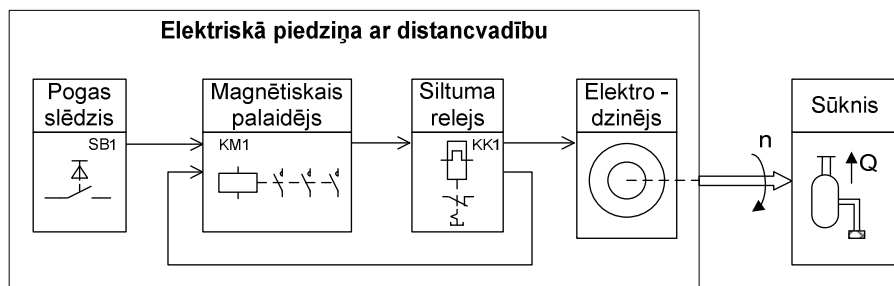
Vadības ierīce formē komandu **komutācijas ierīcei**, kura automātiski ieslēdz vai izslēdz **elektrodzinēju**. **Aizsardzības ierīce** kontrolē elektrodzinēja noslodzi un elektriskā tīkla parametrus. Pārslodzes un avārijas režīmos aizsardzības ierīce dod atgriezeniskās saites signālu uz komutācijas ierīci, kura savlaicīgi atslēdz elektrodzinēju no elektriskā tīkla, novēršot tā strukturālo atteici.

Vienkāršākais elektriskās piedziņas vadības veids ir **distancvadība** (1.2. att.). Elektrodzinējs tiek ieslēgts un izslēgts ar **rokas vadības** slēdžu palīdzību. Parasti izmanto **pogas tipa slēdžus**, ar kuriem īslaicīgi saslēdz vai pārtrauc vadības ķēdi.

Tradicionāli kā komutācijas ierīces izmanto **magnētiskos palaidējus**, kuri paredzēti trīsfāzu asinhrono elektrodzinēju jaudas ķēžu automātiskai komutācijai (saslēgšanai vai pārtraukšanai) distancvadības un automātiskās vadības shēmās.

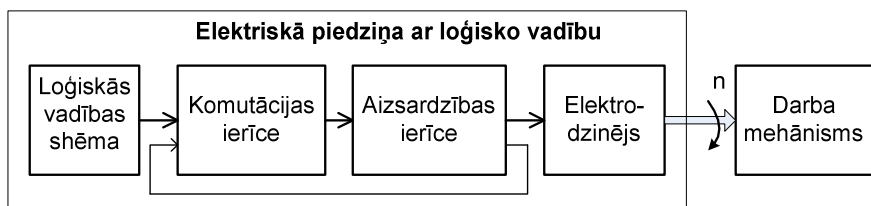
Plaši izplatītas elektrodzinēju aizsardzības ierīces ir **siltuma releji**. Tie kontrolē elektrodzinēja strāvu jaudas ķēdē. **Ilgstošas tehnoloģiskas pārslodzes**, **rotora nosprūšanas** un **lielas elektriskā tīkla asimetrijas** (fāzes izkrišana) gadījumos siltuma relejs pārtrauc magnētiskā palaidēja vadības ķēdi un elektrodzinējs tiek

savlaicīgi atslēgts no elektriskā tīkla, novēršot tā statora tinumu pārkaršanu un izolācijas caursiti. Siltuma releji vislabāk piemēroti elektriskās piedziņas, kas darbojas ilgstošā režīmā ar vienmērīgu slodzi, aizsardzībai pret strukturālu atteici.



1.2. att. Elektriskās piedziņas ar distancvadību struktūra un komponentes.

Elektriskās piedziņas **automātisko vadību** realizē ar **loģiskās (diskrētās)** vadības un nepārtrauktās **pozicionālās** vai **analogās** vadības sistēmām. Tradicionāli neregulējamas elektriskās piedziņas loģisko vadību realizē ar releju **loģiskās vadības shēmām**, kurām ir cieta struktūra (tās nav programmējamās). Loģiskās vadības sistēma ir valēja, jo tai nav galvenās atgriezeniskās saites (1.3. att.). Loģiskā vadība nodrošina loģisko operāciju secīgu izpildi un šīs izpildes pārbaudi, izmantojot iekšējās sensorās saites, bet tā nekontrolē darba rezultātu.



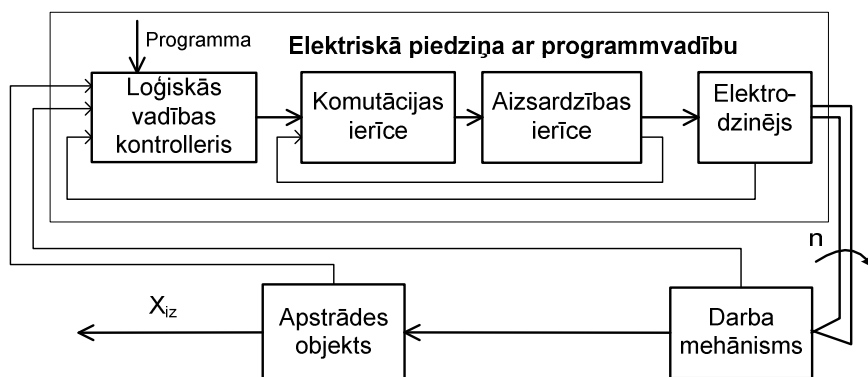
1.3. att. Valēja sistēma ar elektriskās piedziņas loģisko vadību.

Loģiskās vadības shēmas operē ar divu līmeņu diskrētiem signāliem jeb stāvokļiem, kuri mainās lēcienveidīgi. Jebkura loģiskās vadības shēmas elementa aktīvu stāvokli „**ieslēgts**”, kam atbilst augsta līmeņa elektriskais signāls apzīmē ar loģisko vieninieku „**1**”, bet pasīvu stāvokli „**izslēgts**”, kam atbilst zema līmeņa elektriskais signāls, apzīmē ar loģisko nulli „**0**”.

Elektriskās piedziņas loģiskās vadības shēmas var izveidot no kontaktu elementiem – elektromagnētiskajiem un herkonu relejiem, magnētiskajiem palaidējiem, laika relejiem, gala – ceļa slēdžiem, rotācijas slēdžiem, kā arī no bezkontakta elementiem – ciparu mikroshēmām, kuras realizē loģiskās funkcijas (**UN**, **VAI**, **NE**, **UN-NE**, **VAI-NE** u.c.), triggeriem, taimeriem, impulsu skaitītājiem, elektroniskajiem sensoriem u.c.

Loģiskās vadības raksturīgi piemēri ir celšanas mehānismu (celtni, lifti), daudzpiedziņas darbgaldus (dēļu gateri) un plūsmas līniju mehānismu elektriskās piedziņas loģiskā secīgā vadība, kā arī bloķēšana kļūmju gadījumos.

Augstāka loģiskās vadības pakāpe ir **programmavadība**, izmantojot loģiskos programmējamos **kontrollerus** (1.4.att.). Loģiskā kontrollera galvenā priekšrocība salīdzinājumā ar cietas struktūras loģiskās vadības shēmām ir elastība, t.i., iespēja ātri izmainīt loģiskās vadības shēmu ar programmatiskiem līdzekļiem.



1.4. att. **Valēja sistēma ar elektriskās piedziņas programmavadību.**

Par **programmavadību** sauc tādu automātiskās vadības principu, kad vadības iedarbe uz tehnoloģisko objektu tiek formēta kā laika funkcija pēc iepriekš uzdotas, noteiktas programmas.

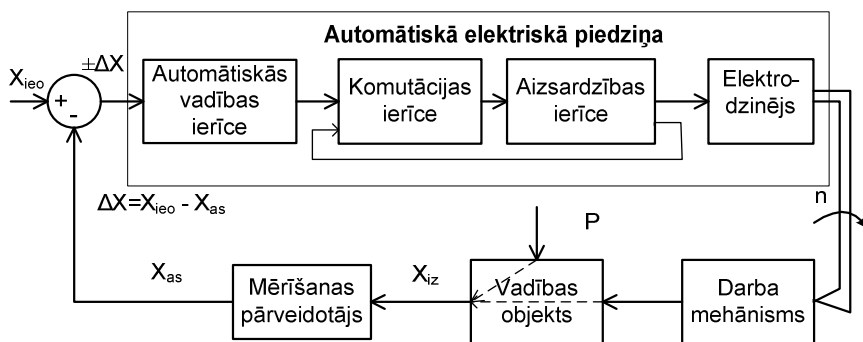
Arī **programmavadības sistēma ir valēja**, jo tā nekoriģē savu darbību pēc darba rezultāta, proti, tā nekontrolē apstrādes objekta izejas parametru X_{iz} . Taču, lai programmavadības sistēma droši darbotos, nepieciešama katra programmas soļa izpildes kontrolē. Šim nolūkam izmanto iekšējās sensorās saites, kas kontrolē atsevišķu sistēmas komponentu darbību un ieprogrammēto operāciju izpildi (1.4.

att.). Rodoties atteicei kādā no sistēmas komponentēm, tās darbība tiek automātiski bloķēta līdz kļūmes novēršanai.

Lauksaimniecībā mehānismu elektriskās piedziņas programmvadību izmanto objektos ar stingri noteiktiem darba režīmiem un konstantām perturbācijām, kā arī gadījumos, ja nav augstas prasības attiecībā uz tehnoloģisko parametru stabilizācijas precizitāti, piemēram, ganību zālāja laistīšanai, izmantojot sūkni ar elektrodzinēja programmvadību.

Rūpniecībā programmvadības principu plaši izmanto darbgaldu un rūpniecības robotu automātiskai vadībai. Pēc šī principa tiek vadīti rūpniecības roboti ar noteiktu (determinētu) manipulatora kustības trajektoriju.

Tehnoloģisko parametru (temperatūras, līmeņa, spiediena u.c.) automātiskai stabilizācijai noteiktā ierobežotā apgabalā izmanto izpildiekārtas (ventilatorus, sūknus, kompresorus u.c.) ar neregulējamu elektrisko piedziņu, kuru vada automātiski pēc **pozicionālās** vadības principa (1.5. att.). Šāda sistēma, atšķirībā no iepriekš apskatītajiem piemēriem, ir slēgta sistēma ar negatīvu atgriezenisko saiti, kurā slēgts jutīgs mērīšanas pārveidotājs. Atgriezeniskā saite veido noslēgtu informācijas pārvades ķēdi no vadības objekta izejas uz izpildiekārtas elektriskās piedziņas automātiskās vadības ierīces ieejas diferenciālo shēmu, kura formē regulējamā parametra X_{iz} novirzes signālu ΔX no uzdotā lieluma X_{ieo} ($\Delta X = X_{ieo} - X_{as}$), kur X_{as} – atgriezeniskās saites signāls. Novirzi izraisa perturbācija (ārējā iedarbe) P , piemēram, slodze, kas tieši iespaido vadības objekta izejas lielumu X_{iz} .



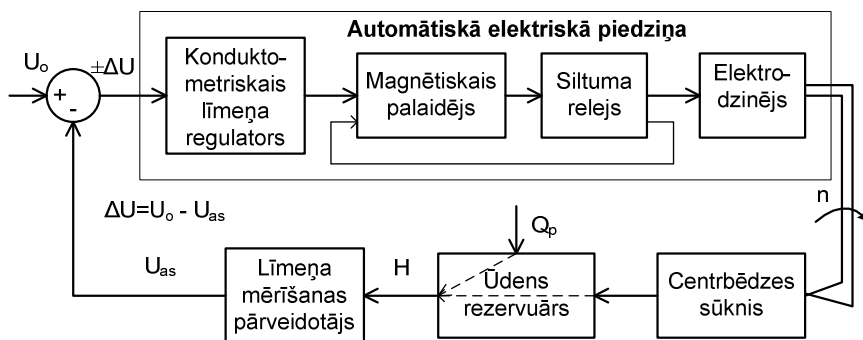
1.5. att. Slēgta sistēma ar neregulējamu automātisko elektrisko piedziņu.

Kā piemēru apskatīsim ūdens līmeņa pozicionālās automātiskās regulēšanas sistēmu (1.6. att.). Tā sastāv no centrālās sūkņa ar elektrisko piedziņu, kuru vada konduktometriskais līmeņa regulators.

Galvenā perturbācija, kas iedarbojas uz tehnoloģisko objektu ir ūdens patēriņš Q_p . Neatkarīgi no patēriņa lieluma rezervuārā tiek nodrošināta noteikta ūdens daudzuma rezerve.

Regulējamais lielums ir līmenis H , kuru kontrolē līmeņa mērīšanas pārveidotājs, kas sastāv no diviem nekorodējoša metāla (niķelis, nerūsējošais tērauds) elektrodiem ar dažādu garumu. Metāla elektrodi iemontēti rezervuārā un kontrolē maksimālo un minimālo iestatīto līmeni.

Mērīšanas signāls ir elektriskā strāva, kas plūst caur ūdeni un metāla elektrodiem. Strāvas ķēdi noslēdz ūdens, pieskaroties elektrodam. Līdz ar to tiek kontrolētas divas pozīcijas (divi diskreti līmeņi) - minimālais H_{min} (ūdens pieskaras garajam elektrodam) un maksimālais H_{max} (ūdens pieskaras īsajam elektrodam).



1.6. att. Ūdens līmeņa automātiskās regulēšanas sistēma.

Ūdens līmeņa divpozīciju regulēšanas sistēma darbojas sekojoši. Ja ūdens līmenis rezervuārā nokrītas zem minimālā - H_{min} , konduktometriskais līmeņa regulators ieslēdz magnētisko palaidēju, kurš iedarbina sūkņa elektrodzinēju. Lai ūdens līmenis paaugstinātos, sūkņa ražīgumam jābūt lielākam par maksimālo patēriņu ($Q_s > Q_{pmax}$). Kad ūdens līmenis rezervuārā sasniedz maksimālo iestatīto vērtību H_{max} , līmeņa regulators izslēdz magnētisko palaidēju un ūdens padeve uz rezervuāru tiek pārtraukta. Iztukšojoties regulēšanas tilpumam $V = (H_{max} - H_{min}) \cdot S$, kur S – rezervuāra šķērsgriezuma laukums, notiek sūkņa atkārtota ieslēgšana.

1.1.2. Regulējamas elektriskās piedziņas funkcionālās shēmas

Regulējamā elektriskā piedziņa atšķiras ar to, ka tiek regulēts elektrodzinēja rotācijas ātrums (**n = var.**). Līdz ar to vienlaicīgi var regulēt elektrodzinēja jaudu (**P = var.**) un momentu (**M = var.**).

Līdzstrāvas elektriskajā piedziņā elektrodzinēja rotācijas ātrumu regulē ar barošanas sprieguma maiņu, izmantojot regulējamu taisngriezi vai pusvadītāju sprieguma pārveidotāju. Līdzstrāvas elektrodzinēja ar neatkarīgo ierosmi rotācijas ātrums mainās proporcionāli enkura spriegumam **U**:

$$n = \frac{U - I_e \cdot R}{c_E \cdot \Phi_{ie}}, \quad (1.1)$$

kur I_e – enkura strāva, A;

R – enkura ķēdes elektriskā pretestība, Ω ;

c_E – elektriskā konstante, kuru nosaka elektrodzinēja enkura tinuma parametri;

Φ_{ie} – ierosmes magnētiskā plūsma, W_b .

Tā kā līdzstrāvas elektrodzinējs ir kontaktu elektriskā mašīna, tad to nav iespējams ideāli aizsargāt pret vides agresīvo iedarbību (augsts relatīvais mitrums, liels putekļu blīvums, ķīmiski un bioloģiski agresīvas komponentes, potenciāli sprādzienbīstamas vides veidošanās), kas raksturīga lauksaimniecības ražošanas objektiem (lopu fermas, graudu kaltes, minerālmēslu noliktavas, lopbarības miltu dzirnavas, zāģmateriālu ražošanas cehi). Tādēļ lauksaimniecības tehnoloģiskajās iekārtās līdzstrāvas elektrisko piedziņu neizmanto.

Kā drošākā, ekonomiskākā un lauksaimniecības apstākļiem vispiemērotākā ir maiņstrāvas elektriskā piedziņa ar īsi slēgta rotora asinhrono elektrodzinēju. Šādam elektrodzinējam ir vairākas būtiskas priekšrocības:

- kompakta bezkontakta elektriskā mašīna ar augstu resursu (līdz 40 tūkst. h) un lielu mehāniskās pārslodzes spēju;
- augsta aizsardzības pakāpe pret apkārtējās vides iedarbību, izvēloties dotajiem apstākļiem atbilstošu modifikāciju (ar slēgtu izpildījumu, mitruma-sala, putekļu, ķīmiski aizsargātu vai eksploziju drošu izpildījumu);
- maza materiālietilpība un augsts lietderības koeficients (līdz 96% - lielas jaudas elektrodzinējiem);
- iespēja realizēt drošas distancvadības un automātiskās vadības shēmas, izmantojot gan kontaktu, gan bezkontakta (pusvadītāju) tipa iekārtas;

- iespēja realizēt lineāri regulējamu piedziņu ar frekvenču pārveidotāju.

Turpmāk apskatīsim tikai asinhrono elektrisko piedziņu. Ar citiem elektriskās piedziņas veidiem var iepazīties literatūras sarakstā norādītajos avotos [1, 2, 8, 10].

Asinhronā elektrodzinēja rotācijas ātruma regulēšanas iespējas raksturo sekojoša izteiksme:

$$n = n_s(1 - s) = \frac{60f}{p}(1 - s), \quad (1.2)$$

kur n – elektrodzinēja vārpstas rotācijas ātrums (apgriezieni/minūtē), min^{-1} ;

n_s – sinhronais rotācijas ātrums (ātrums ar kādu rotē magnētiskais lauks), min^{-1} ;

$s = (n_s - n)/n_s$ – elektrodzinēja rotora slīde attiecībā pret magnētisko lauku;

f – elektrodzinēja barošanas sprieguma frekvence (herci), s^{-1} ;

p – polu pāru skaits, kuru nosaka elektrodzinēja tinumu spoļu skaits uz vienu fāzi (vienam polu pārim atbilst divas spoles uz fāzi).

Izteiksme (1.2) parāda, ka asinhronā elektrodzinēja rotācijas ātrumu var regulēt divējādi:

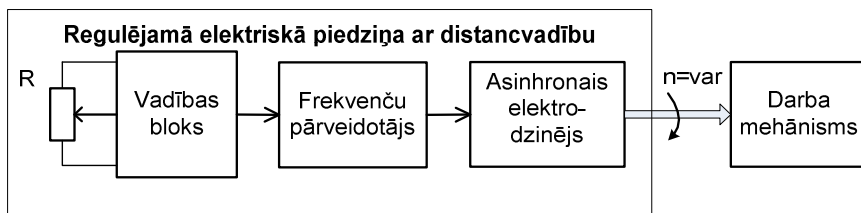
- mainot barošanas sprieguma frekvenci f ;
- mainot statora tinuma polu pāru skaitu p .

Polu pāru skaitu p var izmainīt, mainot spoļu slēgumus. Lai izveidotu asinhrono elektrodzinēju ar diviem vai vairākiem diskrētiem ātrumiem (pieejami triju un pat četru ātrumu dzinēji), nepieciešams palielināt statora tinumu spoļu skaitu, kas neizbēgami palielina elektrodzinēja gabarītus, paaugstina tā materiālietilpību un cenu. Vairāku ātrumu elektrodzinēju pielietojums pēdējā laikā būtiski samazinās.

Mainot barošanas sprieguma frekvenci f , elektrodzinēja rotācijas ātrumu n var regulēt vienmērīgi plašās robežās. Mūsdienās šim nolūkam izmanto frekvenču pārveidotājus. Vienlaicīgi ar frekvenci f tiek regulēts spriegums U . Atkarībā no sprieguma regulēšanas veida mainās arī elektrodzinēja jauda P un (vai) moments M . Šie jautājumi detalizēti apskatīti 4. nodaļā.

Tāpat kā neregulējamā piedziņa arī regulējamā elektriskā piedziņa tiek izmantota distancvadības un automātiskās vadības režīmos. Regulējamā elektriskā piedziņa ar distancvadību (1.7. att.) sastāv no vadības bloka, pusvadītāju frekvenču pārveidotāja un asinhronā elektrodzinēja. Vadības bloks parasti ir iebūvēts frekvenču pārveidotājā. Nepieciešamo frekvenci f un tai atbilstošo rotācijas ātrumu n iestata ar

tastatūru vai potenciometru R . Asinhronā elektrodzinēja rotācijas ātrums mainās tieši proporcionāli (lineāri) barošanas sprieguma frekvencei.

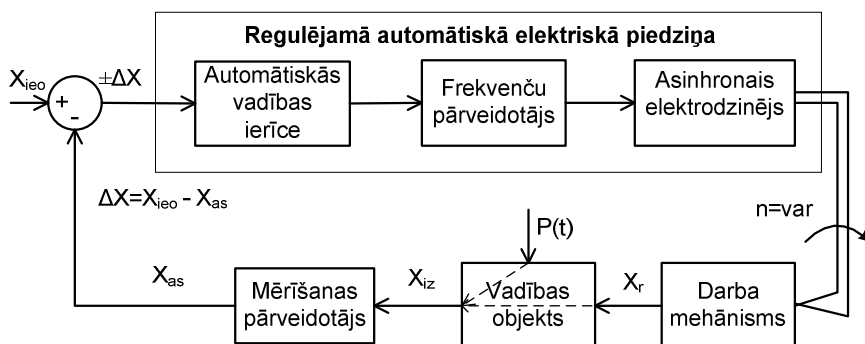


1.7. att. Frekvenču regulējamās elektriskās piedziņas struktūra.

Mehānismu regulējamo elektrisko piedziņu izmanto slēgtajās automātiskās vadības sistēmās (AVS) ar negatīvu atgriezenisko saiti (1.8. att.). AVS sastāv no frekvenču regulējamās asinhronās piedziņas ar darba mehānismu kā izpildiekārtu, kura rada regulējošo iedarbi X_r uz vadības objektu ar mērķi kompensēt perturbācijas $P(t)$ iespaidu uz regulējamo parametru X_{iz} , ko izmēra mērīšanas pārveidotājs un pārveido proporcionālā elektriskā signālā X_{as} .

Diferenciālā shēma salīdzina atgriezeniskās saites signālu X_{as} ar sistēmas ieejas signālu X_{ieo} un formē novirzes signālu $\Delta X = X_{ieo} - X_{as}$, kas tiek padots uz automātiskās vadības ierīci.

Atkarībā no novirzes ΔX lieluma izpildiekārta ar regulējamo elektrisko piedziņu izmaina regulējošo iedarbi X_r uz vadības objektu un nodrošina tajā nepieciešamos darba režīmus un izejas parametrus atbilstoši uzdotiem kvalitātes kritērijiem.

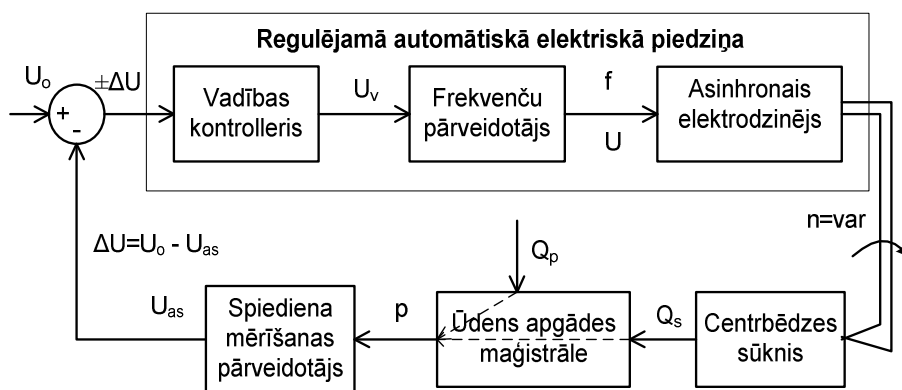


1.8. att. Slēgta sistēma ar regulējamo automātisko elektrisko piedziņu.

Slēgtas AVS ar regulējamu izpildiekārtas elektrisko piedziņu priekšrocības:

- vienmērīgi mainīga regulējošā iedarbe uz vadības objektu un tajā notiekošā tehnoloģiskā procesa nepārtraukta kontrole caur atgriezenisko saiti ar mērīšanas pārveidotāju;
- augsta vadības objekta izejas lieluma X_{iz} (vai vairāku lielumu) regulēšanas stabilitāte un precizitāte.

Kā piemēru apskatīsim slēgtas AVS ar automātiski regulējamu elektrisko piedziņu pielietojumu lielajā ūdensapgādes sistēmā, kur kā vadības objekts ir ciemata vai pilsētas ūdensapgādes tīkla maģistrāle (1.9. att.).



1.9. att. Spiediena automātiska regulēšana ūdensapgādes maģistrālē.

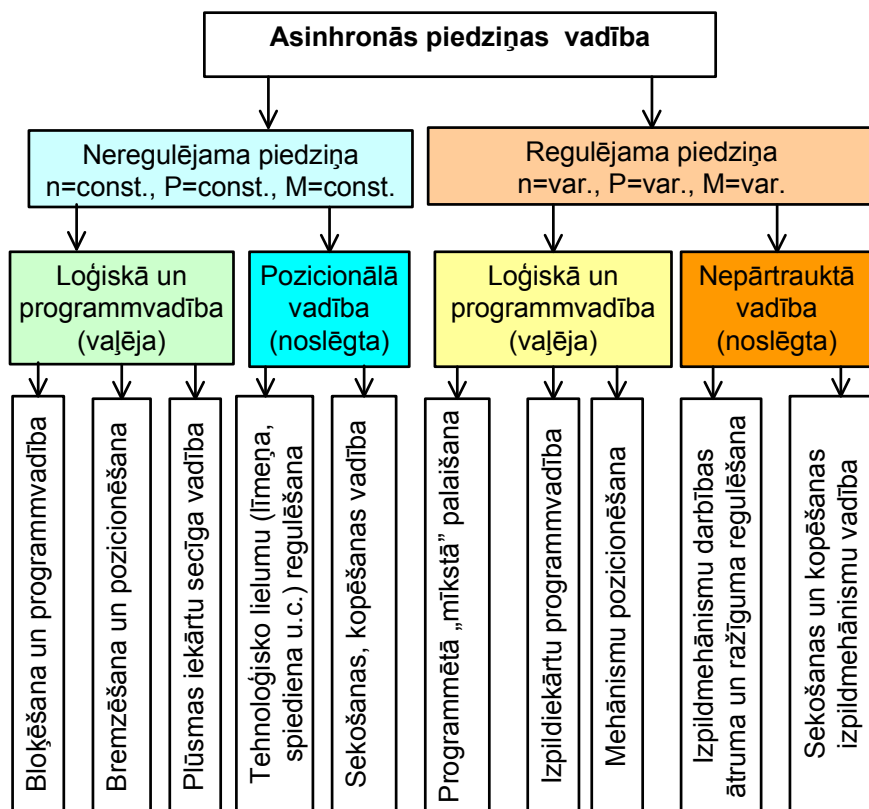
AVS sastāv no centrālās sūkņa kā izpildiekārtas ar frekvenču regulējamu asinhrono piedziņu, kuru vada ar programmējamu regulējošo kontrolleri. Vadības objekta regulējošā iedarbe ir mainīgais sūkņa ražīgums Q_s . Galvenā perturbācija - ūdens patēriņš Q_p tieši iespaido stabilizējamo lielumu - spiedienu p maģistrālē. Ar spriegumu U_0 iestata nepieciešamo spiedienu p_0 , piemēram, 3 bāri.

Ja reālais spiediens, ko izmēra spiediena mērīšanas pārveidotājs, pazeminās, tad pieaug novirzes spriegums $\Delta U = U_0 - U_{as}$ kontrollera ieejā un vadības spriegums U_v tā izejā. Tā rezultātā palielinās arī frekvenču pārveidotāja izejas spriegums U un frekvence f . Proporcioniāli palielinās asinhronā elektrodzinēja rotācijas ātrums n un sūkņa ražīgums Q_s . Līdz ar to ūdens spiediens maģistrālē paaugstinās līdz uzdotajai vērtībai p_0 . Šāda AVS nodrošina stabilu spiedienu neatkarīgi no patēriņa.

Neregulējamas un regulējamas asinhronās piedziņas vadības veidu klasifikācija apskatīta 1.10. attēlā. Loģiskās vadības un programmvadības sistēmas ir vaļējas ar nenoslēgtu vadības ķēdi, jo tās izpilda noteiktas loģiskās un ieprogrammētās darbības, bet neveic darba rezultāta kontroli.

Tehnoloģisko iekārtu pozicionālās un nepārtrauktās analogās vai ciparu vadības sistēmas ir ar noslēgtu vadības kontūru. To nodrošina atgriezeniskā saite no sistēmas izejas uz ieeju. Šajā saitē ieslēgtais mērīšanas pārveidotājs nepārtraukti mēra regulējamo lielumu un nodrošina tā automātisku korekciju, ja izmainās slodze uz vadības objektu vai citi faktori, piemēram, apkārtējās vides apstākļi, kas tieši vai netieši iespaido vadības objekta darbību.

Turpmākajās nodaļās apskatīta neregulējamas un regulējamas asinhronās piedziņas vadības realizācija, izmantojot kontaktu tipa un pusvadītāju iekārtas.



1.10. att. Asinhronās elektriskās piedziņas vadības metožu klasifikācija.

1.2. Energijas pārvade un zudumi

1.2.1. Elektrodzinēja jaudas un siltuma balance

Elektrodzinējam pievadītā elektriskā jauda P_e pārveidojas mehāniskajā jaudā P_m , kas tiek noņemta no elektrodzinēja vārpstas un pārvēršas lietderīgajā darbā, un zudumu komponentē ΔP_z , kas pārvēršas siltuma plūsmā Q (1.11. att.).

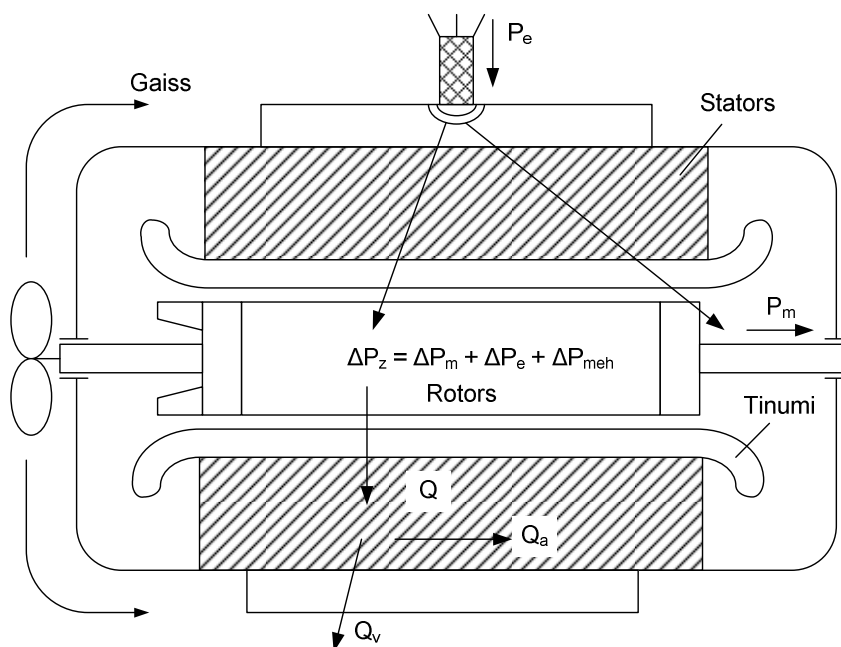
Asinhronā elektrodzinēja jaudu bilances vienādojums:

$$P_e = P_m + \Delta P_z = P_m + (\Delta P_m + \Delta P_{meh} + \Delta P_e), \quad (1.3)$$

kur ΔP_m – magnētiskie zudumi statora un rotora elektrotehniskajā tēraudā, W;

ΔP_{meh} – mehāniskie zudumi gultņos un ventilatorā, W;

ΔP_e – mainīgie elektriskie zudumi statora un rotora elektriskajās ķēdēs, W.



1.11. att. Asinhronā elektrodzinēja jaudas un siltuma plūsmu balance.

Magnētiskos zudumus rada histerēzes (pārmagnetizēšanās) parādības statora un rotora magnētiskajās ķēdēs, kā arī nesinusoidālās magnetizācijas plūsmas

augstākās harmonikas. Neregulējamai piedziņai, kurai magnetizācijas plūsmas mainās nebūtiski, var pieņemt, ka $\Delta P_m = \text{const}$.

Mehāniskos zudumus rada rotējošās daļas berze un inerce, elektrodzinēja dzesēšanas ventilatora patērētā mehāniskā jauda, kā arī magnetizācijas spēka augstāko harmoniku radītie papildmomenti elektrodzinēja biežas palaišanas režīmos. Neregulējamai piedziņai, kas darbojas ar vienmērīgu slodzi var pieņemt, ka mehāniskie zudumi ir nemainīgi ($\Delta P_{\text{meh}} = \text{const.}$).

Elektriskie zudumi, kas rodas statora tinumā un rotora elektriskajā ķēdē sastāda mainīgo zudumu komponenti. Elektriskie zudumi ir atkarīgi no rotora un statora ķēžu elektriskajām pretestībām un strāvām:

$$\Delta P_e = 3(I_1^2 \cdot R_1 + I_2^2 \cdot R_2), \quad (1.4.)$$

kur I_1 un I_2 – statora un rotora fāzes strāvas, A;

R_1 un R_2 - statora un rotora fāzes pretestības, Ω .

Mainoties elektrodzinēja slodzei, izmainās statora un rotora strāvas, tādēļ būtiski izmainās arī elektriskie zudumi.

Visa zudumu jauda pārvēršas siltuma plūsmā Q , kas paaugstina elektrodzinēja temperatūru un tiek utilizēta apkārtējā vidē:

$$\Delta P_z = Q = Q_a + Q_v, \quad (1.5)$$

kur Q_a – elektrodzinējā akumulētā siltuma plūsma, W;

Q_v – apkārtējai videi atdotā siltuma plūsma, W;

Lai veiktu elektrodzinēja silšanas aprēķinus, jānosaka zudumu jauda. To var aprēķināt no jaudu bilances vienādojuma (1.3):

$$\Delta P_z = P_e - P_m = \frac{P_m}{\eta} - P_m = P_m \frac{1 - \eta}{\eta}, \quad (1.6)$$

kur η – elektrodzinēja lietderības koeficients.

Zudumi mainās atkarībā no jaudas P_m un lietderības koeficienta η . Nominālos zudumus var aprēķināt, izmantojot elektrodzinēja kataloga datus P_{nom} un η_{nom} .

Mainoties slodzei, izmainās elektrodzinēja lietderības koeficients. Palielinot slodzi lietderības koeficients paaugstinās. Nenoslogota elektrodzinēja lietderības koeficients ir mazāks par nominālo. Dažos katalogos dota lietderības koeficienta atkarība no slodzes, kas dod iespēju veikt zudumu aprēķinu pie dažādām slodzēm.

Piemērs. Aprēķināsim zudumu jaudu pēc kataloga datiem. Doti sekojoši lielumi:

$$1. P_{sl1} = P_{nom} = 11 \text{ kW}, \eta_{nom} = 0.93; 2. P_{sl2} = 0.75 P_{nom}, \eta_{0.75} = 0.91;$$

$$3. P_{sl3} = 1.25 P_{nom}, \eta_{1.25} = 0.945.$$

Atrisinājums. 1. $\Delta P_{znom} = P_{nom} \frac{1 - \eta_{nom}}{\eta_{nom}} = 11 \cdot \frac{1 - 0.93}{0.93} = 0.83 \text{ kW};$

$$2. \Delta P_{z0.75} = 0.75 P_{nom} \frac{1 - \eta_{0.75}}{\eta_{0.75}} = 0.75 \cdot 11 \cdot \frac{1 - 0.91}{0.91} = 0.82 \text{ kW};$$

$$3. \Delta P_{z1.25} = 1.25 P_{nom} \frac{1 - \eta_{1.25}}{\eta_{1.25}} = 1.25 \cdot 11 \cdot \frac{1 - 0.945}{0.945} = 0.80 \text{ kW}.$$

Aprēķinu rezultāti parāda, ka svarīga nozīme ir elektrodzinēja lietderības koeficientam. Jo augstāks lietderības koeficients, jo mazāki zudumi un augstāka elektriskās piedziņas darbības efektivitāte. Sakarā ar pazeminātu lietderības koeficientu, par 75% slogota elektrodzinēja jaudas zudumi gandrīz vienādi ar 100% slogota elektrodzinēja zudumiem. Turpretī paaugstināts lietderības koeficients pie 25% pārslodzes rada mazākus zudumus, nekā par 25% nenoslogots elektrodzinējs ar 3.5% zemāku lietderības koeficientu.

1.2.2. Elektrodzinēja silšanas vienādojums un raksturlīknes

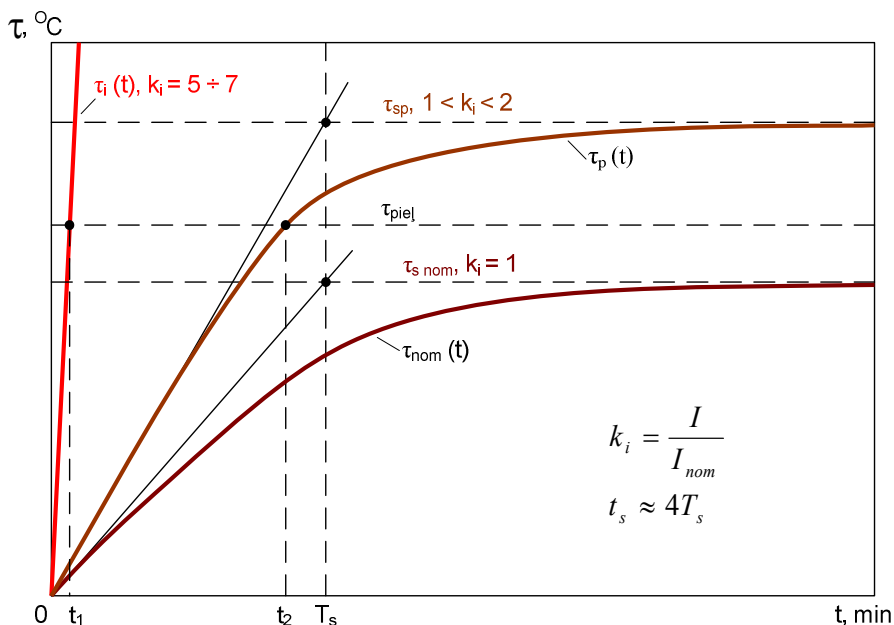
Elektrodzinēja silšana ir viens no svarīgākajiem faktoriem, kas nosaka tā jaudas un izpildījuma izvēli elektriskās piedziņas sistēmā. Silšanas virstemperatūru τ (temperatūras paaugstinājumu virs vides temperatūras θ_v) rada zudumu jauda ΔP_z . Jo lielāki jaudas zudumi un sliktāki siltuma apmaiņas apstākļi ar apkārtējo vidi (augsta temperatūra un relatīvais mitrums, liels putekļu blīvums, dažādi nosēdumi uz korpusa), jo augstāka elektrodzinēja komponentu (tinumu, statora korpusa, rotora korpusa un gultņu) temperatūra.

Asinhronā elektrodzinēja jutīgākā komponente pret termisko slodzi ir statora tinums. Tādēļ tā silšanai pievērš vislielāko uzmanību. Ap 80% asinhrono elektrodzinēju strukturālo atteihu ražošanā rada tinumu bojājumi, kurus izraisa termiskas un elektriskas pārslodzes. Tādēļ elektrodzinēja silšanu parasti identificē ar tā statora tinumu silšanu, kuru temperatūra ir augstāka nekā pārējām daļām.

Lai vienkāršotu silšanas procesa analīzi elektrodzinēju apskata kā homogēnu (viendabīgu) ķermeni ar pielīdzinātu masu un siltumietilpību. Elektrodzinēja siltumtehnisko parametru aprēķins ir sarežģīts un darbietilpīgs, tādēļ to noteikšanai izmanto eksperimentālas metodes, uzņemot tinumu temperatūras pārejas procesa raksturlīknes pie konstanta barošanas sprieguma un dažādām slodzēm.

Kā slodzi raksturojošu lielumu ērti izmantot statora tinuma strāvu I , ko var viegli izmērīt un reģistrēt. Tad elektrodzinēja noslodzi izsaka ar slodzes koeficientu pēc strāvas: $k_i = I/I_{nom}$, kur I_{nom} – elektrodzinēja nominālā strāva, A. Lai izmērītu tinumu temperatūras nestacionāro izmaiņu ar mazu dinamisko mērīšanas kļūdu, elektrodzinēja statora tinumu pieres daļās iemontē mazu gabarītu jutīgus temperatūras mērīšanas pārveidotājus (metāla termopārus vai pusvadītāju termistorus), kuru izejas signālus apstrādā un reģistrē ar datu logeriem.

Elektrodzinēja tinumu virstemperatūras pārejas procesa raksturlīknes $\tau = f(t)$ pie dažādiem elektriskās slodzes koeficientiem k_i vispārīgā veidā parādītas 1.12. attēlā.



1.12. att. Asinhronā elektrodzinēja silšanas raksturlīknes dažādām slodzēm.

Elektrodzinēja sākuma temperatūra vienāda ar vides temperatūru $\theta_0 = \theta_v$, tādēļ $\tau_0 = \theta_0 - \theta_v = 0$ °C. Nomināli slogota elektrodzinēja virstemperatūra sasniedz stacionāru (nostabilizējušos) vērtību, kas mazāka par pieļaujamo dotajai izolācijas klasei ($\tau_{snom} < \tau_{pieļ.}$) (1.12. att.). Elektrodzinēja silšana notiek pakāpeniski ar noteiktu inerci pēc eksponenciāla likuma. Inerci raksturo silšanas laika konstante T_s , kuru var noteikt grafoanalītiski velkot pieskari no raksturlīknes sākumpunkta līdz tā krusto ordinātu τ_{snom} . Velkot iegūtā krustpunkta projekciju uz laika t asi, iegūst T_s vērtību.

Laika intervālā, kas vienāds ar laika konstanti T_s , virstemperatūra sasniedz **63%** no stacionārās vērtības ($\tau_{Ts} = 0.63 \tau_s$). Virstemperatūras nostabilizēšanās laiku var aprēķināt pēc laika konstantes ($t_s \approx 4 T_s$).

Ja elektrodzinējs darbojas ar pārslodzi ($k_i > 1$), tā stacionārā virstemperatūra var pārsniegt pieļaujamo vērtību ($\tau_{sp} > \tau_{pieļ.}$). Tad savlaicīgi jānostrādā aizsardzībai un jāatslēdz elektrodzinēju no elektriskā tīkla. Aizsardzībai jānostrādā laika momentā, kad virstemperatūra sasniedz pieļaujamo vērtību ($t_{nostr} \leq t_2$).

No termiskās pārslodzes viedokļa ekstremāls ir īsslēguma režīms (nosprūdis rotors), kad strāva tinumos $I = (5 - 7) I_{nom}$. Tinumu silšana notiek pēc adiabātiska procesa, proti, temperatūra palielinās lineāri ar ātrumu **(5 – 10) °C/s**. Pēc (10...30)s tinumu temperatūra sasniedz kritisko vērtību. Aizsardzības ierīcei jābūt pietiekami jutīgai un ātrdarbīgai, lai nepieļautu tinumu pārkaršanu ($t_{nostr} \leq t_1$, 1.12. att.).

Elektrodzinēja silšanas procesa vienādojums.

Silšanas vienādojuma sastādīšanai izvēlamies nulles sākuma nosacījumus. Ja laiks $t = 0$, tad elektrodzinēja tinumu temperatūra vienāda ar vides temperatūru ($\theta_0 = \theta_v$), bet virstemperatūra $\tau_0 = \theta_0 - \theta_v = 0$ °C. Elektrodzinēja nestacionāro silšanas procesu var aprakstīt ar siltuma plūsmu bilances vienādojumu:

$$Q_a + Q_v = \Delta P_z, \quad (1.7)$$

kur Q_a – akumulētā siltuma plūsma, kas paaugstina elektrodzinēja temperatūru, W;

Q_v – videi atdotā siltuma plūsma, kas veicina elektrodzinēja dzesēšanu, W.

Silšanas procesa sākumā, kad elektrodzinēja temperatūra vienāda ar vides temperatūru ($\theta_0 = \theta_v$) visa zudumu radītā siltuma plūsma akumulējas elektrodzinējā ($P = Q_a, Q_v = 0$) un paaugstina tā temperatūru θ .

Procesa beigās, kad iestājas stacionārs līdzsvara stāvoklis un elektrodzinēja temperatūra sasniedz nostabilizējušos vērtību ($\theta_s = \text{const.}$), visa zudumu jaudas radītā siltuma plūsma tiek atdota apkārtējai videi ($\mathbf{P} = \mathbf{Q}_v$, $\mathbf{Q}_a = \mathbf{0}$).

Izmantojot elektrodzinēja fizikālos parametrus, iegūstam tā silšanas dinamikas vienādojumu izvērstā veidā:

$$Q_a = c \cdot m \frac{d\tau}{dt}, \quad Q_v = \alpha \cdot S \cdot \tau, \quad c \cdot m \frac{d\tau}{dt} + \alpha \cdot S \cdot \tau = \Delta P_z, \quad (1.8)$$

kur c – vidējā īpatnējā siltumietilpība, J/(kg·°C);

m – elektrodzinēja masa, kg;

α – siltuma atdeves koeficients, W/(m²·°C);

S – siltuma atdeves virsmas laukums, m²;

$\tau = (\theta - \theta_0)$ – tinumu virstemperatūra, °C.

Dalot diferenciālvienādojuma (1.8) abas puses ar $\alpha \cdot S$, iegūstam elektrodzinēja silšanas vienādojumu normālformā:

$$T_s \frac{d\tau}{dt} + \tau = K \cdot \Delta P_z, \quad (1.9)$$

kur $T_s = c \cdot m / (\alpha \cdot S)$ – silšanas laika konstante, s;

$K = 1/(\alpha \cdot S)$ – siltuma pārvades koeficients, °C/W.

Atrisinot diferenciālvienādojumu (1.9), iegūst eksponenciālu funkciju, kas apraksta siltuma pārejas procesu elektrodzinēja tinumos:

$$\tau(t) = \tau_s (1 - e^{-t/T_s}) = K \cdot \Delta P_z (1 - e^{-t/T_s}). \quad (1.10)$$

kur $\tau_s = K \cdot \Delta P_z$ – stacionārā (nostabilizējusies) tinumu virstemperatūra, °C.

Silšanas laika konstante T_s , kas raksturo procesa inerci, ir tieši proporcionāla elektrodzinēja īpatnējai siltumietilpībai c un masai m , bet apgriezti proporcionāla siltuma atdeves koeficientam α no dzesēšanas virsmas un tās laukumam S .

Reizinājumu $\mathbf{C} = \mathbf{c} \cdot \mathbf{m}$ (J/°C) sauc par elektrodzinēja siltuma ietilpību, bet reizinājumu $\mathbf{A} = \alpha \cdot \mathbf{S}$ (W/°C) – par elektrodzinēja siltuma atdevi.

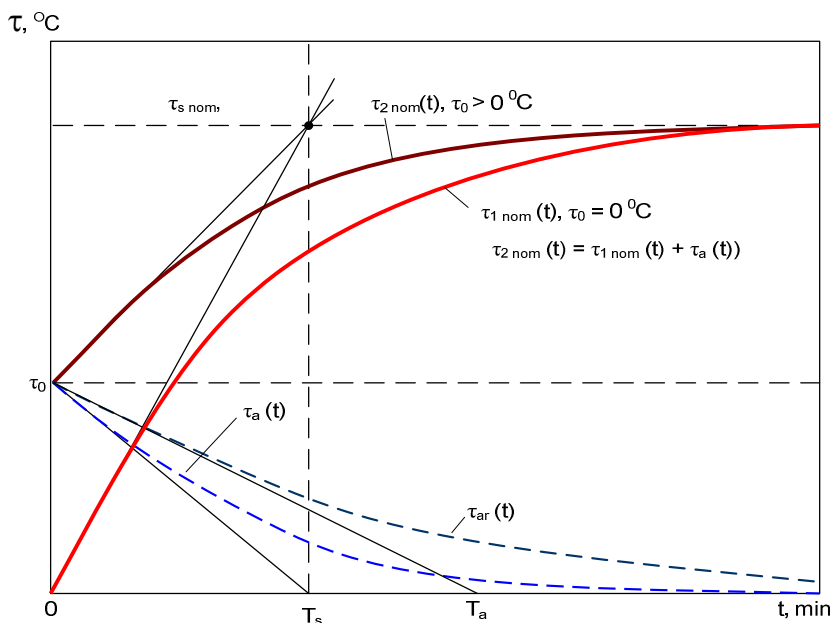
Jo lielāka siltuma atdevē, jo ātrāk notiek elektrodzinēja uzsilšanas process un zemāka ir tā beigu virstemperatūra. Tātad lai samazinātu elektrodzinēja virstemperatūru pie nemainīgas zudumu jaudas, jāpalielina siltuma atdevē. To panāk

dzēsējot elektrodzinēju ar piespiedu ventilāciju (palielinās α) un palielinot dzesēšanas virsmas laukumu S ar ribotu statora korpusa virsmu.

Ja nav spēkā nulles sākuma nosacījumi un $\tau_0 > 0^\circ\text{C}$ (kārtējās iedarbināšanas momentā elektrodzinējs nav atdzisis līdz vides temperatūrai), tad diferenciālvienādojuma (1.9) atrisinājumu iegūst sekojošā formā:

$$\tau(t) = \tau_s(1 - e^{-t/T_s}) + \tau_0 e^{-t/T_s} = K \cdot \Delta P_z(1 - e^{-t/T_s}) + \tau_0 e^{-t/T_s}. \quad (1.11)$$

Raksturlīkne $\tau_{2\text{nom}}(t)$ sastāv no divām formālām komponentēm: $\tau_{2\text{nom}}(t) = \tau_{1\text{nom}}(t) + \tau_a(t)$, kur $\tau_{1\text{nom}}(t)$ – silšanas līkne pie nulles sākuma nosacījumiem; $\tau_a(t)$ – atdzišanas līkne, pieņemot, ka atdzišanas laika konstante vienāda ar T_s (1.13. att.).



1.13. att. Silšanas un atdzišanas raksturlīknes dažādiem sākuma nosacījumiem.

Nostabilizējusies virstemperatūra ir vienāda kā pie nulles, tā nenulles sākuma nosacījumiem ($\tau_{2\text{snom}} = \tau_{1\text{snom}} = \tau_{\text{snom}}$). Augot laikam t , komponente $\tau_0 = e^{-t/T_s}$ izteiksmē (1.11) tiecas uz nulli. Elektrodzinēja reālā atdzišana notiek lēnāk, nekā uzsilšana, jo atdzišanas laika konstante ir lielāka par silšanas laika konstanti ($T_a > T_s$). Tas izskaidrojams ar to, ka nedarbojas elektrodzinēja ventilators un ir sliktāki dzesēšanas apstākļi.

Piemērs. Aprēķināsim trīsfāzu asinhronā elektrodzinēja zudumu jaudu ΔP_z un siltumtehniskos rādītājus – siltuma atdevi **A** un siltuma ietilpību **C**, izmantojot eksperimentālo silšanas raksturlīkni nominālai slodzei.

Aprēķina dati: mehāniskā jauda $P_{nom} = 11 \text{ kW}$; lietderības koeficients $\eta_{nom} = 0.93$; nostabilizējusies virstemperatūra $\tau_s = 80 \text{ }^\circ\text{C}$; silšanas laika konstante $T_s = 25 \text{ min}$; vides temperatūra $\theta_v = +20 \text{ }^\circ\text{C}$.

Aprēķins:

- jaudas zudumi $\Delta P_z = P_{nom} (1 - \eta_{nom}) / \eta_{nom} = 11 (1 - 0.93) / 0.93 = 0.83 \text{ kW} = 830 \text{ W}$;
- siltuma atdevi $A = \Delta P_z / \tau_s = 830 / 80 = 10.4 \text{ W/}^\circ\text{C}$ ($\tau_s = K \cdot \Delta P_z = \Delta P_z / A$);
- siltuma ietilpība $C = T_s \cdot A = 25 \cdot 60 \cdot 10.4 = 15600 \text{ J/}^\circ\text{C}$ ($T_s = C / A$);
- siltuma pārvades koeficients $K = \tau_s / \Delta P_z = 1/A = 1/10.4 = 0.096 \text{ }^\circ\text{C/W}$.

Aprēķinātie lielumi ΔP_z , **A** un **C** dod iespēju modelēt elektrodzinēja silšanu Windows vidē, izmantojot datorprogrammu **Matlab „Simulink”**.

1.2.3. Elektrodzinēja silšanas procesa modelēšana Windows vidē

Pielietojot Laplasa transformāciju diferenciālvienādojumam (1.9), iegūstam elektrodzinēja silšanas operatorvienādojumu:

$$T_s \cdot \tau(s) \cdot s + \tau(s) = K \cdot \Delta P_z(s); \quad (1.12)$$

kur $\tau(s)$ – virstemperatūras attēls;

$\Delta P_z(s)$ – zudumu jaudas attēls;

$T_s = C / A$ – silšanas laika konstante, min;

$K = \tau_s / \Delta P_z = 1/A$ – statiskais siltuma pārvades koeficients, $^\circ\text{C/W}$;

s – Laplasa arguments, s^{-1} .

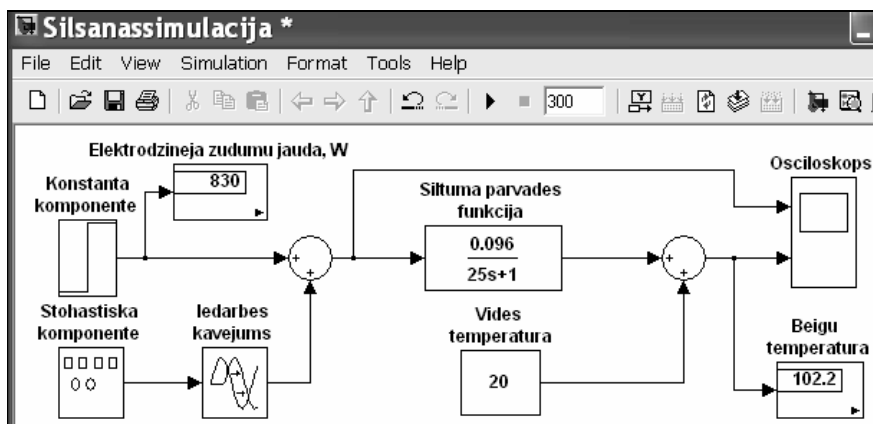
No operatorvienādojuma (1.12) atrodam attiecību $\tau(s)/\Delta P_z(s)$ – dinamisko siltuma pārvades koeficientu jeb pārvades funkciju, kas ir elektrodzinēja silšanas simulācijas matemātiskais modelis:

$$W(s) = \frac{\tau(s)}{\Delta P_z(s)} = \frac{K}{T_s \cdot s + 1}. \quad (1.13)$$

Veiksim trīsfāzu asinhronā elektrodzinēja ar jaudu **11 kW** silšanas procesa simulāciju Windows vidē, izmantojot datorprogrammu **Matlab „Simulink”**, kuras pielietošanas metodika un piemēri apskatīti automātikas pamatu kursā.

Modelēšanas blokshēma un raksturlīknes. Lai iegūtu elektrodzinēja silšanas pārejas procesa raksturlīknes, sastādām modelēšanas blokshēmu (1.14. att.), kas sastāv no „Simulink” bibliotēkas standarta blokiem:

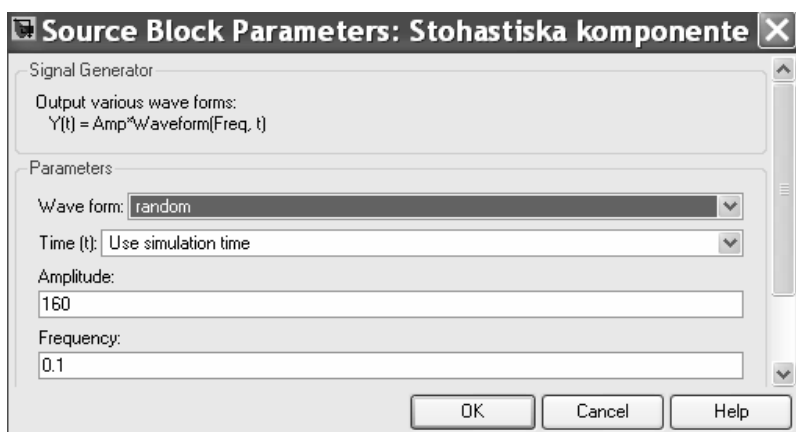
- „**Step**”, kas formē zudumu jaudas konstanto komponenti $\Delta P_{z0}=830 \text{ W}$;
- „**Signal Generator**”, kas formē zudumu jaudas stohastisko komponenti $\Delta P_{zs}=\pm 160 \text{ W}$, kuras iedarbes kavējumu iestata ar bloku „**Transport Delay**”;
- „**Transfer Fnc (with initial output)**”, ar kuru modelē elektrodzinēja silšanas virstemperatūru pie nulles vai nenulles sākuma nosacījumiem; „**Constant**”, kas formē vides temperatūru $\theta_v = +20 \text{ }^{\circ}\text{C}$;
- „**Scope**”- osciloskops pārejas procesa raksturlīkņu vizualizācijai un divi ciparu displeji „**Display**”, lai skaitliski parādītu zudumu jaudas konstanto komponenti un simulācijas beigu temperatūru (1.14. att.).



1.14. att. Elektrodzinēja zudumu jaudas un temperatūras simulācijas blokshēma.

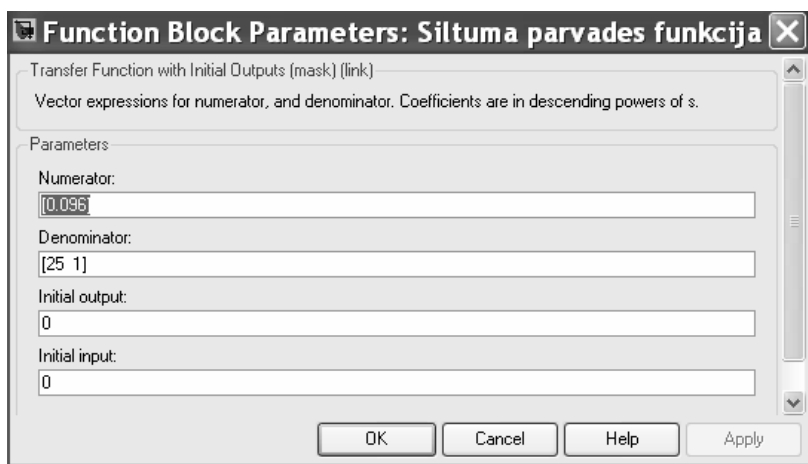
Lai veiktu elektrodzinēja silšanas procesa simulāciju, konfigurējam bloku parametrus. Bloka „**Konstanta komponente**” parametru logā iestatām sākuma laiku $t_0 = 0$. un izejas lielumu 830 W . Laika t_0 izvēle nav reglamentēta, taču, lai iegūtu uzskatāmāku modelēšanas rezultātu, izvēlas $t_0 > 0$.

Atveram bloka „**Stohastiska komponente**” parametru logu un aktivizējam gadījuma skaitļu ģeneratoru „**random**” (1.15. att.). Izvēlamies zudumu jaudas stohastiskās komponentes amplitūdu „**Amplitude**” $\approx 20\%$ no $830 \approx 160 \text{ W}$ un izmaiņas frekvenci „**Frequency**” $= 0.1$ pilna svārstība minūtē. Stohastiskā komponente tiek formēta atbilstoši normālajam varbūtību sadalījuma likumam.



1.15. att. Zudumu jaudas stohastiskās komponentes parametru logs.

Atveram bloka „**Siltuma pārvades funkcija**” parametru logu un ievadām pārvades funkcijas (1.13) skaitliskos parametrus - $K = 0.096 \text{ }^{\circ}\text{C/W}$ un $T_s = 25\text{min}$ (1.16. att.). Izvēlamies nulles sākuma nosacījumus – elektrodzinēja ieslēgšanas brīdī tā temperatūra vienāda ar vides temperatūru (ja $t = 0$, $\tau_0 = \theta_0 - \theta_v = 0 \text{ }^{\circ}\text{C}$).



1.16. att. Parametru logs nulles sākuma nosacījumiem (ja $t = 0$, $\tau_0 = 0 \text{ }^{\circ}\text{C}$).

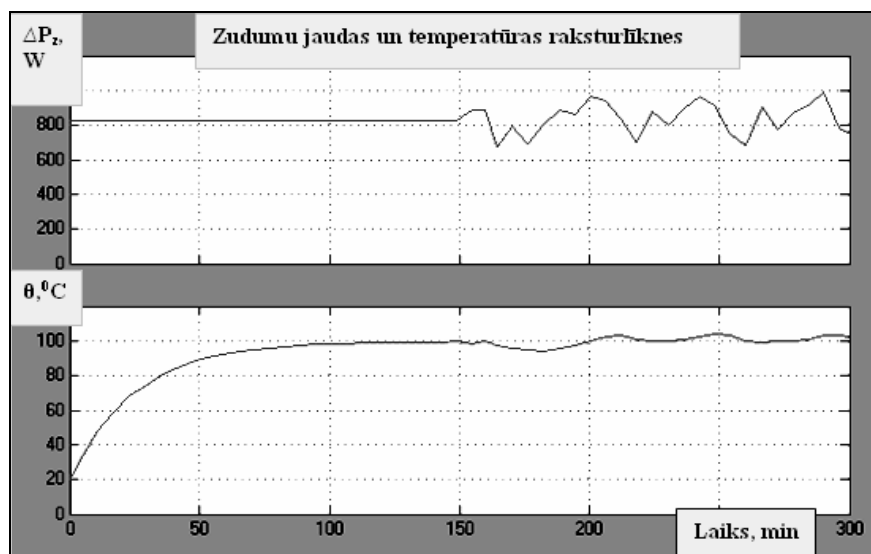
Izvēlamies simulācijas laiku $t_{\text{sim}} = 300 \text{ min}$. Pirmās 150 minūtes zudumu jauda ir konstanta (aktivizēta konstantā komponente). 150-tajā minūtē konstantajai

komponentei tiek uzklāta stohastiskā komponente, aktivizējot bloku „**ledarbes kavējums**”, kurā ievadīts stohastiskā signāla transportkavējuma laiks – **150 min**.

Veicot simulāciju, iegūstam elektrodzinēja zudumu jaudas $\Delta P_z = f(t)$ un tinumu temperatūras $\theta = f(t)$ pārejas procesa raksturlīknes, ja ieslēgšanas brīdī tā temperatūra ir vienāda ar vides temperatūru $\theta_0 = \theta_v = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (1.17. att.).

Sākumā elektrodzinēja slodze ir konstanta $\Delta P_{z0} = 830\text{ W}$. Elektrodzinēja silšana notiek pakāpeniski pēc eksponenciāla likuma un temperatūra sasniedz maksimālo nostabilizējušos vērtību $\theta_s = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ pēc laika $t_s \approx 4T_s = 4 \cdot 25 = 100\text{ min}$.

Pieliekot elektrodzinējam stohastiski svārstīgu slodzi $\sim \Delta P_z = 830 \pm 160\text{ W}$, notiek temperatūras pārejas process, kura beigās iestatās konstantas temperatūras svārstības $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ jeb $\pm 2\%$ no θ_s , ja zudumu jaudas svārstības ir $\pm 20\%$. Augstu temperatūras stabilitāti nodrošina elektrodzinēja lielā silšanas inerce.



1.17. att. Elektrodzinēja zudumu jaudas $\Delta P_z(t)$ un temperatūras $\theta(t)$ simulētās pārejas procesa raksturlīknes, ja $\theta_v = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ un $\tau_0 = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Lai modelētu elektrodzinēja silšanu no karsta stāvokļa (atkārtotas ieslēgšanas momentā elektrodzinējs nav atdzisis līdz vides temperatūrai), silšanas simulācijas bloka „**Siltuma pārvades funkcija**” parametru logā „**Initial output**” ievadām sākuma virstemperatūru $\tau_0 = \theta_0 - \theta_v = 60 - 20 = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ (1.18. att.). Veicot simulāciju,

iegūstam zudumu jaudas $\Delta P_z = f(t)$ un temperatūras $\theta = f(t)$ pārejas procesa raksturlīknes, ja ieslēgšanas brīdī temperatūra ir vienāda ar $\theta_0 = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ (1.19. att.).

Function Block Parameters: Siltuma parvades funkcija

Transfer Function with Initial Outputs (mask) (link)

Vector expressions for numerator, and denominator. Coefficients are in descending powers of s.

Parameters

Numerator:
[0.096]

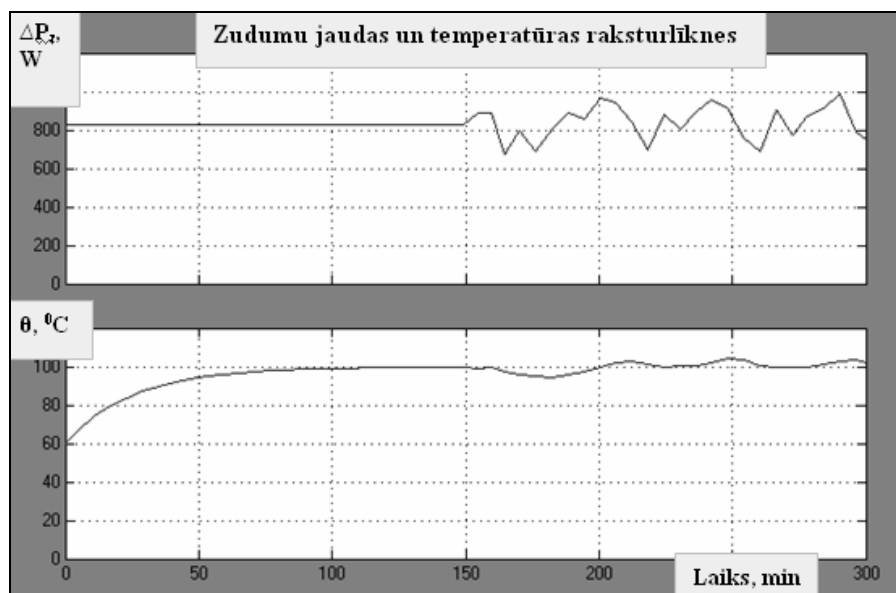
Denominator:
[25 1]

Initial output:
40

Initial input:
0

OK Cancel Help Apply

1.18. att. Parametru logs nenulles sākuma nosacījumiem (ja $t = 0$, $\tau_0 = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$).



1.19. att. Elektrodzinēja zudumu jaudas $\Delta P_z(t)$ un temperatūras $\theta(t)$ simulētās pārejas procesa raksturlīknes, ja $\theta_v = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ un $\tau_0 = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Temperatūras izmaiņa notiek atbilstoši sakarībai (1.11), kuru iegūst atrisinot silšanas diferenciālvienādojumu pie nenulles sākuma nosacījumiem.

Elektrodzinēja temperatūra sasniedz to pašu maksimālo nostabilizējušos vērtību $\theta_s = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ tajā pašā laikā $t_s \approx 100\text{ min.}$, kā pie nulles sākuma nosacījumiem. Tātad elektrodzinēja sākuma virstemperatūra τ_0 neiespaido silšanas temperatūras beigu lielumu un tās nostabilizēšanās laiku.

1.2.4. Tinumu izolācijas klases pēc termiskās izturības

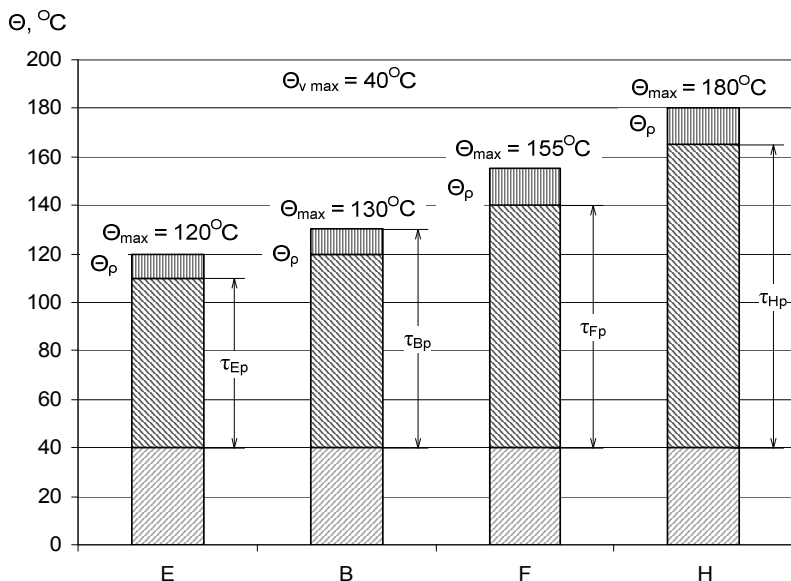
Statora tinumu temperatūra ir noteicošais faktors, pēc kura notiek elektrodzinēja izvēle. Asinhronajiem elektrodzinējiem ir relatīvi liela mehāniskās pārslodzes spēja un tie var ilgstoši strādāt ar (25 – 50) % mehānisko pārslodzi, taču nedrīkst pieļaut ilgstošu termisku pārslodzi.

Elektrodzinējs un darba režīms jāizvēlas tā, lai visā darbības laikā tinumu temperatūra nepārsniegtu maksimālo pieļaujamo vērtību. Ja tas tomēr notiek, tad savlaicīgi jānostrādā elektrodzinēja aizsardzībai, kas to atslēdz no elektriskā tīkla. Ja šādas aizsardzības nav vai tā nav atbilstoši izvēlēta un pareizi iestatīta, notiek elektrodzinēja tinumu pārkaršana, kas izsauc izolācijas plaisāšanu, pārogļošanos un elektrisko caursiti, kā rezultātā elektrodzinējs tiek bojāts, radot gan tiešos, gan tehnoloģiskos zaudējumus.

Tinumu izolācijas termisko izturību nosaka to izolācijas klases. Maksimālo īslaicīgi pieļaujamo temperatūru $\theta_{\max}$ nosaka izolācijas materiāla (lakas) termiskās īpašības. Atbilstoši starptautiskajiem standartiem ir četras izolācijas klases - **E**, **B**, **F** un **H** (1.20. att.).

Mūsdienu asinhronajos elektrodzinējos izplatītākās ir **B** un **F** klases izolācijas ar maksimālo īslaicīgi pieļaujamo temperatūru $130\text{ }^{\circ}\text{C}$ un $155\text{ }^{\circ}\text{C}$. **E**-klasi izmanto reti, bet **H**-klase paredzēta speciāliem gadījumiem, kad elektrodzinēji darbojas īpaši smagos termiskos apstākļos. Elektrodzinējus ar **H**-klases izolāciju ražo pēc individuāla pasūtījuma.

Ilgstoši pieļaujamo temperatūru θ_p slogotam elektrodzinējam ($P_m = P_{\text{nom}}$) nosaka, pieskaitot vides temperatūrai $\theta_v = +40\text{ }^{\circ}\text{C}$ pieļaujamo virstemperatūru τ_p . **B**-klases izolācijai: $\theta_{B\max} = \theta_v + \tau_{Bp} = 40\text{ }^{\circ}\text{C} + 90^{\circ}\text{C} = 130\text{ }^{\circ}\text{C}$, bet ilgstoši pieļaujamā temperatūra $\theta_{Bp\max} = 120\text{ }^{\circ}\text{C}$. Līdzīgi **F**-klases izolācijai: $\theta_{F\max} = \theta_v + \tau_{Fp} = 40\text{ }^{\circ}\text{C} + 115\text{ }^{\circ}\text{C} = 155\text{ }^{\circ}\text{C}$, bet ilgstoši pieļaujamā temperatūra $\theta_{Fp\max} = 140\text{ }^{\circ}\text{C}$.



1.20. att. Elektrodzinēju tinumu izolācijas termiskās izturības klases.

Elektrodzinējiem ar augstāku izolācijas klasi ir arī augstāka cena, jo tajos izmantotas augstākas kvalitātes izolācijas lakas. Normāliem darba apstākļiem ($\theta_v < 30^\circ\text{C}$, $\varphi_v = (60 - 70)\%$, vienmērīga slodze) izvēlas elektrodzinējus ar **B**-klases izolāciju. Smagos darba vides apstākļos (augsta temperatūra, augsts relatīvais mitrums, liels putekļu blīvums, pulsējoša slodze u.c.) izvēlas elektrodzinējus ar **F**-klases izolāciju vai īpaši smagos apstākļos ar **H**-klases izolāciju.

Ja elektrodzinēja darba vides temperatūra atšķiras no standartizētās **+40 °C**, tad attiecīgi jāpieskaņo tā mehāniskā noslodze. Zemākās temperatūrās slodzi var palielināt virs nominālās, bet augstākās - elektrodzinējs jāatslogo (1.1. tab.).

1.1. tabula

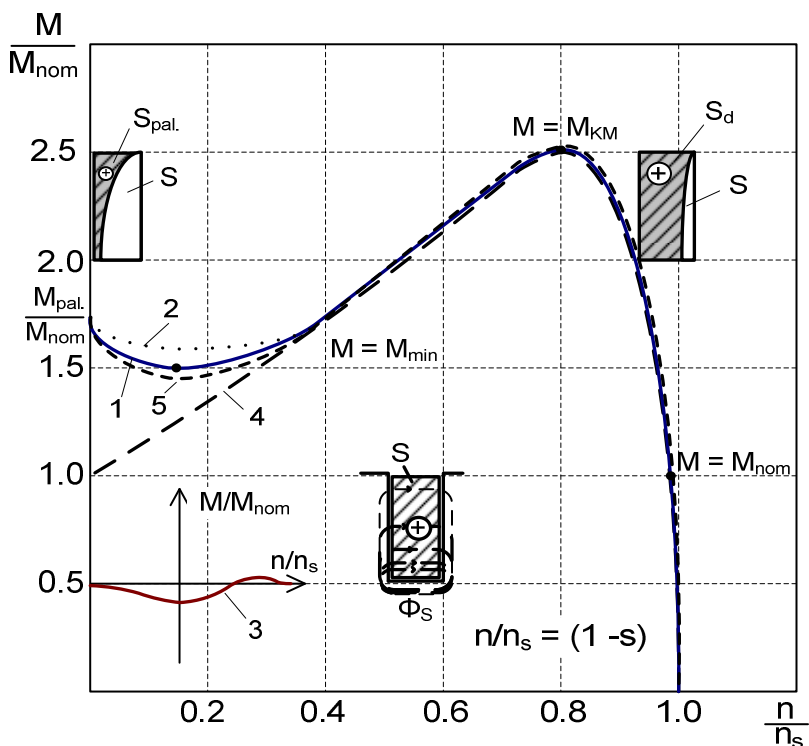
Elektrodzinēja mehāniskās slodzes izvēle atkarībā no vides temperatūras

Darba vides temperatūra, °C	20	30	35	40	45	50	55	60
Mehāniskās slodzes koeficients $k_{sl} = P_{sl}/P_{nom}$	1.20	1.08	1.04	1.00	0.95	0.90	0.85	0.80

1.3. Elektromehāniskie pārejas procesi

1.3.1. Asinhronā elektrodzinēja mehāniskās raksturlīknes

Asinhronā elektrodzinēja mehāniskās raksturlīknes izsaka statisko sakarību starp momentu M (N·m) un rotācijas ātrumu n (apgr./min vai min^{-1}). Veicot elektrodzinēja mehānisko īpašību vispārēju analīzi, abus lielumus izsaka relatīvās vienībās M/M_{nom} un n/n_s , kur M_{nom} – elektrodzinēja nominālais moments, N·m; n_s – sinhronais rotācijas ātrums, min^{-1} (1.21. att.).



1.21. att. Asinhronā elektrodzinēja relatīvās mehāniskās raksturlīknes:

1 - reālā; 2 - ņemot vērā strāvas izspiešanas efektu rotora ķēdē; 3 - magnetizācijas spēka augstāko harmoniku radītais pretestības moments; 4 - pēc Klosa formulas; 5 - pēc koriģētās Klosa formulas.

Mazas un vidējas jaudas (līdz 100 kW) asinhronajiem dzinējiem, atkarībā no to jaudas un konstrukcijas, palaides moments M_{pal} ir (1.2 – 2.5) reizes lielāks par nominālo momentu M_{nom} (raksturlīkne -1, 1.21. att.). To panāk izveidojot dziļrievu rotorus. Īpaši augstu palaides momentu iegūst ar dubultrievu rotoru jeb tā saucamo

dubulto „**vāveres ratu**”. Šādus elektrodzinējus izmanto piedziņās ar smagiem palaišanas apstākļiem.

Rotora feromagnētiskajā ķermenī izveidoto dziļrievu augstums ir ievērojami lielāks par to platumu. Rievās ielietie alumīnija stieņi ar noslēdzošajiem gala gredzeniem veido rotora tinumu, kas atgādina „vāveres ratu”.

Statora strāvas radītais rotējošais magnētiskais lauks inducē rotora ķēdē maiņstrāvu, kuras frekvence mainās atkarībā no rotora rotācijas ātruma. Palaides sākuma momentā, kad lauka rotācijas ātrums attiecībā pret vēl nekustīgo rotoru ir maksimāls, rotora strāvas frekvence ir **50 Hz**. Šī strāva rada izkliedes magnētisko plūsmu Φ_s , kuras maksimālais blīvums ir rotora stieņa šķērs griezuma **S** apakšējā daļā (1.21. att.). Tā rezultātā rotora strāva tiek izspiesta stieņa šķērs griezuma augšējā daļā. Līdz ar to asinhronā elektrodzinēja palaides sākuma posmā rotora strāvas šķērs griezum S_{pal} ir būtiski mazāks par rotora stieņa šķērs griezumu **S** (1.21. att.), kas ir ekvivalents rotora elektriskās ķēdes pretestības pieaugumam. Kā zināms, palielinot rotora ķēdes elektrisko pretestību pieaug asinhronā elektrodzinēja moments.

Strāvas izspiešanas efekts darbojas elektrodzinēja palaides sākuma stadijā (raksturīgā - 2, 1.21. att.), jo, palielinoties rotācijas ātrumam, rotora strāvas frekvence strauji samazinās un līdz ar to pavājinās strāvas izspiešanas efekts. Nominālā darba režīmā rotora strāvas frekvence ir aptuveni tikai **2 Hz**. Rotora strāvas šķērs griezum ir gandrīz vienāds ar rotora stieņa šķērs griezumu $S_d \approx S$ un strāvas izspiešanas efekts vairs nedarbojas.

Elektrodzinēja palaides procesā darbojas arī cits efekts, kam par iemeslu ir magnetizācijas spēka augstākās harmonikas. Sakarā ar statora magnētvara zobveida konstrukciju un tinumu nevienmērīgu izvietojumu pa statora aploci, statora strāvas radītā magnetizācijas spēka telpiskā raksturīgā ir nesinusoidāla. Tā sastāv no 1-mās kārtas harmonikas un augstāku kārtu (3-šās, 5-tās, 7-tās u.t.t.) harmonikām.

Galveno griezes momentu rada pirmā harmonika. Augstākās harmonikas, īpaši 5-tā un 7-tā, rada bremzējošu momentu (raksturīgā-3, 1.21. att.), kura maksimums vidēji ir pie rotācijas ātruma $1/6 n_s$. Šis bremzējošais papildmoments samazina elektrodzinēja griezes momentu un rada tā saucamo minimālo momentu M_{min} , kas tiek uzrādīts arī elektrodzinēju katalogos kā relatīvais moments $k_{min} = M_{min} / M_{nom}$.

1.3.2. Mehānisko raksturlīkņu analītiskais apraksts

Asinhronā elektrodzinēja momentu (Nm) aprēķina pēc formulas:

$$M = 9.55 \frac{P_m}{n} = \frac{P_m}{\omega} = \frac{P_e}{\eta \cdot \omega}, \quad (1.14)$$

kur P_m – mehāniskā jauda uz vārpstas, W;

n – rotora rotācijas ātrums (apgr./min), min^{-1} ;

ω – rotora rotācijas frekvence (rad./s), s^{-1} ;

P_e – elektrodzinējam pievadītā elektriskā jauda, W;

η – elektrodzinēja lietderības koeficients.

Asinhronā elektrodzinēja mehānisko raksturlīkni ērtāk aprēķināt pēc tuvinātās Klosa formulas:

$$M = \frac{2 M_k}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s}}, \quad (1.15)$$

kur M_k – kritiskais (maksimālais) moments, Nm;

$s = (n_s - n)/n_s$ – elektrodzinēja rotora slīde;

n_s – sinhronais (magnētiskā lauka) rotācijas ātrums, min^{-1} ;

s_k – rotora kritiskā slīde pie kritiskā momenta.

Kritisko slīdi var aprēķināt, izmantojot elektrodzinēja kataloga datus:

$$s_k = s_{nom} (k_k + \sqrt{k_k^2 + 1}), \quad (1.16)$$

kur $s_{nom} = (n_s - n_{nom})/n_s$ – elektrodzinēja nominālā slīde;

n_{nom} – nominālais rotācijas ātrums, min^{-1} ;

$k_k = M_k/M_{nom}$ – relatīvais kritiskais moments attiecībā pret nominālo momentu.

Izsakām elektrodzinēja momentu relatīvās vienībās:

$$k_m = \frac{2 k_k}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s}}, \quad (1.17)$$

kur $k_m = M/M_{nom}$ – relatīvais moments attiecībā pret nominālo momentu.

Izteiksmes (1.15) un (1.17) dod lielu momenta aprēķina kļūdu palaišanas sākuma posmā asinhronajiem elektrodzinējiem ar dziļrievu un dubultrievu rotoriem, jo tās neņem vērā strāvas izspiešanas efekta un papildmomentu darbību palaišanas režīmā (raksturlīkne-4, 1.21. att.).

Aprakstīt analītiski abu minēto efektu iespaidu praktiski nav iespējams. Tādēļ ievadam empīrisku korekciju, izmantojot elektrodzinēja kataloga datus:

$$k_m = \frac{2k_k}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s}} + \Delta k_{pal} e^{-a(1-s)}, \quad (1.18)$$

kur $\Delta k_{pal} = \Delta M_{pal}/M_{nom}$ – koriģētais relatīvais palaišanas moments;

a – pagaidām nenoteikts empīrisks koeficients.

Eksponenciāla funkcija visadekvātāk apraksta abu papilddefektu iespaidu uz asinhronā elektrodzinēja mehānisko raksturlīkni palaišanas stadijā.

Palaišanas momentā elektrodzinēja slīde $s=1$. Tad Δk_{pal} var izteikt sekojoši:

$$\Delta k_{pal} = k_{pal} - \frac{2k_k}{\frac{1}{s_k} + \frac{s_k}{1}}, \quad (1.19)$$

kur $k_{pal} = M_{pal}/M_{nom}$ – relatīvais palaišanas moments pēc kataloga.

Tā kā $1/s_k \gg s_k$, tad izteiksmi (1.19) var vienkāršot:

$$\Delta k_{pal} \approx k_{pal} - 2k_k \cdot s_k \quad (1.20)$$

Koeficientu a noteiksim, veicot Klosa formulas korekciju pēc minimālā momenta M_{min} . Šai nolūkā ievadam lielumus- relatīvais minimālais moments $k_{min} = M_{min}/M_{nom}$, kas atrodams elektrodzinēju katalogā, un tam atbilstošo rotora slīdi s_{min} .

Izsakām relatīvo minimālo momentu pēc Klosa formulas (1.17):

$$k_{min}^* = \frac{2k_k}{\frac{s_{min}}{s_k} + \frac{s_k}{s_{min}}}. \quad (1.21)$$

Tā kā $s_{min}/s_k \gg s_k/s_{min}$, tad izteiksmi (1.21) var vienkāršot:

$$k_{min}^* \approx 2k_k \cdot s_k / s_{min}. \quad (1.22)$$

Minimālā momenta labojums:

$$\Delta k_{\min} = k_{\min} - k_{\min}^* = k_{\min} - 2k_k \cdot s_k / s_{\min}. \quad (1.23)$$

Izsakām minimālā momenta labojumu ar empīrisku izteiksmi no (1.18):

$$\Delta k_{\min} = \Delta k_{\text{pal}} e^{-a(1-s_{\min})}, \quad (1.24)$$

$$a = -\frac{\ln(\Delta k_{\min} / \Delta k_{\text{pal}})}{1-s_{\min}}. \quad (1.25)$$

no kurienes

Ievietojot izteiksmi (1.25) formulā (1.18), iegūstam pusempīrisku sakarību asinhronā elektrodzinēja relatīvā momenta aprēķinam, ņemot vērā strāvas izspiešanas efektu un magnetizācijas spēka augstāko harmoniku radīto papildmomentu iespaidu uz mehānisko raksturlielnu (raksturlielne-5, 1.21. att.):

$$k_m = \frac{2k_k}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s}} + \Delta k_{\text{pal}} e^{\frac{\ln(\Delta k_{\min} / \Delta k_{\text{pal}})}{1-s_{\min}} \cdot (1-s)}, \quad (1.26)$$

kur $\Delta k_{\text{pal}} = k_{\text{pal}} - 2k_k \cdot s_k$ un $\Delta k_{\min} = k_{\min} - 2k_k \cdot s_k / s_{\min}$ - palaides momenta un minimālā momenta labojuma koeficienti ($k_{\min} = (0.8 \dots 0.9) k_{\text{pal}}$, $s_{\min} = (0.8 \dots 0.9)$).

Veiksim izteiksmes (1.26) pārbaudi ar skaitlisku piemēru.

Piemērs. Trīsfāzu 4-polu asinhronā elektrodzinēja katalogā doti sekojoši dati:

- relatīvais palaides moments $k_{\text{pal}} = 1.75$ pie slīdes $s_{\text{pal}} = 1$;
- relatīvais kritiskais (maksimālais) moments $k_k = 2.5$;
- relatīvais minimālais moments $k_{\min} = 1.5$ un slīde $s_{\min} = 0.85$;
- relatīvais nominālais moments $k_{\text{nom}} = 1$ un rotācijas ātrums $n_{\text{nom}} = 1450 \text{ min}^{-1}$.

Aprēķini. 1. Nominālā slīde: $s_{\text{nom}} = (n_s - n_{\text{nom}})/n_s = (1500 - 1450)/1500 = 0.033$.

2. Kritiskā slīde: $s_k = s_{\text{nom}} (k_k + \sqrt{k_k^2 + 1}) = 0.033 (2.5 + \sqrt{2.5^2 + 1}) = 0.17$.

3. Palaides momenta labojums: $\Delta k_{\text{pal}} = k_{\text{pal}} - 2k_k \cdot s_k = 1.75 - 2 \cdot 2.5 \cdot 0.17 = 0.9$.

4. Minimālā momenta labojums: $\Delta k_{\min} = k_{\min} - 2k_k \cdot s_k / s_{\min} = 1.5 - 2 \cdot 2.5 \cdot 0.17 / 0.85 = 0.5$.

5. Aprēķinātie relatīvie momenti: $k_{\text{pal}}^a = 1.73$; $k_k^a = 2.54$; $k_{\min}^a = 1.47$; $k_{\text{nom}}^a = 0.97$.

Aprēķinu rezultātu (formula 1.26) atšķirība no kataloga datiem ir mazāka par 5%.

1.3.3. Mehānisko raksturliķņu modelēšana Windows vidē

Apskatīsim asinhronā elektrodzinēja mehānisko raksturliķņu modelēšanu **Matlab-Simulink** vidē, izmantojot Klosa formulu un koriģēto Klosa formulu. Lai vienkāršotu modelēšanas blokshēmas sastādīšanu, Klosa formulu (1.17), relatīvā momenta aprēķinam, pārveidojam sekojošā formā:

$$k_{m_{Klosa}} = \frac{2k_k \cdot s_k \cdot s}{s^2 + s_k^2}, \quad (1.27)$$

kur slīde $s = 1 - n/n_s$; kritiskā slīde $s_k = s_{nom} (k_k + \sqrt{k_k^2 + 1})$; nominālā slīde

$$s_{nom} = 1 - n_{nom}/n_s.$$

Relatīvā momenta korekcijas k_{kor} aprēķinam izmantojam izteiksmi (1.26), no

$$\text{kuras: } k_{kor} = \Delta k_{pal} e^{\frac{\ln(\Delta k_{min}/\Delta k_{pal})}{1-s_{min}}(1-s)} = (k_{pal} - 2k_k \cdot s_k) \cdot e^{\frac{\ln \frac{k_{min} - 2k_k \cdot s_k / s_{min}}{k_{pal} - 2k_k \cdot s_k}}{1-s_{min}}(1-s)}, \quad (1.28)$$

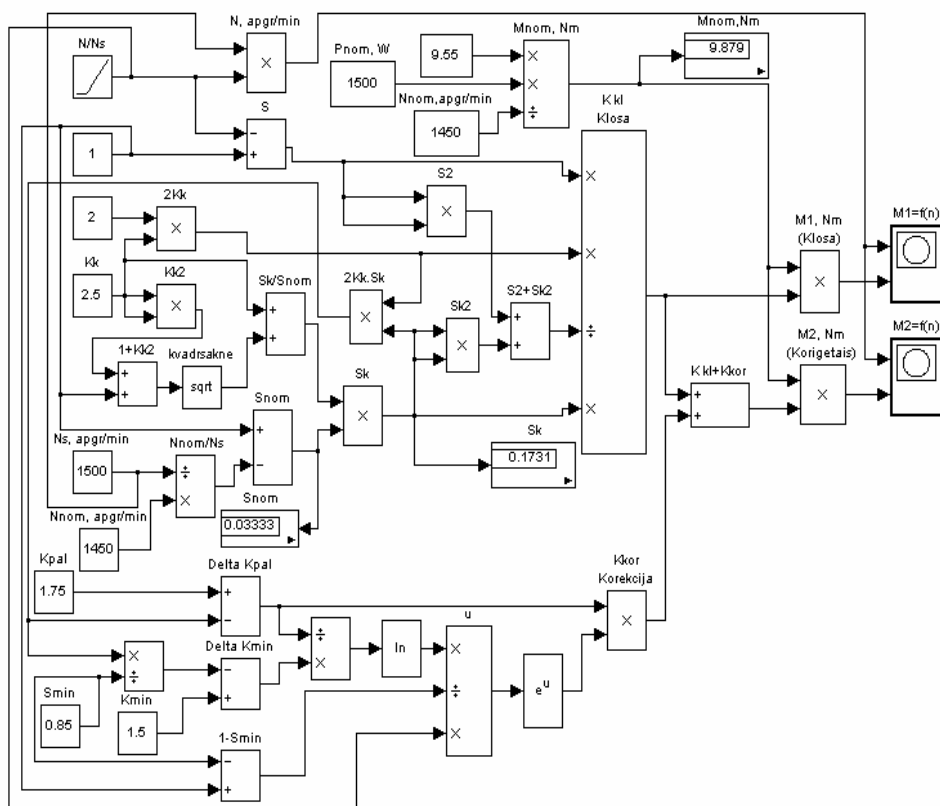
kur neatkarīgo mainīgo lielumu slīdi izsaka ar relatīvo rotācijas ātrumu: $(1-s) = n/n_s$.

Modelēšanas blokshēma un raksturliķnes.

Lai iegūtu elektrodzinēja mehāniskās raksturliķnes pēc Klosa formulas (1.27) un tās korekcijas (1.28), sastādām modelēšanas blokshēmu (1.22. att.), kas sastāv no „**Simulink**” bibliotēkas standarta blokiem:

- konstanto lielumu (**1**, **2**, **9.55**, k_k , n_s , n_{nom} , k_{pal} , k_{min} , s_{min} , P_{nom}) formēšanai izmantojam konstanta signāla ģeneratorus „**Constant**” no avotu „**Sources**” bibliotēkas;
- matemātisko operāciju (saskaitīšana, atņemšana, reizināšana, dalīšana, kvadrātsaknes vilkšana, kāpināšana, logaritmēšana) realizācijai izvēlamies atbilstošus blokus „**Add**”, „**Subtract**”, „**Product**”, „**Divide**” un „**Math Function**” no matemātisko operāciju bibliotēkas „**Math Operations**”;
- neatkarīgo mainīgo lielumu – relatīvo rotācijas ātrumu n/n_s visā tā izmaiņas apgabālā (0 ... 1) formē ar lineāra signāla ģeneratoru „**Ramp**”;

- Aprēķinu blokshēma sastāv no divām daļām atbilstoši algoritmu (1.27) un (1.28) struktūrai, pēc kuras var izsekot blokshēmas sastādīšanas metodikai.



Mehānisko raksturlīkņu simulācija veikta trīsfāzu asinhronajam elektrodzinējam ar sekojošiem parametriem:

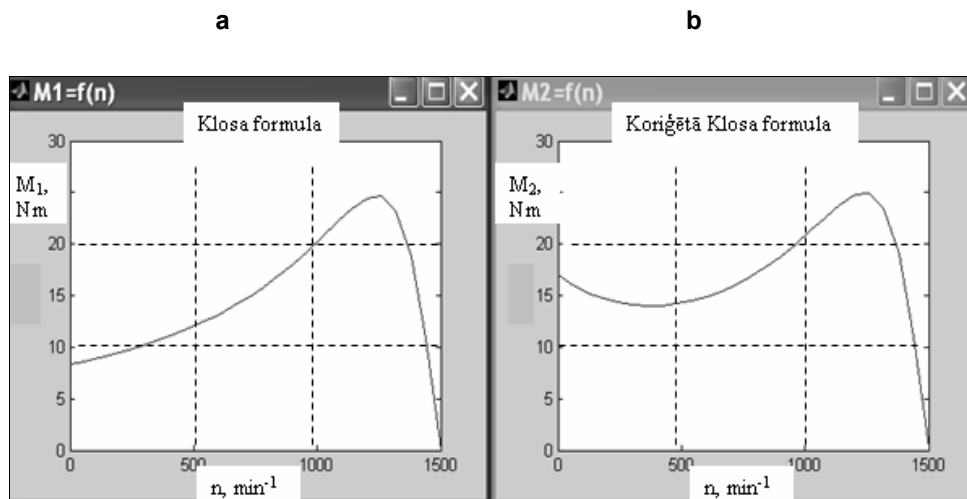
- 36

□ relatīvais palaides moments $k_{\text{pal}} = M_{\text{pal}}/M_{\text{nom}} = 1.75$ pie slīdes $s_{\text{pal}} = 1$, relatīvais minimālais moments $k_{\text{min}} = M_{\text{min}}/M_{\text{nom}} = 1.5$ pie slīdes $s_{\text{min}} = 0.85$ un relatīvais kritiskais moments $k_k = M_k/M_{\text{nom}} = 2.5$ pie aprēķinātās slīdes $s_k = 0.173$.

Veicot simulāciju, iegūst elektrodzinēja tuvināto mehānisko raksturlīkni $M_1=f(n)$, kas iegūta pēc Klosa formulas un precizēto raksturlīkni $M_2 = f(n)$, kas iegūta pēc koriģētās Klosa formulas (1.23. att.).

Redzams, ka Klosa formula adekvāti apraksta elektrodzinēja palaides beigu procesu, pie rotācijas ātruma $n > 0.5n_s$. Aprēķinātais palaides moments $M_{1\text{pal}}$ pie $n = 0$ ir mazāks par nominālo momentu $M_{1\text{nom}} \approx 9.9 \text{ Nm}$ (1.23.a att.) un ir 1.75 reizes mazāks par elektrodzinēja katalogā doto lielumu $M_{\text{pal.kat.}} = 1.75 M_{\text{nom}}$.

Koriģētā Klosa formula dod reālajam palaišanas procesam atbilstošu rezultātu visā rotācijas ātruma izmaiņas apgabalā (1.23.b att.).



1.23. att. Asinhronā elektrodzinēja ($P_{\text{nom}} = 1.5 \text{ kW}$, $n_s = 1500 \text{ min}^{-1}$) simulētās mehāniskās raksturlīknes:

a - pēc Klosa formulas; b - pēc koriģētās Klosa formulas, ņemot vērā strāvas izspiešanas efektu rotora ķēdē un magnetizācijas spēka augstāko harmoniku darbību palaides procesā.

1.3.4. Asinhronās elektriskās piedziņas dinamiskās raksturlīknes

Lai projektētu automātisko elektrisko piedziņu un optimizētu tās nestacionāros pārejas procesus, nepieciešams izpētīt elektriskās piedziņas dinamiskās īpašības. Elektriskās piedziņas darbību nestacionārā režīmā raksturo elektromagnētiskā un elektromehāniskā inerce.

Elektromagnētisko inerci rada pārejas procesi elektrodzinēja statora un rotora ķēdēs, kurus izraisa tinumu induktivitātes. Pieslēdzot elektrodzinējam spriegumu, strāva tā tinumos pieaug pakāpeniski ar aizkavēšanos, jo induktivitātē strāva nevar izmainīties lēcienvēidīgi. Jo lielāka ir tinumu induktivitāte, jo strāvas izmaiņa vairāk aizkavējas attiecībā pret sprieguma izmaiņu. Šo aizkavēšanos raksturo elektromagnētiskā laika konstante T_e , kas asinhronajiem elektrodzinējiem ir neliela ($T_e \approx 10^{-3} - 10^{-2} \text{ s}$) salīdzinājumā ar elektromehānisko laika konstanti T_m .

Elektromehānisko inerci galvenokārt izraisa mehāniskie pārejas procesi elektrodzinējā un darba mašīnā. To nosaka elektrodzinēja un darba mašīnas rotējošo daļu inerce, elektrodzinēja rotācijas frekvence ω un attīstītais griezes moments M , kurš savukārt tieši proporcionāls barošanas sprieguma kvadrātam $M \sim U^2$, kā arī darba mašīnas radītais statiskais pretestības (slodzes) moments M_{sl} .

Asinhronās elektriskās piedziņas griezes kustības dinamiku apraksta momentu bilances vienādojums:

$$M_{din} = (J + J'_{sl}) \cdot \frac{d\omega}{dt} = M - M'_{sl}, \quad (1.29)$$

kur M_{din} – elektriskās piedziņas dinamiskais moments, Nm;

J – elektrodzinēja rotācijas moments, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$;

J'_{sl} – pie elektrodzinēja vārpstas reducētais slodzes rotācijas moments, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$;

ω – elektrodzinēja vārpstas rotācijas frekvence, s^{-1} ;

M – elektrodzinēja griezes moments, Nm;

M'_{sl} – pie elektrodzinēja vārpstas reducētais slodzes moments, Nm.

Momentu redukcija jāveic tad, ja elektrodzinēja griezes moments tiek pārņemts uz darba mašīnas vārpstu ar netiešo pārvadu (zobratu reduktoru, ķīļsiksna pārvadu, ķēdes pārvadu, skrūves pārvadu) ar pārnese skaitli $i = \omega_1/\omega_2 \neq 1$, kur ω_1 – elektrodzinēja vārpstas rotācijas frekvence, s^{-1} ; ω_2 – darba mašīnas vārpstas rotācijas frekvence s^{-1} .

Zinot pārnese skaitli i var aprēķināt reducētos momentus:

$$J'_{sl} = \frac{J_{sl} + J_p}{i^2 \cdot \eta_p}, \quad M'_{sl} = \frac{M_{sl} + M_p}{i \cdot \eta_p}, \quad (1.30)$$

kur J_{sl} – darba mašīnas rotācijas moments, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$;

J_p – pārvada rotācijas moments, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$;

η_p – pārvada lietderības koeficients;

M_{sl} – darba mašīnas statiskais pretestības moments, Nm;

M_p – pārvada pretestības moments, Nm.

Darba mašīnu radītie pretestības momenti vispārīgi ir atkarīgi no vārpstas rotācijas frekvences, ko vispārināti var aprakstīt ar izteiksmi:

$$M_{sl} = M_0 + \Delta M \left(\frac{\omega_2}{\omega_{2nom}} \right)^\alpha, \quad (1.31)$$

kur M_0 – no rotācijas frekvences neatkarīga slodzes momenta komponente, Nm;

ω_2 – darba mašīnas vārpstas rotācijas frekvence, s^{-1} ;

ω_{2nom} – darba mašīnas vārpstas nominālā rotācijas frekvence, s^{-1} ;

$\Delta M = (M_{slnom} - M_0)$ – darba mašīnas momenta izmaiņa, Nm;

M_{slnom} – nominālais slodzes moments, Nm.

α – kāpinātājs, kura skaitliskā vērtība atkarīga no slodzes rakstura.

Raksturīgākās darba mašīnu momenta funkcijas:

- **$\alpha=0$, $M_{sl} = M_0 = \text{const.}$** – slodzes moments nav atkarīgs no vārpstas rotācijas frekvences (transportieri, konveijeri, celšanas mehānismi, kokapstrādes un metālapstrādes darbgaldi ar konstantu slodzi);
- **$\alpha=1$, $M_{sl} = M_0 + \Delta M \cdot \omega_2 / \omega_{2nom}$** – slodzes moments sastāv no konstantās komponentes M_0 un mainīgās komponentes $\Delta M \cdot \omega_2 / \omega_{2nom}$, kas mainās tieši proporcionāli rotācijas frekvencei (elektroģeneratori ar konstantu slodzes pretestību);
- **$\alpha=2$, $M_{sl} = M_0 + \Delta M \cdot (\omega_2 / \omega_{2nom})^2$** – slodzes moments sastāv no konstantās komponentes M_0 un mainīgās komponentes $\Delta M \cdot (\omega_2 / \omega_{2nom})^2$, kas mainās tieši proporcionāli rotācijas frekvences kvadrātam (centrbēdzes mehānismi – ūdens sūkņi, gaisa ventilatori, turbokompresori, centrifūgas, dūmu sūkņi).

Sastādīsim izvērstu dinamikas vienādojumu elektriskajai piedziņai ar tiešo pārvadu ($i=1$, $J_p \approx 0$, $M_p \approx 0$, $\eta_p = 1$), ja slodzes moments **$M_{sl} = M_0 = \text{const.}$** :

$$(J + J_{sl}) \cdot \frac{d\omega}{dt} = M - M_0. \quad (1.32)$$

Elektrodzinēja momentu izsakām ar Klosa formulu (1.15) sekojošā formā:

$$M = \frac{2k_k \cdot M_{nom} \cdot s_k \cdot (1 - \omega / \omega_s)}{[(1 - \omega / \omega_s)^2 + s_k^2]}, \quad (1.33)$$

kur $k_k \cdot M_{nom} = M_k$ – elektrodzinēja kritiskais moments, Nm;

$(1 - \omega / \omega_s) = s$ – elektrodzinēja rotora slīde.

Ievietojot izteiksmi (1.33) vienādojumā (1.32) un veicot matemātiskus pārveidojumus, iegūst elektriskās piedziņas diferenciālvienādojumu normālformā, kas apraksta rotācijas frekvences pārejas procesu palaišanas režīmā:

$$T_m(\omega) \cdot \frac{d\omega}{dt} + \omega = K \omega_s, \quad (1.34)$$

kur procesa inerci raksturo elektromehāniskā laika konstante $T_m(\omega)$, kas mainās atkarībā no rotācijas frekvences -

$$T_m(\omega) = \frac{(J + J_{sl}) \cdot \omega_s \cdot [(1 - \omega / \omega_s)^2 + s_k^2]}{2k_k \cdot M_{nom} \cdot s_k} (s), \quad (1.35)$$

bet statisko jutību izsaka pārvades koeficients –

$$K = \frac{\omega_{nost}}{\omega_s} = 1 - \frac{M_0 \cdot [(1 - \omega_{nost} / \omega_s)^2 + s_k^2]}{2k_k \cdot M_{nom} \cdot s_k}, \quad (1.36)$$

kur $\omega_{nost} = K \cdot \omega_s$ – nostabilizējusies rotācijas frekvence pārejas procesa beigās, s^{-1} .

Slogotam elektrodzinējam $K < 1$ un $\omega_{nost} < \omega_s$. Jo lielāks slodzes moments M_0 , jo mazāks pārvades koeficients K , kā rezultātā nostabilizējusies slīde ($s_{nost} = 1 - K$) palielinās. Ideālā tukšgaitā ($M_0 \approx 0$, $K = 1$) nostabilizējusies rotācijas frekvence ir tuva sinhronajai frekvencei ($\omega_{nost} \approx \omega_s$).

Izteiksme (1.35) liecina, ka laika konstante $T_m(\omega)$ mainās atkarībā no rotācijas frekvences ω . Pārejas procesa sākumā ($\omega = 0$) tā ir maksimāla:

$$T_{m, \omega=0} \approx \frac{(J + J_{sl}) \cdot \omega_s}{2k_k \cdot M_{nom} \cdot s_k}. \quad (1.37)$$

Pārejas procesa beigās ($\omega_{nom} \leq \omega < \omega_s$) tā vairākkārtīgi samazinās:

$$T_{m, \omega \geq \omega_{nom}} \approx \frac{(J + J_{sl}) \cdot \omega_s \cdot s_k}{2k_k \cdot M_{nom}}. \quad (1.38)$$

Tuvinātos aprēķinos izmanto nemainīgu laika konstanti, ko aprēķina pēc vienkāršotas formulas:

$$T_m \approx \frac{(J + J_{sl}) \cdot \omega_s}{M_{nom}}. \quad (1.39)$$

Lielums $(1 - \omega_{nost} / \omega_s)$ izteiksmē (1.36) ir nostabilizējusies slīde s_{nost} . Tā kā $s_{nost}^2 \ll s_k^2$, tad izteiksmi var vienkāršot:

$$K \approx 1 - \frac{M_0 \cdot s_k}{2k_k \cdot M_{nom}} = 1 - \frac{k_{sl} \cdot s_k}{2k_k}, \quad (1.40)$$

kur $k_{sl} = M_0/M_{nom}$ – mehāniskās slodzes koeficients.

Ievietojot vienādojumā (1.34) $T_m = \text{const.}$ un $K = \text{const.}$, iegūst lineāru diferenciālvienādojumu ar konstantiem koeficientiem, kuru var atrisināt analītiski, iegūstot funkciju, kas tuvināti apraksta elektromehānisko pārejas procesu:

$$\omega = K \cdot \omega_s (1 - e^{-\frac{t}{T_m}}). \quad (1.41)$$

Izteiksme (1.41) ir eksponenciāla funkcija. Reālais process ir ievērojami sarežģītāks. Palaišanas sākumā elektriskās piedziņas paātrināšanās aizkavējas, jo ir liela laika konstante. Augot rotācijas frekvencei, samazinās laika konstante T_m , kā rezultātā palielinās elektriskās piedziņas paātrinājums.

Šādu procesu apraksta **S-tipa** raksturlīkne, kuru iegūst atrisinot nestacionāru diferenciālvienādojumu ar mainīgu laika konstanti $T_m = f(\omega)$. Kā zināms, šāds vienādojums analītiski nav atrisināms.

Matlab-Simulink tehnoloģija dod iespēju modelēt nelineārus nestacionārus procesus ar laikā mainīgiem koeficientiem, ko apskatīsim nākošajā apakšnodaļā.

1.3.5. Elektromehānisko procesu modelēšana Windows vidē

Elektromehānisko pārejas procesa raksturlīkņu simulācija veikta trīsfāzu asinhronajai elektriskajai piedziņai ar sekojošiem parametriem:

- elektrodzinēja nominālā jauda $P_{nom} = 1.5 \text{ kW}$, sinhronā rotācijas frekvence $\omega_s = 157 \text{ s}^{-1}$, nominālā rotācijas frekvence $\omega_{nom} = 150 \text{ s}^{-1}$, elektrodzinēja rotācijas moments $J = 0.5 \cdot 10^{-2} \text{ kgm}^2$, slodzes (mehānisma ar tiešo pārvadu) rotācijas

moments $J_{sl} = 0.4 \cdot 10^{-2} \text{ kgm}^2$; elektrodzinēja nominālais moments $M_{nom} = P_{nom}/\omega_{nom} = 1500/150 = 10 \text{ Nm}$; slodzes moments $M_{sl} = M_0 = 8.7 \text{ Nm} = \text{const}$;

□ relatīvais slodzes moments $k_{sl} = M_0/M_{nom} = 0.87$, elektrodzinēja relatīvais kritiskais moments $k_k = M_k/M_{nom} = 2.5$ pie aprēķinātās kritiskās slīdes $s_k = 0.173$.

Modelēšanas blokhēma un raksturlīknes.

Modelēsim vienkāršotu elektriskās piedziņas pārejas procesu, pieņemot, ka elektromehāniskā laika konstante $T_m = \text{const.}$ (formula 1.39) un pārvades koeficients $K = \text{const.}$ (formula 1.40). Izmantojot „Simulink” bibliotēkas standarta blokus, sastādīsim un salīdzināsim divus modeļus: 1) modeli ar konstantiem koeficientiem; 2) modeli ar koeficientu automātisku aprēķinu (1.24. att.).

Lai iegūtu modeli ar konstantiem koeficientiem, sastādām elektriskās piedziņas dinamikas vienādojumu:

$$T_m \cdot \frac{d\omega}{dt} + \omega = K \cdot \omega_s, \quad (1.42)$$

$$\text{kur } T_m \approx \frac{(J + J_{sl}) \cdot \omega_s}{M_{nom}} = \frac{(0.5 + 0.4)10^{-2} \cdot 157}{10} = 0.14s, \quad K \approx 1 - \frac{k_{sl} \cdot s_k}{2k_k} = 1 - \frac{0.87 \cdot 0.173}{2 \cdot 2.5} = 0.97.$$

Pielietojot Laplasa transformāciju diferenciālvienādojumam (1.42) pie nulles sākuma nosacījumiem ($t=0, \omega=0$), iegūstam operatorvienādojumu:

$$0.14 \cdot \omega(s) \cdot s + \omega(s) = 0.97 \cdot \omega_s(s), \quad (1.43)$$

kur $\omega(s)$ un $\omega_s(s)$ – momentānās un sinhronās rotācijas frekvences attēli (Laplasa transformācijas); s – Laplasa arguments (neatkarīgais mainīgais).

No operatorvienādojuma (1.43) iegūstām pārvades funkciju kā pārejas procesa matemātisko modeli, kuru ievada modelēšanas blokhēmā (1.24. att.):

$$W(s) = \frac{\omega(s)}{\omega_s(s)} = \frac{0.97}{0.14s + 1}. \quad (1.44)$$

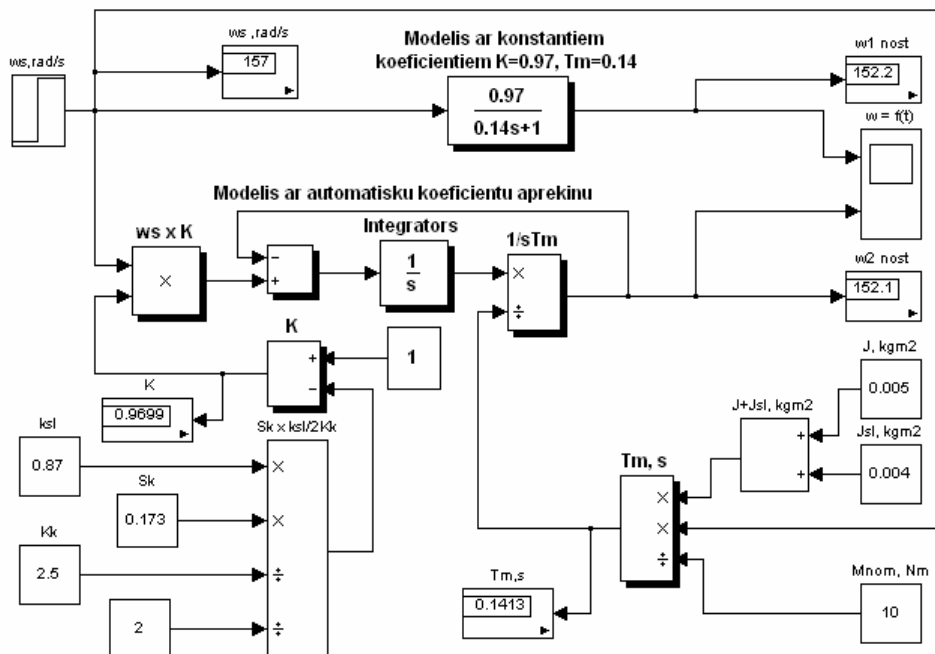
Pārejas procesa simulācijai izvēlamies bloku „Transfer Function” no „Simulink” bibliotēkas „Continuous” un konfigurējam to atbilstoši pārvades funkcijai (1.44). Simulācijas blokhēma risina procesa operatorvienādojumu pie lēcienveida ieejas iedarbes $\omega_s = 157 \text{ s}^{-1}$, kuru formē ar bloku „Step”;

$$\omega(s) = 157 \times \frac{0.97}{0.14s + 1}. \quad (1.45)$$

Šajā modelī lielumi $K = 0.97$ un $T_m = 0.14$ iepriekš jāaprēķina pēc formulām (sk. 1.42) un jāievada pārvades funkcijā kā konstanti skaitliski lielumi.

Otrs modelis dod iespēju aprēķināt lielumus K un T_m simulācijas laikā atbilstoši elektriskās piedziņas parametriem arī tad, ja tie ir laikā mainīgi lielumi.

Konstanto lielumu (1, 2, k_k , k_{sl} , s_k , M_{nom} , J un J_{sl}) formēšanai izmantojam konstanta signāla ģeneratorus „Constant” no avotu „Sources” bibliotēkas.



1.24. att. Asinhronā elektrodzinēja dinamisko raksturlīkņu modelēšanas blokshēma tukšgaitas režīmā:

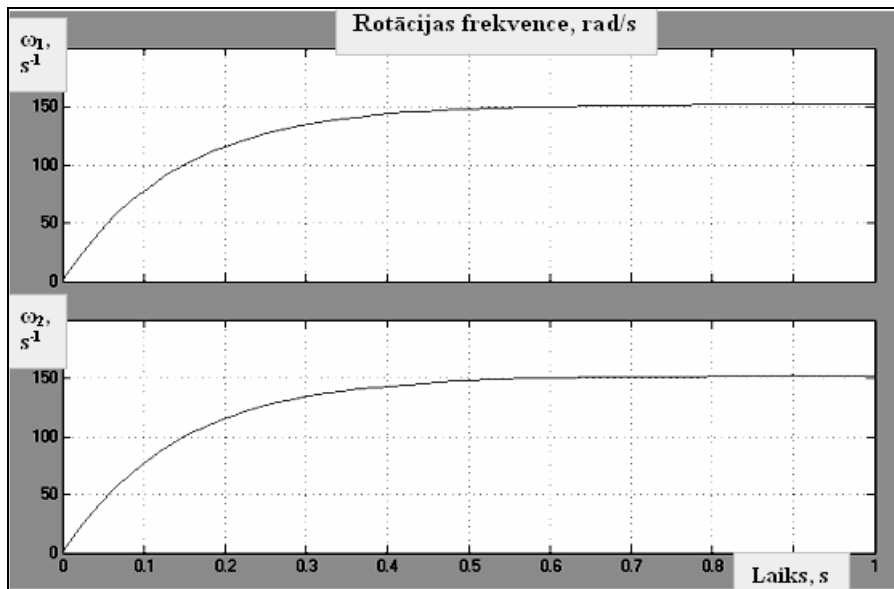
$\omega_1=f(t)$ -bāzes modelis ar konstantiem koeficientiem; $\omega_2 = f(t)$ – modelis ar koeficientu automātisku aprēķinu.

Pārvades koeficienta K aprēķinam izvēlamies blokus „Divide”($s_k \times k_{sl}/2k_k$) un „Subtract”(1- $s_k \times k_{sl}/2k_k$), bet laika konstantes T_m aprēķinam – blokus „Add”(J+J_{sl}) un „Divide”[(J+J_{sl}) $\times \omega_s/M_{nom}$] no matemātisko operāciju bibliotēkas „Math Operations”.

Procesa modelis sastāv no blokiem: „Product”($\omega_s \times K$); „Subtract”($\omega_s \times K - \omega$); „Integrator”(1/s); „Divide” (1/(s·T_m)). Aptverot integratoru ar cietu negatīvu atgriezenisko saiti, iegūst aperiodisku pārvades funkciju, kas sakrīt ar (1.45):

$$\omega(s) = 157 \times 0.97 \times \frac{1}{0.14s + 1} \quad (1.46)$$

Veicot simulāciju, iegūstam elektriskās piedziņas rotācijas frekvences izmaiņas raksturlīknes palaišanas procesā (1.25. att.). Rotācijas frekvence sasniedz nostabilizējušos lielumu $\omega_{\text{nost}} = 152\text{s}^{-1}$ laikā, kas vienāds ar četrām laika konstantēm - $t_{\text{nost}} \approx 4T_m = 4 \cdot 0.14 = 0.56 \text{ s}$. Simulācija parāda, ka abi modeļi dod vienādus rezultātus, taču modelim ar integratoru ir neapšaubāmas priekšrocības, jo tas dod iespēju adaptēt modeļa parametrus procesa simulācijas laikā.



1.25. att. **Simulētās palaišanas procesa raksturlīknes tukšgaitas režīmam:**
 ω_1 – bāzes modelim ar ievadītiem konstantiem koeficientiem $K = 0.97$, $T_m = 0.14\text{s}$;
 ω_2 – nestandarta modelim ar koeficientu automātisku aprēķinu.

1.4. Galvenie standartizētie darba režīmi un elektrodzinēja izvēle

Elektriskajai piedziņai ir pavisam astoņi standartizētie darba režīmi:

- **S1 – ilgstošs režīms** ar nemainīgu slodzi, kura laikā elektrodzinēja daļas (tinumi, rotors, stators) sasniedz nostabilizējušos temperatūru;
- **S2 – īslaicīgs režīms** ar nemainīgu slodzi, kur darba laikā elektrodzinēja daļas nesasniedz nostabilizējušos temperatūru, bet pauzes laikā tās atdziest līdz vides temperatūrai;

- **S3 – atkārtoti īslaicīgs ciklisks režīms** ar nemainīgu slodzi, kur darba laikā elektrodzinēja daļas nerasniedz nostabilizējušos temperatūru, bet pauzes laikā tās neatdziest līdz vides temperatūrai;
- **S4 – atkārtoti īslaicīgs ciklisks režīms ar biežu palaidi**, kur darba laikā elektrodzinēja daļas nerasniedz nostabilizējušos temperatūru, bet pauzes laikā tās neatdziest līdz vides temperatūrai;
- **S5 – atkārtoti īslaicīgs ciklisks režīms ar biežu palaidi un elektrisku bremzēšanu**, kur darba laikā elektrodzinēja daļas nerasniedz nostabilizējušos temperatūru, bet pauzes laikā tās neatdziest līdz vides temperatūrai;
- **S6 – ciklisks režīms, kur īslaicīgs darba periods mainās ar tukšgaitas periodu** un darba laikā elektrodzinēja daļas nerasniedz nostabilizējušos temperatūru, bet tukšgaitas laikā tās neatdziest līdz konstantai temperatūrai;
- **S7 – ciklisks režīms ar biežiem reversiem, kur reversēšanas periods mainās ar nominālas slodzes periodu** un šo periodu ilgums ir tāds, ka to laikā elektrodzinēja daļas nerasniedz nostabilizējušos temperatūru;
- **S8 – ciklisks režīms ar diviem vai vairākiem rotācijas ātrumiem**, kur darba periods pie viena rotācijas ātruma un slodzes mainās ar darba periodu pie cita rotācijas ātruma un tam atbilstošas slodzes un šo periodu laikā elektrodzinēja daļas nerasniedz nostabilizējušos temperatūru.

Pirmie septiņi režīmi (**S1-S7**) galvenokārt attiecas uz neregulējamo elektrisko piedziņu (elektrodzinēja rotācijas ātrums netiek regulēts). Režīms **S8** attiecas uz regulējamo elektrisko piedziņu ar diviem vai vairākiem rotācijas ātrumiem.

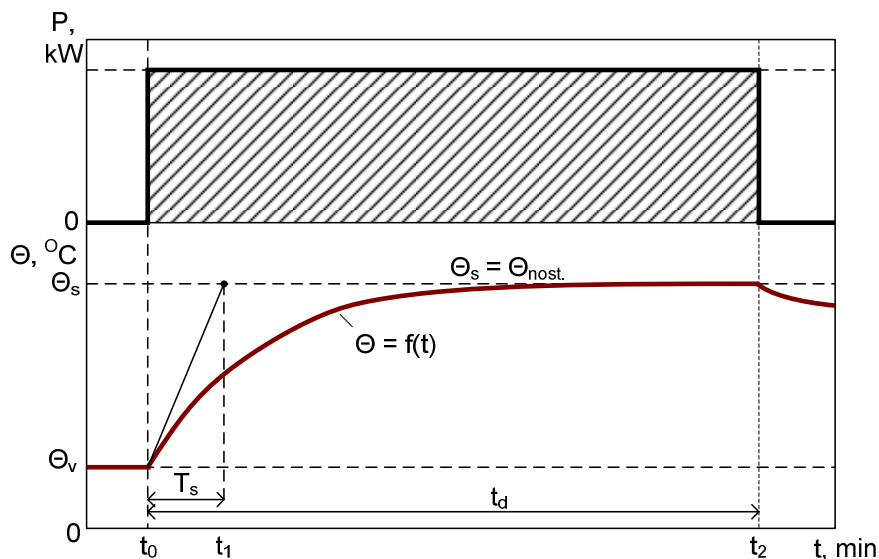
Detalizēti apskatīsim galvenos režīmus - **S1**, **S2**, **S3** un režīmu - **S8**. Pārējie ir atvasināti no režīmiem **S1**, **S3** un tiek apskatīti elektriskās piedziņas pamatos.

1.4.1. Elektrodzinēja darbība un izvēle ilgstošā darba režīmā **S1**

Ilgstošā režīmā ar nemainīgu slodzi darbojas notekūdeņu aerācijas kompresori, cirkulācijas sūkņi, vēdināšanas un žāvēšanas iekārtu ventilatori. Atbilstību standartizētajam darba režīmam **S1** nosaka pēc elektrodzinēja silšanas. Ilgstošā režīmā elektrodzinēja temperatūra sasniedz nostabilizētu vērtību θ_{nost} (1.26. att.).

Lai temperatūra sasniegtu nostabilizētu vērtību, elektrodzinēja darba laikam jābūt lielākam par trim silšanas laika konstantēm: $t_d > 3 T_s$. Ja temperatūras

raksturlīkne uzņemta eksperimentāli, tad silšanas laika konstanti T_s nosaka grafoanalītiski, velkot pieskari līdz krustpunktam ar ordinātu $\theta = \theta_{nost}$ (1.26.att.).



1.26. att. Jaudas $P = f(t)$ un temperatūras $\theta = f(t)$ raksturlīknes ilgstošam darba režīmam – S1 ar nemainīgu slodzi.

Elektrodzinēja izvēle režīmam S1.

No kataloga izvēlas elektrodzinēju, kas paredzēts ilgstošam darba režīmam. Lai izvēlētos elektrodzinēju ar atbilstošu nominālo mehānisko jaudu P_{nom} , nepieciešams aprēķināt vai izmērīt slodzes jaudu P_{sl} vai slodzes momentu M_{sl} .

Elektrodzinēja izvēli nosaka sekojoši nosacījumi:

$$P_{nom} \geq P_{sl}, \quad M_{nom} \geq M_{sl}. \quad (1.47)$$

Ja ir smagi palaišanas apstākļi, izvēlētais elektrodzinējs jāpārbauda pēc palaišanas momenta M_{pal} :

$$M_{pal} \geq M_{pal\,sl}, \quad (1.48)$$

kur M_{pal} - elektrodzinēja palaišanas moments, Nm;

M_{palsl} – slodzes pieprasītais palaišanas moments, Nm;

Ja reālā slodze ir mainīga, elektrodzinējs jāpārbauda arī pēc pārslodzes spējas:

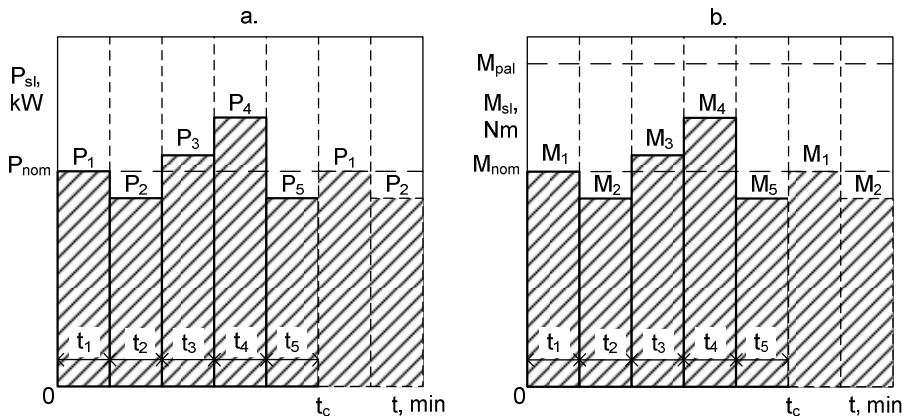
$$M_k \geq M_{pal_{max}}, \quad (1.49)$$

kur M_k - elektrodzinēja kritiskais (maksimālais) moments, Nm;

$M_{pal_{max}}$ – slodzes maksimālais moments, Nm;

Elektrodzinēja izvēle mainīgai slodzei.

Mainīgai ilgstošai slodzei (1.27. att.) elektrodzinēja izvēli nosaka tā silšana. Elektrodzinēja tinumu maksimālā temperatūra nevienā darba ciklā nedrīkst pārsniegt dotajai izolācijas klasei ilgstoši pieļaujamo, piemēram, **B** klasei $\theta_{pieļ} = 120\text{ }^{\circ}\text{C}$. Lai izvēlētos elektrodzinēju, jānosaka tā silšanas raksturliktne, kas ir sarežģīts un darbietilpīgs process. Tādēļ praksē lieto vienkāršākas tuvinātas metodes, piemēram, vidējo jaudas zudumu metodi, ekvivalentās strāvas metodi, ekvivalentā momenta metodi un ekvivalentās jaudas metodi. Katrai metodei ir savas priekšrocības un trūkumi. No praktiskā viedokļa ērtāka ir ekvivalentās jaudas metode, īpaši tad, ja iespējams uzņemt slodzes diagrammu (1.27. att.).



1.27. att. Slodzes jaudas $P_{sl} = f(t)$ (a) un slodzes momenta $M_{sl} = f(t)$ (b) diagrammas ilgstošam darba režīmam – S1 ar mainīgu slodzi.

Slodzes diagrammu sadala intervālos ar konstantu jaudu- t_1, P_1 ; t_2, P_2 ; t_3, P_3 u.t.t. un vienveidīgos darba ciklos t_c , kas periodiski atkārtojas. Ekvivalento jaudu aprēķina vienam darba ciklam:

$$P_{ekv} = \frac{\sqrt{P_1^2 \cdot t_1 + P_2^2 \cdot t_2 + P_3^2 \cdot t_3 + P_4^2 \cdot t_4 + P_5^2 \cdot t_5}}{t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5}, \quad (1.50)$$

kur $t_1+t_2+t_3+t_4+t_5 = t_c$ – cikla laiks, s.

Elektrodzinēju izvēlas no nosacījuma:

$$P_{nom} \geq P_{ekv} . \quad (1.51)$$

Obligāti jāpārbauda nosacījumu (1.48) un (1.49) izpilde.

1.4.2. Elektrodzinēja darbība un izvēle īslaicīgā darba režīmā S2

Īslaicīgā režīmā ar nemainīgu slodzi darbojas kanalizācijas sūkņi, periodiskas nosūkšanas ventilatori, sūkņi ūdensapgādes iekārtās ar mazu ūdens patēriņu, celšanas mehānismu elektriskā piedziņa.

Atbilstību standartizētajam režīmam **S2** nosaka pēc elektrodzinēja silšanas. Darba laikā t_d elektrodzinēja daļu temperatūra nesasniedz nostabilizētu vērtību $\theta_d < \theta_{nost}$, bet pauzes laikā t_p , tas atdziest līdz vides temperatūrai θ_v (1.28. att.).

Lai elektrodzinēja temperatūra nesasniegtu nostabilizētu vērtību, tā darba laikam jābūt mazākam par trim silšanas laika konstantēm $t_d < 3 T_s$. Lai elektrodzinējs atdziestu līdz vides temperatūrai, pauzes laikam jābūt lielākam par trim silšanas laika konstantēm $t_p > 3 T_s$.

Elektrodzinēja izvēle režīmam S2.

Ja izvēlas elektrodzinējus no kataloga, kas paredzēti īslaicīgam darba režīmam, tad vadās pēc standartizētajiem darba laikiem: $t_{dst} = 10, 30, 60, 90 \text{ min.}$ Ja reālais darba laiks nesakrīt ar standartizēto laiku, veic pārrēķinu.

Elektrodzinēja izvēli nosaka sekojoši nosacījumi:

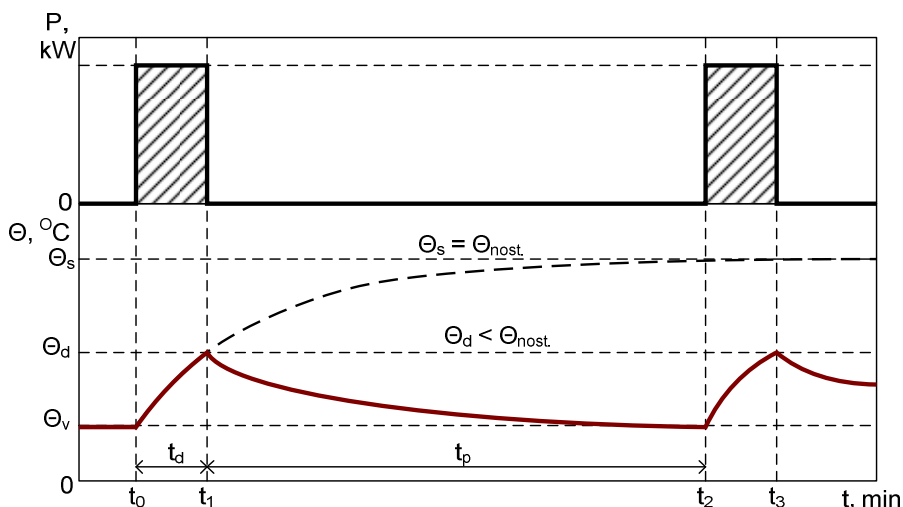
$$P_{nom} \geq P_{sl}, \quad M_{nom} \geq M_{sl} . \quad (1.52)$$

Ja ir smagi palaišanas apstākļi, izvēlētais elektrodzinējs jāpārbauda pēc palaišanas momenta:

$$M_{pal} \geq M_{pal_{sl}} . \quad (1.53)$$

Mainīgai slodzei elektrodzinējs jāpārbauda arī pēc pārslodzes spējas:

$$M_k \geq M_{pal_{max}} . \quad (1.54)$$



1.28. att. Jaudas $P = f(t)$ un temperatūras $\theta = f(t)$ raksturlīknes īslaicīgam darba režīmam – S2 ar nemainīgu slodzi.

Speciālie katalogi nav plaši pieejami. Tādēļ īslaicīgam darba režīmam **S2** parasti izvēlas elektrodzinējus, kas paredzēti ilgstošam darba režīmam **S1**. Lai šāds elektrodzinējs, darbojoties īslaicīgā režīmā, tiktu pietiekami termiski noslogots, tā nominālo jaudu izvēlas mazāku par slodzes pieprasīto jaudu ($P_{nom} < P_{sl}$).

Tātad elektrodzinēja izvēli īslaicīgā režīmā, tāpat kā ilgstošā režīmā, galvenokārt nosaka tā silšana. Apskatīsim divus elektrodzinēja jaudas izvēles variantus.

1. variants

Elektrodzinēja nominālā jauda vienāda ar slodzes pieprasīto jaudu ($P_{nom1} = P_{sl}$). Tad īslaicīgā darba laika t_d beigās elektrodzinēja virstemperatūra ir zemāka par pieļaujamo ($\tau_{1d} < \tau_{pieļ}$) (1.29. att.). Tātad elektrodzinēja termiskās noslodzes spēja netiek izmantota.

2. variants

Izvēlamies elektrodzinēja nominālo jaudu mazāku par slodzes pieprasīto jaudu ($P_{nom2} < P_{sl}$) tā, lai īslaicīgā darba laika t_d beigās elektrodzinēja tinumu virstemperatūra nepārsniegtu attiecīgajai izolācijas termiskajai klasei pieļaujamo lielumu ($\tau_{2d} \leq \tau_{pieļ}$):

$$\tau_{2d} = \tau_{2s} (1 - e^{-t_d/T_s}), \quad (1.55)$$

kur τ_{2s} – nostabilizējiesies virstemperatūra, °C;

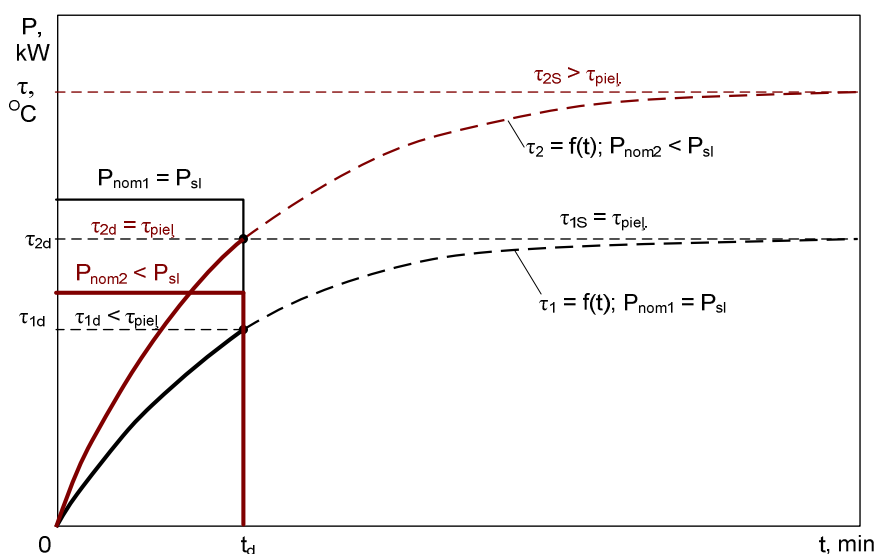
T_s – silšanas laika konstante, min.

Izmantojot (1.55), var aprēķināt elektrodzinēja termiskās pārslodzes koeficientu:

$$k_{\tau} = \frac{\tau_{2s}}{\tau_{2d}} = \frac{\tau_{2s}}{\tau_{2s}(1 - e^{-td/Ts})} = \frac{1}{(1 - e^{-td/Ts})}. \quad (1.56)$$

Nominālās jaudas aprēķinam izmantojam mehāniskās pārslodzes koeficientu:

$$k_m = \frac{P_{sl}}{P_{nom}} \approx \sqrt{k_{\tau}}, \text{ no kurienes } P_{nom} = \frac{P_{sl}}{\sqrt{k_{\tau}}}. \quad (1.57)$$



1.29. att. Jaudas $P = f(t)$ un virstemperatūras $\tau = f(t)$ raksturīknes īslaicīgam darba režīmam – S2 ar nemainīgu slodzi:

$\tau_1 = f(t)$ – elektrodzinēja nominālā jauda vienāda ar slodzes jaudu ($P_{nom1} = P_{sl}$);
 $\tau_2 = f(t)$ – nominālā jauda mazāka par slodzes jaudu ($P_{nom2} < P_{sl}$).

1. piemērs. Aprēķināt elektrodzinēja nominālo jaudu īslaicīgam darba režīmam, ja

$t_d = 10 \text{ min}$, $T_s = 20 \text{ min}$, $P_{sl} = 4.5 \text{ kW}$.

Atrisinājums. Termiskās pārslodzes koeficients:

$$k_{\tau} = \frac{1}{(1 - e^{-td/Ts})} = \frac{1}{(1 - e^{-10/20})} = 2.54.$$

Aprēķinātā nominālā jauda:

$$P_{nom} = P_{sl} / \sqrt{k_{\tau}} = 4.5 / \sqrt{2.54} = 2.8 kW$$

Izvēlamies elektrodzinēju ar $P_{nom} = 3 kW$.

2. piemērs. Aprēķināt elektrodzinēja nominālo jaudu īslaicīgam darba režīmam, ja

$$t_d = 30 \text{ min}, T_s = 20 \text{ min}, P_{sl} = 4.5 kW.$$

Atrisinājums. Termiskās pārslodzes koeficients:

$$k_{\tau} = \frac{1}{(1 - e^{-t_d / T_s})} = \frac{1}{(1 - e^{-30 / 20})} = 1.3.$$

Aprēķinātā nominālā jauda:

$$P_{nom} = P_{sl} / \sqrt{k_{\tau}} = 4.5 / \sqrt{1.3} = 4 kW.$$

Izvēlamies elektrodzinēju ar $P_{nom} = 4 kW$.

Elektrodzinēja izvēle noteikti jāpārbauda pēc nosacījumiem (1.53 un 1.54).

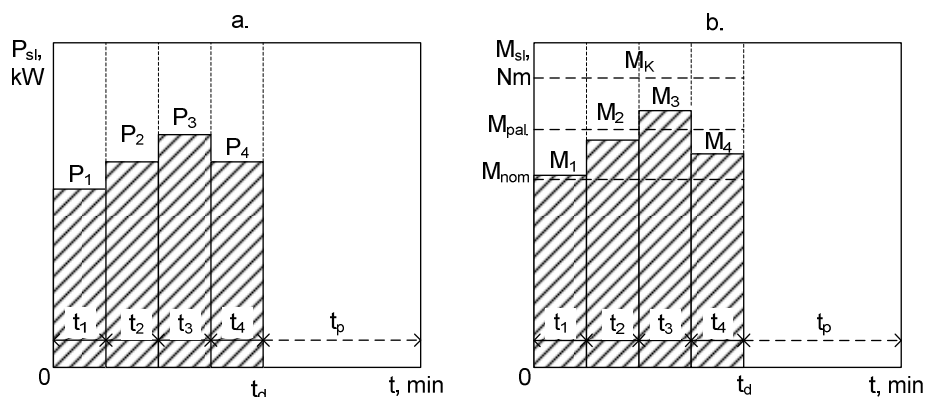
Elektrodzinēja izvēle mainīgai slodzei.

Ja ir uzņemta mainīgās slodzes diagramma (1.30. att.), tad elektrodzinēja izvēli var veikt pēc ekvivalentās slodzes jaudas aprēķina:

$$P_{sl_{ekv}} = \frac{\sqrt{P_1^2 \cdot t_1 + P_2^2 \cdot t_2 + P_3^2 \cdot t_3 + P_4^2 \cdot t_4}}{t_d}. \quad (1.58)$$

Ievietojot aprēķināto ekvivalento jaudu izteiksmē (1.57), nosaka elektrodzinēja nepieciešamo nominālo jaudu.

Obligāti jāpārbauda izvēlētajā elektrodzinēja atbilstība pēc slodzes pieprasītā palaišanas momenta un maksimālā momenta (nosacījumu 1.53 un 1.54 izpilde).



1.30. att. Slodzes jaudas $P_{sl} = f(t)$ (a) un slodzes momenta $M_{sl} = f(t)$ (b) diagrammas īslaicīgam darba režīmam – S2 ar mainīgu slodzi.

1.4.3. Elektrodzinēja darbība un izvēle atkārtoti-īslaicīgā režīmā S3

Atkārtoti-īslaicīgā režīmā **S3** un tam modificētajos darba režīmos **S4** (ar biežu palaišanu) un **S5** (ar biežu palaišanu un bremzēšanu) darbojas kokapstrādes un metālapstrādes darbgaldu padeves mehānismu, stumbru sagarumošanas līniju padeves transportieru un cikliskas darbības celšanas mehānismu elektriskā piedziņa.

Atbilstību standartizētajam režīmam **S3** nosaka pēc elektrodzinēja silšanas. Darba laikā t_d elektrodzinēja daļu temperatūra nesasniedz nostabilizētu vērtību $\theta_d < \theta_{nost}$, bet pauzes laikā t_p , tās neatdziest līdz vides temperatūrai θ_v (1.31. att.), pie kam cikla ilgums $t_c = t_d + t_p \leq 10 \text{ min}$.

Elektrodzinēja darbību režīmā **S3** raksturo relatīvais darba ilgums, ko izsaka procentos:

$$\varepsilon = \frac{t_d}{t_d + t_p} \cdot 100 \% = \frac{t_d}{t_c} \cdot 100 \% . \quad (1.59)$$

Pieņemtie standartizētie darba ilgumi ir sekojoši: $\varepsilon_{st} = 15\%, 25\%, 40\% \text{ un } 60\%$.

Bieža elektrodzinēja ieslēgšana un izslēgšana rada elektriskas un termiskas pārslodzes (komutācijas pārspriegumi samazina izolācijas resursu, lielā palaišanas strāva pastiprina elektrodzinēja silšanu).

Lai ierobežotu minētos faktorus, nosaka elektrodzinēja maksimālo pieļaujamo komutāciju biežumu (ieslēgšanas-izslēgšanas skaitu vienā stundā). Asinhronajam

elektrodzinējam ar konstantu nominālu slodzi maksimāli pieļaujamo komutāciju biežumu stundā var noteikt, izmantojot tuvinātu izteiksmi:

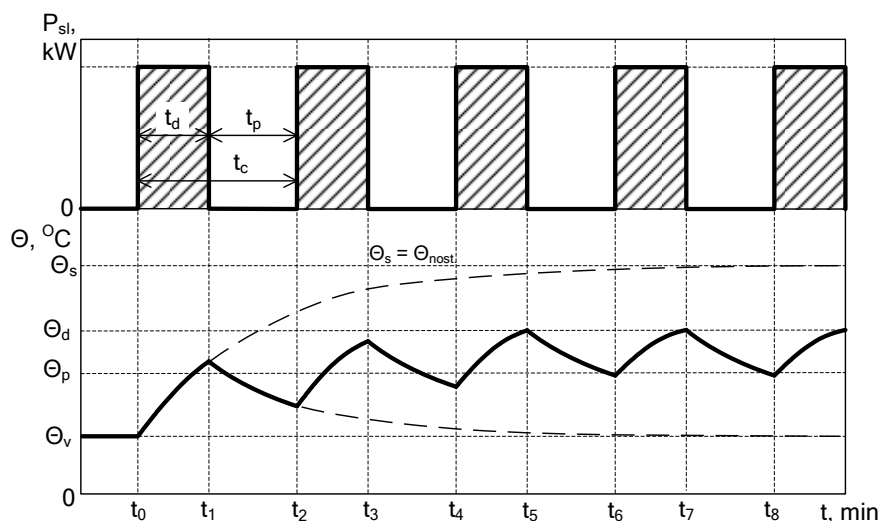
$$f_{\max} \approx \frac{36 \cdot (100 - \varepsilon)}{t_{\text{pal}} \cdot (I_{\text{pal}} / I_{\text{nom}})^2}, \quad (1.60)$$

kur t_{pal} – elektrodzinēja palaides laiks, s;

I_{pal} – elektrodzinēja palaides strāva, A;

I_{nom} – elektrodzinēja nominālā strāva, A.

Elektrodzinējam ar mazāku relatīvo darba ilgumu pieļaujams lielāks komutāciju biežums. Savukārt smagos palaišanas apstākļos ar relatīvi lielu palaides laiku maksimālais komutāciju skaits jāsamazina. Lielumu $f_{\max}$ būtiski iespaido palaides strāvas koeficients $k_{\text{pal}} = I_{\text{pal}}/I_{\text{nom}}$, jo asinhronajiem elektrodzinējiem $k_{\text{pal}} = 5 \dots 7$.



1.31. att. Jaudas $P = f(t)$ un temperatūras $\theta = f(t)$ raksturlīknes atkārtoti īslaicīgam darba režīmam – S3 ar nemainīgu slodzi.

Elektrodzinēja izvēle režīmam S3.

Atkārtoti-īslaicīgam darba režīmam **S3** un tā modifikācijām **S4** un **S5** izvēlas elektrodzinējus, kas paredzēti šādam darba režīmam. Tie ir elektrodzinēji ar paaugstinātu slīdi. Katalogos dota elektrodzinēju jauda atbilstoši standartizētajiem relatīvajiem darba ilgumiem: **15%, 25%, 40%** un **60%**.

Ja elektriskās piedziņas relatīvais darba ilgums režīmā **S3** atbilst standarta lielumam ϵ_{st} , tad elektrodzinēja izvēli nosaka sekojoši nosacījumi:

$$P_{nom\epsilon_{st}} \geq P_{sl}, \quad M_{nom\epsilon_{st}} \geq M_{sl}, \quad (1.61)$$

kur $P_{nom\epsilon_{st}}$ un $M_{nom\epsilon_{st}}$ - standartizētajam relatīvajam darba ilgumam atbilstošā elektrodzinēja nominālā jauda (kW) un nominālais moments (Nm).

Smagos palaišanas apstākļos, izvēlētais elektrodzinējs jāpārbauda pēc palaišanas momenta:

$$M_{pal\epsilon_{st}} \geq M_{pal_{sl}}. \quad (1.62)$$

Ja reālais relatīvais darba ilgums ϵ nesakrīt ar standartizēto lielumu ϵ_{st} , veic elektrodzinēja jaudas pārrēķinu atbilstoši reālajam lielumam ϵ :

$$P_{nom\epsilon} \geq P_{sl} \cdot \sqrt{\epsilon / \epsilon_{st}}, \quad (1.63)$$

Izvēlas elektrodzinēju, kura standartizētais darba režīms vistuvāk atbilst reālajam režīmam, piemēram, ja $\epsilon = 75\%$, izvēlas $\epsilon_{st} = 60\%$. Veicot pārrēķinu, iegūstam, ka $P_{nom\epsilon} \geq P_{sl} \cdot \sqrt{75 / 60} = P_{sl} \cdot 1.12$. Tātad jāizvēlas elektrodzinējs ar aptuveni 12% lielāku jaudu.

Ja $\epsilon > 80\%$, izvēlas elektrodzinēju, kas paredzēts ilgstošam darba režīmam **S1**.

Ja elektrodzinēja slodze darba laikā ir mainīga, vai sastādās no vairākām komponentēm, piemēram, **palaišana-nomināls darba režīms-bremzēšana**, tad jaudas aprēķinam var izmantot ekvivalentās jaudas metodi:

$$P_{nom\epsilon} \geq \sqrt{\frac{\epsilon \cdot \sum (P_i^2 \cdot t_{di})}{\epsilon_{st} \cdot \sum t_{di}}}, \quad (1.64)$$

kur P_i un t_{di} - jaudas komponentes un to darbības laiki.

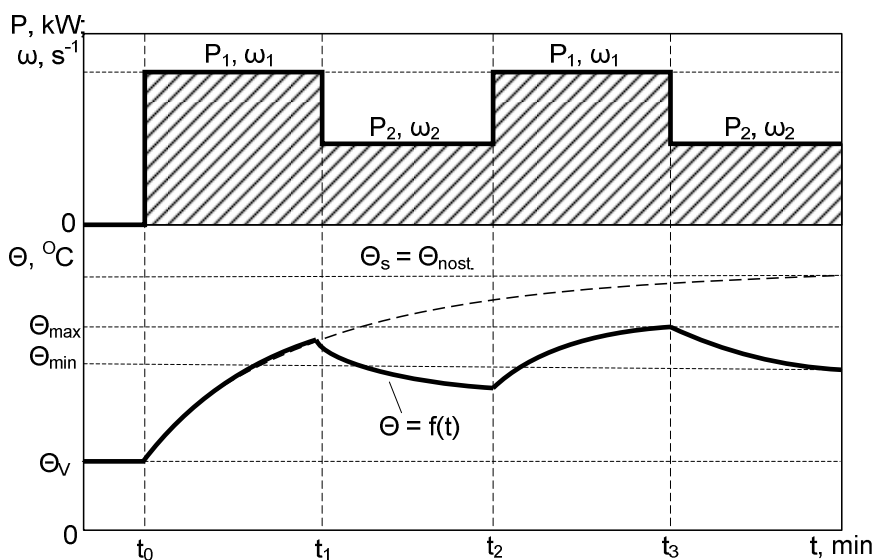
Mainīgai slodzei elektrodzinējs jāpārbauda arī uz kritisko momentu - $M_{kr} \geq M_{maxsl}$.

1.4.4. Cikliskais darba režīms ar rotācijas frekvences maiņu S8

Cikliskajā režīmā **S8** darbojas elektriskās piedziņas ar diskrēti maināmu vārpstas rotācijas frekvenci (divu un vairāku ātrumu sūkņi, ventilatori, kompresori, konveijeri, precīzās pozicionēšanas iekārtas).

Režīmu **S8** raksturo elektriskās piedziņas darbība ar vienu rotācijas frekvenci ω_1 ar tai atbilstošu nemainīgu slodzi P_1 un darba laiku $t_{d1} = t_1 - t_0$, ko periodiski nomaina darbība ar citu rotācijas frekvenci ω_2 ar tai atbilstošu nemainīgu slodzi P_2 un darba laiku $t_{d2} = t_2 - t_1$, pie kam elektrodzinēja temperatūra nesasniedz nostabilizētu vērtību ($\theta_{\max} < \theta_{\text{nost}}$, $\theta_{\min} > \theta_v$), kur θ_v – vides temperatūra (1.32. att.).

Standartizēto darba režīmu **S8** visatbilstošāk var realizēt ar vairāku ātrumu asinhronajiem elektrodzinējiem, kuru rotācijas frekvenci maina, pārslēdzot polu skaitu. Vienveidīgo darba ciklu ($t_c = t_{d1} + t_{d2}$) atkārtējos nodrošina, izmantojot loģisko programmēto vadību. Elektrodzinēja izvēli nosaka rotācijas frekvenču pārslēgšanas biežums stundā, slodzes jauda katrai rotācijas frekvencei un tai atbilstošais relatīvais darba ilgums attiecībā pret cikla laiku.



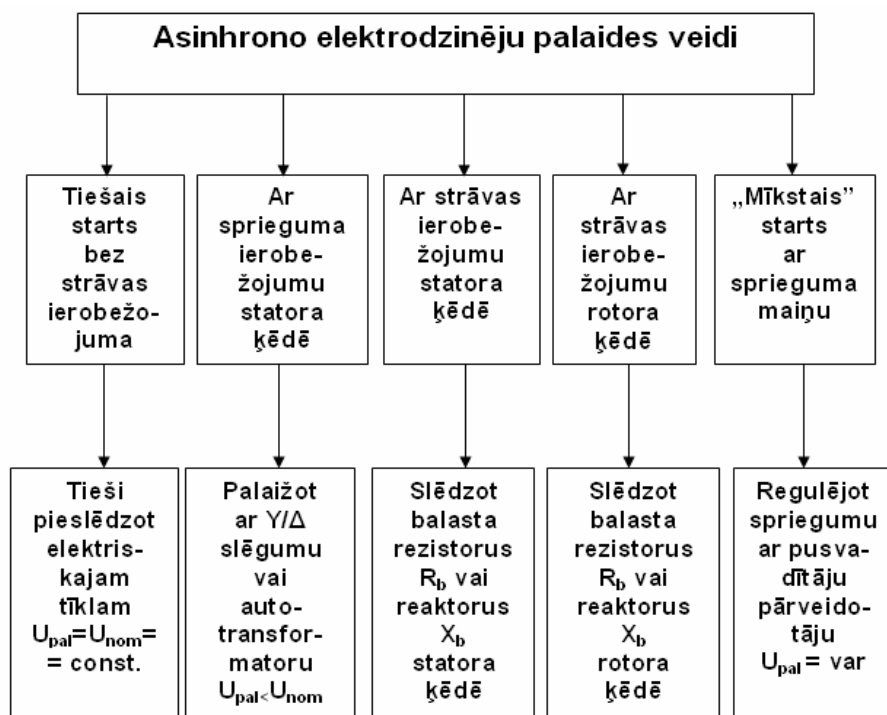
1.32. att. Jaudas $P = f(t)$ un temperatūras $\theta = f(t)$ raksturlīknes cikliskam darba režīmam S8 ar divām diskrētām rotācijas frekvencēm ω_1 un ω_2 .

2. Elektriskās piedziņas automātiskā palaide

2.1. Palaides veidu klasifikācija

Par elektrodzinēja palaidi sauc tā rotora iegriešanos no miera stāvokļa līdz stacionāram rotācijas ātrumam n_{st} pēc statora tinuma pieslēgšanas elektriskajam tīklam. Tīkla sprieguma ieslēgšanas momentā, kad rotors vēl negriežas ($n = 0$) un slīde ($s = 1$), elektrodzinēja palaides strāva I_{pal} vairākkārtīgi pārsniedz nominālo strāvu I_{nom} . Trīsfāzu asinhronajiem elektrodzinējiem $I_{pal} = (5...7)I_{nom}$.

Elektrodzinēja palaides strāva rada lielu papildus slodzi elektriskajam tīklam, kas var izraisīt sprieguma būtisku pazemināšanos un nelabvēlīgi iespaidot pārējo patērētāju darbību. Lai to novērstu, izmanto dažādus paņēmienus palaides strāvas ierobežošanai (2.1. att.). Strāvas ierobežojumu limitē elektrodzinēja griezes moments M , kas nepieciešams darbināmā mehānisma pretestības (slodzes) momenta M_{sl} pārvarēšanai.



2.1. att. Asinhrono elektrodzinēju palaides veidu klasifikācija.

Lai elektriskā piedziņa normāli darbotos, vienmēr jāizpildās nosacījumam – $M \geq M_{sl}$. Asinhronajiem elektrodzinējiem moments mainās tieši proporcionāli statora tinumu fāzes sprieguma U_f vai fāzes strāvas I_f kvadrātam:

$$M^* \approx M \cdot \left(\frac{U_f^*}{U_f}\right)^2 \approx M \cdot \left(\frac{I_f^*}{I_f}\right)^2, \quad (2.1)$$

kur M^* - elektrodzinēja moments atbilstoši spriegumam U_f^* (V) vai strāvai I_f^* (A).

Samazinot spriegumu divkārtīgi ($U_f^* = 0.5U_f$), moments samazinās četrkārtīgi ($M^* = 0.25M$). Ja elektrodzinēja nominālais palaides moments $M_{pal} = 2M_{nom}$, tad pie divkārt pazemināta sprieguma tas ir $M_{pal}^* = 2 \cdot 0.25M_{nom} = 0.5M_{nom}$.

Asinhronos elektrodzinējus palaiž tieši pieslēdzot elektriskajam tīklam bez palaišanas strāvas ierobežojuma, ja elektriskā tīkla jauda ir vairākkārtīgi lielāka par elektrodzinēja palaišanas jaudu.

Vidējas jaudas (līdz 20kW) asinhrono elektrodzinēju ar īsi slēgtu rotoru palaides strāvas ierobežošanai 1.5 līdz 2 reizes izmanto statora ķēdē slēgtus balasta rezistorus R_b vai reaktorus X_b . Metodes galvenais trūkums ir relatīvi lieli enerģijas zudumi balasta elementos un mazs palaides moments, tādēļ elektrodzinējs jāpalaiž nenoslogots.

Vidējas un lielas jaudas asinhrono elektrodzinēju ar īsi slēgtu rotoru palaides strāvas 3-kārtīgai samazināšanai tradicionāli izmanto statora tinumu zvaigznes un trīsstūra slēguma shēmas (Y/Δ - **slēgums**). Elektrodzinēju palaiž Y - **slēgumā** pie pazemināta sprieguma. Pēc iedarbināšanās elektrodzinēja tinumus pārslēdz Δ - **slēgumā** pie nominālā sprieguma. Metodes priekšrocība ir relatīvi mazi enerģijas zudumi palaides režīmā. Metodes pielietošanu daļēji ierobežo nepieciešamība izvēlēties atbilstošu spriegumu elektrodzinējus. Lai palaistu no **380 V** elektriskā tīkla, jāizvēlas elektrodzinējs ar nominālajiem spriegumiem $Y/\Delta = 660/380$ V.

Asinhrono elektrodzinēju ar fāzu rotoru palaides strāvas ierobežošanai tradicionāli izmanto balasta rezistorus vai reaktorus rotora ķēdē. Vienlaicīgi ar strāvas ierobežojumu iegūst paaugstinātu palaišanas momentu, kas dod iespēju iedarbināt mehānismus smagos palaišanas apstākļos. Šādas piedziņas galvenais trūkums ir elektriskie kontakti rotora ķēdē, kas pazemina ekspluatācijas drošumu.

Modernajās elektriskajās piedziņās izmanto pusvadītāju „mīkstās” palaides iekārtas, kas dod iespēju realizēt pakāpenisku palaišanu un nepieciešamo strāvas ierobežojumu ar automātisku sprieguma maiņu visā palaides procesā.

2.2. Vadības un aizsardzības aparātūra

2.2.1. Automātslēdži, kontaktori un siltuma releji

Elektriskās piedziņas vadībai un aizsardzībai distancvadības (rokas vadības) un automātiskās vadības režīmos izmanto atbilstošu vadības-aizsardzības aparāturu. Tradicionāli tie ir automātslēdži, kontaktori un siltuma releji.

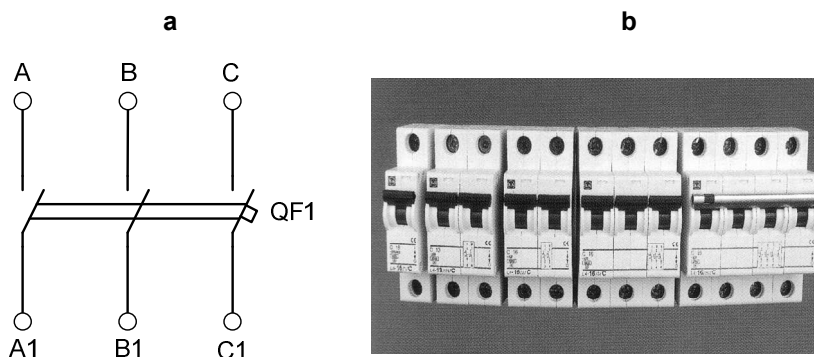
Automātslēdži.

Automātslēdži vienlaicīgi nodrošina divas funkcijas:

- elektrisko ķēžu komutāciju (saslēgšanu un pārtraukšanu);
- elektriskā tīkla un patērētāja aizsardzību pret elektriskām pārslodzēm.

Asinhronās elektriskās piedziņas shēmās automātslēdžus izmanto barošanas sprieguma pieslēgšanai un atslēgšanai spēka un vadības ķēdēm, kā arī šo ķēžu un elektriskā tīkla aizsardzībai pret īssavienojuma strāvām. Šāds automātslēdzis ir apgādāts ar elektromagnētisko atkabni, kas nodrošina slēdža automātisku ātru atslēdzi no īssavienojuma strāvām.

Trīsfāzu elektriskās piedziņas spēka ķēdēs izmanto trīspolīgos automātslēdžus (2.2. att.), kuru simboliskais apzīmējums sastāv no diviem burtiem: **Q** – spēka slēdzis; **F** - ar aizsardzības funkciju.



2.2. att. **Automātslēdži:**

a – vispārīgs apzīmējums elektriskajās shēmās; b – tehniskais dizains.

Normālā režīmā slēdzi ieslēdz un atslēdz manuāli (ar roku). Slēdzi ieslēdzot tiek nospiesta tā atslēgšanas atspere, kuru fiksē noturētājspriņķis. Elektrisko strāvu katrā fāzē kontrolē elektromagnēts, kurš sastāv no strāvas spoles un feromagnētiska

enkura. Ja kādā no fāzēm rodas īssavienojuma strāva, enkurs ievēlās spolē un ar belzni iedarbojas uz noturētājsprūdu, kā rezultātā atbrīvojas atspere un ar lielu ātrumu atslēdz automātslēdzi.

Vienpolīgos vai divpolīgos automātslēdžus izmanto elektriskās piedziņas vadības ķēžu aizsardzībai: vienpolīgos – 220 V ķēdei; divpolīgos – 380 V ķēdei. Vadības (vājstrāvas) ķēdēs lieto divu burtu apzīmējumu **SF**, kur **S** – vājstrāvas slēdzis; **F** - ar aizsardzības funkciju.

Automātslēdzī bez elektromagnētiskās atkabnes var būt iebūvēta arī siltuma (termiskā) atkabne. Ja tā ir regulējama, proti, ar iespēju iestatīt atslēdzes strāvu atbilstoši dotā elektrodzinēja nominālajai strāvai, tad šādu automātslēdzi var izmantot elektrodzinēja aizsardzībai arī pret pārslodzēm - vienas fāzes atteici trīsfāzu elektriskajā tīklā, ilgstošu tehnoloģisku pārslodzi vai rotora nosprūšanu. Šajā gadījumā automātslēdzis nav jādublē ar siltuma releju, bet elektriskajā shēmā jāparāda izvērsts automātslēdža grafiskais apzīmējums ar siltuma atkabni.

Turpmāk visās elektriskās piedziņas spēka ķēdēs tiek izmantoti automātslēdži ar elektromagnētisko atkabni. Elektrodzinēju aizsardzību pret pārslodzēm nodrošina siltuma releji.

Automātslēdžu izvēle.

Automātslēdzi izvēlas atbilstoši elektroiekārtas nominālajam spriegumam un nominālajai strāvai. Nostrādes iestatījumus izvēlas sekojoši.

1. Elektromagnētiskās atslēdzes strāvas iestatījums:

$$I_e \geq 1.2 \cdot I_{pal}, \quad (2.2)$$

kur I_{pal} – elektrodzinēja palaides strāva, A.

2. Siltuma atslēdzes strāvas iestatījums mainīgai slodzei:

$$I_s \geq 1.25 \cdot I_{nom}, \quad (2.3)$$

kur I_{nom} – elektrodzinēja nominālā strāva, A.

3. Elektromagnētiskās atslēdzes strāvas iestatījums elektrodzinēju grupai:

$$I_e \geq 1.2(I_{pal}^{\max} + k_v \sum_{i=1}^{n-1} I_{nom_i}), \quad (2.4)$$

kur $I_{pal}^{\max}$ – elektrodzinēja ar vislielāko jaudu palaides strāva, A;

$\sum_{i=1}^{n-1} I_{nom_i}$ – elektrodzinēju grupas summārā nominālā strāva, izņemot $I_{nom}^{\max}$, A;

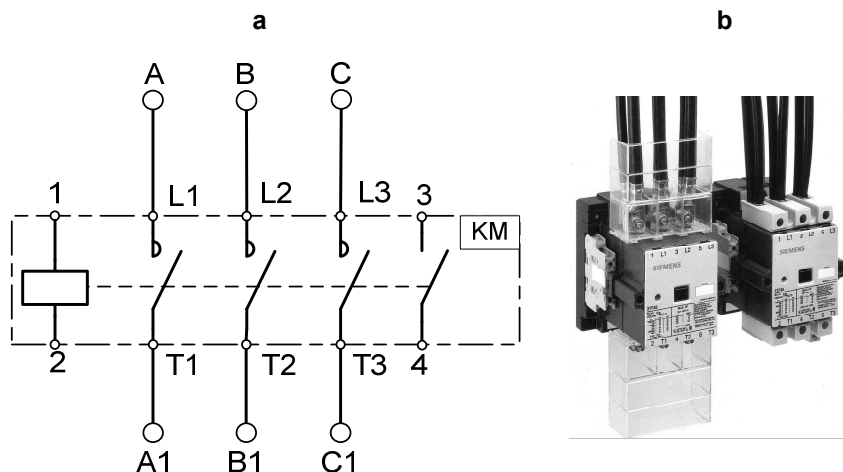
$k_v = (0.5 \dots 0.85)$ – elektrodzinēju darbības vienlaicības koeficients.

Kontaktori.

Kontaktori ir elektromagnētiskie aparāti elektrisko spēka ķēžu komutācijai. Trīspolīgos kontaktorus izmanto trīsfāzu asinhrono elektrodzinēju automātiskai, pusautomātiskai un distancvadībai. Kontaktori sastāv no elektromagnēta un elektrisko kontaktu sistēmas. Kontaktora ieejas elements ir spole, kas uzmontēta uz feromagnētiska materiāla serdeņa, kuru noslēdz tāda paša materiāla enkurs.

Pievadot spoles spailēm **1-2** nominālo spriegumu, tajā plūst strāva, kuras radītā magnētiskā plūsma Φ noslēdzas caur serdeni, gaisa spraugu un enkuru. Plūsma Φ rada elektromagnētisko vilces spēku F_e un enkurs pievelkas pie serdeņa, pārvietojot kontaktplāksnes, kuras saslēdz spēka kontaktus **L1-T1**, **L2-T2** un **L3-T3**, kā arī vājstrāvas kontaktus **3-4**, kurus izmanto vadības ķēdē (2.3.a att.).

Pieejams plašs kontaktoru klāsts trīsfāzu asinhrono elektrodzinēju ar jaudu no **2.2 kW** līdz **450 kW** un nominālo spriegumu **380/400 V** komutācijai. Tradicionāli kontaktoros izmanto maiņstrāvas elektromagnētus ar spoles nominālo spriegumu 220 V vai 380 V. Kontaktora 3TF49, kas paredzēts 45 kW elektrodzinēja komutācijai, izpildījumi ar spaiļu kārbu (pieslēguma kabeli ar uzmvām) un bez tās (pieslēguma kabeli bez uzmvām) parādīti 2.3.b attēlā. Lielas jaudas elektrodzinēju (300-450 kW) komutācijai izmanto vakuuma kontaktorus, kuros spēka kontakti atrodas hermetizētā vakuuma vidē. Ar to panāk augstu ekspluatācijas drošumu un lielu kontaktu kalpošanas resursu (līdz 1.3 miljoniem komutācijas ciklu).

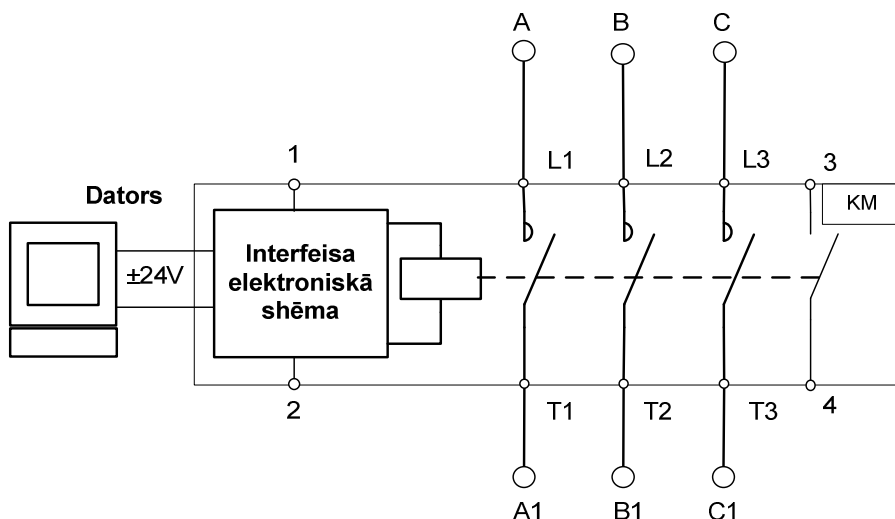


2.3. att. **Kontaktori:**

a – vispārīgs apzīmējums elektriskajās shēmās; b – tehniskais dizains.

Kontatori ar iebūvētu interfeisa shēmu.

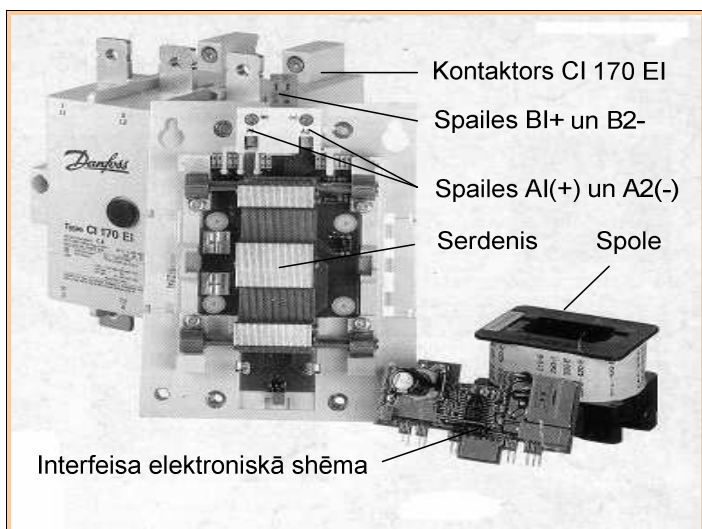
Lai jaudīgus kontaktorus varētu tieši vadīt ar programmējamiem loģiskiem kontrolleriem (**PLK**) un vadības datoriem (**VD**), izmanto kontaktorus ar iebūvētu interfeisa elektronisko shēmu (2.4. att.). Komutācijas vadība notiek ar elektronisko shēmu, kuras izejā pieslēgta kontaktora spole. Elektroniskā shēma nodrošina precīzu kontaktora nostrādes spriegumu un ierobežo komutācijas pārsprieguma impulsus, kā rezultātā uzlabojas kontaktora elektromagnētiskā saderība un palielinās tā kalpošanas resurss laiks. Precīzā elektroniskā vadība būtiski samazina spoles patērēto jaudu palaišanas un darba režīmos, kā rezultātā samazinās siltuma zudumi.



2.4. att. Kontakors ar iebūvētu interfeisu tiešai vadībai ar datoru.

Elektroniski vadāmie kontaktori **CI 140 EI ... CI 420 EI** paredzēti trīsfāzu asinhrono elektrodzinēju ar jaudu **75 kW ... 210 kW** komutācijai. Kontaktorus var izvēlēties ar vairākiem spoļu spriegumiem – **(24...28) V**, **(110..130) V**, **(208...277) V** un **(380...400) V** ar maiņsprieguma frekvenci **50/60 Hz**.

Kontaktoriem ir divi darba režīmi. Standarta režīmā (E) vadības spriegumu $U_v = \pm 24 V$ pievada spailēm **A1(+)** un **A2(-)**. Lai realizētu vadību ar **PLK** vai **VD**, kontaktoru pārslēdz interfeisa režīmā (EI) un vadības iekārtas izeju pieslēdz spailēm **B1+** un **B2-** (2.5. att.)



2.5. att. Kontaktora ar iebūvētu interfeisu uzbūve un dizains.

Asinhrono elektrodzinēju aizsardzība.

Elektriskās piedziņas sistēmā elektrodzinējam jābūt aizsargātam pret avārijas pārslodzes režīmiem. Šādus režīmus var radīt elektriskais tīkls, darbināmais mehānisms un apkārtējā vide.

Elektriskajā tīklā vai elektrodzinēja elektriskajā ķēdē var rasties īssavienojums, nepilnu fāzu režīms vai liela spriegumu asimetrija. Atkarībā no tīkla noslodzes var notikt sprieguma paaugstināšanās vai pazemināšanās. Tas viss izraisa pastiprinātu elektrodzinēja silšanu.

Darbināmais mehānisms var radīt paaugstinātu vibrāciju līmeni, kas samazina gultņu un izolācijas resursu, mainīgu ilgstošu tehnoloģisku pārslodzi, kas izraisa elektrodzinēja pastiprinātu silšanu, vai ekstremālu pārslodzi ar rotora nosprūšanu, kas izraisa tinumu temperatūras pieaugumu ar ātrumu (5 ... 10) °C/s.

Augsta vides temperatūra (30 °C un vairāk), augsts relatīvais mitrums (90% un vairāk), liels putekļu blīvums un citi faktori var radīt elektrodzinēja dzesēšanas traucējumus, kā rezultātā notiek elektrodzinēja pārkaršana arī pie nominālās slodzes. Ilgstoši paaugstināts vides relatīvais mitrums var izraisīt tinumu izolācijas pretestības būtisku samazināšanos, kā rezultātā komutācijas brīdī var notikt izolācijas caursīte. Ja elektriskā piedziņa nav nodrošināta ar atbilstošu aizsardzību, jebkurā avārijas pārslodzes režīmā var notikt elektrodzinēja strukturāla atteice.

Asinhrono elektrodzinēju aizsardzības veidi.

Elektrodzinēju aizsardzībai avārijas pārslodzes režīmos izmanto – **siltuma** (termisko) aizsardzību, **temperatūras** (iebūvēto) aizsardzību un dažāda veida un līmeņa **elektronisko** aizsardzību.

Asinhrono elektrodzinēju bāzes aizsardzība ir **siltuma relejs** (termorelejs), kurš kontrolē elektrodzinēja strāvu visās trijās fāzēs. Siltuma relejs paredzēts asinhrono elektrodzinēju ar vienmērīgu slodzi aizsardzībai pret – **ilgstošām tehnoloģiskām pārslodzēm, nepilnu fāzu režīmu un rotora nosprūšanu**. Siltuma releja uzbūvi, īpašības, izvēli un iestatīšanu apskatīsim turpinājumā.

Ja elektriskās piedziņas slodze ir izteikti mainīga (zāģmašīnas) vai tā darbojas atkārtoti īslaicīgā režīmā (padeves mehānismi), tad piemērotākā ir temperatūras aizsardzība. Izplatītākās ir temperatūras aizsardzības ierīces ar statora tinuma visu triju fāzu spoļu pieres daļās iebūvētiem **pozistoriem** (pusvadītāju termorezistori ar pozitīvu pretestības temperatūras koeficientu), kas savienoti virknē un pieslēgti **elektronikas blokam** ar elektromagnētisko **releju** izejā.

Temperatūras aizsardzības ierīces (**TAI**) reaģē uz visiem tiem pārslodzes režīmiem, kas izraisa tinumu uzkaršanu. Kā liecina prakse, asinhrono elektrodzinēju statora tinumu strukturālo atteici galvenokārt izraisa tinumu pārkāršana, tādēļ **TAI** ir samērā universāla aizsardzība. Galvenais trūkums – nepieciešamība iekļauties elektrodzinēja konstrukcijā, iebūvējot tinumos pozistorus.

Jaudīgu elektrisko piedziņu ar specifiskiem darba režīmiem aizsardzībai izmanto **kombinēto elektronisko aizsardzību**, kas kompleksi kontrolē elektriskā tīkla, elektrodzinēja un vides iespaida faktorus, piemēram, elektriskā tīkla spriegumu un tā asimetriju, elektrodzinēja strāvu un tās asimetriju, fāzes atteici, tinumu temperatūru, tinumu izolācijas pretestību, vides temperatūras iespaidu.

Modernās elektroniskās aizsardzības ierīces (**EAI**) veidotas uz mikroprocesoru bāzes, tās ir programmējamās ar iespēju mainīt iestatījumus un atsevišķo funkcionālo moduļu darba raksturlīknes, ar elektrodzinēja iepriekšējās darbības atmiņu pirms atkārtotas ieslēgšanas un vides faktoru iespaida kompensāciju.

EAI ir dārgas ierīces un tādēļ izmantojamas specifisku jaudīgu un dārgu elektrisko piedziņu darbības režīmu kontrolei un aizsardzībai pārslodžu gadījumos.

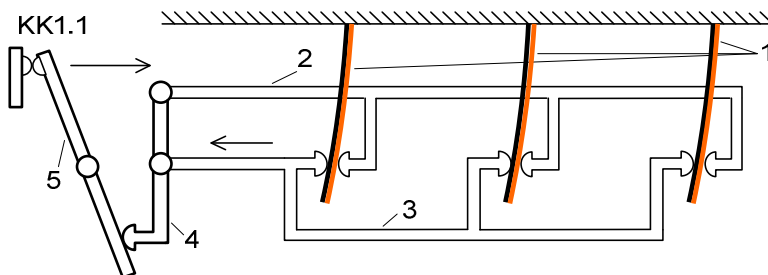
Siltuma releju, uzbūve, izvēle un iestatīšana.

Siltuma relejs (**SR**) sastāv no 3 elektriskiem sildelementiem, kas slēgti katrā fāzē un caur kuriem plūst elektrodzinēja strāva. Sildelementā ar pretestību R_s (Ω) izdalās siltuma plūsma Q (W), kas proporcionāla strāvas I (A) kvadrātam: $Q = I^2 \cdot R_s$.

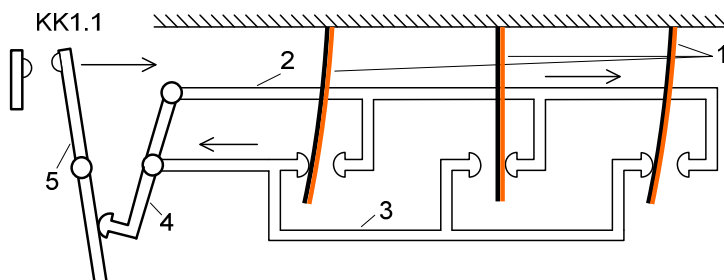
Sildelementos izdalītā siltuma plūsma sasilina **SR** jutīgos elementus - **bimetāla plāksnītes 1**, kuras deformējoties iedarbojas uz **atslēdzes mehānismu 2, 3, 4**. Iedarbojoties **pārnesuma svirai 4** uz **kontakta ar atsperes atslēdzi 5**, tiek pārtraukti **elektriskie kontakti KK1.1** (2.6. att.).

Ja elektrodzinēja barošanas spriegums ir simetrisks, tad, rodas ilgstošai tehnoloģiskai pārslodzei, strāva visās fāzēs palielinās vienādi. Līdz ar to arī visas bimetāla plāksnītes uzsilst un deformējas vienādi. Tās pārbīda bīdņi **3** bultas norādītajā virzienā (2.6.a att.) un pārvieto paralēli pārnesuma sviru **4**, kas iedarbojas uz atsperes atslēdzi **5** un pārtrauc kontaktus **KK1.1**.

a



b



2.6. att. **Siltuma releja diferenciālais mehānisms un tā darbība simetriskas pārslodzes (a) un fāzes atteices (b) režīmos:** 1 - bimetāla plāksnītes; 2 - fāzes atteices bīdņis; 3 - simetriskas pārslodzes bīdņis; 4 - pārnesuma svira; 5 - kontakts ar atsperes atslēdzi.

SR reakcijas kavējuma laiks t_k ir apgriezti proporcionāls elektriskās pārslodzes koeficientam $k_{ip} = k_i - 1$, kur $k_i = I/I_{nom}$ – elektriskās slodzes koeficients.

Vidējo kavējuma laiku (sekundes) no pārslodzes rašanās momenta līdz **SR** nostrādes momentam var tuvināti novērtēt ar empīrisku sakarību:

$$t_k \approx \frac{30}{k_{ip}} = \frac{30}{k_i - 1} . \quad (2.5)$$

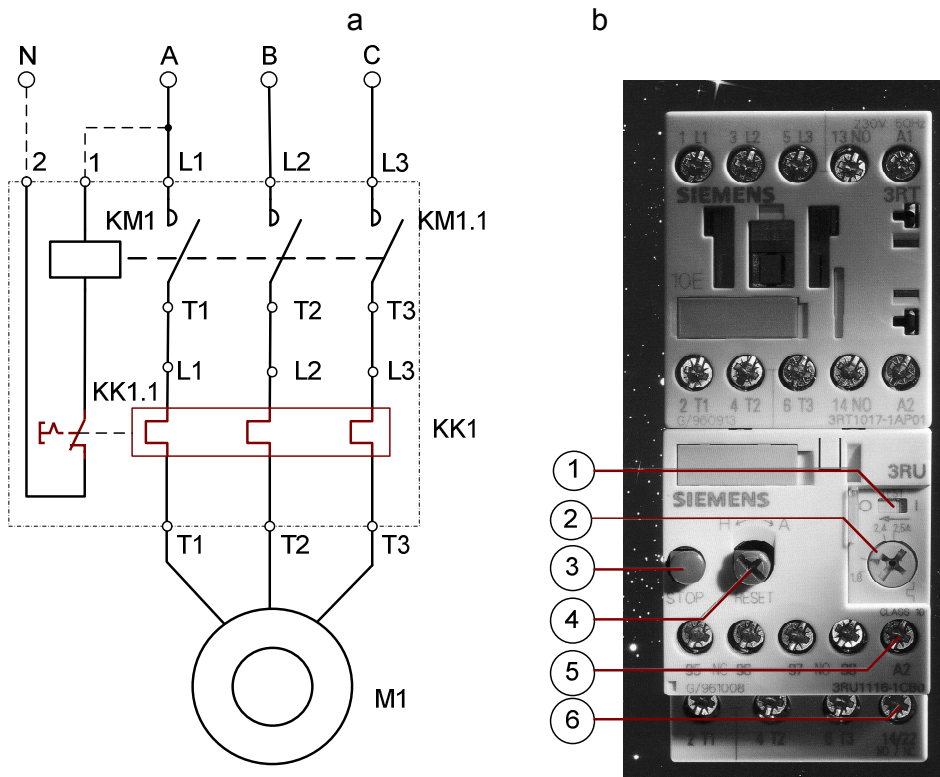
Izmantojot sakarību (2.5) novērtēsim kavējuma laikus atkarībā no elektrodzinēja slodzes koeficienta: $k_i = 6$, $t_k = 6$ s; $k_i = 2$, $t_k = 30$ s; $k_i = 1.5$, $t_k = 60$ s; $k_i = 1.1$, $t_k = 300$ s.

Ja elektriskajā tīklā izzūd viena fāze, piemēram, fāze **B** (2.6.b att.), tad nomināli slogotam elektrodzinējam ($I = I_{nom}$) strāvas pārējās fāzēs **A** un **C** palielinās **1.73 reizes**. Līdz ar to arī abas malējās bimetāla plāksnītes uzsilst, deformējas un pārbīda bīdņi **3** bultas norādītajā virzienā (2.6.b att.). Tā kā fāzē **B** strāva neplūst, tad vidējā plāksnīte paliek sākuma stāvoklī un bloķē bīdņa **2** pārvietošanos. Tā rezultātā pārnese svira **4** pagriežas ap bīdņa **2** šarnīru un paātrināti pārtrauc kontaktus **KK1.1**. Šāda diferenciālā konstrukcija nodrošina **SR** paaugstinātu jutību un paātrinātu nostrādi nepilnu fāzu režīmā.

Siltuma releju apzīmējums elektriskajās shēmās, pieslēgšanas un parametru iestatīšanas panelis, kā arī tehniskais dizains parādīts 2.7. un 2.8. attēlos. Elektrodzinēja **M1** spēka ķēdē attēlots **SR** siltuma atkabnis **KK1** ar sildelementiem katrā fāzē. Kontaktora spoles izvadu savieno ar **SR** atslēdzošo kontaktu **KK1.1**.

Asinhrono elektrodzinēju komutācijas iekārtu parasti komplektē no kontaktora un siltuma releja. Mazas un vidējas jaudas **SR** ieejas spaiļes **L1**, **L2** un **L3** izveidotas kā savienotājtapas (2.8. att.), kuras ievieto zem kontaktora izejas spaiļu **T1**, **T2** un **T3** paplāksnēm un fiksē ar skrūvēm. Šādu komplektāciju sauc par **magnētisko palaidēju** vai vienkārši par **palaidēju**. Šis nosaukums plaši iegājijs praksē. Turpmāk to lietošim asinhronā dzinēja vadības kontaktora apzīmēšanai.

SR paredzēti noteiktam strāvu diapazonam. Ja elektrodzinēja strāva $I_{nom} = 11$ A, izvēlas **SR** ar strāvu diapazonu $I_s = (9 \dots 14)$ A. **SR** atslēdzes strāvu iestata ar slēdzi **2** (2.7.b att.) atbilstoši nosacījumam: $I_s \geq I_{nom}$. Ja elektrodzinēja strāva ilgstoši pārsniedz iestatīto strāvu, **SR** to atslēdz no elektriskā tīkla. Atkārtota ieslēgšana iespējama pēc bimetāla plāksnīšu atdzišanas. Atiestates veidu – rokas vai automātisko iestata ar slēdzi **4**. Ar slēdzi **3** releju var ieslēgt un izslēgt rokas vadības režīmā. Relejam paredzēts papildus kontakts **6** avārijas signalizācijai.



2.7. att. Siltuma releja KK1 attēlojums elektriskajā shēmā (a) un tā panelis (b):
 1 - testa funkciju indikators; 2 - nominālās strāvas iestatījuma slēdzis; 3 - releja izslēgšanas
 poga; 4 - rokas (H) vai automātiskā (A) atiestate ; 5 - palaidēja spoles pieslēgšanas spaile ;
 6 - papildus kontakta spaile.



2.8. att. Siltuma releju tehniskais dizains un modifikācijas mazas, vidējas un lielas
 jaudas elektrodzinēju aizsardzībai.

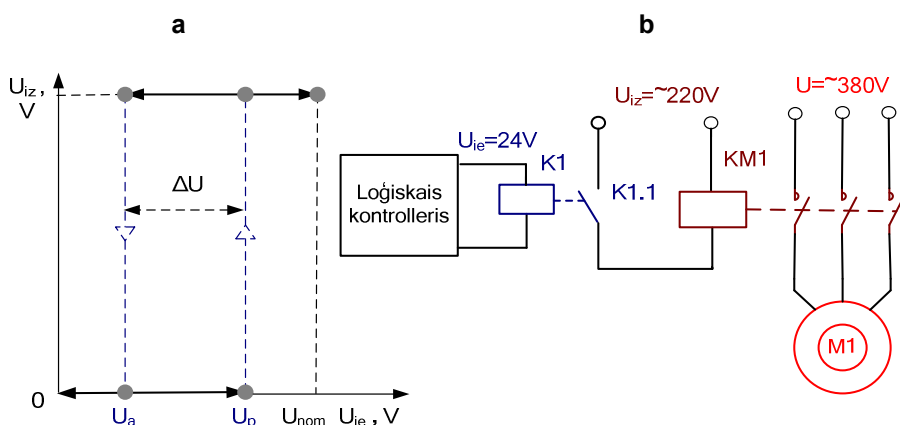
2.2.2. Elektromagnētiskie un herkonu releji

Elektromagnētiskie releji ir vājstrāvas elektrisko ķēžu komutācijas ierīces. **Visu releju raksturīga īpatnība, ka, mainoties ieejas signālam vienmērīgi, izejas signāls mainās lēcienveidīgi.** Elektromagnētiskā releja ieejas lielums ir spriegums U_{ie} , kas tiek pievadīts releja spolei, bet izejas lielums ir spriegums U_{iz} , kas tiek pievadīts patērētājam, piemēram, apgaismošanas spuldzei.

Pakāpeniski palielinot spoles spriegumu no $U_{ie} = 0$ līdz $U_{ie} = U_p$, kur U_p – releja pievilkšanās (ieslēgšanās) spriegums, tā izejas spriegums nemainās ($U_{iz} = 0$). Sasniedzot $U_{ie} = U_p$, notiek pārejas process un relejs ieslēdzas. Releja izejas spriegums U_{iz} pieaug lēcienveidīgi no nulles līdz nominālajai vērtībai (2.9.a att.).

Pakāpeniski samazinot spoles spriegumu no $U_{ie} = U_p$ līdz $U_{ie} = U_a$, kur U_a – releja atlaišanās spriegums, notiek releja izslēgšanās. Izejas spriegums U_{iz} uz patērētāja samazinās lēcienveidīgi no nominālās vērtības līdz nullei. Tātad elektromagnētiskajam relejam nav viennozīmīgas sakarības starp ieejas un izejas spriegumu izmaiņu. Spriegumu starpību $\Delta U = U_p - U_a$ sauc par releja nejutības zonu. Jo mazāks ΔU , jo augstāka releja jutība.

Automātiskā elektromagnētiskie releji ir vadības iekārtu izejas elementi jeb vadības komandu pārvades elementi no vadības iekārtas uz izpildiekārtu. Piemēram, loģiskais kontroleris iedarbina releju **K1**, kurš komutē magnētisko palaidēju **KM1**, savukārt **KM1** iedarbina izpildiekārtas elektrodzinēju **M1** (2.9.b att.).



2.9. att. Elektromagnētiskā releja statiskā raksturlīkne (a) un izmantošanas piemērs elektriskās piedziņas vadības sistēmā (b).

Par elektromagnētisko releju sauc elektromagnētisku ierīci, kurā enkura pievilkšanas spēku rada spoles strāvas magnētiskais lauks. Mainoties ieejas spriegumam vienmērīgi, izejas spriegums mainās lēcienveidā.

Elektromagnētiskie releji iedalās **līdzstrāvas** un **maiņstrāvas** relejos. Līdzstrāvas releju spoles baro ar **līdzstrāvu**, bet maiņstrāvas – ar **maiņstrāvu**.

Līdzstrāvas releji iedalās **neitrālajos** relejos un **polarizētajos** relejos. **Neitrālie releji nav jutīgi pret ieejas sprieguma polaritāti**, jo, neatkarīgi no sprieguma polaritātes, šāda releja enkurs pievelkas vienā un tajā pašā virzienā.

Polarizētie releji ir jutīgi pret ieejas sprieguma polaritāti. To uzbūve un konstrukcija izveidota tā, ka enkuram ir vidusstāvoklis. Mainot ieejas sprieguma polaritāti, enkurs pārslēdzas uz vienu vai otru pusi un komutē divas dažādas elektriskās ķēdes. Polarizētie releji ir ievērojami jutīgāki par neitrālajiem relejiem, taču to pielietošana elektriskās piedziņas vadības shēmās ir ierobežota sakarā ar ļoti mazo pieļaujamo komutācijas jaudu. Tādēļ apskatīsim tikai neitrālos relejus.

Līdzstrāvas elektromagnētiskie releji.

Līdzstrāvas releju uzbūves pamatā ir līdzstrāvas elektromagnēts, kas sastāv no feromagnētiska materiāla serdeņa **1**, uz kura uzmontēta spole **2**. Magnētisko ķēdi caur gaisa spraugu noslēdz feromagnētiska materiāla enkurs **3** (2.10. att.).

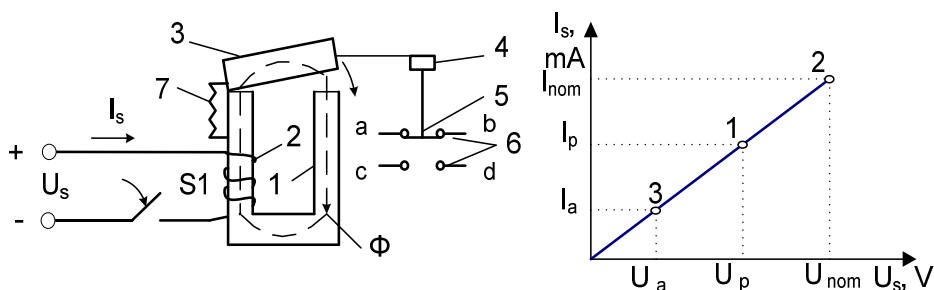
Ja spoles ķēdei pievada nominālo spriegumu $U_s = U_{nom}$ un ieslēdz slēdzi **S1**, spolē plūstošā strāva I_s rada magnētisko plūsmu Φ , kas noslēdzas caur gaisa spraugu un rada tajā elektromagnētisko vilces spēku F_e . Enkurs **3** pievelkas pie serdeņa **2** un, pagriežot izcilni **4**, pārslēdz kontaktplāksni **5**, kura pārvietojoties pārtrauc vai saslēdz elektriskos kontaktus **7**. Kontakti **(a-b)** ir **normāli slēgti** jeb **atslēdzoši** kontakti, kontakti **(c-d)** – **normāli vaļēji** jeb **saslēdzoši** kontakti.

Izslēdzot slēdzi **S1**, atspere **7** atgriež enkuru sākuma pozīcijā un elektriskie kontakti ieņem normālo stāvokli. **Relejs ir normālā stāvoklī, ja tā spolei nav pieslēgts spriegums.**

Līdzstrāvas elektromagnētiskos relejus raksturojošie parametri.

1. Enkura **pievilkšanās spriegums** U_p (**pievilkšanās strāva** I_p) - spoles spriegums (strāva spolē), kas nodrošina enkura pievilkšanos (releja kontaktu pārslēgšanos).

2. **Nominālais spriegums U_{nom} (nominālā strāva I_{nom})**, kas nodrošina releja stabilu darbību ($U_{nom} > U_p$; $I_{nom} > I_p$). Līdzstrāvas releju spoļu standartizētie nominālie spriegumi – (6, 12, 24, 36, 48, 60, 110, 220)V.



2.10. att. Līdzstrāvas elektromagnētiskais relejs un tā voltampēru raksturlīkne:

1 - serdenis; 2 - spole; 3 - enkurs; 4 - izcilnis; 5 - kontaktplāksne; elektriskie kontakti;
7 - atspere.

3. **Atlaišanās spriegums U_a (atlaišanās strāva I_a)** – minimālais spoles spriegums (strāva), pie kura releja enkurs atlaižas un kontakti ieņem sākuma stāvokli.

4. **Drošuma (rezerves) koeficients:**

$$K_d = \frac{U_{nom}}{U_p} = \frac{I_{nom}}{I_p}, \quad (2.6)$$

kur $K_d > 1$ ($K_d = 1, 2 \dots 2, 0$).

Drošuma koeficients raksturo releja nominālā sprieguma rezervi attiecībā pret pievilkšanās spriegumu. Šāda rezerve nodrošina releju shēmu drošu darbību mainīga sprieguma apstākļos. Līdzstrāvas releju vadības shēmas parasti baro no maiņstrāvas elektriskā tīkla caur taisngriežiem. Dažādu patērētāju iespaidā elektriskā tīkla spriegums var pazemināties līdz 20% no nominālā lieluma.

5. Elektromagnētisko releju jutību raksturo **atgriešanas koeficients:**

$$K_a = \frac{U_a}{U_p} = 1 - \frac{\Delta U}{U_p} = \frac{I_a}{I_p}, \quad (2.7)$$

kur $\Delta U = U_p - U_a$ - releja nejutības zona.

Jo mazāka palaišanas un atgriešanas spriegumu starpība ΔU , jo augstāka releja jutība. Zemas jutības relejiem $K_a = 0,2 - 0,3$; vidēji jutīgiem relejiem $K_a = 0,4 - 0,5$, bet relejiem ar augstu jutību $K_a = 0,8 - 0,9$. No zemas jutības relejiem veido **laika relejus**, vidējas jutības releji tiek izmantoti kā elektrisko ķēžu **komutācijas releji**, bet augstas jutības relejus izmanto **minimālā sprieguma** kontrolei.

6. Nominālais jaudas pastiprinājuma koeficients:

$$K_p = \frac{I_{iz\ nom} \cdot U_{iz\ nom}}{I_{ie\ nom} \cdot U_{ie\ nom}} = \frac{P_{iz\ nom}}{P_{ie\ nom}}, \quad (2.8)$$

kur $I_{iz\ nom}$, $U_{iz\ nom}$, $P_{iz\ nom}$ – kontaktu nominālā komutācijas strāva, spriegums un jauda;

$I_{ie\ nom}$, $U_{ie\ nom}$, $P_{ie\ nom}$ - releja spoles nominālā strāva, spriegums un jauda.

Automātiskā elektromagnētiskos relejus apskata kā **nelineārus jaudas pastiprinātājus**, jo pievadot releja spolei relatīvi mazas jaudas elektrisko signālu, no tā kontaktiem var noņemt ievērojami lielākas jaudas signālu.

Piemērs. Dots: $U_{ie} = 24\text{ V}$, $I_{ie} = 20\text{ mA}$, $U_{iz} = 220\text{ V}$, $I_{iz} = 2\text{ A}$. Ievietojot skaitliskos lielumus, iegūstam: $K_p = 220\text{V} \cdot 4\text{A} / 24\text{V} \cdot 0,02\text{A} = 917$.

Līdzstrāvas releja voltampēru (V-A) raksturlīkne $I = f(U)$ ir lineāra (2.10.att.). To apraksta Oma likums līdzstrāvas ķēdei:

$$I_s = \frac{U_s}{R_s}, \quad (2.9)$$

kur R_s - releja spoles aktīvā pretestība, Ω ;

I_s un U_s – releja spoles strāva (A) un spriegums, V.

Raksturlīknei ir trīs raksturīgie punkti: 1 - pievilkšanās punkts; 2 - nominālais darba punkts; 3 - atlaišanās punkts.

Elektromagnētiskais vilces spēks.

Līdzstrāvas elektromagnētiskajam relejam ar vienu gaisa spraugu starp serdeni un enkuru elektromagnētisko vilces spēku F_e (N) aprēķina pēc formulām:

$$F_e = \frac{\Phi^2}{2\mu_0 \cdot S}; F_e = \frac{B^2 \cdot S}{2\mu_0}; F_e = \frac{(I_s \cdot w)^2}{2} \cdot \frac{\mu_0 \cdot S}{\delta^2}, \quad (2.10)$$

kur $\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$ – magnētiskā konstante, H/m;

Φ - spoles strāvas radītā magnētiskā plūsma, Wb;

B - magnētiskā lauka indukcija, T; I_s - spoles strāva, A.

w – spoles vijumu skaits; δ – gaisa spraugas platums, m;

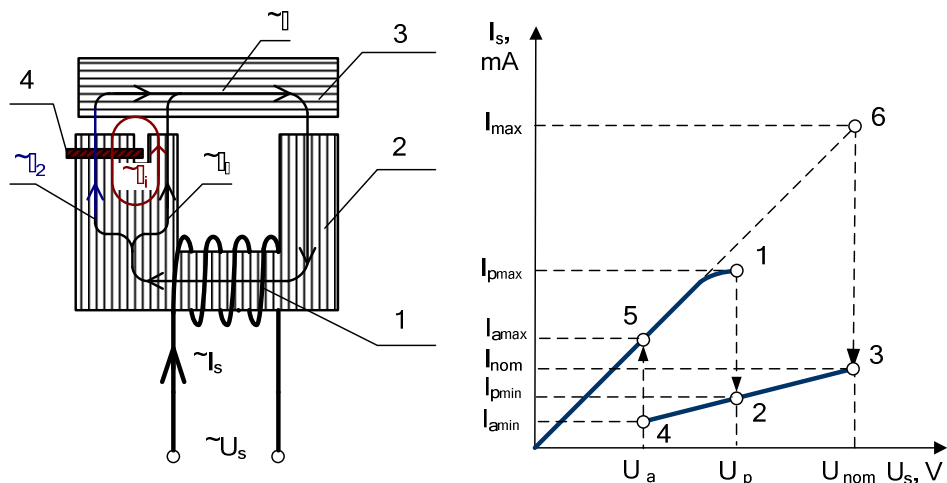
S – feromagnētiskā serdeņa šķēsgriezuma laukums, m^2 .

Līdzstrāvas releja vilces spēks F_e ir tieši proporcionāls spoles ampērvijumu kvadrātam $(I_s \cdot w)^2$ un serdeņa šķēsgriezuma laukumam S , bet apgriezti proporcionāls gaisa spraugas platuma δ kvadrātam. Samazinot gaisa spraugu starp enkuru un serdeni, var samazināt releja pievilkšanās spriegumu un patērēto jaudu.

Mainstrāvas elektromagnētiskie releji.

Mainstrāvas releju uzbūves pamatā ir maiņstrāvas elektromagnēts, kas sastāv no spoles **1**, kura uzmontēta uz feromagnētiska materiāla serdeņa **2**. Magnētisko ķēdi caur gaisa spraugu noslēdz feromagnētiska materiāla enkurs **3** (2.11. att.).

Ja spoles ķēdei pievada nominālo maiņspriegumu $\sim U_s = \sim U_{nom}$, spolē plūstošā maiņstrāva $\sim I_s$ rada sinusoidāli mainīgu magnētisko plūsmu $\sim \Phi$, kas noslēdzas caur gaisa spraugu un rada tajā elektromagnētisko vilces spēku $\sim F_e$. Enkurs **3** pievelkas pie serdeņa **2** un pārslēdz elektriskos kontaktus (attēlā nav parādīti).



2.11. att. **Mainstrāvas elektromagnētiskais relejs un tā voltampēru raksturliķne:**
1 - spole; 2 - serdenis; 3 - enkurs; 4 - gredzens enkura vibrāciju novēršanai.

Mainstrāvas releja uzbūve ir līdzīga līdzstrāvas releja uzbūvei, taču ir dažas būtiskas atšķirības.

1. **Mainstrāvas releja serdenis un enkurs, atšķirībā no līdzstrāvas releja, tiek izgatavoti nevis no viengabala materiāla, bet no elektrotehniskā tērauda**

plāksnīšu paketēm. Plāksnītes savā starpā ir elektriski izolētas ar izolācijas lakas kārtiņu. Šāda konstrukcija nepieciešama, lai ierobežotu spoles strāvas radītās mainīgās magnētiskās plūsmas $\sim \Phi$ inducētās **virpuļstrāvas** jeb **Fuko** strāvas, kuras serdenī un enkurā rada lielus siltuma zudumus. Tā kā katrai plāksnītei ir liela elektriskā pretestība, tad tajā inducētā strāva ir maza un siltuma zudumi serdenī un enkurā ir niecīgi.

2. Lai novērstu maiņstrāvas releja **enkura vibrācijas**, kas rodas sinusoidālajai spoles strāvai ($\sim I_s = I_{s\max} \cdot \sin \omega t$) ejot caur nulles punktu, uz releja serdes gala uzmontē vara vai alumīnija **gredzenu 4**, kas aptver **2/3** no serdes gala laukuma (2.11. att.). Releja spoles strāvas radītā magnētiskā plūsma $\sim \Phi$ šajā vietā sadalās divās nobīdītās komponentēs $\sim \Phi_1$ un $\sim \Phi_2$, kurām pārklājoties rodas stabils vilces spēks $\sim F_e > F_m$, kur F_m – atsperu pretestības spēks, N.

Plūsmas komponente $\sim \Phi_1$ apiet gredzenu, komponente $\sim \Phi_2$ iet caur gredzenu un inducē tajā strāvu $\sim I_i$, kuras radītā magnētiskā plūsma $\sim \Phi_i$, atbilstoši Lenca likumam, darbojas pretī plūsmas $\sim \Phi_2$ izmaiņai un nobīda to fāzē attiecībā pret komponenti $\sim \Phi_1$ par 60 elektriskajiem grādiem. Līdz ar to notiek abu komponentu pārklāšanās, kas nodrošina stabilu pievilkšanās spēku $\sim F_e$.

Mainstrāvas releja V-A raksturlīkne ir izteikti nelineāra (2.11. att.). To apraksta Oma likums maiņstrāvas ķēdei:

$$I_s = \frac{U_s}{Z_s} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + X_L^2}}, \quad (2.11)$$

kur Z_s - maiņstrāvas releja spoles pilnā pretestība, Ω ;

R – spoles aktīvā pretestība, Ω .

X_L – spoles induktīvā pretestība, Ω .

Induktīvā pretestība X_L ir lielums, kas mainās atkarībā spoles induktivitātes:

$$X_L = 2\pi fL, \quad (2.12)$$

kur f – maiņstrāvas frekvence, Hz (s^{-1});

L – spoles induktivitāte, H.

Pievelkoties enkuram, induktīvā pretestība X_L palielinās, jo pieaug releja spoles induktivitāte L :

$$L = \frac{w^2 \mu_0 \mu S}{l + \mu \delta}, \quad (2.13)$$

kur w - releja spoles vijumu skaits; S - serdeņa šķēsgriezuma laukums, m^2 ;

l - magnētiskās ķēdes garums pa viduslīniju, m ;

δ -gaisa spraugas platums, m ;

μ - serdeņa materiāla relatīvā magnētiskā caurlaidība;

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ - magnētiskā konstante, H/m .

Maiņstrāvas releja V-A raksturlīknei ir seši raksturīgie punkti (2.11. att.). Pakāpeniski palielinot spoles spriegumu, proporcionāli palielinās strāva. Tuvojoties punktam **1** sākas enkura vibrācijas, kā rezultātā strāva nedaudz samazinās. Punktā **1** notiek releja **pievilkšanās** un samazinoties gaisa spraugai, pieaug spoles induktīvā pretestība un pievilkšanās strāva lēcienveidā samazinās no I_{pmax} līdz I_{pmin} punktā **2**. Palielinot spriegumu no U_p līdz U_{nom} strāva palielinās ievērojami mazāk, jo spolei ir liela induktīvā pretestība.

Punktā **3** maiņstrāvas releja spoles spriegums un strāva ir vienāda ar nominālajiem lielumiem U_{nom} un I_{nom} . Samazinot spoles spriegumu, punktā **4** notiek releja atlaišanās. Palielinoties gaisa spraugai starp serdeni un enkuru, samazinās spoles induktīvā pretestība un atlaišanās strāva lēcienveidā palielinās no I_{amin} līdz I_{amax} . Punktam **6** atbilst releja maksimālā pievilkšanās strāva, ja to ieslēdz pie nominālā sprieguma. Atšķirībā no līdzstrāvas releja, maiņstrāvas releja pievilkšanas strāva ir ievērojami lielāka par nominālo darba strāvu (2.11. att.).

Maiņstrāvas releja elektromagnētiskais vilces spēks.

Maiņstrāvas releja ar **vienu gaisa spraugu** elektromagnētisko vilces spēku $\sim F_e$ aprēķina pēc formulām:

$$\sim F_e = \frac{\sim \Phi^2}{3\mu_0 S} \left(1,5 - \frac{\sqrt{3}}{2} \sin 2\omega t\right); \quad \sim F_e = \frac{\sim B^2 S}{3\mu_0} \left(1,5 - \frac{\sqrt{3}}{2} \sin 2\omega t\right); \quad (2.14)$$

$$\sim F_e = \frac{(\sim I_s \cdot w)^2 \mu_0 S}{3 \cdot \delta^2} \left(1,5 - \frac{\sqrt{3}}{2} \sin 2\omega t\right)$$

Kur $\sim \Phi$ - spoles strāvas radītās magnētiskās plūsmas efektīvā vērtība, Wb ;

$\sim B$ - magnētiskā lauka indukcijas efektīvā vērtība, T ;

$\sim I_s$ - spoles strāvas efektīvā vērtība, A;

$\omega = 2\pi f$ - maiņstrāvas leņķiskā frekvence, s^{-1} ;

Maiņstrāvas relejam vilces spēks $\sim F_e$ ir svārstīgs un periodiski mainās no $\sim F_{emin}$ līdz $\sim F_{emax}$ ar divkārtu maiņstrāvas leņķisko frekvenci 2ω .

Ja $2\omega t = \pi/2$, tad vilces spēks ir minimāls:

$$\sim F_e = \sim F_{emin} \approx 0.42 \frac{(\sim I_s \cdot w)^2 \mu_0 \cdot S}{2\delta^2}. \quad (2.15)$$

Ja $2\omega t = \pi$, tad vilces spēks ir maksimāls:

$$\sim F_e = \sim F_{emax} \approx 1.58 \frac{(\sim I_s \cdot w)^2 \mu_0 \cdot S}{2\delta^2}. \quad (2.16)$$

Salīdzinot maiņstrāvas releju un ekvivalentu līdzstrāvas releju ar vienādiem elektromagnēta parametriem (formulas 2.10) iegūstam, ka $\sim F_{emin} = 0,42F_{ekv}$, bet $\sim F_{emax} = 1,58F_{ekv}$, kur F_{ekv} - ekvivalentā līdzstrāvas releja enkura vilces spēks, N. Ekvivalentā līdzstrāvas releja vilces spēks ir vairāk kā 2 reizes lielāks par atbilstošā maiņstrāvas releja minimālo vilces spēku. Tas liecina, ka līdzstrāvas releji ir jutīgāki par maiņstrāvas relejiem.

Elektromagnētisko releju izvēle un salīdzinājums.

Līdzstrāvas un maiņstrāvas elektromagnētiskos relejus izvēlas pēc diviem galvenajiem tehniskajiem rādītājiem: 1) spoles nominālā sprieguma U_{nom} ; 2) kontaktu nominālā komutācijas sprieguma U_{knom} ; 3) nominālās komutācijas jaudas P_{knom} .

Spoles barošanas spriegumu izvēlas vienādu ar nominālo: $U_s = U_{nom}$. Kontaktu spriegumu izvēlas no nosacījuma: $U_k \leq U_{knom}$. Lai relejs kalpotu paredzēto resursa laiku, kontaktu komutācijas jaudu ieteicams izvēlēties aptuveni 2 reizes mazāku par nominālo jaudu: $P_k \approx 0.5P_{knom}$.

Līdzstrāvas releju pozitīvās īpašības: 1) augsta jutība un augsts ekspluatācijas drošums; 2) maza patērētā jauda un mazi zudumi; 3) spoles strāva nav atkarīga no enkura stāvokļa.

Trūkumi: 1) sakarā ar paliekošo magnetizāciju iespējama enkura pielipšana pie serdeņa; 2) nepieciešama taisngrieža iekārta barošanai no maiņstrāvas tīkla.

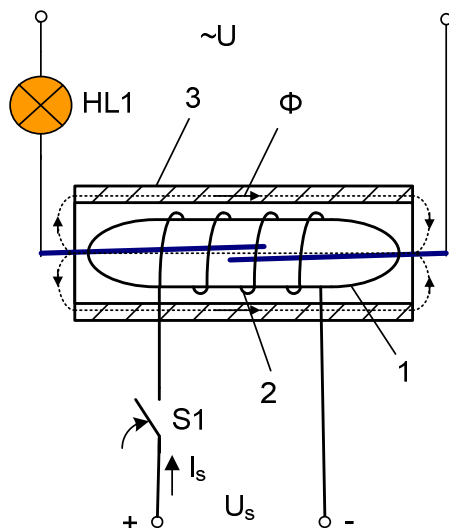
Mainstrāvas releju pozitīvās īpašības: 1) iespēja barot tieši no maiņstrāvas tīkla; 2) liela palaišanas strāva, kas dod iespēju palielināt kontaktu atstarpi un komutēt lielāku jaudu.

Trūkumi: 1) salīdzinājumā ar līdzstrāvas relejiem, aptuveni 2 reizes zemāks ekspluatācijas drošums; 2) svārstīgs vilces spēks un relatīvi lieli enerģijas zudumi.

Herkonu releji.

Herkonu releji ir komutācijas ierīces, kas sastāv no magnētiski vadāmu, hermetizētu kontaktu elementa – **herkona 1**, kurš ievietots spolē ar lielu vijumu skaitu **2**. Lai pastiprinātu magnētisko plūsmu Φ , mazgabarīta herkonu releju spoles aptver ar magnētisko ķēdi **3**. Herkons **1** sastāv no stikla balona, kurā iekausēti magnētiski mīksta materiāla elastīgi kontakti. Dzirksteļošanas samazināšanai herkona balonā iepildīta inerta gāze (argons).

Ieslēdzot slēdzi **S1** (2.12. att.) releja spolē **2** plūst strāva I_s . Tās radītā magnētiskā plūsma Φ iet caur herkonu **1** un magnetizē tā kontaktus. Magnētiskā pievilkšanās spēka iespaidā kontakti saslēdzas un ieslēdz slodzi - signālspludzi **HL1**. Izslēdzot slēdzi **S1**, magnētiskā plūsma izzūd, kontakti atmagnetizējas un pārtrauc slodzes ķēdi.



2.12. att. **Herkonu relejs:**
1-herkons; 2- spole; 3- magnētiskā ķēde.

Herkonu releju galvenās priekšrocības:

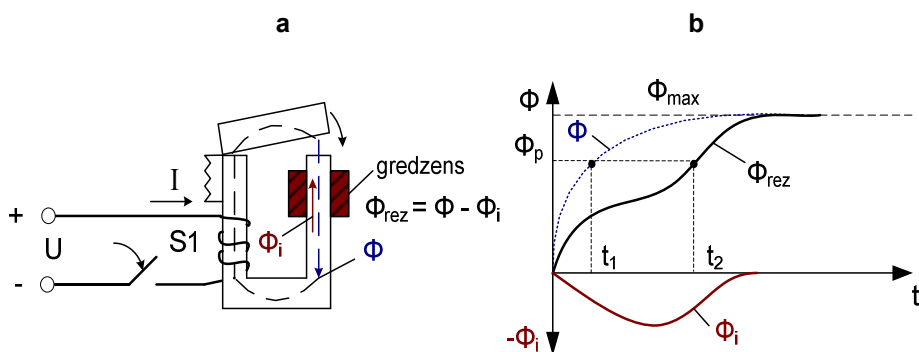
- vienkārša uzbūve (nav mehāniskās daļas);

- var darboties ugunsnedrošās un sprādzienbīstamās vidēs;
- liels komutācijas ciklu skaits (līdz 10^7);
- lielāka komutējamā jauda un 10 reizes lielāks komutācijas ciklu skaits salīdzinājumā ar ekvivalentu līdzstrāvas elektromagnētisko releju.

2.2.3. Elektromagnētiskie un elektroniskie laika releji

Indukcijas tipa elektromagnētiskais laika relejs.

Indukcijas tipa laika releja pamatā ir līdzstrāvas elektromagnētiskais relejs, uz kura serdeņa uzmontēts masīvs vara vai misiņa gredzens ar mazu elektrisko pretestību (2.13. un 2.14. att.). Ieslēdzot slēdzi **S1**, releja spolē plūst strāva **I**, kas rada augošu magnētisko plūsmu Φ . Šī plūsma noslēdzas caur gredzenu un inducē tajā strāvu, kura rada indukcijas plūsmu Φ_i (2.13.a att.). Pēc Lenca likuma indukcijas plūsma darbojas pretī galvenās plūsmas izmaiņai. Tā kā galvenā plūsma palielinās, tad indukcijas plūsma vērsta pretējā virzienā un kavē tās augšanu. Līdz ar to reālā rezultējošā magnētiskā plūsma vienāda ar galvenās plūsmas un indukcijas plūsmas algebrisko starpību (2.13.b att.). Ja releja pievilkšanās plūsma vienāda ar Φ_p , tad relejam bez gredzena pievilkšanās laika kavējums vienāds ar t_1 , bet relejam ar gredzenu tas ir ievērojami lielāks $t_p = t_2$.



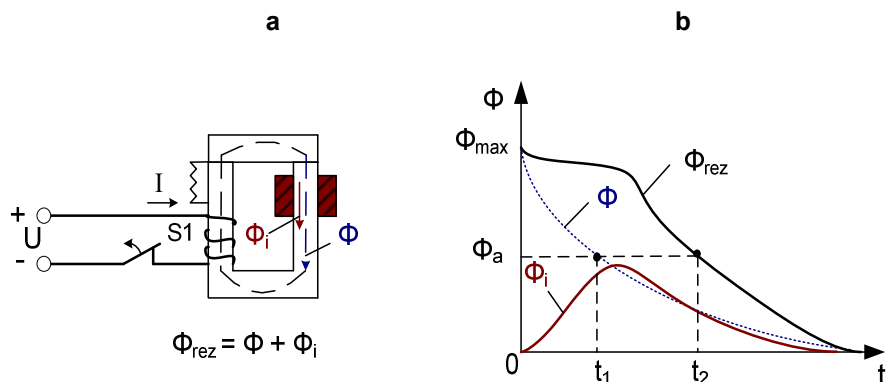
2.13. att. Laika relejs ar elektromagnētiskās indukcijas radītu darbības kavējumu uz ieslēgšanos (a) un magnētisko plūsmu raksturlīknes (b).

Arī releja atlaišanās kavējumu rada indukcijas plūsma. Izslēdzot slēdzi **S1**, magnētiskā plūsma Φ strauji samazinās un rada indukcijas plūsmu Φ_i (2.14.a att.), kas pēc Lenca likuma cenšas galveno plūsmu Φ uzturēt. Šajā gadījumā indukcijas plūsma vērsta galvenās plūsmas virzienā un kavē tās samazināšanos. Līdz ar to

reālā rezultējošā magnētiskā plūsma vienāda ar galvenās plūsmas un indukcijas plūsmas algebrisko summu (2.14.b att.).

Ja releja atlaišanās plūsma vienāda ar Φ_a , tad relejam bez gredzena atlaišanās laika kavējums vienāds ar t_1 , bet relejam ar gredzenu tas ir ievērojami lielāks $t_a = t_2$.

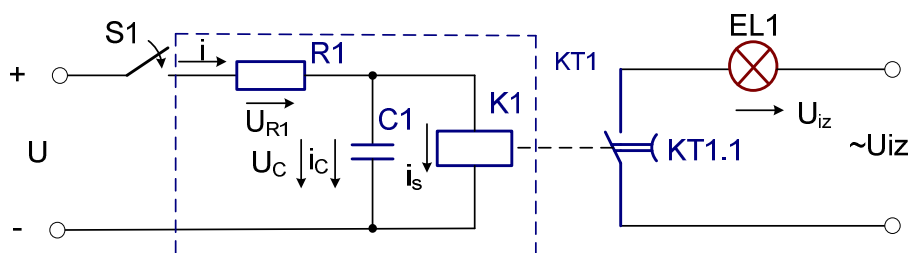
Ar indukcijas tipa laika releju iegūst kavējumu gan uz ieslēgšanos, gan atslēgšanos. Kavējuma laiks ir (2 ... 3)s. Šos laika relejus izmanto elektrodzinēju automātiskās palaišanas un bremzēšanas shēmās.



2.14. att. Laika relejs ar elektromagnētiskās indukcijas radītu darbības kavējumu uz atslēgšanos (a) un magnētisko plūsmu raksturlīknes (b).

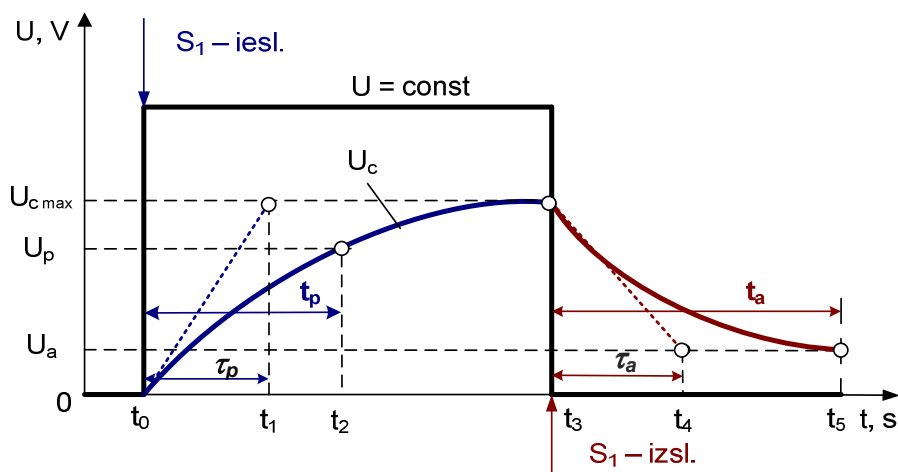
Elektromagnētiskais laika relejs ar kondensatoru.

Vienkāršākais elektromagnētiskais laika relejs sastāv no līdzstrāvas releja, kura spolei **K1** paralēli pieslēgts kondensators **C1** (2.15. att.). Ieslēdzot slēdzi **S1**, caur uzlādes rezistoru **R1** plūst strāva i , kas mezglu punktā sadalās spoles strāvā i_s un kondensatora uzlādes strāvā i_c . Releja spoles **K1** pretestība R_s rada noplūdi kondensatoram **C1** un samazina tā kapacitāti. Tādēļ, lai iegūtu lielākus laika kavējumus, jāizvēlas augstomīgs relejs ($R_s \geq 10k\Omega$).



2.15. att. Elektromagnētiskais līdzstrāvas relejs ar kondensatora **C1** radītu darbības kavējumu uz ieslēgšanos un atslēgšanos.

Slēdža **S1** ieslēgšanas momentā ($t = 0$, $i_s = 0$, $U_c = 0$, $i_c = i_{cmax} = U/R1$) sākas kondensatora uzlāde. Saskaņā ar komutācijas likumu, spriegums uz kondensatora nevar mainīties lēcienveidīgi. Tas pieaug pakāpeniski, atkarībā no kondensatora kapacitātes **C1**. Kad kondensatora spriegums kļūst vienāds ar releja pievilkšanās spriegumu $U_c = U_p$, relejs **K1** ieslēdzas. No slēdža **S1** ieslēgšanas momenta līdz releja **K1** nostrādei paiet laika sprādis t_p , ko sauc par releja pievilkšanās kavējumu. Pēc tam kondensators turpina uzlādēties līdz spriegumam U_{cmax} (2.16. att.).



2.16. att. Elektromagnētiskais līdzstrāvas relejs ar kondensatora **C1** radītu darbības kavējumu uz ieslēgšanos un atslēgšanos.

Izslēdzot slēdzi **S1**, notiek kondensatora **C1** izlāde caur releja spoli **K1**. Kondensatora izlādes strāva notur releju **K1** ieslēgtā stāvoklī zināmu laika sprādi pēc tam, kad tiek atslēgts barošanas spriegums **U**. Šo laika sprādi sauc par releja atslēgšanās laika kavējumu t_a .

Laika releja analītiskais aprēķins.

Lai aprēķinātu laika releja parametrus, sastāda tā elektriskās ķēdes strāvu un spriegumu bilances vienādojumus, izmantojot Kirhofa likumus:

$$\begin{cases} {}^1 i = i_s + i_c \\ {}^2 U = U_{R1} + U_c \end{cases} \quad (2.17)$$

kur $i = U_{R1} / R1$; $i_s = U_c / R_s$; $i_c = C \frac{dU_c}{dt}$.

Ievietojot strāvu izteiksmes (2.17) vienādojumā (1), bet no vienādojuma (2) izsakot spriegumu U_{R1} , iegūstam elektriskās ķēdes diferenciālvienādojumu:

$$\frac{U - U_c}{R_1} = \frac{U_c}{R_s} + C \frac{dU_c}{dt} \quad (2.18)$$

Izdarot vienkāršus pārveidojumus, iegūst pirmās kārtas diferenciālvienādojumu ar konstantiem koeficientiem:

$$\tau_p \frac{dU_c}{dt} + U_c = U_{c \max}, \quad (2.19)$$

kur $\tau_p = C \cdot \frac{R_s \cdot R_1}{R_s + R_1}$ - releja pievilkšanās laika konstante, s;

$U_{c \max} = \frac{R_s}{R_s + R_1} \cdot U$ - kondensatora maksimālais uzlādes spriegums, V;

Laika konstante τ_p raksturo releja pievilkšanās inerci. Lai iegūtu τ_p mērvienību sekundēs, kapacitāte jāizsaka farados (F), bet elektriskā pretestība omos (Ω).

Piemērs. Dots: $C = 100 \mu F$, $R_s = 10 k\Omega$, $R_1 = 7 k\Omega$.

Aprēķins: $\tau_p = C \cdot \frac{R_s \cdot R_1}{R_s + R_1} = 100 \cdot 10^{-6} F \cdot \frac{10 \cdot 10^3 \Omega \cdot 7 \cdot 10^3 \Omega}{(10 + 7) \cdot 10^3 \Omega} = 0.41 s$.

Laika intervālā, kas vienāds ar laika konstanti τ_p , kondensators uzlādējas līdz spriegumam $U_c = 0,63 U_{c \max}$. Ja kondensatora uzlādes raksturlielne uzņemta eksperimentāli, tad τ_p var noteikt grafiski kā parādīts 2.16. attēlā.

Diferenciālvienādojuma (2.19) atrisinājums ir eksponenciāla funkcija:

$$U_c = U_{c \max} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_p}} \right) \quad (2.20)$$

Lai aprēķinātu releja pievilkšanās kavējumu t_p , izteiksmē (2.20) ievietojam $U_c = U_p$ un $t = t_p$. Veicot pārveidojumus, iegūst vienādību:

$$e^{\frac{t_p}{\tau_p}} = \frac{U_{c \max}}{U_{c \max} - U_p} \quad (2.21)$$

Logaritmējot vienādības abas puses, iegūst t_p aprēķina izteiksmi:

$$t_p = \tau_p \cdot \ln \frac{U_{c \max}}{U_{c \max} - U_p} \quad (2.22)$$

Laika sprīdī t_p kondensators uzlādējas līdz releja pievilkšanās spriegumam U_p .

Izslēdzot slēdzi **S1**, relejs tiek atslēgts no barošanas avota. Līdz ar to izmainās strāvu un spriegumu balance, jo $i = 0$; $U = 0$; $U_{R1} = 0$. Tad laika releja darbību apraksta sekojoši vienādojumi:

$$i_s + i_c = 0, \quad U_c = U_s \quad (2.23)$$

$$\text{kur } U_c = U_s = i_s \cdot R_s, \quad i_s = -i_c = -C \cdot \frac{dU_c}{dt}.$$

Veicot pārveidojumus iegūst kondensatora izlādes procesa diferenciālvienādojumu:

$$C \cdot R_s \cdot \frac{dU_c}{dt} + U_c = 0. \quad (2.24)$$

Releja atlaišanās kavējuma laikā t_a notiek kondensatora izlāde no $U_{c \max}$ līdz atlaišanās spriegumam U_a . Šos nosacījumus ņemam vērā integrējot vienādojumu:

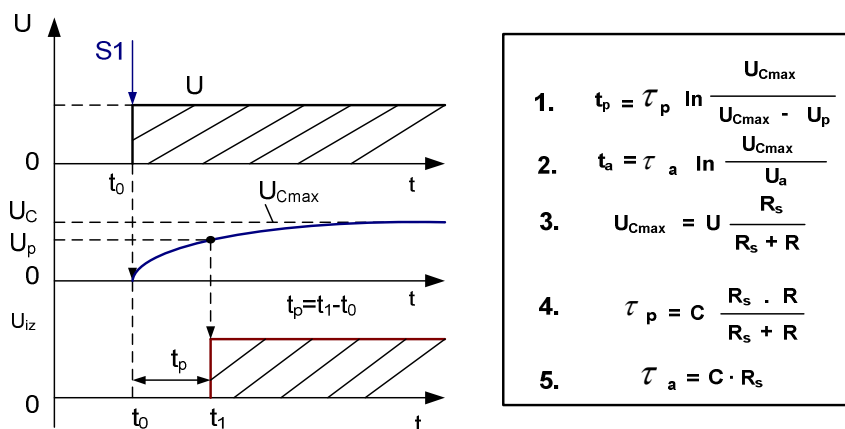
$$\int_{U_{c \max}}^{U_a} \frac{dU_c}{U_c} = - \int_0^{t_a} \frac{dt}{C \cdot R_s}, \quad \text{no kurienes } \ln U_a - \ln U_{c \max} = - \frac{t_a}{C \cdot R_s}. \quad (2.25)$$

No vienādojuma (2.25) iegūst laika releja atlaišanās kavējuma aprēķina izteiksmi:

$$t_a = \tau_a \cdot \ln \frac{U_{c \max}}{U_a}, \quad (2.26)$$

kur $\tau_a = C \cdot R_s$ – releja atlaišanās laika konstante, s.

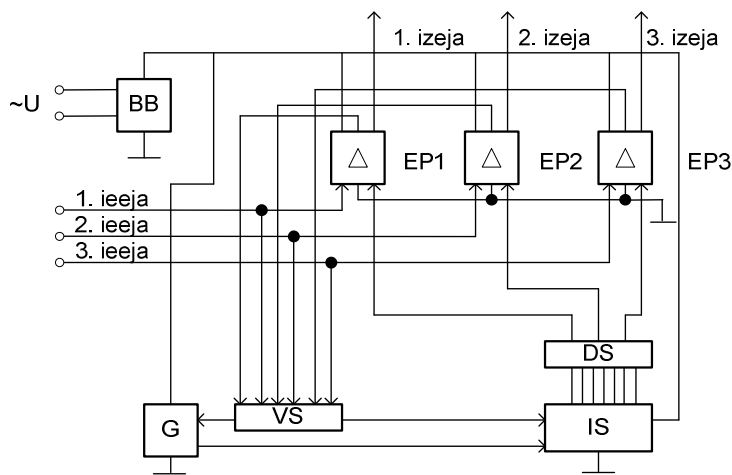
Laika konstanti τ_a var noteikt grafoanalītiski kā parādīts 2.16. attēlā. Sakarības starp laika releja spriegumiem un aprēķina formulas parādītas 2.17. attēlā.



2.17. att. Laika releja ar kondensatoru spriegumu raksturlīknes (a) un kavējuma laiku aprēķina analītiskās izteiksmes (b).

Elektroniskais laika relejs. Lielu kavējumu (no dažām minūtēm līdz stundām un pat vairākām diennaktīm) iegūšanai izmanto laika relejus, kas veidoti uz analogo un ciparu mikroskāmu bāzes. Šādi laika releji var būt vienkānāla (ar vienu ieeju un vienu izeju) vai daudzkanālu (ar vairākām ieejām un izejām).

Daudzkanālu laika releji tiek izmantoti kā komandaparāti programmvadības sistēmās. Trīs kanālu elektroniskā laika releja shēma parādīta 2.18. attēlā.



2.18. att. **Elektroniskais daudzkanālu laika relejs:**

BB - barošanas bloks; G - takts impulsu ģenerators; IS - impulsu skaitītājs; DS - dešifrators; EP - izejas signālu pastiprinātāji; VS - vadības shēma.

Nonākot komandas signālam kādā no ieejām, vadības shēma **VS** palaiž takts ģeneratoru **G** un impulsu skaitīšanas shēmu **IS**, kas sastāv no bināri-decimālo skaitītāju mikroskāmu. Takts ģenerators formē sprieguma impulsus ar stabilu sekošanas periodu T_1 . **IS** attiecīgajā decimālajā izejā parādās augsta līmeņa signāls, ja saskaitīto impulsu skaits vienāds ar attiecīgās izejas decimālo vērtību. Piemēram, decimālajā izejā **5**, kam atbilst decimālā vērtība $2^5 = 32$, augsta līmeņa signāls parādās pēc tam, kad ieejā pienākuši **32** impulsi. Ja impulsu sekošanas periods $T_1 = 0.5s$, tad attiecīgajā **IS** izejā signāls aizkavējas par $t_5 = 0.5 \times 32 = 16 s$.

Dešifrators **DS** atšifrē laika releja attiecīgā vadības kanāla, piemēram, (1) ieprogrammēto laika kavējumu, piemēram, (16 s) un formē signālu izejas jaudas pastiprinātājam **EPI**. Pastiprinātais signāls tiek padots uz izpildiekārtu. Katram vadības kanālam var ieprogrammēt dažādus kavējumu laikus, kas dod iespēju realizēt iekārtu programētu vadību atbilstoši tehnoloģiskajām prasībām.

2.2.4. Ceļa-gala slēdži un rotācijas slēdži

Ceļa slēdži ir automātikas ierīces, kas kontrolē mehānisma noieto ceļu vai pozīciju. Noteiktā ceļa punktā ceļa slēdzis var dot dažādas komandas, piemēram, mainīt mehānisma kustības virzienu, mainīt tā kustības ātrumu vai iedarbināt citu mehānismu.

Gala slēdži pēc konstrukcijas daudzos gadījumos neatšķiras no ceļa slēdžiem, tikai to darbības funkcijas ir šaurākas. Gala slēdžu uzdevums ir izslēgt mehānismu galējos stāvokļos vai noietā ceļa noteiktā punktā. Praksē vairāk tiek lietots termins - gala slēdzis, neatkarīgi no veiktās funkcijas, Tādēļ turpmāk lietošim šo nosaukumu.

Gala slēdžus iedala: 1) **kontakta** tipa; 2) **bezkontakta** tipa. Kontakta tipa gala slēdžu pārslēgšana notiek fiziska kontakta veidā. Ar izcilņa palīdzību mehānisms tieši iedarbojas uz gala slēdža pārslēgšanas sviru.

Kontakta tipa gala slēdžus iedala: 1) **vienkāršas** darbības (pārslēgšanās ātrums atkarīgs no mehānisma kustības ātruma); 2) **momentānas** darbības (gala slēdzis pārslēdzas momentāni neatkarīgi no mehānisma kustības ātruma).

Bezkontakta gala slēdžu pārslēgšana notiek iedarbojoties ar elektrisko un magnētisko lauku vai gaismas plūsmu.

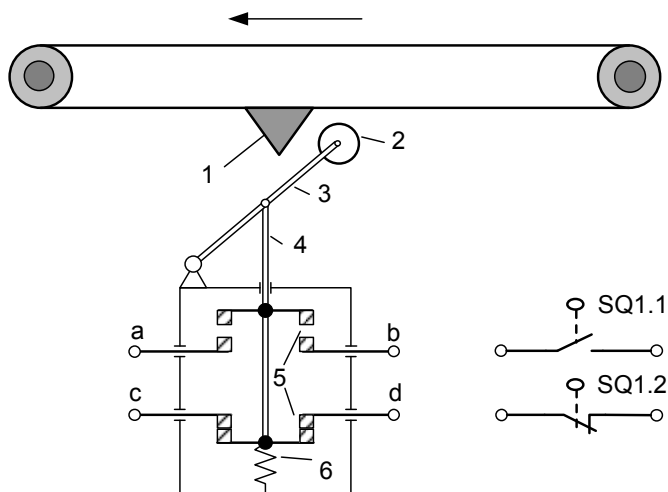
Bezkontakta tipa gala slēdžus iedala: 1) **herkonu** (pārslēgšana notiek ar magnētisko lauku); 2) **ģeneratora** tipa (pārslēgšana notiek ar elektrisko lauku); 3) **fotoelektroniskie** (pārslēgšana notiek ar gaismas plūsmu).

Vienkāršas darbības kontakta tipa gala slēdzis.

Gala slēdzi iedarbina uz transportiera lentes uzmontēts izcilnis **1**. Tam iedarbojoties uz rullīti **2**, tiek pagriezta svira **3**, kas pārvieto uz leju kātu **4** ar kontaktu plāksnēm. Augšējā kontaktu plāksne savieno elektriskos kontaktus **a-b (SQ1.1)**, kas ir gala slēdža **normāli vajējie** jeb **saslēdzošie** kontakti. Apakšējā kontaktu plāksne pārtrauc elektriskos kontaktus **c-d (SQ1.2)**, kas ir gala slēdža **normāli slēgtie** jeb **atslēdzošie** kontakti. Ja mehānisms reversējas vai izcilnis pāriet pāri rullītim, gala slēdzis atbrīvojas un atspere **6** atgriež elektriskos kontaktus normālā stāvoklī (2.19. att.).

Vienkāršas darbības gala slēdzi var izmantot, ja izcilņa kustības ātrums ir vismaz **1 m/s**. Jā ātrums ir mazāks, elektriskie kontakti pārslēdzas lēni, starp tiem veidojas **Volta loks**, kas izraisa kontaktu apdegšanu un paātrina to nolietošanos. Šis trūkums ir novērsts momentānas darbības gala slēdžos, kuru elektriskie kontakti

pārslēdzas momentāni neatkarīgi no mehānisma kustības ātruma. Tas panākts, izmantojot atsperes mehānisku ar sprūdu vai profilētu izcilni.



2.19.att. Vienkāršas darbības kontakta tipa gala slēdzis:

1 - izcilnis; 2 - rullītis; 3 - svira; 4 - kāts ar kontaktu plāksnēm; 5 - elektriskie kontakti; 6 - atspere.

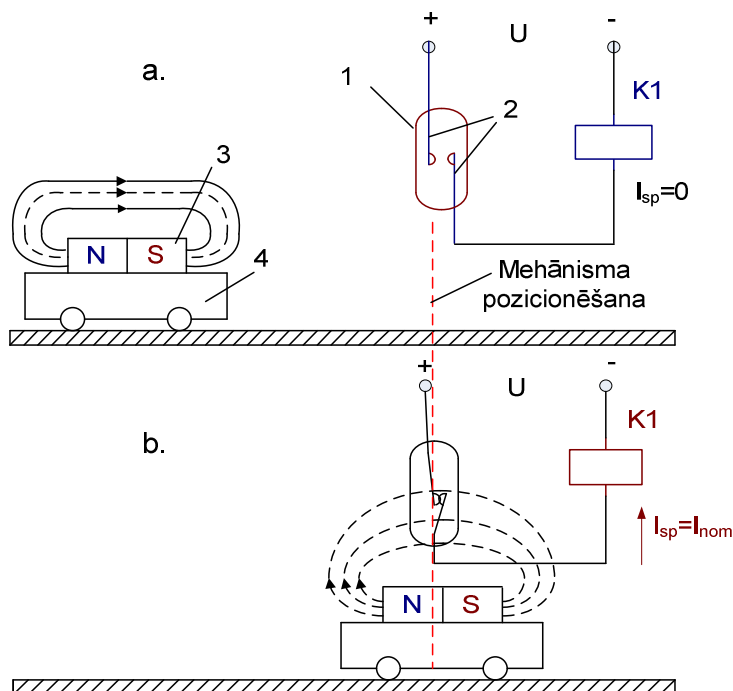
Herkonu galaslēdži.

Vienkāršākais herkonu galaslēdzis sastāv no **herkona**, kuram virknē slēgta jutīga līdzstrāvas releja spole **K1** (2.20. att.). Herkons sastāv no stikla balona **1**, no kura izsūkņēts gaiss, bet tā vietā iepildīta cēlgāze, piemēram, argons. Balonā iekausēti elastīgi magnētiski mīksta (nerūdīta) metāla elektriskie kontakti **2**. Šo kontaktu saslēgšana notiek ar magnētiskā lauka palīdzību, kuru rada pastāvīgais magnēts **3**, kas uzmontēts uz mehānisma **4**. Kamēr mehānisms nav pārvietojis magnētu pretī herkonam, tā elastīgie kontakti ir pārtraukti un relejs **K1** ir izslēgtā stāvoklī (2.20.a att.). Kad mehānisms pārvieto magnētu tieši pretī herkonam, tā magnētiskais lauks magnetizē herkona kontaktus, tie savstarpēji pievelkas un saslēdz releja spoles ķēdi (2.20.b att.).

Herkonu galaslēdžu priekšrocības:

- pārslēgšana notiek iedarbojoties magnētiskajam laukam bez tieša kontakta ar mehānismu;
- vienkārši pēc uzbūves, lēti un droši ekspluatācijā, var darboties agresīvās un sprādzienbīstamās vidēs;

- lielāka kontaktu komutācijas jauda un komutāciju ciklu skaits salīdzinājumā ar kontakta tipa galaslēdžiem.



2.20. att. **Herkonu bezkontakta tipa gala slēdzis:**

1 - herkons; 2 - magnētiskie kontakti; 3 - pastāvīgais magnēts; 4 - mehānisms.

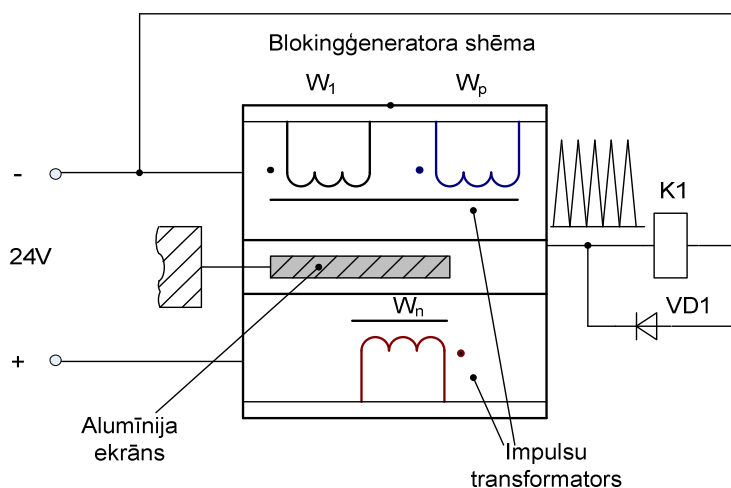
Generators tipa galaslēdži.

Ģenerators tipa gala slēdži tiek vadīti ekranējot elektrisko lauku vai mainot augstfrekvences ģenerators svārstību kontūra parametrus. Elektriskā lauka ekranēšanai izmanto alumīnija ekrānu, bet svārstību kontūra parametrus izmaina ar feromagnētiska izciļņa palīdzību – to pietuvinot kontūra spolei. Abos gadījumos gala slēdža pārslēgšana notiek bezkontakta veidā.

Pirmā tipa gala slēdzis sastāv no blokingģenerators shēmas ar impulsu transformatoru, kas veido atgriezenisko saiti no tā izejas uz ieeju (2.21. att.).

Impulsu transformators, kas sastāv no primārā tinuma w_1 , pozitīvās atgriezeniskās saites tinuma w_p un negatīvās atgriezeniskās saites tinuma w_n , iebūvēts divos izciļņos, starp kuriem ir gaisa sprauga.

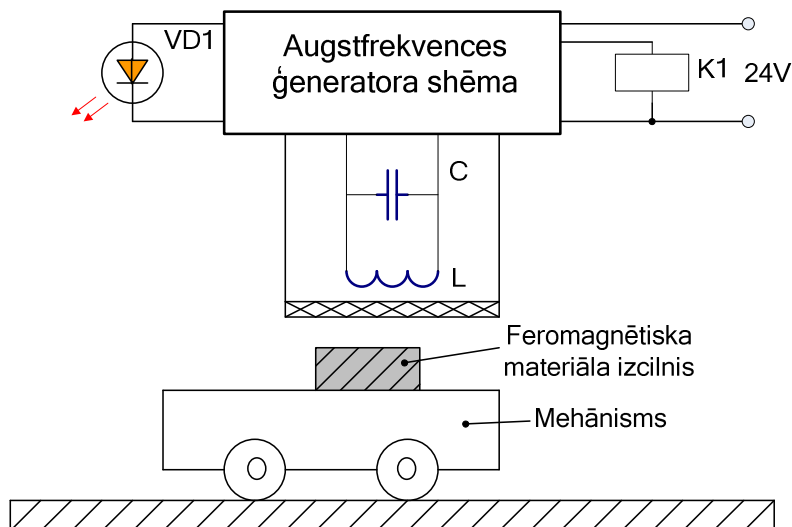
Blokingģenerators elektroniskā shēma un impulsu transformators ievietoti vienā plastmasas korpusā ar trim hermētiskiem izvadiem **24 V** barošanas līdzsprieguma un līdzstrāvas releja spoles **K1** ar pretestību **500 Ω** pieslēgšanai. Lai aizsargātu blokingģenerators izejas tranzistoru pret pašindukcijas EDS radīto pārspriegumu, releja spoli sprostvirzienā šuntē ar diodi **VD1** (2.21. att.)



2.21. att. **Bezkontakta gala slēdzis ar blokingģeneratoru un alumīnija ekrānu.**

Kamēr gaisa spraugā nav iebīdīts alumīnija ekrāns, negatīvās atgriezeniskās saites tinuma w_n iespaids ir pārsvarā pār pozitīvās atgriezeniskās saites tinuma w_p iespaidu un ģenerators darbība tiek bloķēta. Iebīdot gaisa spraugā alumīnija ekrānu, tinums w_n tiek ekranēts attiecībā pret primāro tinumu w_1 un pārsvaru iegūst pozitīvā atgriezeniskā saite. Tā rezultātā blokingģenerators sāk ģenerēt līdzstrāvas impulsus ar kilohercu frekvenci, kas tiek padoti uz releja **K1** spoli. Relejs ieslēdzas un formē attiecīgu vadības komandu mehānismam (apstāties, reversēties, mainīt kustības ātrumu).

Otrā tipa galaslēdži sastāv no augstfrekvences ģenerators shēmas ar **LC** svārstību kontūru. Galaslēdža jutīgais elements ir spoliņa **L**, kas novietota cilindrica metāla vai plastmasas korpusa galā un hermetizēta ar epoksīda kompaundu. Galaslēdzim ir trīs hermetizēti elektriskie izvadi 24V barošanas līdzsprieguma un līdzstrāvas releja spoles **K1** pieslēgšanai. Korpusā var būt iebūvēta gaismas diode **VD1** galaslēdža darbības indikācijai (2.22. att.).



2.22. att. **Bezkontakta gala slēdzis ar augstfrekvences svārstību ģeneratoru.**

Svārstību kontūra parametri izvēlēti tā, lai tā pašsvārstību frekvence sakristu ar uzspiesto svārstību frekvenci. Pie šādiem nosacījumiem **LC** kontūrs darbojas rezonanses režīmā un tam ir maza elektriskā pretestība. Līdz ar to tas šuntē augstfrekvences ģenerators mikroshēmas ieeju un uz releja spoles **K1** ir zems sprieguma līmenis.

Pietuvinot spoliņai **L** feromagnētiska materiāla izcilni (2.22. att.), tās induktivitāte būtiski izmainās. Svārstību kontūrs iziet no rezonanses režīma, tā pretestība jūtami palielinās un tas vairs nešuntē ģenerators mikroshēmas ieeju. Ģenerators izejā parādās augsta līmeņa līdzstrāvas impulsi un ieslēdzas relejs **K1**.

Ģenerators tipa galaslēdžu priekšrocības:

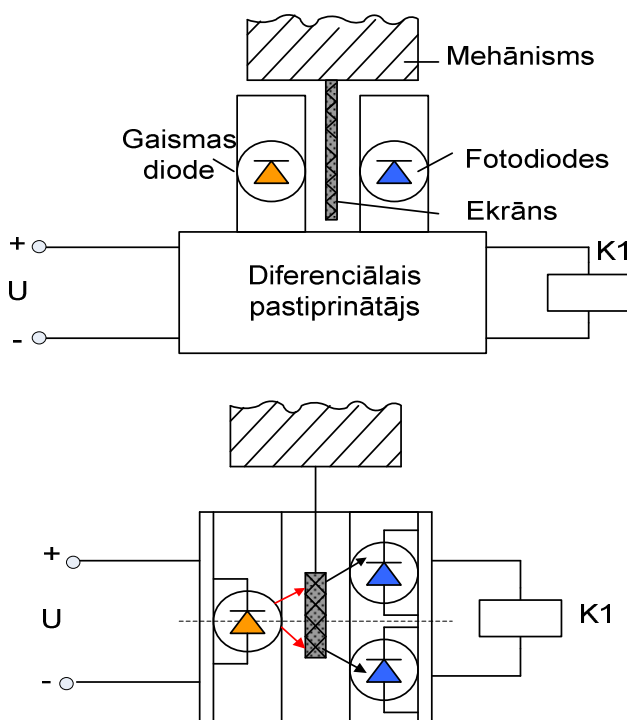
- ❑ pārslēgšana notiek bezkontakta veidā;
- ❑ var izmantot agresīvās un sprādzienbīstamās vidēs;
- ❑ augsta nostrādes precizitāte ($\pm 0.1 \dots 0.5$ mm);
- ❑ var iekļaut pusvadītāju loģiskās vadības shēmās;
- ❑ var izmantot robotu vadības kompleksos kā tuvās darbības lokatorus.

Fotoelektroniskie galaslēdži.

Kā fotoelektronisku galaslēdzi var izmantot **fotoreleju**, kurš sastāv no gaismas jutīga elementa, piemēram, **fotorezistora** un **līdzstrāvas elektromagnētiskā releja**.

Kamēr fotorezistoru apgaismo gaismas avots, relejs ir ieslēgtā stāvoklī. Iebīdot starp gaismas avotu un fotorezistoru **necaurspīdīga materiāla ekrānu**, ievērojami pieaug fotorezistora elektriskā pretestība un relejs izslēdzas. Šis ir bezkontakta tipa galaslēdzis, jo **pārslēgšana notiek** nevis iedarbojoties ar mehānisku spēku, bet **aizsedzot gaismas plūsmu**.

Lai iegūtu augstu pozicionēšanas precizitāti, izstrādāti speciāli fotoelektroniskie galaslēdži, kuros kā gaismas avotu izmanto **gaismas diodes**, bet kā gaismas jutīgos elementus divas **fotodiodes**, kuras slēgtos jutīga **diferenciālā pastiprinātāja** ieejā (2.23. att.). Spraugā starp gaismas diodi un fotodiodēm tiek iebīdīts precīza izmēra **necaurspīdīgs ekrāns**. Diferenciālā pastiprinātāja izejā slēgtais līdzturības relejs **K1** nostrādā tad, kad ekrāns vienādi aptumšo abas fotodiodes. Šāds fotoelektroniskais galaslēdzis paredzēts augstas precizitātes programmavadiņas darbgaldu griezējinstrumentu pozicionēšanai. Pozicionēšanas precizitāte ($\pm 0.05 \dots 0.1 \text{ mm}$).



2.23.att. Augstas precizitātes foto-elektroniskais gala slēdzis metālapstrādes darbgalda griezēju precīzai iestatīšanai.

Rotācijas ātruma kontroles slēdži.

Rotācijas slēdzus izmanto asinhrono elektrodzinēju **automātiskās palaišanas, bremzēšanas un darbības kontroles shēmās**. Rotācijas slēdzis kontrolē vārpstas rotāciju. Miera stāvoklī slēdža elektriskie kontakti **SR** ir pārtraukti. Vārpstai sākot rotēt, slēdža kontakti saslēdzas un signalizē, ka iekārta darbojas. Atslēdzot elektrodzinēju, tā vārpstas rotācijas ātrums samazinās. Kad tas samazinās līdz minimālam lielumam, rotācijas slēdzis pārtrauc savus kontaktus **SR**. Slēdža ieslēgšanās un atslēgšanās sliekšni nosaka tā jutība.

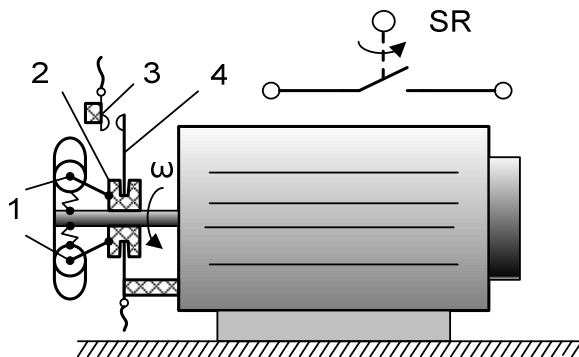
Apskatīsim divus rotācijas slēdžu veidus: 1) mehānisko **centrbēdzes** slēdzi; 2) **indukcijas** tipa rotācijas slēdzi.

Centrbēdzes slēdzis sastāv no vārpstas, kuras galā uzmontēta metāla skava ar tajā ievietotiem metāla rullīšiem **1**. Rullīšus pievelk vārpstai atsperes, bet to asis ar svirām un šarnīriem savienotas ar buksīti **2**, kura rotē reizē ar vārpstu un var pa to pārvietoties horizontālālā virzienā. Rotācijas slēdža vārpstu savieno ar elektrodzinēja vārpstu tieši, vai izmantojot pārvadu. Slēdža elektriskais kontakts **3** ir stacionārs, bet otrs elastīgais kontakts **4** ievietots buksītes **2** rievā.

Iedarbinot elektrodzinēju, palielinās tā vārpstas rotācijas frekvence ω . Uz rullīšiem **1** sāk darboties centrālās spēks, kura iespaidā rullīši attālinās no vārpstas un, pavelkot slīdošo buksīti pa kreisi, saslēdz kontaktus **2-3** (2.24. att.)

Centrbēdzes slēdzim ir būtiski trūkumi:

- 1) berze mehāniskajos elementos, kas samazina tā jutību un darbības resursu;
- 2) nevar kontrolēt rotācijas virzienu, jo slēdzis nereaģē uz rotācijas virziena maiņu.



2.24. att. **Centrbēdzes rotācijas slēdzis:**

1 - metāla rullīši; 2 - slīdoša buksīte; 3 - stacionārais elektriskais kontakts; 4 - kustīgais elektriskais kontakts.

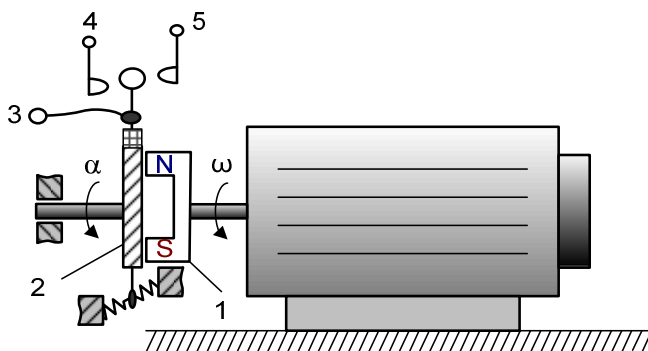
Indukcijas tipa rotācijas slēdzis sastāv no pastāvīgā magnēta **1**, kurš savienots ar elektrodzinēja vārpstu, alumīnija diska **2**, kurš novietots pie magnēta poliem **N-S** un var pagriezties ap savu vārpstu par ierobežotu leņķi α . Slēdža elektriskais kontakts **3** ir uzmontēts uz diska un elektriski izolēts no tā. Atkarībā no elektrodzinēja vārpstas rotācijas virziena kustīgais elektriskais kontakts **3** var saslēgties ar kontaktu **4** vai ar kontaktu **5** (2.25. att.).

Iedarbinot elektrodzinēju, pastāvīgais magnēts **N-S** sāk rotēt. Magnēta radītā magnētiskā lauka spēka līnijas šķel alumīnija disku un inducē tajā strāvu. Inducētās strāvas magnētiskā plūsma saķēdējas ar magnēta magnētisko plūsmu un rada griezes momentu uz diska vārpstas. Alumīnija disks pagriežas elektrodzinēja rotācijas virzienā līdz atdurim, savieno kontaktu **3** ar kontaktu **4** un saslēdz pirmo elektrisko ķēdi. Elektrodzinēju apstādinot, magnētiskais saķēdējums starp magnētu un disku izzūd, atsperes atgriež disku normālā pozīcijā un tiek pārtraukti kontakti **3-4**.

Iedarbinot elektrodzinēju pretējā virzienā, arī alumīnija disks pagriežas pretēji, savienojas kontakti **3-5** un noslēdzas otra elektriskā ķēde, kas signalizē par elektrodzinēja reversiju.

Indukcijas slēdža priekšrocības:

1) nav mehāniskās berzes starp slēdža elementiem, kas paaugstina tā jutību un ekspluatācijas drošumu; 2) var kontrolēt rotācijas virzienu, ko izmanto, piemēram, reversējamu elektrodzinēju automātiskās bremzēšanas shēmās ar pretslēgumu.



2.25. att. **Indukcijas tipa rotācijas slēdzis:**

1 - pastāvīgais magnēts; 2 - alumīnija disks; 3 - mobilais elektriskais kontakts;
4, 5 - stacionārie elektriskie kontakti.

2.3. Asinhronās elektriskās piedziņas tiešā palaide

2.3.1. Palaišanas strāvas un momenta raksturlīknes

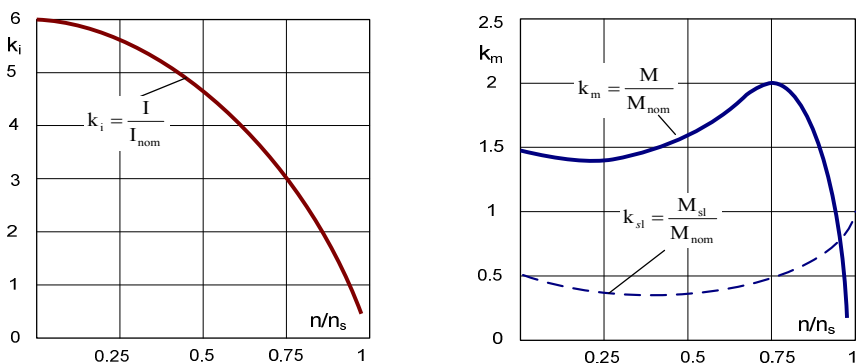
Elektrodzinēju palaišanas režīmu raksturo strāvas un momentu raksturlīknes. Lai varētu salīdzināt dažādus palaišanas veidus, izvēlamies trīsfāzu asinhrono elektrodzinēju ar palaišanas strāvu $I_{\text{pal}} = 6I_{\text{nom}}$ un momentu $M_{\text{pal}} = 1.5M_{\text{nom}}$. Slodzes moments, kuru rada darbināmais mehānisms palaišanas sākumā ir $M_{\text{sl}} = 0.5M_{\text{nom}}$.

Mainīgos lielumus izsakām relatīvās vienībās: $k_i = I/I_{\text{nom}}$ – elektrodzinēja relatīvā strāva, izteikta kā mainīgās strāvas attiecība pret nominālo strāvu; $k_m = M/M_{\text{nom}}$ – elektrodzinēja relatīvais moments, izteikts kā mainīgā momenta attiecība pret nominālo momentu; $k_{\text{sl}} = M_{\text{sl}}/M_{\text{nom}}$ – slodzes relatīvais moments, izteikts kā mainīgā slodzes momenta attiecība pret elektrodzinēja nominālo momentu; n/n_s – elektrodzinēja vārpstas relatīvais rotācijas ātrums, izteikts kā mainīgā rotācijas ātruma attiecība pret elektriskā lauka (sinhrono) rotācijas ātrumu.

Palaižot elektrodzinēju tieši, tas tiek pieslēgts nemainīgam elektriskā tīkla spriegumam $U_t = \text{const}$. Elektrodzinēja ieskreja notiek pa tā dabiskajām strāvas $k_i = f(n/n_s)$ un momenta $k_m = f(n/n_s)$ raksturlīknēm (2.26. att.).

Ieslēgšanas brīdī notiek strāvas lēcieni, kas 6-kārtīgi pārsniedz nominālo strāvu ($k_{i\text{pal}} = 6$). Arī elektrodzinēja patērētā pilnā jauda 6-kārtīgi pārsniedz nominālo jaudu. Palielinoties elektrodzinēja rotācijas ātrumam no $n = 0$ palaišanas sākumā līdz $n = n_{\text{nom}}$ palaišanas beigās, strāva pakāpeniski samazinās līdz nominālai vērtībai ($k_i = 1$).

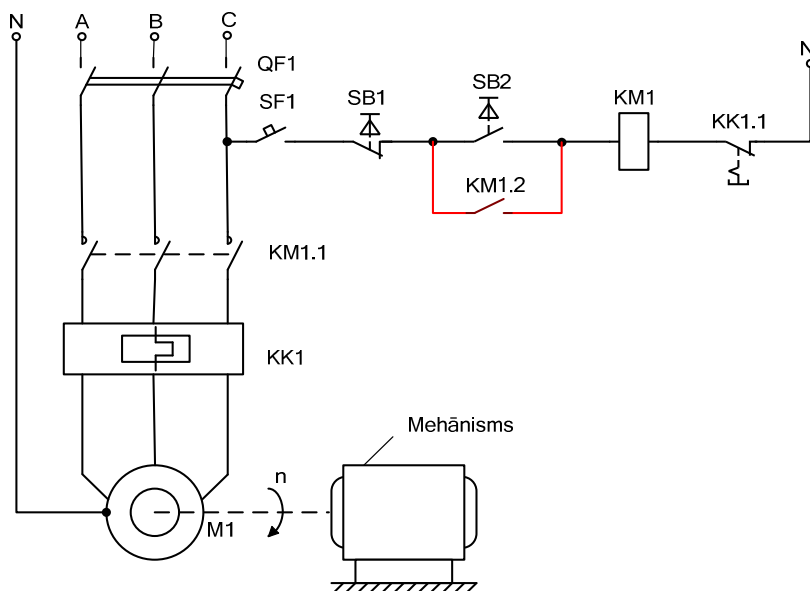
Elektrodzinēja moments mainās no $k_{m\text{pal}} = 1.5$ palaišanas sākumā, palielinās līdz kritiskajam lielumam $k_{m\text{kr}} = 2.0$ un samazinās līdz $k_m = 1$ palaišanas beigās.



2.26. att. Relatīvā strāva $k_i = I/I_{\text{nom}}$, relatīvais griezes moments $k_m = M/M_{\text{nom}}$ un slodzes moments $k_{\text{sl}} = M_{\text{sl}}/M_{\text{nom}}$ tiešās palaišanas režīmā.

2.3.2. Nereversējama asinhronā elektrodzinēja palaide

Nereversēja elektrodzinēja (mehānisms ar vienvirziena rotāciju, piemēram, ripzāģis vai sūknis) tiešās palaišanas shēma sastāv no **spēka ķēdes** ar automātslēdzi **QF1**, magnētiskā palaidēja (turpmāk **palaidēja**) spēka kontaktiem **KM1.1** un siltuma releja **KK1**, un **vadības ķēdes** ar automātslēdzi **SF1**, stop-pogas slēdzi (turpmāk **stop-poga**) **SB1**, palaišanas-pogas slēdzi (turpmāk **palaišanas-poga**) **SB2**, palaidēja spoli **KM1** un siltuma releja atslēdzošo kontaktu **KK1.1** (2.27. att.). Palaišanas-poga šuntēta ar elektriskās bloķēšanas kontaktu **KM1.2**.



2.27. att. Nereversējama elektrodzinēja tiešās palaišanas shēma.

Ieslēdzot automātslēdžus **QF1** un **SF1**, tiek padots spriegums uz spēka ķēdi un vadības ķēdi. Nospiežot palaišanas pogu **SB2**, ieslēdzas palaidējs **KM1**. Vienlaicīgi saslēdzas tā spēka kontakti **KM1.1**, kas pieslēdz spriegumam elektrodzinēju **M1**, un bloķēšanas kontakti **KM1.2**, kas elektriski bloķē palaišanas-pogu **SB2**.

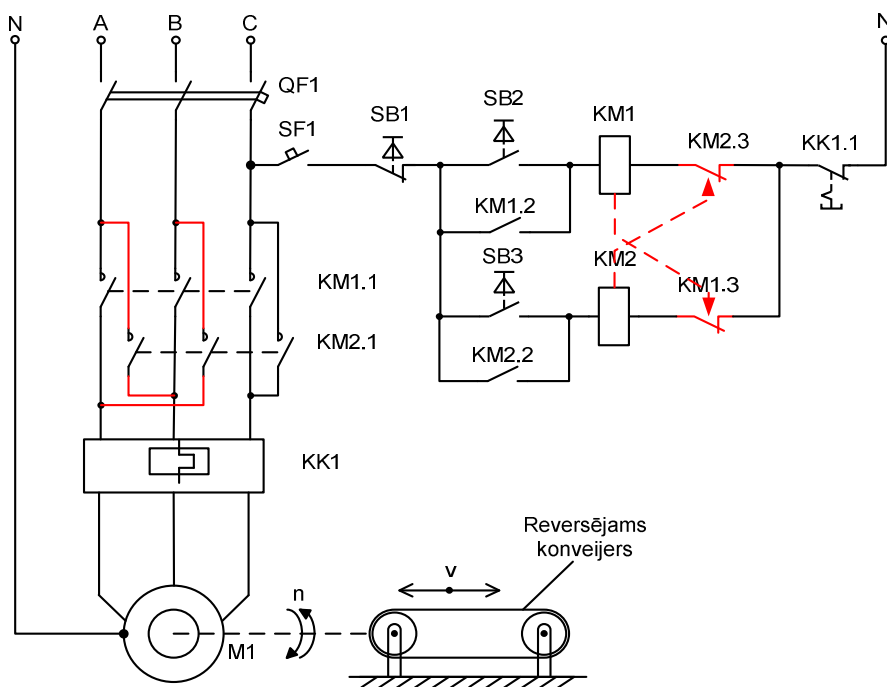
Pogas tipa slēdži darbojas īslaicīgi. Atlaižot palaišanas-pogu, tās kontaktu plāksne pārtrauc elektrisko ķēdi, taču palaidējs neizslēdzas, jo tā spolē turpina plūst elektriskā strāva caur kontaktu **KM1.2**. Elektrodzinēju var apstādināt, nospiežot stop-pogu **SB1**. Ja rodas ilgstoša pārslodze, nepilnu fāzu režīms vai nosprūst rotors, tad

ar atbilstošu kavējumu pārtraucas siltuma releja kontakts **KK1.1**, izslēdzas palaidējs **KM1** un atslēdz elektrodzinēju **M1** no elektriskā tīkla.

2.3.3. Reversējama asinhronā elektrodzinēja palaide

Reversējama elektrodzinēja (mehānisms ar divu virzienu rotāciju, piemēram, dēļu gatera padeves mehānisms vai celšanas mehānisms) tiešās palaišanas shēma atšķiras no iepriekš apskatītās (2.27. att.) ar to, ka shēmā iekļauts otrs palaidējs **KM2** un otra palaišanas-poga **SB3** (2.28. att.).

Lai reversētu trīsfāzu asinhrono elektrodzinēju, jāsamaina vietām jebkuras divas fāzes: **A-B**, **B-C** vai **C-A**. Mainot vietām divas fāzes, mainās magnētiskā lauka rotācijas virziens, kā rezultātā izmainās arī elektrodzinēja rotācijas virziens. Palaidējs **KM1** pieslēdz tiešo fāzu secību **A-B-C**. Palaidējs **KM2** pieslēdz apgriezto fāzu secību **B-A-C**.



2.28. att. Reversējama elektrodzinēja tiešās palaišanas shēma.

Īpaša uzmanība jāpievērš tam, ka palaidēji **KM1** un **KM2** nedrīkst ieslēgties vienlaicīgi, jo tad rodas bīstams divu fāžu **A-B** īssavienojums!

To novērš ar abu palaidēju **savstarpējo blokēšanu**, kuru realizē kontakti **KM1.3** un **KM2.3**. Ja ieslēdz palaidēju **KM1**, pārtraucas kontakts **KM1.3** un neļauj ieslēgt palaidēju **KM2**. Ja ieslēdz palaidēju **KM2**, pārtraucas kontakts **KM2.3** un neļauj ieslēgt palaidēju **KM1**.

Ieslēdzot automātslēdžus **QF1** un **SF1**, tiek padots spriegums uz spēka ķēdi un vadības ķēdi. Nospiežot palaides-pogu **SB2**, ieslēdzas palaidējs **KM1**. Palaidēja enkura gājiena sākumā vispirms pārtraucas kontakts **KM1.3** un neļauj ieslēgt palaidēju **KM2**. Enkura gājiena beigās vienlaicīgi saslēdzas spēka kontakti **KM1.1**, kas pieslēdz elektrodzinējam **M1** tiešo fāzu secību, un kontakti **KM1.2**, kas blokē palaides-pogu **SB2**. Elektrodzinējs darbojas **tiešajā rotācijas virzienā**.

Lai **elektrodzinēju reversētu**, vispirms jānospiež stop-pogu **SB1**. Tad izslēdzas palaidējs **KM1**. Pārtraucas tā kontakti **KM1.1** un **KM1.2** un atslēdz elektrodzinēju no elektriskā tīkla, bet kontakti **KM1.3** saslēdzas un **atļauj** ieslēgt palaidēju **KM2**.

Nospiežot palaides-pogu **SB3**, ieslēdzas palaidējs **KM2**. Vispirms pārtraucas kontakts **KM2.3** un neļauj ieslēgt palaidēju **KM1**. Pēc tam saslēdzas spēka kontakti **KM2.1**, kas pieslēdz elektrodzinējam **apgriežto fāzu secību**, un kontakti **KM2.2**, kas blokē palaides-pogu **SB3**. Elektrodzinējs darbojas reversajā rotācijas virzienā.

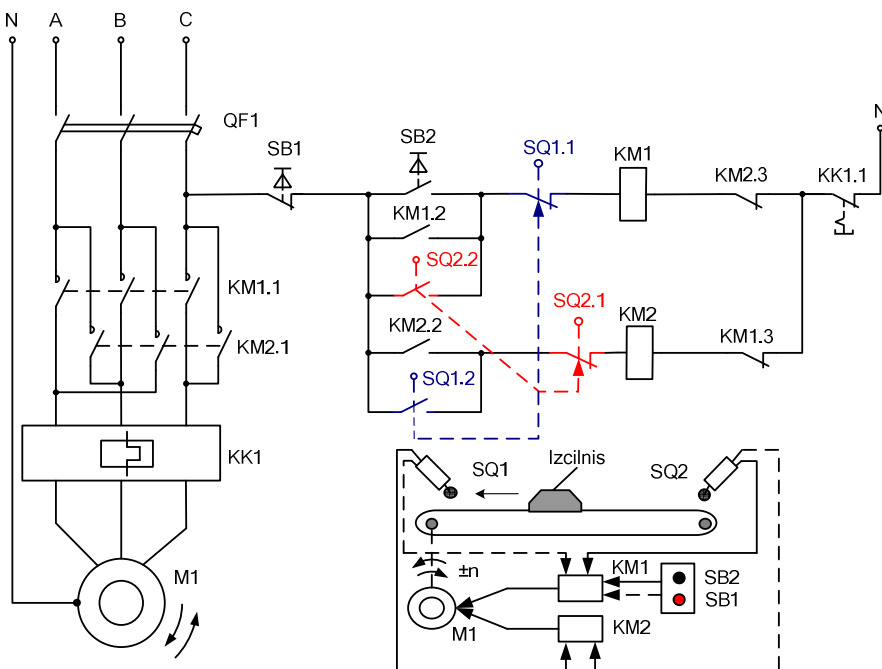
2.3.4. Asinhronā elektrodzinēja automātiskā reversīvā vadība

Automātiski reversējama elektrodzinēja (mehānisms ar periodiski mainīgu rotācijas virzienu, piemēram, restu tīrīšanas mehānisms kanalizācijas iekārtās vai pulēšanas darbgalds kokapstrādē) vadības shēma atšķiras no iepriekš apskatītās (2.28. att.) ar to, ka tajā iekļauti divi **gala slēdži SQ1** un **SQ2**, ar kuru palīdzību elektrodzinējs **M1** tiek reversēts automātiski (2.29. att.).

Apskatīsim automātiski reversējama transportiera vadības shēmu (2.29. att.). Uz transportiera lentes uzmontētais izcilnis iedarbojas uz gala slēdžiem **SQ1** vai **SQ2**. Elektrodzinēju palaižot, izcilnim jāpārvietojas gala slēdža **SQ1** virzienā. Pretējā gadījumā shēma nedarbosies. Ja izcilnis pārvietojas pretējā virzienā, tad elektrodzinējs jāatslēdz no elektriskā tīkla un jāmaina fāzu secība, t.i., jāsamaina vietām divas barošanas sprieguma fāzes.

Ieslēdzot automātslēdži **QF1**, tiek padots spriegums uz spēka ķēdi un vadības ķēdi. Nospiežot palaides-pogu **SB2**, ieslēdzas palaidējs **KM1**. Pārtraucas kontakts

KM1.3 un neļauj ieslēgt palaidēju **KM2**, bet saslēdzas spēka kontakti **KM1.1**, kas iedarbina elektrodzinēju **M1**, un kontakti **KM1.2**, kas bloķē palaides-pogu **SB2**. Transportiera lente pārvietojas bultas virzienā. Kad izcilnis nospiež gala slēdzi **SQ1**, pārtraucas tā kontakti **SQ1.1** un saslēdzas **SQ1.2**. Tiek izslēgts palaidējs **KM1**. Tā kontakti **KM1.1**, **KM1.2** pārtraucas un elektrodzinējs tiek atslēgts no sprieguma, bet kontakts **KM1.3** saslēdzas un atļauj ieslēgties palaidējam **KM2**.



2.29. att. Automātiski reversējama elektrodzinēja tiešās palaides shēma.

Elektriskā ķēde noslēdzas caur sekojošiem elementiem – **SB1**, **SQ1.2**, **SQ2.1**, **KM2**, **KM1.3** un **KK1.1**. Ieslēdzas palaidējs **KM2**, pārtraucas tā kontakts **KM2.3** un neļauj ieslēgt palaidēju **KM1**. Saslēdzas spēka kontakti **KM2.1**, kas pieslēdz elektrodzinēju **M1** spriegumam ar mainītu fāzu secību, un kontakti **KM2.2**, kas bloķē galasslēdža kontaktu **SQ1.2**.

Transportiera lente ar izcilni pārvietojas pretējā virzienā. Kad izcilnis atbrīvo gala slēdzi **SQ1**, pārtraucas tā kontakti **SQ1.2**, bet palaidējs **KM2** turpina darboties, jo tā spole saņem strāvu caur kontaktu **KM2.2**.

Kad izcilnis nospiež gala slēdzi **SQ2**, pārtraucas tā kontakti **SQ2.1** un saslēdzas **SQ2.2**. Tiek izslēgts palaidējs **KM2**. Tā kontakti **KM2.1**, **KM2.2** pārtraucas un

elektrodzinējs tiek atslēgts no sprieguma, bet kontakts **KM2.3** saslēdzas un **atļauj** ieslēgties palaidējam **KM1**. Elektriskā piedziņa sāk nākamo darba ciklu.

Gala slēdzis **SQ1** ar kontaktu **SQ1.1** atslēdz palaidēju **KM1**, bet ar kontaktu **SQ1.2** ieslēdz palaidēju **KM2**. Savukārt gala slēdzis **SQ2** ar kontaktu **SQ2.1** atslēdz palaidēju **KM2**, bet ar kontaktu **SQ2.2** ieslēdz palaidēju **KM1**. Kontakti **KM1.3** un **KM2.3** nodrošina palaidēju **KM1** un **KM2** savstarpējo bloķēšanu.

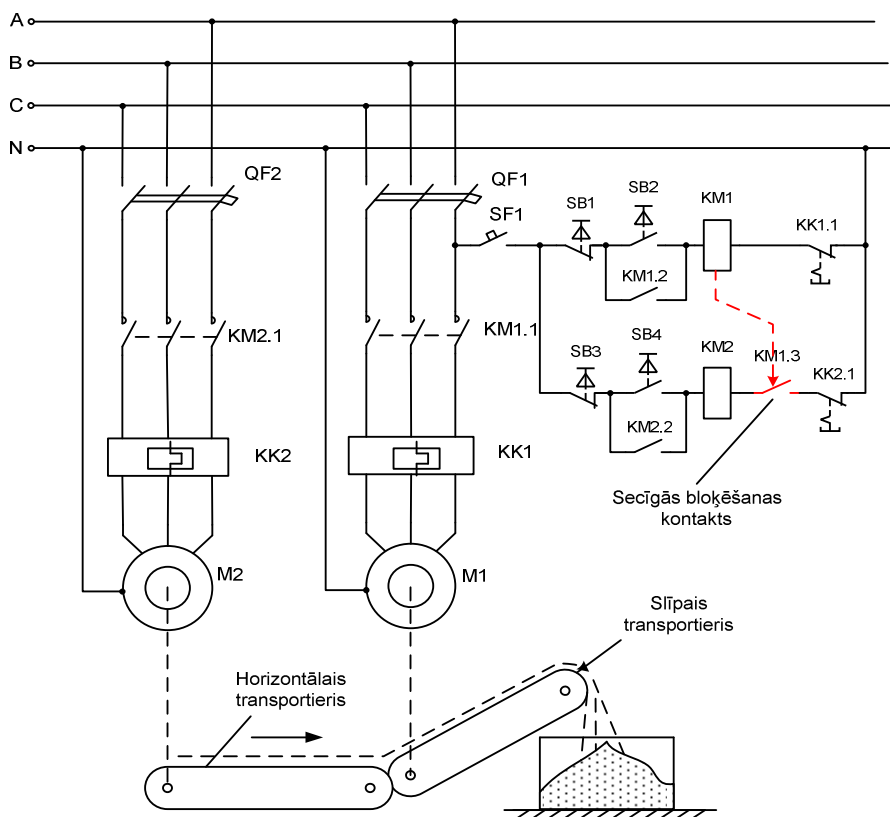
2.3.5. Secīgi bloķētu elektrisko piedziņu palaišanas shēma

Secīgo bloķēšanu izmanto plūsmas līnijās, lai nodrošinātu mehānismu pareizas ieslēgšanās un izslēgšanās secību. Vienkāršas plūsmas līnijas, kas sastāv no diviem mehānismiem – horizontālā un slīpā transportiera, secīgās bloķēšanas shēma parādīta 2.30. attēlā. **Plūsmas līnija tiek palaista pretēji plūsmas virzienam.** Tātad vispirms jāpalaiž slīpais transportieris un tikai pēc tam – horizontālais transportieris. Slīpais transportieris var darboties neatkarīgi. Horizontālais transportieris drīkst darboties tikai tad, ja darbojas slīpais transportieris. Ja slīpais transportieris atslēdzas, tad jāatslēdzas arī horizontālajam transportierim. To nodrošina automātiskās secīgās bloķēšanas shēma (2.30. att.).

Ieslēdzot automātslēdžus **QF1**, **QF2** un **SF1**, tiek padots spriegums uz spēka ķēdēm un vadības ķēdi. **Secīgo bloķēšanu realizē saslēdzošais kontakts KM1.3. Kamēr nav ieslēgts palaidējs KM1, nevar ieslēgt palaidēju KM2.**

Nospiežot palaišanas-pogu **SB2**, ieslēdzas palaidējs **KM1**. Saslēdzas kontakti **KM1.1** un iedarbina slīpā transportiera elektrodzinēju **M1**, saslēdzas kontakti **KM1.2** un bloķē palaišanas-pogu **SB2**, vienlaicīgi saslēdzas secīgās bloķēšanas kontakts **KM1.3** un **atļauj** ieslēgt horizontālā transportiera palaidēju **KM2**.

Nospiežot palaišanas-pogu **SB4**, ieslēdzas palaidējs **KM2** un iedarbina horizontālā transportiera elektrodzinēju **M2**. Līdz ar to plūsmas līnija ir palaista. Ja kaut kādu iemeslu dēļ atslēdzas palaidējs **KM1** (nospiež stop-pogu **SB1** vai pārtraucas siltuma releja kontakts **KK1.1**), atslēdzas slīpais transportieris. Atslēdzoties kontaktam **KM1.3**, tiek apturēts arī horizontālais transportieris un līnija apstājas.



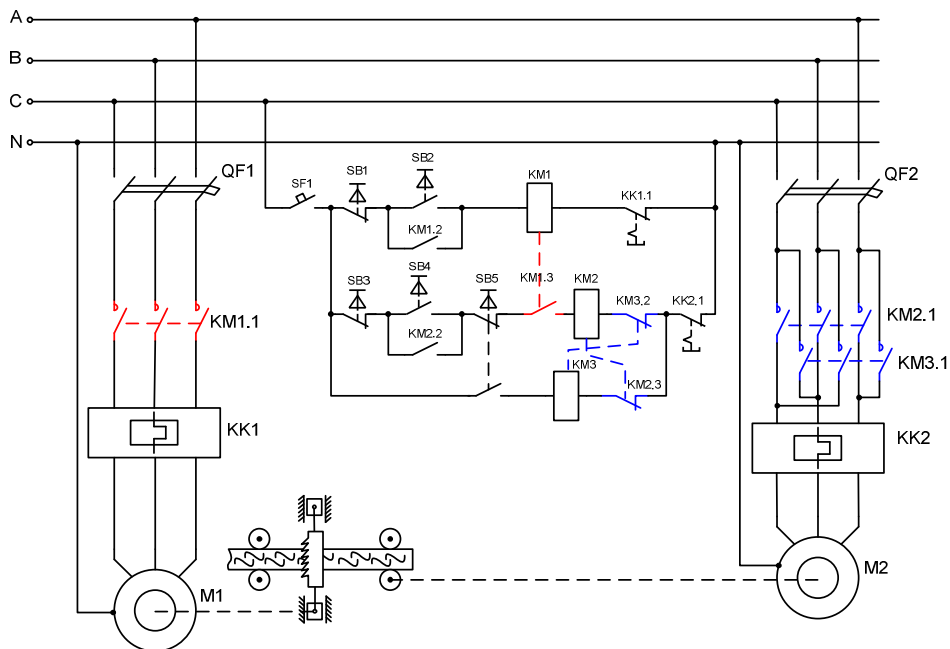
2.30. att. Divu asinhrono elektrodzinēju secīgās palaišanas shēma.

2.3.6. Dēļu gatera mehānismu elektriskās piedziņas palaišana

Dēļu gatera piedziņa sastāv no diviem galvenajiem mehānismiem – **zāģu agregāta** un **padeves mehānisma**. To vadības shēmā tiek izmantota kā **secīgā**, tā **savstarpējā bloķēšana**. Vispirms iedarbina zāģu piedziņas elektrodzinēju **M1**, pēc tam padeves mehānisma elektrodzinēju **M2** (2.31. att.).

Šādu secību nodrošina secīgās bloķēšanas kontakts KM1.3.

Ieslēdzot automātslēdzus **QF1**, **QF2** un **SF1**, tiek padots spriegums uz spēka ķēdēm un vadības ķēdi. Nospiežot palaišanas-pogu **SB2**, ieslēdzas palaidējs **KM1**. Saslēdzas kontakti **KM1.1** un iedarbina zāģu piedziņas elektrodzinēju **M1**, saslēdzas kontakti **KM1.2** un bloķē palaišanas-pogu **SB2**, vienlaicīgi saslēdzas secīgās bloķēšanas kontakts **KM1.3** un **atļauj ieslēgt padeves mehānisma palaidēju KM2** stubra padevei uz zāģiem.



2.31. att. Dēļu gatera zāģu agregāta un padeves mehānisma elektriskās piedziņas secīgās palaišanas un bloķēšanas shēma.

Nospiežot palaišanas-pogu **SB4**, ieslēdzas palaidējs **KM2**, saslēdzas kontakti **KM2.1**, **KM2.2** un iedarbina padeves mehānisma elektrodzinēju **M2** padevei „uz priekšu”, bet kontakts **KM2.3** pārtraucas un **neļauj** vienlaicīgi ieslēgt palaidēju **KM3** padevei „atpakaļgaitā”. Līdz ar to gateris ir palaists. Ja kaut kādu iemeslu dēļ atslēdzas palaidējs **KM1** (nospiež stop-pogu **SB1** vai pārtraucas siltuma releja kontakts **KK1.1**), atslēdzas zāģu piedziņas elektrodzinējs **M1**. Atslēdzoties kontaktam **KM1.3**, tiek apturēts arī padeves mehānisms un gateris apstājas.

Padevi „atpakaļgaitā” var ieslēgt neatkarīgi no zāģu agregāta darbības. Nospiežot pogas slēdzi **SB5**, pārtraucas tā atslēdzošais kontakts palaidēja **KM2** spoles ķēdē un saslēdzas saslēdzošais kontakts palaidēja **KM3** spoles ķēdē. Līdz ar to izslēdzas palaidējs **KM2** un ieslēdzas **KM3**. Elektrodzinējam **M2** tiek pieslēgta mainīta fāzu secība un padeves mehānisms reversējas.

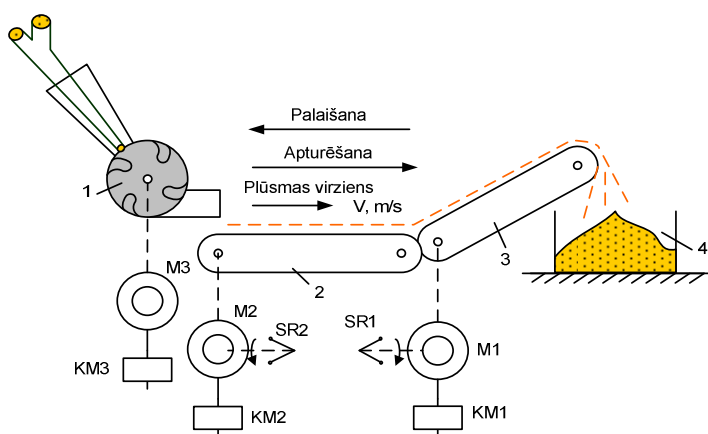
Padeve „atpakaļgaitā” notiek īslaicīgi, kamēr pietur pogas slēdzi **SB5.**

2.3.7. Plūsmas līnijas posmu secīgā palaišana un apturēšana

Šķeldu ražošanas plūsmas līnija sastāv no šķeldotāja 1 ar elektrodzinēju **M3** un palaidēju **KM3**, horizontālā transportiera 2 ar elektrodzinēju **M2**, palaidēju **KM2** un darbības kontroles rotācijas slēdzi **SR2** un slīpā transportiera 3 ar elektrodzinēju **M1**, palaidēju **KM1** un darbības kontroles rotācijas slēdzi **SR1** (2.32. att.).

Tā kā **plūsmas līniju palaiž pretēji plūsmai**, tad **vispirms palaiž slīpo transportieri, pēc tam – horizontālo transportieri**, bet **pēdējo – šķeldotāju**. Līnijas **apturēšana notiek pretējā virzienā** (pa plūsmai). **Vispirms izslēdz šķeldotāju, pēc tam**, ieturot pauzi, kas nepieciešama materiāla aiztransportēšanai līdz uzkrājam-bunkuram, **apstādina horizontālo un slīpo transportieri**.

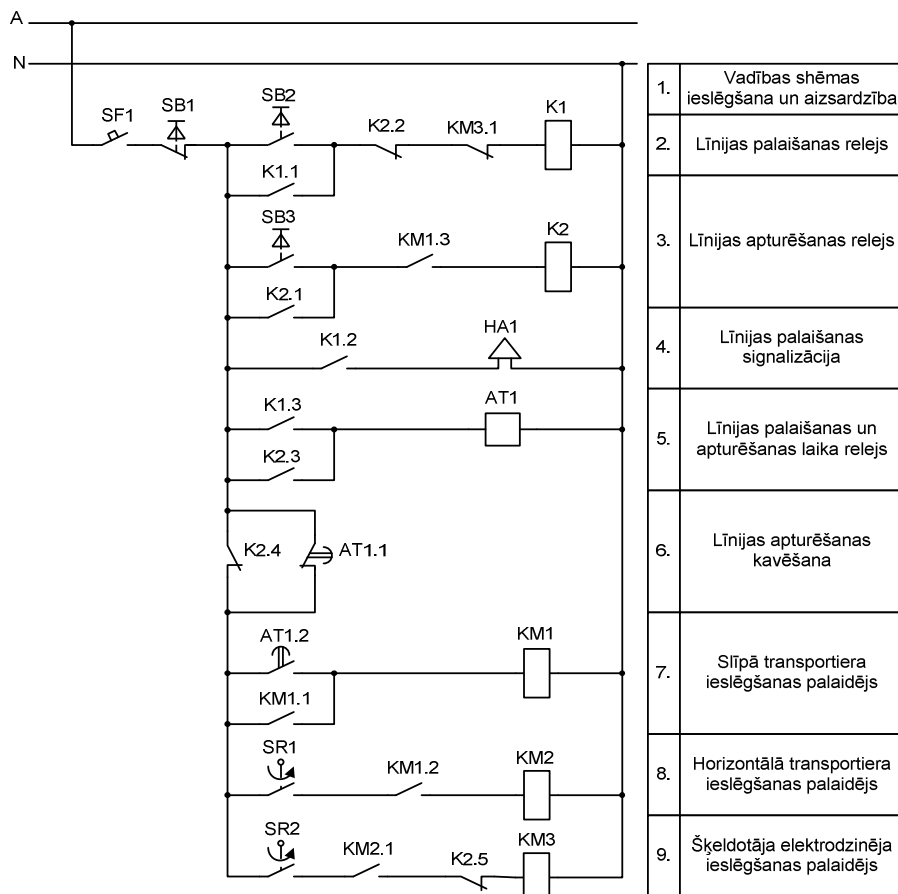
Plūsmas līnijas automātiskās palaišanas un apturēšanas elektriskā shēma ar laika releju parādīta 2.33. attēlā. Ieslēdzot automātslēdzi **SFI** un nospiežot pogas slēdzi **SB2**, tiek ieslēgts līnijas palaišanas relejs **K1**. Saslēdzas kontakti **K1.1**, **K1.2** un **K1.3**. Kontakts **K1.1** bloķē slēdzi **SB2**, **K1.2** ieslēdz sirēnu **HA1** un **K1.3** padod spriegumu uz laika releju **AT1**. Laika releja pievilkšanās kavējumu izvēlas **20...30 s**. Šajā laikā **darbojas tikai brīdinošā signalizācija**, kas, atbilstoši darba drošības prasībām, savlaicīgi informē apkalpojošo personālu par līnijas palaišanu.



2.32. att. Šķeldu ražošanas plūsmas līnijas tehnoloģiskā shēma.

Kad ieslēdzas laika relejs **AT1**, saslēdzas tā kontakts **AT1.1** un **sākas līnijas posmu palaišana**. Palaidējs **KM1** ieslēdz elektrodzinēju **M1**, kurš iedarbina slīpo transportieri **3**. Saslēdzas kontakts **KM1.1** un bloķē kontaktu **AT1.2**, bet secīgās

bloķēšanas kontakts **KM1.2** sagatavo palaidēja **KM2** spoles ķēdi. Kad iedarbinās elektrodzinējs **M1**, saslēdzas rotācijas slēdža kontakts **SR1**. Palaidējs **KM2** ieslēdz elektrodzinēju **M2**, kurš iedarbina horizontālo transportieri **2**.



2.33. att. Plūsmas līnijas posmu secīgās palaišanas un apturēšanas shēma.

Saslēdzas secīgās bloķēšanas kontakts **KM2.1** un rotācijas slēdža kontakts **SR2** palaidēja **KM3** spoles ķēdē. Palaidējs **KM3** ieslēdz elektrodzinēju **M3**, kurš iedarbina šķeldotāju **3**. Kontakts **KM3.1** pārtraucas un izslēdz līnijas palaišanas releju **K1**. Pārtraucas kontakti **K1.1**, **K1.2** un **K1.3**, izslēdzas sirēna **HA1** un laika relejs **AT1**. Līnijas palaide ir beigusies.

Ja darba laikā nosprūst elektrodzinējs **M1**, pārtraucas kontakts **SR1**, izslēdzas palaidēji **KM2** un **KM3**. Tā rezultātā atslēdzas horizontālais transportieris un šķeldotājs. Ja traucējums ir īslaicīgs, bloķētie posmi atkal automātiski palaižas.

Līnijas apturēšanai nospiež pogas slēdzi **SB3**. Tad ieslēdzas līnijas apturēšanas relejs **K2**. Kontakts **K2.1** bloķē slēdzi **SB3**, bet **K2.3** padod spriegumu uz laika releju **AT1**. Kontakti **K2.2**, **K2.4** un **K2.5** pārtraucas. **K2.2** bloķē palaišanas releju **K1**, **K2.4** aktivizē laika releja kontaktu **AT1.1**, bet **K2.5** izslēdz šķeldotāja palaidēju **KM3**. Abi transportieri turpina darboties. Kad ieslēdzas laika relejs **AT1**, pārtraucas tā kontakts **AT1.1** un vienlaicīgi izslēdz abu transportieru palaidējus **KM1** un **KM2**. Pārtraucas kontakts **KM1.3**, izslēdzas līnijas apturēšanas relejs **K2**, kurš izslēdz laika releju **AT1**. Līnijas apturēšana ir pabeigta.

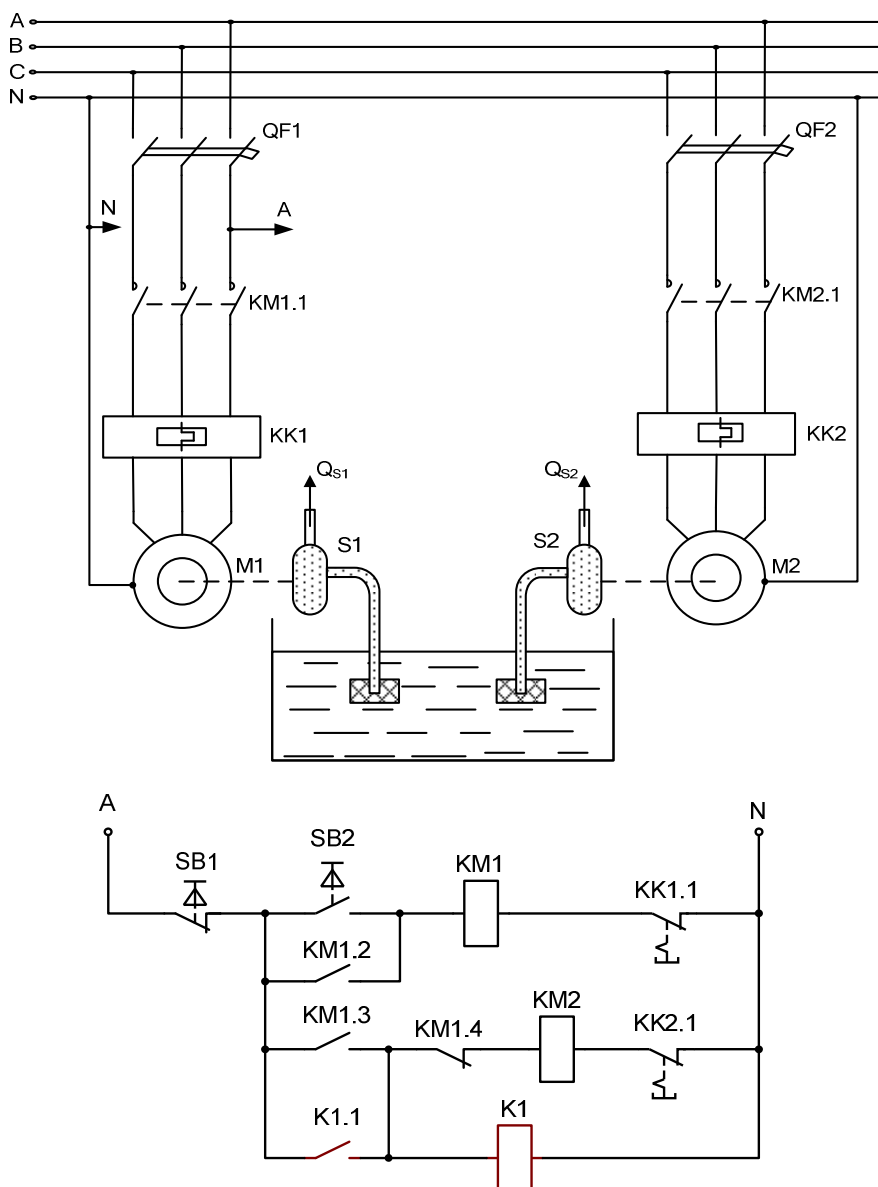
2.3.8. Rezerves sūkņa iekārtas automātiskās palaišanas shēma

Reizēm nepieciešama tehnoloģisko iekārtu rezervēšana. Raksturīgi tas ir ūdens apgādes sistēmām. Ja galvenā sūkņa **S1** elektrodzinējs **M1** kaut kādu iemeslu dēļ atslēdzas (bojājums vadības ķēdē, pārslodzes rezultātā nostrādā siltuma relejs), tad automātiski ieslēdzas rezerves sūkņa **S2** elektrodzinējs **M2**. Lai to realizētu, vadības shēmā izmanto atmiņas releju **K1**. Galvenā un rezerves sūkņa elektriskās piedziņas spēka ķēdes un vadības ķēde parādītas 2.34. attēlā.

Ieslēdzot automātslēdžus **QF1**, **QF2**, tiek padots spriegums uz spēka ķēdēm un vadības ķēdi. Nospiežot palaišanas-pogu **SB2**, ieslēdzas galvenā sūkņa palaidējs **KM1**. Tā kontakts **KM1.4** pārtraucas un **neļauj** ieslēgt rezerves sūkņa palaidēju **KM2**. Kontakti **KM1.1**, **KM1.2** un **KM1.3** saslēdzas. Spēka kontakti **KM1.1** padod trīsfāzu spriegumu uz elektrodzinēju **M1**, **KM1.2** bloķē slēdzi **SB2**, bet **KM1.3** ieslēdz atmiņas releju **K1**, kura kontakts **K1.1** šuntē palaidēja kontaktu **KM1.3** un nodrošina releja spoles barošanu, ja palaidējs **KM1** atslēdzas.

Pieņemsim, ka nostrādā siltuma relejs un pārtrauc kontaktus **KK1.1**. Tad izslēdzas galvenā sūkņa palaidējs **KM1**. Pārtraucas tā kontakti **KM1.1**, **KM1.2** un **KM1.3**, bet saslēdzas **KM1.4**. Tā rezultātā atslēdzas galvenā sūkņa elektrodzinējs **M1**. Tā kā noslēdzas elektriskā ķēde **SB1**, **K1.1**, **KM1.4**, **KM2**, **KK2.1**, tad ieslēdzas palaidējs **KM2** un iedarbina rezerves sūkņa elektrodzinēju **M2**.

Rezerves sūknis darbojas, kamēr nospiež stop-pogu SB1.

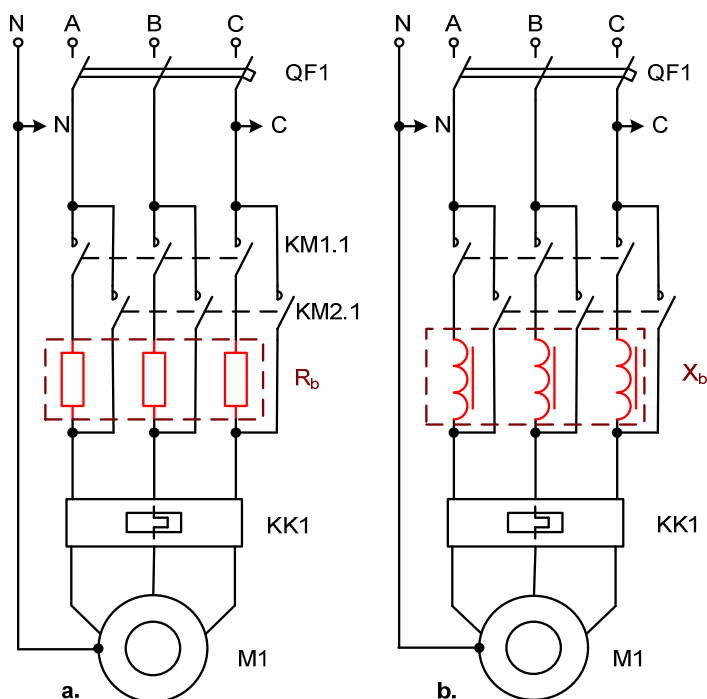


2.34. att. Rezerves sūkņa elektrodzinēja automātiskās palaišanas shēma.

2.4. Palaide ar strāvas ierobežošanu elektrodzinēja statora ķēdē

Lai ierobežotu asinhronā elektrodzinēja lielo palaišanas strāvu statora ķēdē slēdz balasta rezistorus R_b (aktīvās pretestības) vai reaktorus X_b (induktīvās

pretestības). Spēka ķēdes ar balasta rezistoriem un reaktoriem (droselēm) parādītas 2.35. attēlā. Balasta elementu pretestību parasti izvēlas tādu, lai palaides strāvas ierobežojums nepārsniegtu **1.5 reizes**. Tad palaides moments samazinās $1.5^2 = 2.25$ **reizes**. Ja nominālais palaides moments $M_{palnom} = 1.5M_{nom}$, tad pie šāda strāvas ierobežojuma tas samazināsies līdz $M_{pal}^{ie} = 1.5/2.25 M_{nom} = 0.67 M_{nom}$. Lai šādu elektrodzinēju varētu palaist, slodzes momentam palaišanas brīdī jābūt mazākam par **67%** no nominālā momenta.



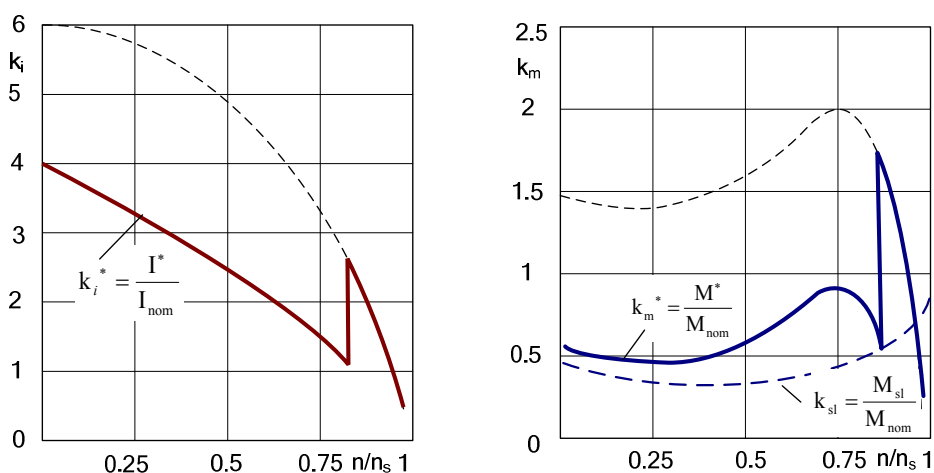
2.35. att. **Asinhrono elektrodzinēju palaides strāvas ierobežošana statora ķēdē:**
a - ar balasta rezistoriem R_b ; b - ar balasta reaktoriem X_b .

Elektrodzinēju palaiž ar palaidēju **KM1**. Saslēdzoties spēka kontaktiem **KM1.1**, statora tinumiem tiek pieslēgts elektriskā tīkla spriegums caur balasta rezistoriem vai reaktoriem, kas ierobežo palaides strāvu **1.5 reizes**. Kad, pieaugot elektrodzinēja rotācijas ātrumam, tā strāva samazinās līdz nominālajam lielumam, ieslēdz palaidēju **KM2**, kura spēka kontakti **KM2.1** šuntē balasta elementus un pieslēdz statora tinumus tieši barošanas spriegumam (2.35. att.).

Metodi izmanto vidējas jaudas elektrodzinēju (**10...20 kW**) palaidei no mazas jaudas elektriskā tīkla. Balasta rezistoros rodas lieli aktīvie zudumi, kas izdalās apkārtējā vidē siltuma plūsmas veidā. Daudz ekonomiskāki ir reaktori, jo tajos rodas ievērojami mazāki siltuma zudumi.

2.4.1. Palaides strāvas un momenta raksturlīknes

Palaižot elektrodzinēju caur balasta rezistoriem vai reaktoriem, tā ieskreja notiek pa mākslīgajām strāvas $k_i^* = f(n/n_s)$ un momenta $k_m^* = f(n/n_s)$ raksturlīknēm ar ierobežotu strāvu un pazeminātu palaides momentu, kuram visā palaides procesā jābūt lielākam par slodzes momentu $M^* > M_{sl}$ (2.36. att.).



2.36.att. **Relatīvā palaides strāva $k_i = I/I_{nom}$, griezes moments $k_m = M/M_{nom}$ un slodzes moments $k_{sl} = M_{sl}/M_{nom}$ ar balasta pretestību statora ķēdē.**

Ieslēgšanas brīdī notiek strāvas lēciens, kas **4-kārtīgi** pārsniedz nominālo strāvu ($k_{ipai}^* = 4$). Palielinoties rotācijas ātrumam, strāva pakāpeniski samazinās. Kad tā nokrītas tuvu nominālai vērtībai ($k_i \approx 1$), palaidējs **KM2** pieslēdz elektrodzinēju tieši elektriskajam tīklam. Notiek strāvas un momenta lēciens, un elektrodzinējs pāriet uz dabiskajām raksturlīknēm. Palaides process ir beidzies.

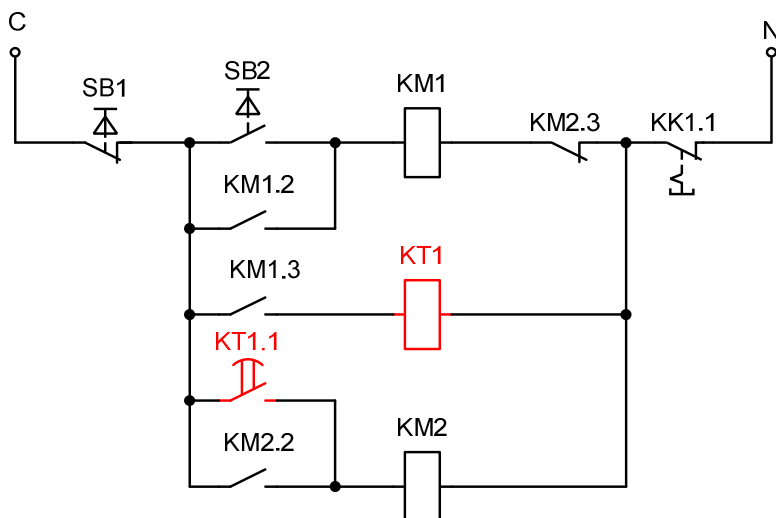
Apskatīsim dažas asinhronā elektrodzinēja automātiskās palaides shēmas, izmantojot **laika releju, strāvas releju vai rotācijas slēdzi**.

2.4.2. Palaides shēma ar laika releju

Elektrodzinēja palaide notiek kā funkcija no laika $pal=f(t)$. Laika releja pievilksnās kavējumu izvēlas no nosacījuma – $t_k \geq t_{pal}$, kur t_{pal} –palaides laiks, s.

Nospiežot palaides-pogu **SB2** nostrādā palaidējs **KM1**. Saslēdzas tā spēka kontakti **KM1.1** un elektrodzinējs sāk palaisties caur balasta elementiem. Vienlaicīgi, saslēdzoties vadības kontaktiem **KM1.2** un **KM1.3**, tiek bloķēts slēdzis **SB2** un tiek pieslēgts spriegumam laika relejs **KT1**, kurš ieslēdzas ar kavējumu t_k .

Kavējuma laikā elektrodzinēja strāva samazinās līdz nominālajai vērtībai. Tad nostrādā laika relejs, saslēdzas tā kontakti **KT1.1** un ieslēdzas palaidējs **KM2**. Vadības ķēdē pārtraucas kontakts **KM2.3** un saslēdzas kontakts **KM2.2** (2.37. att.), kā arī saslēdzas kontakti **KM2.1** spēka ķēdē (skat. 2.35. att.). Elektrodzinējs tiek tieši pieslēgts elektriskajam tīklam un palaides process beidzas.



2.37. att. Palaides shēma ar laika releju **KT1**.

Pārtraucoties kontaktam **KM2.3**, izslēdzas palaidējs **KM1**, pārtraucas tā kontakts **KM1.3** un atslēdz laika releju **KT1**, kurš atlaižas ar nelielu kavējumu. Lai neatslēgtos palaidējs **KM2**, tā saslēdzošais kontakts **KM2.2** bloķē kontaktu **KT1.1**.

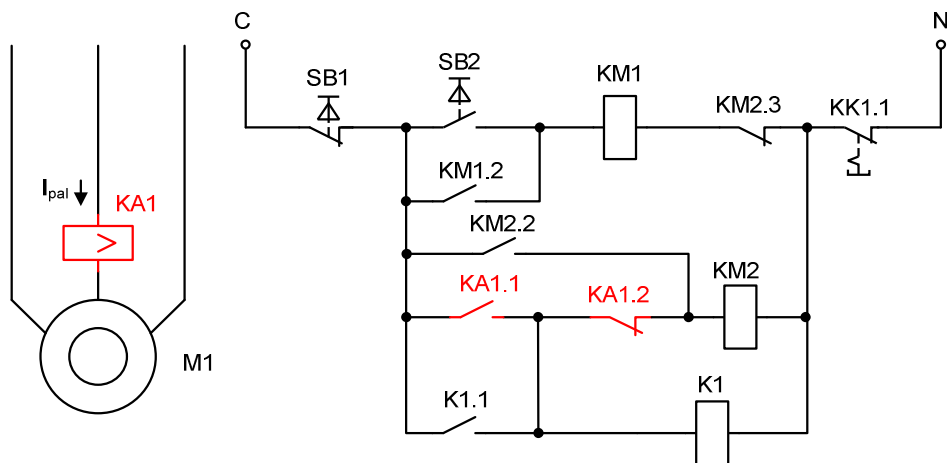
2.4.3. Palaides shēma ar strāvas releju

Automātisko palaišanas procesu precīzāk var realizēt ar strāvas releju **KA1**, kura spole slēgta elektrodzinēja spēka ķēdē un tieši kontrolē palaišanas strāvu. Elektrodzinēja palaide notiek kā funkcija no strāvas **pal = f(I)**.

Lai vadības shēma stabili darbotos, tajā izmanto atmiņas releju **K1**. Nospiežot palaides-pogu **SB2** nostrādā palaidējs **KM1**. Saslēdzas tā spēka kontakti **KM1.1** un elektrodzinējs sāk palaisties caur balasta elementiem (skat. 2.35. att.). Vienlaicīgi saslēdzas vadības kontakts **KM1.2**, kurš blokē slēdzi **SB2** (2.38. att.).

Ierobežotā, bet pietiekami lielā palaišanas strāva ieslēdz strāvas releju **KA1**. Pārtraucas tā kontakts **KA1.2** un neļauj ieslēgties palaidējam **KM2**, bet kontakts **KA1.1** saslēdzas un ieslēdz atmiņas releju **K1**. Saslēdzas tā kontakts **K1.1** un sagatavo darbam palaidēja **KM2** spoles ķēdi.

Kad elektrodzinēja strāva nokrītas tuvu nominālajai vērtībai, izslēdzas strāvas relejs **KA1**, saslēdzas tā kontakts **KA1.2**, bet pārtraucas – **KA1.1**. Pa noslēgto ķēdi-**SB1**, **K1.1**, **KA1.2**, **KM2**, **KK1.1** ieslēdzas palaidējs **KM2**. Pārtraucas kontakts **KM2.3** un izslēdz palaidēju **KM1**, bet saslēdzas kontakts **KM2.2**, kurš šuntē strāvas releja kontaktus un nodrošina patstāvīgu barošanu palaidēja **KM2** spolei. Vienlaicīgi saslēdzas kontakti **KM2.1** spēka ķēdē un elektrodzinējs tiek tieši pieslēgts elektriskajam tīklam (skat. 2.35. att.).



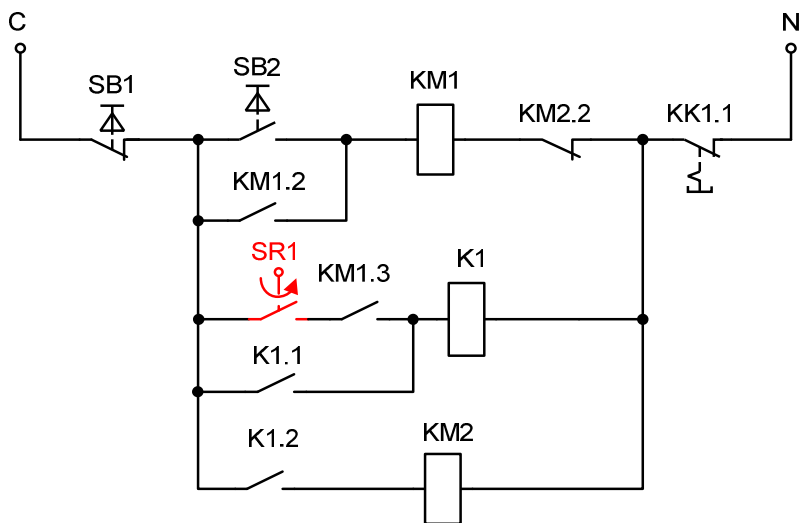
2.38. att. Palaides shēma ar strāvas releju KA1.

2.4.4. Palaides shēma ar rotācijas slēdzi

Elektrodzinēja palaide notiek kā funkcija no tā vārpstas rotācijas ātruma – $pal=f(n)$. Elektrodzinēja vārpstas rotācijas ātruma kontrolei uzstāda rotācijas slēdzi **SR1**, kura nostrādes sliekšni izvēlas tuvu nominālajam rotācijas ātrumam – $n_{nostr} = (0.7...0.8)n_{nom}$. Lai palielinātu rotācijas slēdža kalpošanas laiku un realizētu nepieciešamās bloķēšanas izmanto starpreleju **K1** (2.39. att.)

Nospiežot palaidēs-pogu **SB2** nostrādā palaidējs **KM1**. Saslēdzas tā spēka kontakti **KM1.1** (2.35. att.) un elektrodzinējs sāk palaisties caur balasta elementiem. Vienlaicīgi, saslēdzoties vadības kontaktiem **KM1.2** un **KM1.3**, tiek bloķēts slēdzis **SB2** un tiek sagatavots darbam starprelejs **K1**, kuru ieslēdz rotācijas slēdzis **SR1**.

Kad elektrodzinēja rotācijas ātrums palielinās līdz n_{nostr} vērtībai, saslēdzas rotācijas slēdža kontakti **SR1**, ieslēdzas starprelejs **K1**, saslēdzas tā kontakts **K1.1** un pieslēdz releja spolei patstāvīgu barošanu, bet kontakts **K1.2** ieslēdz palaidēju **KM2**. Vadības ķēdē pārtraucas kontakts **KM2.2** un atslēdz palaidēju **KM1**, bet spēka ķēdē saslēdzas kontakti **KM2.1** (2.35. att.) un elektrodzinējs tiek pieslēgts elektriskajam tīklam. Jebkurā brīdī elektrodzinēju var atslēgt ar stop-pogu **SB1**.



2.39. att. Palaides shēma ar rotācijas slēdzi SR1.

2.5. Asinhronā elektrodzinēja palaide pie pazemināta sprieguma

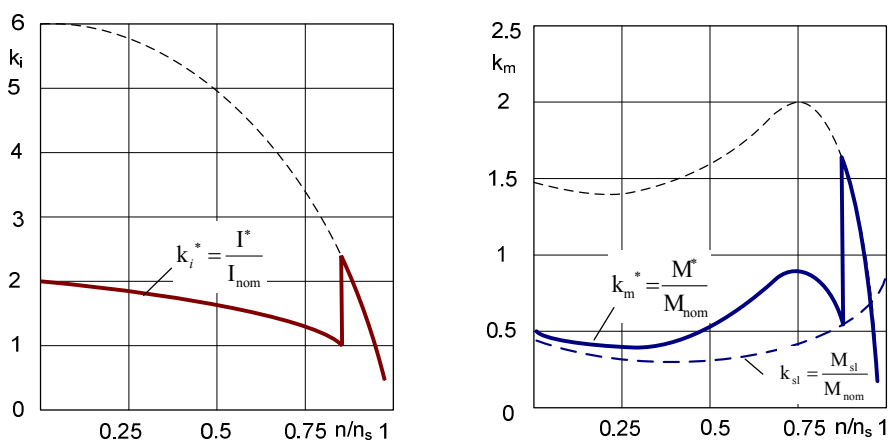
Ir divi asinhronā elektrodzinēja palaišanas veidi ar pazeminātu spriegumu statora ķēdē: izmantojot **autotransformatoru**; ar **zvaigznes – trīsstūra palaidēju**.

Ar autotransformatoru ieregulē pazeminātu spriegumu, bet pēc palaišanas pieslēdz nominālo spriegumu. Ja transformācijas koeficients ir k , tad palaišanas strāva samazinās k reizes, bet palaišanas moments samazinās k^2 reizes. Tā kā autotransformators ir dārga iekārta, tad šo paņēmieni izmanto reti.

Praksē visvairāk pielieto zvaigznes-trīsstūra palaidēju. Elektrodzinēju palaiž zvaigznes slēgumā pie pazemināta sprieguma. Palaišanas procesa beigās, tā tinumus pārslēdz trīsstūra slēgumā, kuram šis spriegums ir nomināls lielums. Zvaigznes-trīsstūra palaišanas strāvas un momentu raksturlīknes dotas 2.40. attēlā.

2.5.1. Palaišanas strāvas un momenta raksturlīknes

Lai izmantotu **zvaigznes-trīsstūra** palaidēju, ja elektriskā tīkla spriegums ir **380 V**, jāizvēlas elektrodzinējs ar nominālajiem spriegumiem - $Y/\Delta = 660/380$ V. Šādam elektrodzinējam **380 V** spriegums zvaigznes slēgumā (Y) ir $\sqrt{3}$ reizes mazāks par nominālo – **660 V**, bet **palaišanas strāva salīdzinājumā ar tiešu palaišanu trīsstūra slēgumā samazinās $(\sqrt{3})^2 = 3$ reizes** (2.40. att.).



2.40. att. Relatīvā strāva $k_i^* = I/I_{nom}$, griezes moments $k_m^* = M/M_{nom}$ un slodzes moments $k_{sl} = M_{sl}/M_{nom}$, palaižot ar zvaigznes-trīsstūra palaidēju.

Lai noteiktu cik reizes samazināsies palaišanas strāva, aprēķināsim līnijas strāvas Y-slēgumam (I_{ly}) un Δ -slēgumam ($I_{l\Delta}$), pieņemot, ka fāzes pretestība R_f abos slēgumos ir vienāda:

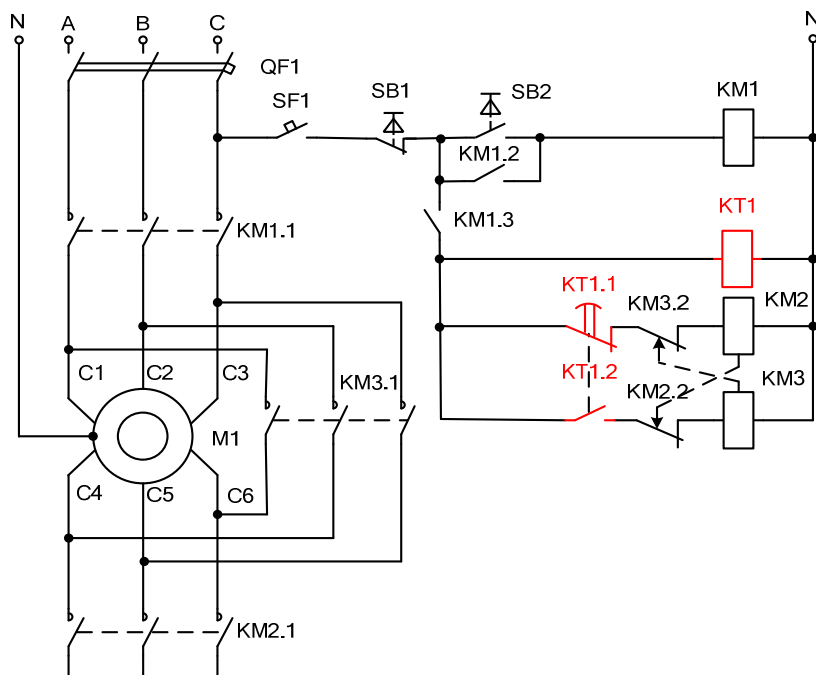
$$I_{ly} = I_{fy} = \frac{U_f}{R_f} = \frac{U_l}{\sqrt{3}R_f}, \quad I_{l\Delta} = \sqrt{3}I_{f\Delta} = \frac{\sqrt{3}U_f}{R_f} = \frac{\sqrt{3}U_l}{R_f}, \quad \frac{I_{l\Delta}}{I_{ly}} = (\sqrt{3})^2 = 3, \quad (2.27)$$

kur U_f un U_l - fāzes un līnijas spriegumi, V; I_{fy} un $I_{f\Delta}$ - fāzes strāvas Y un Δ , A.

Palaišanas moments, tāpat kā strāva, samazinās 3 reizes. Ja $M_{pal\ nom} = 1.5 M_{nom}$, tad palaižot ar zvaigznes-trīsstūra palaidēju, tas samazinās līdz $M_{pal}^* = 0.5 M_{nom}$.

2.5.2. Zvaigznes-trīsstūra palaišanas shēma ar laika releju

Lai realizētu zvaigznes – trīsstūra palaidi, vajadzīgi 3 tradicionālie palaidēji (2.41. att.). Ja pieejams palaidējs ar pārslēdzošiem spēka kontaktiem, tad palaišanas shēmu var sastādīt no 2 palaidējiem. Palaidējs ar saslēdzošiem kontaktiem pieslēdz statora tinumus trīsfāzu spriegumam, bet palaidējs ar pārslēdzošiem spēka kontaktiem pārkomutē zvaigznes un trīsstūra slēgumus.



2.41.att. Zvaigznes – trīsstūra shēma palaišanai pie pazemināta sprieguma.

Shēmas darbības apraksts.

Ieslēdzot automātslēdžus **QF1** un **SF1**, tiek padots spriegums uz spēka un vadības ķēdēm. Nospiežot pogas slēdzi **SB2**, ieslēdzas palaidējs **KM1** un saslēdzas tā kontakti **KM1.1**, **KM1.2** un **KM1.3**. Vienlaicīgi tiek padots spriegums uz elektrodzinēja statora tinumiem, laika releju **KT1** un palaidēju **KM2**, **KM3** vadības ķēdēm. Tā kā palaides sākumā laika relejs ir atslēgtā stāvoklī, tad caur normāli slēgto kontaktu **KT1.1** ieslēdzas palaidējs **KM2**. Pārtraucas tā kontakts **KM2.2** un **nejauj** ieslēgties palaidējam **KM3**, bet spēka kontakti **KM2.1** saslēdz statora tinumus zvaigznes slēgumā (2.41. att.).

Palaides beigās nostrādā laika relejs **KT1**. Tā kontakts **KT1.1**. pārtraucas, bet **KT1.2** saslēdzas. Līdz ar to izslēdzas palaidējs **KM2** un ieslēdzas - **KM3**. Kontakti **KM2.1** pārtraucas, bet **KM3.1** saslēdzas un statora tinumi tiek pārslēgti no zvaigznes slēguma uz trīsstūra slēgumu pie nominālā sprieguma. Elektrodzinējs pāriet uz dabisko raksturliktu un darbojas nominālā režīmā.

2.6. Asinhronās elektriskās piedziņas „mīkstā” palaide

Iepriekš apskatītie asinhrono elektrodzinēju palaides veidi ar strāvas vai sprieguma pakāpes veida ierobežošanu statora ķēdē izraisa strāvas un momenta lēcienveida izmaiņu, pārejot no mākslīgās uz dabisko raksturliktu. Tas rada mehāniskās pārslodzes pārvados, kas izraisa to paātrinātu nolietošanos. Sūkņu elektriskās piedziņas momenta lēcienveida izmaiņa rada hidrauliskos triecienus cauruļvados, kas ir ļoti nevēlama parādība ūdensapgādes - kanalizācijas sistēmās.

Elektroniskās „mīkstās” palaides iekārtas ar **kontrollera vadību** realizē vienmērīgu elektrodzinēja palaidi un vienmērīgu apturēšanu, un pilnībā novērš iepriekš minētās problēmas. Tas tiek panākts vienmērīgi mainot elektrodzinēja barošanas spriegumu visā palaides un apturēšanas procesa laikā. Elektroniskās „mīkstās” palaides iekārtas ar kontrollera vadību var nodrošināt sekojošus režīmus:

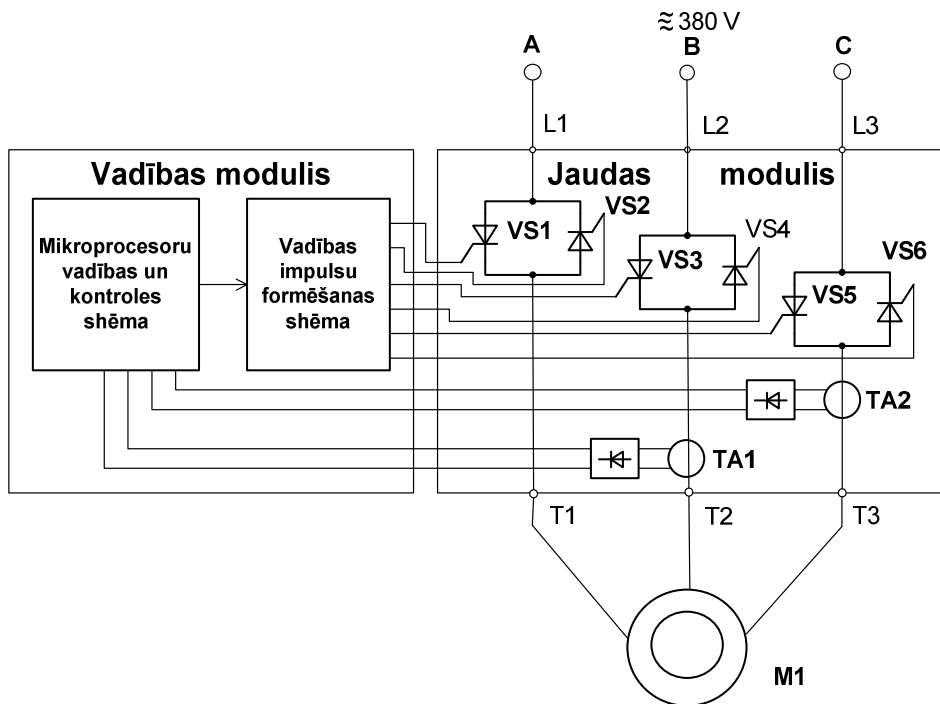
- palaidi ar ieprogrammētu stāvas ierobežojumu – **(2...5) I_{nom}** ;
- darba strāvas iestatījumu (nenoslogotam elektrodzinējam) – **(50...100%) I_{nom}** ;
- palaidi ar ieprogrammētu ieskrejas laiku – **(1...30)s**;
- triecienpalaidi elektrodzinējam ar lielu slodzes pretestību;
- apturēšanu ar ieprogrammētu apstāšanās laiku – **(2...60)s**;
- elektrodzinēja ātro dinamisko bremsēšanu ar līdzstrāvu.

2.6.1. „Mīkstās” palaides iekārtas uzbūve un raksturlīknes

Elektroniskās palaides iekārtas **ATS-23** elektriskā shēma sastāv no jaudas moduļa un vadības moduļa (2.42. att.). Vadības modulis sastāv no mikroprocesora **vadības, kontroles** un **aizsardzības** bloka un tiristoru **VS1...VS6** vadības impulsu formēšanas bloka.

Vadības modulis nodrošina sekojošas funkcijas:

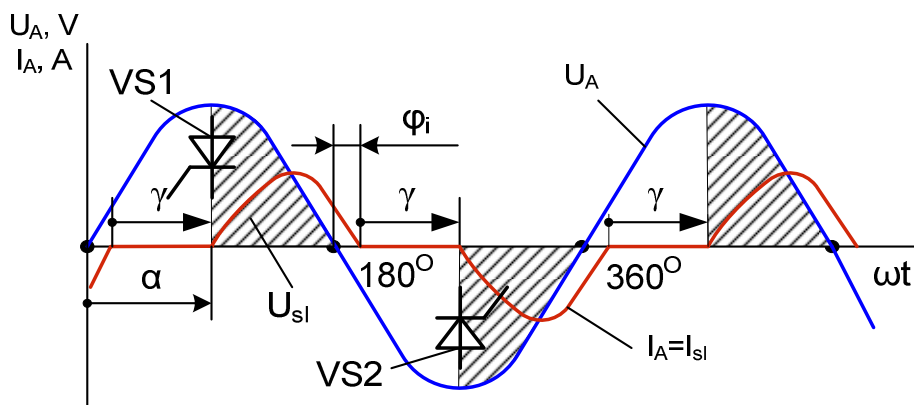
- komutē pusvadītāju slēdžus-tiristorus atbilstoši uzdotajiem nosacījumiem;
- reģistrē un uzkrāj elektrodzinēja un palaides iekārtas termiskā stāvokļa datus;
- kontrolē elektroenerģijas piegādi un elektriskās izolācijas stāvokli;
- darbības funkciju izvēli ar 4 selektoru slēdžiem;
- darbības parametru iestatīšanu ar 4 potenciometriem;
- elektrodzinēja un palaides iekārtas pārslodzes-avārijas aizsardzību;
- elektrodzinēja un palaides iekārtas stāvokļa indikāciju ar gaismas displeju, kā arī brīdinošo un avārijas signalizāciju termiskās vai elektriskās pārslodzes gadījumā (fāzes izkrišana, fāzu asimetrija, virs-strāva u.c.).



2.42. att. „Mīkstās” palaides iekārta ar vadāmu elektronisko komutatoru.

Jaudas modulī ietilpst **6 sapāroti tiristori** ar to aizsardzības ķēdēm. Katrā fāzē slēgti **2 tiristori**, kas savienoti **pretslēgumā**, lai varētu komutēt maiņsprieguma pozitīvo un negatīvo pusperiodu (2.43. att.). Strāvas transformatori **TA1** un **TA2** ar izejas taisngriežiem formē informatīvos signālus vadības modulim par elektrodzinēja strāvas lielumu, asimetriju un fāzu stāvokli. Palaides iekārtās ar strāvu **virs 72A iebūvēti ventilatori**, kas dzesē tiristorus un aizvada no tiem elektrisko zudumu radīto siltumu.

Apskatīsim sprieguma un strāvas regulēšanu fāzē **A**. Elektrodzinēja fāzes sprieguma U_{sl} un fāzes strāvas I_{sl} vidējās efektīvās vērtības regulēšanai izmanto tiristora vadības impulsa fāzes nobīdi attiecībā pret tīkla sprieguma U_A sākuma fāzi ($\varphi_{UA} = 0$) par leņķi α . Šo nobīdi izsaka elektriskajos grādos un sauc par **tiristora atvēršanas leņķi** (2.43. att.). Ja $\alpha = 0$, $U_{sl} = U_{Anom}$. Ja $\alpha = 180^\circ$, $U_{sl} = 0$.



2.43. att. „Mīkstās” palaides iekārtas sprieguma un strāvas raksturlīknes.

Tiristors **VS1** komutē sinusoidālā sprieguma **pozitīvo pusvilni**, bet pretēji slēgtais tiristors **VS2** – **negatīvo pusvilni**. Pieņemsim, ka iekārtas palaišanas brīdī spriegums fāzē **A** iet caur nulles punktu un $U_A = 0$. Tiristori **VS1** un **VS2** ir aizvērtā stāvoklī. Padodot impulsu ar kavējumu α uz tiristora **VS1** vadības elektrodu, tas atveras un padod daļu no pozitīvā pusvilņa sprieguma (iesvītrotais laukums) uz slodzi. Kad spriegums samazinās līdz nullei, notiek tiristora **VS1** aizvēršanās. Sinhroni ar sprieguma negatīvā pusvilņa izmaiņu tiek formēts tiristora **VS2** atvēršanas impulss ar tādu pašu kavējumu α un uz slodzi tiek padota daļa no

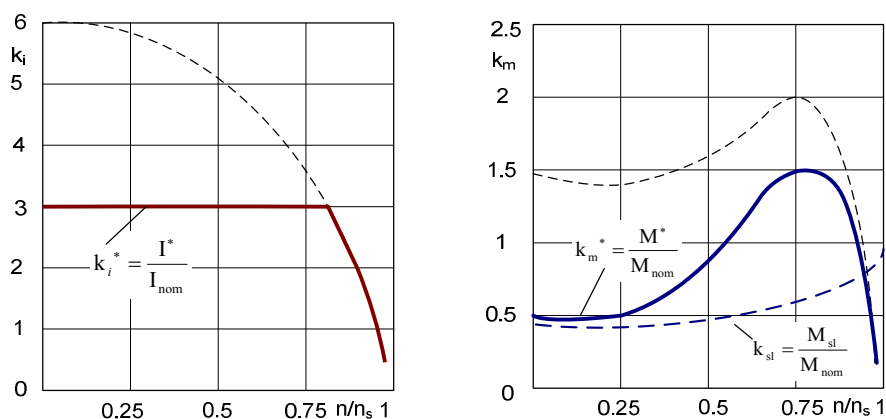
sprieguma negatīvā pusvilņā. Palielinot tiristoru atvēršanas leņķi α , spriegums un strāva slodzē samazinās: $U_{sl} = U_A \sqrt{1 - \alpha / \pi + \sin(2\alpha / \pi)}$. Šāda **α -regulēšana** dod pozitīvu rezultātu, ja slodze ir tīri aktīva. Tad strāva $I_{sl} = U_{sl}/R$ sakrīt fāzē un pēc formas ar spriegumu U_{sl} .

Elektrodzinēja tinumi rada aktīvi-induktīvu slodzi, tādēļ strāva $I_{sl}=I_A$ būtiski atšķiras no sprieguma U_{sl} pēc formas un aizkavējas attiecībā pret to par leņķi $\varphi_i = \arctg(X_L / R)$, kur $X_L = 2\pi fL$ – tinuma induktīvā pretestība, Ω ; L – tinuma induktivitāte, H; $f = 50s^{-1}$ – sprieguma frekvence; R – tinuma aktīvā pretestība, Ω .

Šajā gadījumā labāku rezultātu dod tā saucamā **γ -regulēšana**, kur $\gamma = \alpha - \varphi_i$ – **strāvas regulēšanas leņķis** (2.43. att.). Palaides procesa beigās vadības modulis iestata tiristoru atvēršanas leņķi $\alpha_0 = \varphi_i$. Tad $\gamma = 0$ un elektrodzinēja strāva iegūst nepārtrauktu sinusoidālu formu, kas nodrošina elektrodzinēja stabilu vienmērīgu darbību un minimālus papildus elektriskos zudumus statora tinumos.

„Mīkstās” palaides raksturlīknes.

„Mīkstās” palaides iekārta nodrošina nemainīgu strāvu visā palaišanas laikā atbilstoši iestatītajam lielumam. Pāreja no strāvas mākslīgās raksturlīknes uz dabisko raksturlīkni notiek vienmērīgi bez strāvas lēcieniem un pārrāvumiem (2.44. att.).



2.44. att. „Mīkstās” palaides relatīvās strāvas $k_i^* = I^*/I_{nom}$, griezes momenta $k_m^* = M^*/M_{nom}$ un slodzes momenta $k_{sl} = M_{sl}/M_{nom}$ raksturlīknes.

Arī griezes momenta izmaiņa ir vienmērīga, ko panāk ar sprieguma pakāpenisku paaugstināšanu. Elektrodzinējs lēnām ieskrienas ar samazinātu

sākuma ātrumu. Līdz ar to mehānisma iedarbināšanās notiek vienmērīgi ar nelielu paātrinājumu, kas neizraisa mehāniskas, elektriskas vai hidrauliskas pārslodzes.

2.6.2. „Mīkstās” palaišanas iekārtas izvēle un iestatīšana

Elektroniskos palaidējus izvēlas atbilstoši elektrodzinēja jaudai, elektriskā tīkla spriegumam un frekvencei:

$$U_{ep} = U_{nom}, f_{ep} = f_{nom}, P_{ep} \geq P_{nom}, \quad (2.28)$$

kur U_{ep} , f_{ep} un P_{ep} – elektroniskā palaidēja nominālais spriegums (V), frekvence (Hz) un jauda (W);

U_{nom} , f_{nom} un P_{nom} – elektrodzinēja nominālais spriegums (V), frekvence (Hz) un jauda (W).

Mīkstās palaišanas iekārtas „Altistart 3” elektroniskie palaidēji **ATS-23** galvenokārt tiek izmantoti ūdensapgādes un kanalizācijas sūkņu vienmērīgai palaišanai un apturēšanai. Iespējams izvēlēties dažādas modifikācijas iekārtas ar barošanas spriegumiem – **220/240 V, 380/415 V, 440/460 V un 500 V** ar frekvenci **50/60 Hz** un nominālo jaudu no **1.8 kW** līdz **800 kW**. Sūkņu elektroniskie palaidēji galvenokārt tiek izmantoti divu iemeslu dēļ: 1- lai ierobežotu sūkņa elektrodzinēja lielo palaišanas strāvu un samazinātu griezes momentu; 2- lai novērstu hidrauliskos triecienus cauruļvadu sistēmā, kas rodas strauji palielinot vai samazinot sūkņa turbīnas rotācijas ātrumu.

Mazas un vidējas jaudas asinhrono elektrodzinēju elektroniskajos palaidējos „**CI-tronic**” izmantota jauna integrālā tehnoloģija, kas dod iespēju izveidot kompaktus aparātus ar maziem siltuma zudumiem jaudas modulī (2.45. att.).

Jaudas modulis izveidots kā integrālā mikroshēma ar nominālo strāvu līdz **30 A**.

Pēc „**CI-tronic**” tehnoloģijas izstrādātie aparāti **MCI-25** izmantojami asinhrono elektrodzinēju ar jaudu no **0.1 kW** līdz **15 kW** vienmērīgai palaišanai un apturēšanai ar strāvas un momenta ierobežojumu. Iestatāmie elektrodzinēja ieskrejas un apstāšanās laiki – **0.5 līdz 10 s**. Smagos palaišanas apstākļos var dot īslaicīgu **trieciēnpalaidi** (0.2 s) ar 100% spriegumu un maksimālo griezes momentu.

Modelī **MCI-25B** papildus iespējama elektrodzinēja īslaicīga darbība ar mazu ātrumu (7.5 vai 10% no nominālā) un ātrā bremsēšana ar līdzstrāvu, ko izmanto mehānismu precīzajā pozicionēšanā. Apskatītās ierīces izmanto ūdens sūkņu, vakuumsūkņu, kompresoru un konveijeru vienmērīgai palaišanai un apturēšanai.

Konveijeru vienmērīga palaide un apturēšana novērš transportējamo detaļu noslīdēšanu vai transportējamā šķidruma izšļakstīšanos.



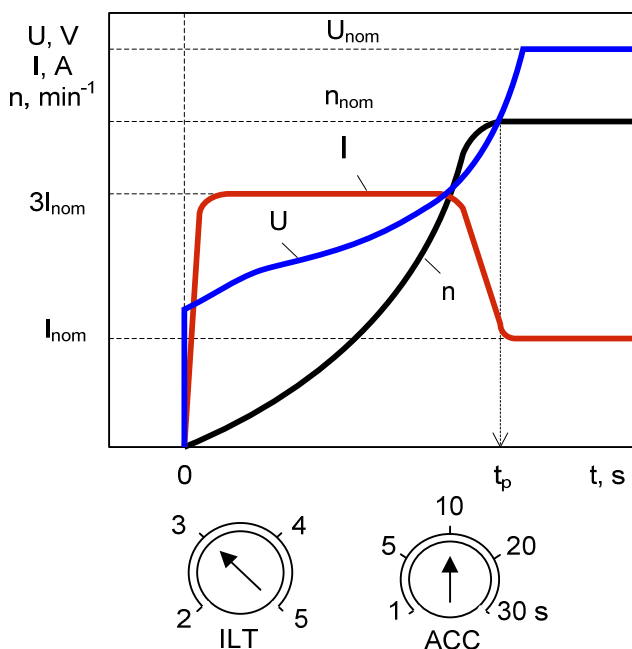
2.45. att. Elektroniskie palaidēji „Cl-tronic” ar integrālo jaudas moduli.

Elektroniskā palaidēja ATS-23 darba raksturlīknes.

Vienmērīgā starta raksturlīknes ar iestatāmu palaides strāvu un regulējamu ieskrejas ātrumu parādītas (2.46. att.). Pirms elektrodzinēja palaides izvēlas strāvas ierobežojumu, piemēram, $I_{pal} = 3I_{nom}$, ko iestata ar potenciometru ILT, un palaides laiku, piemēram, $t_p = 10 \text{ s}$. Mazas jaudas iekārtām svarīgāks ir palaides laiks, vidējas un lielas jaudas iekārtām ar lielu inerci – strāvas ierobežojums.

Atbilstoši iestatītajiem palaides parametriem elektroniskā palaidēja procesors aprēķina pieļaujamo sprieguma lēcieni, lai strāva nepārsniegtu uzdoto lielumu palaides sākumā. Pēc tam spriegums tiek automātiski regulēts atbilstoši uzdotajai palaides strāvai un palaides laikam (2.46. att.). Kad elektrodzinēja rotācijas ātrums tuvojas nominālajam lielumam n_{nom} , strāva samazinās līdz nominālai vērtībai I_{nom} , bet spriegums tiek strauji paaugstināts līdz lielumam U_{nom} . Elektrodzinēja rotācijas ātrums sasniedz lielumu n_{nom} un palaides process beidzas.

Vienmērīga sprieguma maiņa ne tikai ierobežo palaides strāvu un novērš mehāniskas pārslodzes pārvados, bet arī būtiski samazina komutācijas pārsprieguma impulsus, kas ģenerējas tinumos sprieguma ieslēgšanas brīdī.

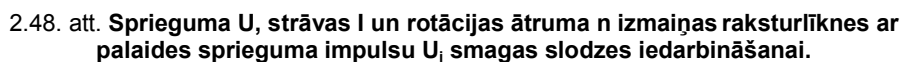


2.46. att. Sprieguma U , strāvas I un rotācijas ātruma n raksturlīknes atbilstoši iestatītam strāvas ierobežojumam $I_{pal} = 3I_{nom}$ un palaides laikam $t_p = 10s$.

Elektrodzinēja apturēšana var notikt divējādi – brīvi ar apturēšanas laiku t_b vai regulēti ar apturēšanas laiku t_r (2.47. att.). Izvēloties brīvo apturēšanu, atslēdz elektriskā tīkla spriegumu. Tad elektrodzinēja apturēšanas laiku t_b un tā brīvās kustības ātruma n_b izmaiņu nosaka tikai rotējošo masu inerce un pretestība.

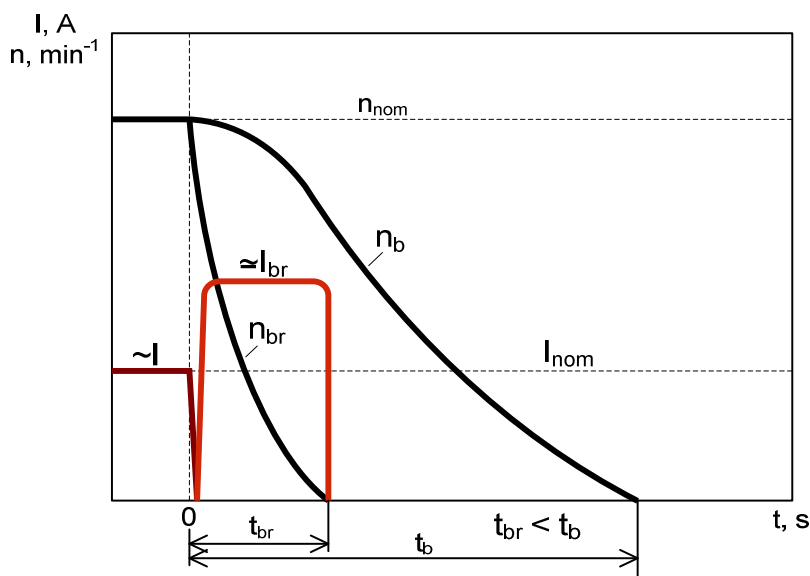
Aktivizējot regulētas apturēšanas funkciju, elektrodzinējs tiek apstādināts pakāpeniski samazinot spriegumu U . Regulētas apturēšanas laiku, piemēram, $t_r=12s$ iestata ar potenciometru **DEC**. Atbilstoši tam, procesors aprēķina regulējamā sprieguma U_r izmaiņas funkciju. Spriegums samazinās pakāpeniski no nominālā lieluma U_{nom} līdz fiksētai minimālai vērtībai U_{min} (2.47. att.).

Lai iedarbinātu smagu slodzi, aktivizē triecienpalaidi „**Booster**”, ieslēdzot slēdzi **BST**. Tad uz elektrodzinēju tiek īslaicīgi (0.1 s) padots nominālā sprieguma impulss U_i , kas rada lielu sākuma griezes momentu. Pēc tam spriegums tiek nomests un tā pakāpeniska paaugstināšana notiek atbilstoši iestatītajam strāvas ierobežojumam un palaides laikam t_p (2.48. att.).



116

potenciometru **DEC** iestata pozīcijā „2”. Dodot „Stop” komandu, elektrodzinēja tinumos pārstāj plūst maiņstrāva $\sim I$ un uz tiem tiek padota pulsējoša līdzstrāva $\sim I_{br}$, kas rada bremzējošu momentu (2.49. att.). Vadības modulis (skat. 2.42. att.) katrā fāzē komutē tikai vienu tiristoru. Kad fāzē **A** ir pozitīvais pusvilnis, fāzēs **B** un **C** ir negatīvie pusvilņi. Lai visos elektrodzinēja tinumos plūstu pulsējoša līdzstrāva, komutē tiristorus **VS1**, **VS4** un **VS6**. Kad pozitīvais pusvilnis parādās fāzē **B**, mainās tiristoru komutācija. Elektrodzinēja pilnīgas apturēšanas laiks, bremzējot ar līdzstrāvu t_{br} , ir ievērojami mazāks par brīvās apstāšanās laiku t_b (2.49. att.).



2.49. att. Dinamiskās bremzēšanas raksturliķnes elektrodzinēja paātrinātai apturēšanai:

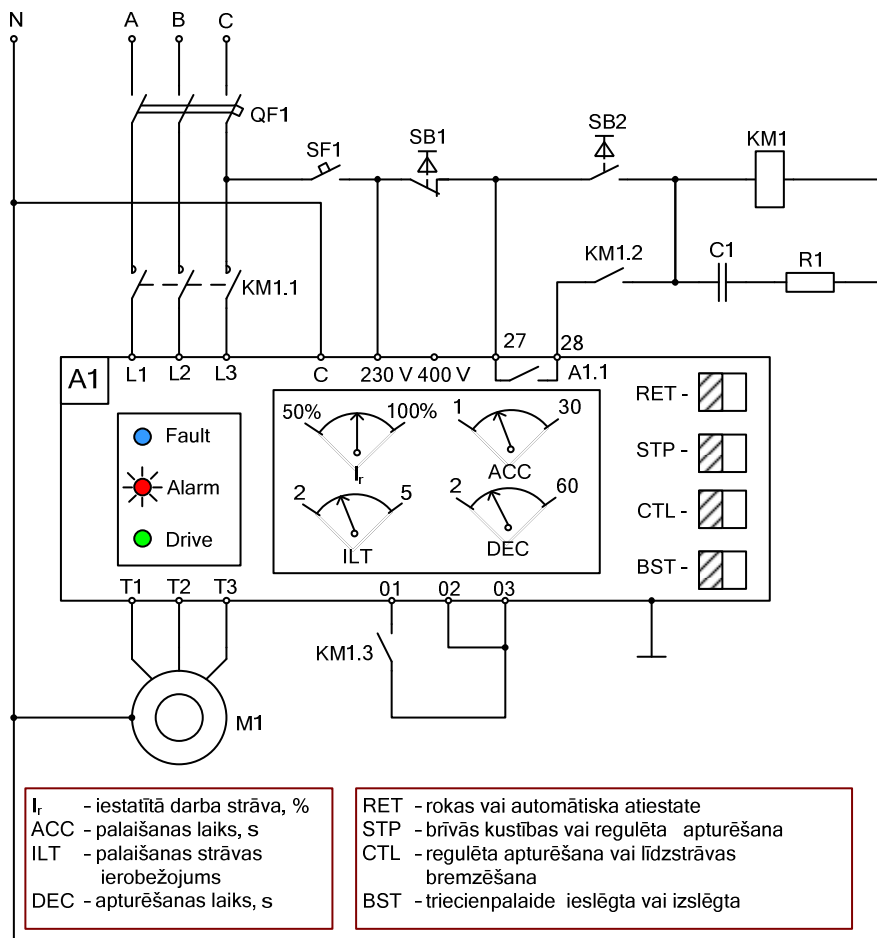
$\sim I$ - nominālā darba strāva, A; $\sim I_{br}$ – bremzēšanas strāva; n_b – brīvās kustības ātrums, min^{-1} ; n_{br} – bremzētas kustības ātrums, min^{-1} .

2.6.3. Palaides shēma ar elektronisko un magnētisko palaidēju

Asinhrono elektrodzinēju palaides bāzes shēmā ar elektronisko palaidēju **A1** parasti iekļauj arī magnētisko palaidēju **KM1**, kas nodrošina elektroniskā palaidēja galvanisku atsaisti no elektriskā tīkla un paaugstina iekārtas darba drošumu pārslodzes-avārijas gadījumos (2.50. att.). Bāzes shēma nodrošina visas „mīkstās” palaides opcijas, bet elektrodzinēja apturēšana var notikt tikai brīvā veidā.

Palaidēja **KM1** vadības ķēdē palaides-pogas **SB2** bloķējošo kontaktu **KM1.2** savieno virknē ar palaidēja **A1** aizsardzības releja kontaktu **A1.1**. Kontaktu **KM1.3**

pievieno spailēm **01** un **03**. Tā kā ir nereversīvā vadība, tad spaili **02** savieno ar **03** tsi. Lai aizsargātu **A1** pret spoles **KM1** ģenerētajiem komutācijas impulsiem, to šuntē ar **CR** filtra ķēdi. **A1** pieslēdz barošanas spriegumam **220/230** vai **380/400 V**.



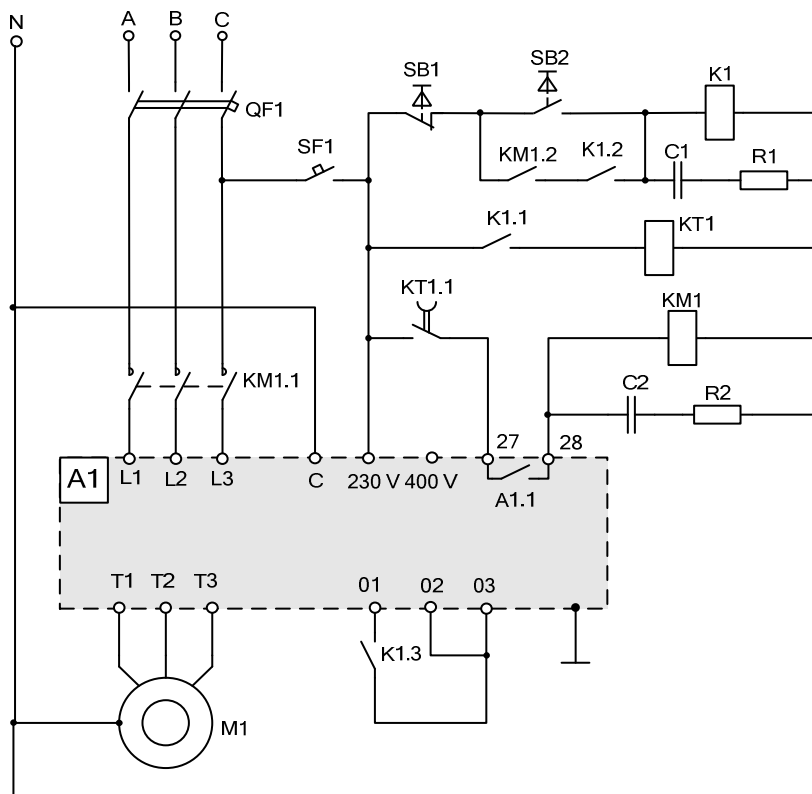
2.50. att. Palaišanas shēma ar iespēju iestatīt elektrodzinēja darba strāvu (I_r), palaišanas laiku (**ACC**) un palaišanas strāvas ierobežojumu (**ILT**).

Ieslēdzot automātslēdžus **QF1** un **SF1**, tiek padots spriegums uz **A1** un **KM1** spēka ķēdi un vadības ķēdi. Ar slēdzi **RET** izvēlas rokas vai automātisko atiestati, ar **STP** izvēlas brīvās kustības apturēšanu, ar **BST** izvēlas vienmērīgu palaidi vai triecienpalaidi, ja ir smagi palaišanas apstākļi. Ar potenciometru I_r iestata darba strāvu. Ja, piemēram, elektrodzinēja darba strāva $I_d = 0.75I_{nom}$, tad iestata $I_r = 75\%$.

Nospiežot pogas slēdži **SB2**, ieslēdzas palaidēji **KM1** un **A1**. Saslēdzoties kontaktiem **KM1.1**, tiek padots spriegums uz palaidēja **A1** jaudas moduli, bet

2.6.4. Palaides un apturēšanas shēma ar laika releju

Lai realizētu visas iespējamās elektroniskā palaidēja **A1** funkcijas – „mīksto palaidi, „mīksto” apturēšanu un elektrisko bremzēšanu, elektrodzinēja palaides shēmu papildina ar starpreleju **K1** un laika releju **KT1** (2.51. att.).



Ieslēdzot automatslēdžus **QF1** un **SF1**, darbam tiek sagatavota spēka ķēde un vadības ķēdes. Nospiežot pogas slēdzi **SB2**, ieslēdzas starprelejs **K1**, saslēdzas kontakti **K1.1** un ieslēdz laika releju **KT1**, saslēdzas **K1.2** un sagatavo **SB2** bloķēšanas ķēdi, saslēdzas **K1.3** un sagatavo darbam elektronisko palaidēju **A1**.

Saslēdzas **A1.1** un sagatavo darbam palaidēju **KM1**. Laika releja kontakts **KT1.1** ieslēdz palaidēju **KM1**. Saslēdzas kontakti **KM1.1** un padod spriegumu uz elektroniskā palaidēja **A1** jaudas moduli, bet kontakts **KM1.2** noslēdz pogas slēdža **SB2** bloķēšanas ķēdi. Sākas elektrodzinēja „mīkstās” palaišanas process.

3. Elektriskās piedziņas bremsēšana un pozicionēšana

Mehānismu elektriskās piedziņas automātiskā bremsēšana tiek izmantota sekojošiem mērķiem:

- mehānisma vai griezējinstrumenta, piemēram, ripzāģa ātrai apturēšanai, lai novērstu traumatismu cilvēka veselībai bīstamos avārijas režīmos;
- tehnoloģisko iekārtu precīzai pozicionēšanai - apturēšanai vai iestatīšanai noteiktā pozīcijā.

Bez mehānismu automātiskas apturēšanas un griezējinstrumentu precīzas pozicionēšanas nevar nodrošināt metālapstrādes un kokapstrādes plūsmas līniju kvalitatīvu darbību. Lai apturētu mehānismu noteiktā pozīcijā, izmantojot distances (rokas) vadību, bieži vien nākas to vairākkārtīgi ieslēgt un izslēgt, kas palielina elektroenerģijas patēriņu, pastiprina elektrodzinēja silšanu un paātrina tehnoloģiskās iekārtas nolietošanu.

Automātiskā precīzā pozicionēšana ar elektrodzinēja piespiedu bremsēšanu paaugstina tehnoloģiskās iekārtas darba ražīgumu, resursu un produkcijas kvalitāti.

Turpmāk apskatīsim galvenos automātiskās bremsēšanas veidus, kas tiek pielietoti modernajā elektriskajā piedziņā ar asinhronajiem elektrodzinējiem:

- bremsēšana ar pretslēgumu (pretstrāvu), izmantojot rotējoša magnētiskā lauka radīto bremsējošo momentu;
- dinamiskā bremsēšana (ar līdzstrāvu), izmantojot statora tinumos plūstošās līdzstrāvas radīto bremsējošo momentu;
- kondensatoru bremsēšana (ar izlādes strāvu), izmantojot statora tinumiem pievienotas kondensatoru baterijas izlādi caur statora tinumiem;
- magnētiskā bremsēšana (ar indukcijas strāvu), izmantojot strauji sabrūkoša magnētiskā lauka radīto strāvu īsi slēgtos statora tinumos;

- augsti efektīva kombinētā bremzēšana, izmantojot divus bremzēšanas veidus vienā bremzēšanas ciklā (kondensatoru-magnētisko, kondensatoru – dinamisko vai magnētisko-dinamisko).

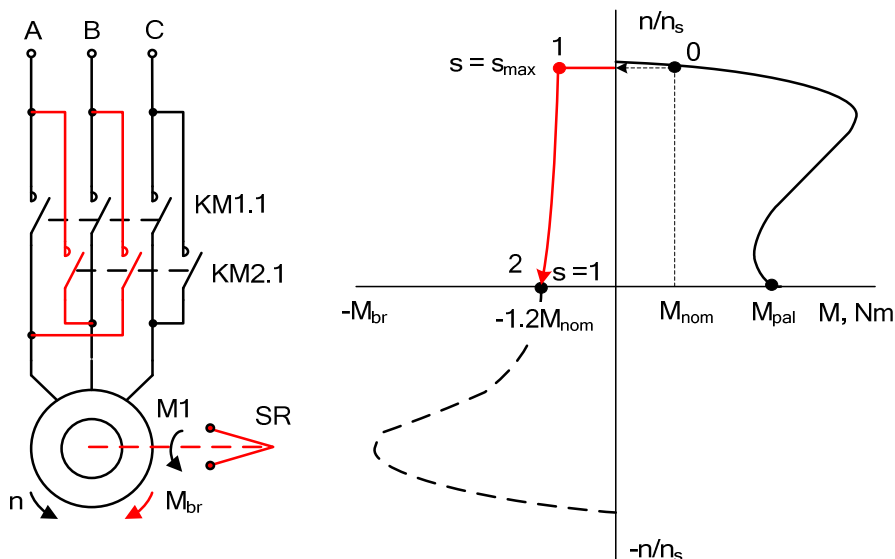
Visuniversālākais bremzēšanas veids ir dinamiskā bremzēšana ar līdzstrāvu, kas dod iespēju regulēt bremzēšanas laiku plašās robežās. Tās pielietojanu neierobežo elektriskās piedziņas jauda un mehāniskā inerce.

Magnētiskā un kondensatoru bremzēšana tiek izmantota mazas jaudas un mazas inerces mehānismu un griezējinstrumentu stāvokļa pozicionēšanai.

3.1. Trīsfāzu asinhrono elektrodzinēju bremzēšana ar pretslēgumu

3.1.1. Bremzēšanas princips, raksturlīknes un laiks

Atslēdzot vadības palaidēju **KM1**, pārtraucas tā spēka kontakti **KM1.1** un atslēdz elektrodzinēju **M1** no trīsfāzu elektriskā tīkla. Vienlaicīgi ieslēdzas bremzēšanas palaidējs **KM2**, saslēdzas tā spēka kontakti **KM2.1** un atkārtoti pieslēdz elektrodzinēju elektriskajam tīklam ar mainītu fāzu secību. **Samainot vietām jebkuras divas fāzes**, piemēram, fāzi **A** ar fāzi **B** (3.1. att.), statora tinumos plūstošā strāva rada **pretēja virziena rotējošu magnētisko lauku**, kurš griežas pretēji rotora griešanās virzienam **n** un rada lielu bremzējošu momentu **M_{br}**.



3.1. att. Bremzēšanas ar pretslēgumu princips un mehāniskās raksturlīknes.

Pārejot no darba režīma (**punkts 0**) uz bremzēšanas režīmu (**punkts 1**), rodas bremzējošs moments $M_{br1} \approx M_{nom}$, kurš procesa beigās (**punkts 2**) palielinās līdz $M_{br2} \approx 1.2 M_{nom}$. Ja elektrodzinējs netiek savlaicīgi atslēgts no elektriskā tīkla, notiek tā reversija-iegriešanās pretējā virzienā (pārtrauktā raksturlīkne 3.1. att.). Lai tas nenotiktu, jākontrolē rotācijas ātrums n . Šim nolūkam izmanto rotācijas slēdzi **SR** (sk. 2.2.4. nodaļu). Kad elektrodzinēja vārpstas griešanās ātrums samazinās tuvu nullei $n \approx 0$, rotācijas slēdzis automātiski izslēdz palaidēju **KM2**, elektrodzinējs tiek atslēgts no elektriskā tīkla un bremzēšanas process beidzas.

Bremzēšanas laika analītiskais aprēķins.

Asinhronās elektriskās piedziņas ar tiešo pārvadu dinamikas vienādojums bremzēšanas režīmā:

$$(J + J_{sl}) \cdot \frac{d\omega}{dt} = M_{br} + M_{sl}, \quad (3.1)$$

kur J – elektrodzinēja rotācijas moments, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$;

J_{sl} – slodzes rotācijas moments, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$;

ω - elektrodzinēja vārpstas rotācijas frekvence, s^{-1} ;

M_{br} – elektrodzinēja bremzēšanas moments, Nm ;

M_{sl} – slodzes pretestības moments, Nm .

Pieņemsim, ka bremzēšanas laikā t_{br} rotācijas frekvence izmainās no $\omega_1 = \omega_{nom}$ līdz $\omega_2 = 0$. Tad diferenciālvienādojumu (3.1) var uzrakstīt vienkāršotā formā:

$$(J + J_{sl}) \cdot \frac{\omega_{nom}}{t_{br}} = M_{br}^v + M_{sl}^v, \quad (3.2)$$

kur M_{br}^v – elektrodzinēja vidējais bremzēšanas moments, Nm ;

M_{sl}^v – vidējais slodzes pretestības moments, Nm .

Lai aprēķinos varētu izmantot elektrodzinēja kataloga datus, izsakām momentus relatīvās vienībās – $k_{br}^v = M_{br}^v / M_{nom}$ un $k_{sl}^v = M_{sl}^v / M_{nom}$, bet rotācijas frekvenci ω (rad/s) ar rotācijas ātrumu n (apgr/min) – $\omega = n/9.55$. Veicot matemātiskus pārveidojumus, no (3.2) iegūstam bremzēšanas laika aprēķina formulu:

$$t_{br} = \frac{(J + J_{sl}) \cdot n_{nom}}{9.55 \cdot M_{nom} \cdot (k_{br}^v + k_{sl}^v)}, \quad (3.3)$$

kur $M_{nom} = 9.55 P_{nom}/n_{nom}$ – elektrodzinēja nominālais griezes moments, Nm;

P_{nom} – elektrodzinēja nominālā mehāniskā jauda, W.

Relatīvo bremzēšanas momentu izsakām ar Klosa formulu:

$$k_{br} = \frac{2 k_k}{\frac{s_{br}}{s_k} + \frac{s_k}{s_{br}}}, \quad (3.4)$$

kur $k_k = M_k/M_{nom}$ – elektrodzinēja relatīvais kritiskais moments;

s_k – elektrodzinēja kritiskā slīde; s_{br} – elektrodzinēja slīde bremzēšanas režīmā

($s_{br} = (n_s + n)/n_s$, $s_{max} = (n_s + n_{nom})/n_s$, $s_{min} = (n_s + 0)/n_s = 1$, ; $1 \leq s_{br} < 2$).

Lai aprēķinātu vidējo relatīvo bremzēšanas momentu, integrējam izteiksmi (3.4)

robežās - $s_{br} = 1$ - s_{max} :

$$k_{br}^v = \frac{1}{s_{max} - 1} \int_1^{s_{max}} \frac{2k_k}{\frac{s_{br}}{s_k} + \frac{s_k}{s_{br}}} \cdot ds = \frac{k_k \cdot s_k}{s_{max} - 1} [\ln(s_k^2 + s_{max}^2) - \ln(s_k^2 + 1)]. \quad (3.5)$$

Piemērs. Aprēķināt asinhronā elektrodzinēja **4A71A4Y3** bremzēšanas laiku pretslēgumā, ja $P_{nom} = 550 \text{ W}$, $n_s = 1500 \text{ apgr./min}$, $n_{nom} = 1380 \text{ apgr./min}$, $J = 0.13 \cdot 10^{-2} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, $J_{sl} = J$, $s_k = 0.4$, $k_k = 2.2$, $s_{max} = (n_s + n_{nom})/n_s = (1500 + 1380)/1500 = 1.92$,

$$k_{br}^v = \frac{k_k \cdot s_k}{s_{max} - 1} [\ln(s_k^2 + s_{max}^2) - \ln(s_k^2 + 1)] = \frac{2.2 \cdot 0.4}{1.92 - 1} [\ln(0.4^2 + 1.92^2) - \ln(0.4^2 + 1)] = 1.13.$$

1. gadījums. Elektrodzinējs darbojas tukšgaitā - $k_{sl} \approx 0$. Tad bremzēšanas laiks

$$t_{br1} = \frac{(J + J_{sl}) \cdot n_{nom}^2}{9.55^2 \cdot P_{nom} \cdot (k_{br}^v + k_{sl}^v)} = \frac{2 \cdot 0.13 \cdot 10^{-2} \cdot 1380^2}{9.55^2 \cdot 550 \cdot 1.13} = 0.09 \text{ s}.$$

2. gadījums. Slodzes moments ir konstants - $k_{sl} \approx 0.7$. Tad bremzēšanas laiks

$$t_{br2} = \frac{(J + J_{sl}) \cdot n_{nom}^2}{9.55^2 \cdot P_{nom} \cdot (k_{br}^v + k_{sl}^v)} = \frac{2 \cdot 0.13 \cdot 10^{-2} \cdot 1380^2}{9.55^2 \cdot 550 \cdot (1.13 + 0.7)} = 0.055 \text{ s}.$$

3. gadījums. Elektrodzinējs darbojas ar ventilatora slodzi, kuras moments ir tieši proporcionāls rotācijas ātruma kvadrātam - $k_{sl}/k_{sl\ nom} = (n/n_{nom})^2$. Pieņemsim, ka

$k_{sl\ nom} = 1$, tad $k_{sl} = (n/n_{nom})^2$. Integrējot iegūto izteiksmi, noteiksim vidējo slodzes

momentu: $k_{br}^v = \frac{1}{n_{nom}} \int_0^{n_{nom}} k_{sl} \cdot dn = \frac{1}{n_{nom}} \int_0^{n_{nom}} \left(\frac{n}{n_{nom}}\right)^2 \cdot dn = 0.33$. Tad bremsēšanas laiks

$$t_{br3} = \frac{(J + J_{sl}) \cdot n_{nom}^2}{9.55^2 \cdot P_{nom} \cdot (k_{br}^v + k_{sl}^v)} = \frac{2 \cdot 0.13 \cdot 10^{-2} \cdot 1380^2}{9.55^2 \cdot 550 \cdot (1.13 + 0.33)} = 0.068\ s.$$

Secinājums.

Elektrodzinēja bremsēšanas laiks ir tieši proporcionāls rotējošo masu kopējam inerces momentam un apgriezti proporcionāls bremsējošā un slodzes momenta summai. Bremsēšanas laiku būtiski iespaido rotācijas ātrums. Izvēloties mazāka ātruma elektrodzinēju, samazinās tā bremsēšanas laiks un līdz ar to paaugstinās mehānisma apturēšanas un pozicionēšanas precizitāte.

3.1.2. Nereversējama elektrodzinēja bremsēšana

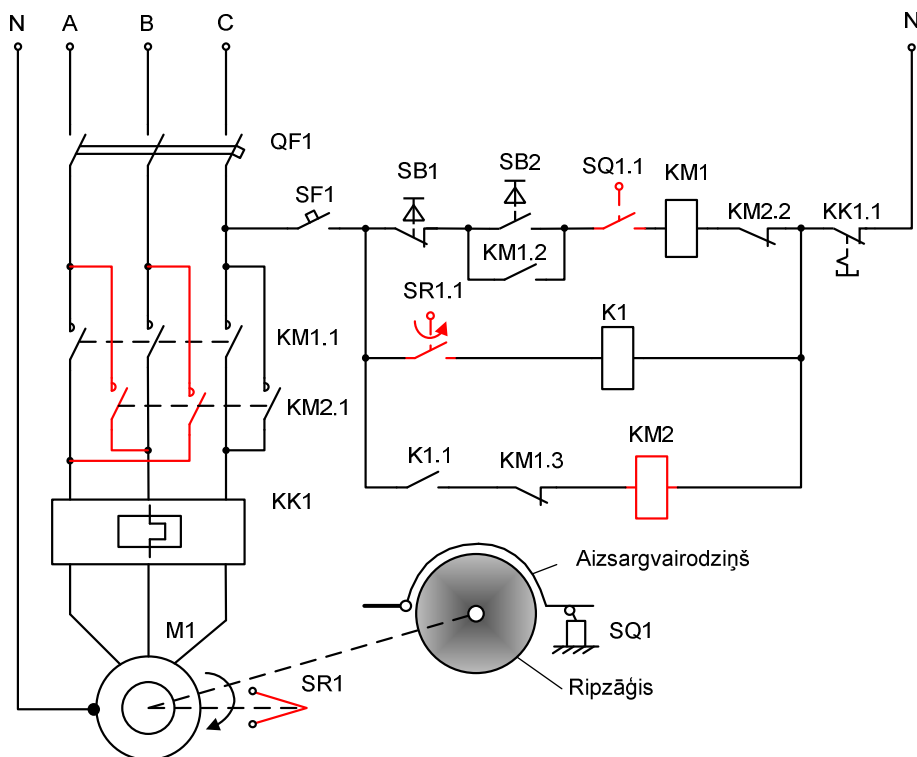
Apskatīsim mazas jaudas ripzāģa (daži kilovati) piedziņas ar trīsfāzu asinhrono elektrodzinēju automātiskās bremsēšanas shēmu (3.2. att.). Tā kā ripzāģim ir tikai viens noteikts rotācijas virziens, tad elektrodzinējs netiek reversēts. Ripzāģis nosepts ar aizsargvairodziņu, kura normālo stāvokli kontrolē gala slēdzis **SQ1**. Darba pozīcijā aizsargvairodziņš nospiež galaslēdzi, tā elektriskie kontakti **SQ1.1** ir saslēgti un atļauj iedarbināt elektrodzinēju **M1**.

Ieslēdzot automātslēdzus **QF1** un **SF1**, tiek padots spriegums uz spēka ķēdi un vadības ķēdi. Nospiežot palaides-pogu **SB2**, ieslēdzas vadības palaidējs **KM1**. Pārtraucas tā kontakts **KM1.3** un **nejauj** ieslēgt bremsēšanas palaidēju **KM2**, saslēdzas spēka kontakti **KM1.1**, kas pieslēdz spriegumam elektrodzinēju **M1** un bloķēšanas kontakti **KM1.2**, kas bloķē palaides-pogu **SB2**.

Iegriežoties elektrodzinēja vārpstai, nostrādā rotācijas slēdzis **SR1**. Saslēdzas elektriskie kontakti **SR1.1** un ieslēdz starpreleju **K1**, kura saslēdzošais kontakts **K1.1** sagatavo darbam bremsēšanas palaidēju **KM2**.

Ja darba laikā nejauši tiek pacelts aizsargvairodziņš, pārtraucas gala slēdža kontakts **SQ1.1**. Līdz ar to automātiski tiek atslēgts vadības palaidējs **KM1**. Pārtraucas tā kontakti **KM1.1**, **KM1.2** un atslēdz elektrodzinēju **M1** no elektriskā tīkla, bet kontakts **KM1.3** saslēdzas un ieslēdz bremsēšanas palaidēju **KM2**. Pārtraucas tā atslēdzošais kontakts **KM2.2** un **nejauj** ieslēgt vadības palaidēju **KM1**, bet spēka

kontakti **KM2.1** atkārtoti pieslēdz elektrodzinēju elektriskajam tīklam **ar mainītu fāzu secību**. Rodas pretēja virziena rotējošs magnētiskais lauks, kas strauji bremzē elektrodzinēju. Kad rotācijas ātrums samazinās līdz minimālai vērtībai, kuru nosaka rotācijas slēdža jutība, pārtraucas kontakts **SR1.1**, atslēdzas starprelejs **K1** un palaidējs **KM2**. Bremzēšanas process ir beidzies. Līdzīga darbība notiek, nospiežot stop-pogu **SB1**.



3.2. att. **Nereversējama asinhronā elektrodzinēja automātiskās bremzēšanas ar pretslēgumu elektriskā shēma ripzāģa ātrai apturēšanai.**

Ja kaut kādu iemeslu dēļ nenostādā rotācijas slēdzis bremzēšanas procesa beigās, notiek elektrodzinēja reversija, jo bremzējošo momentu rada pretēja virziena griezes moments. Tas ir šīs bremzēšanas metodes galvenais trūkums.

3.1.3. Reversējama elektrodzinēja bremzēšana

Reversējamas elektriskās piedziņas automātiskai bremzēšanai ar pretslēgumu izmanto **indukcijas tipa rotācijas slēdžus**, kas jutīgi pret rotācijas virziena maiņu

(sk. 2.2.4. nodaļu). Kā piemēru apskatīsim reversējamu ķēžu transportieru koka stumbru paku novilkšanai uz estakādes vadības shēmu (3.3. att.).

Ieslēdzot automātslēdžus **QF1** un **SF1**, tiek padots spriegums uz spēka ķēdi un vadības ķēdi. Nospiežot palaidēs-pogu **SB2**, ieslēdzas palaidējs **KM1**. Pārtraucas kontakts **KM1.3** un **neļauj** ieslēgt palaidēju **KM2**, bet saslēdzas spēka kontakti **KM1.1**, kas iedarbina elektrodzinēju **M1**, un kontakti **KM1.2**, kas bloķē palaidēs-pogu **SB2**. Iegriežoties elektrodzinējam **M1**, saslēdzas rotācijas slēdža kontakts **SR1.2** un ieslēdz starpreleju **K2**, atslēdzas kontakts **K2.2** un **neļauj** ieslēgties starpreļam **K1**, bet **K2.1** un **K2.3** saslēdzas. **K2.1** sagatavo darbam palaidēju **KM2** elektrodzinēja bremsēšanai, bet **K2.3** ieslēdz starpreleju **K3**, kura kontakts **K3.1** noslēdz pogas slēdža **SB2** bloķēšanas ķēdi. Elektrodzinējs ar vinču darbina ķēžu transportieri un ar tērauda troses cilpu aiz atbalsta aizkabinātā stumbru paka tiek novilkta uz estakādes. Kad izcilnis nospiež gala slēdzi **SQ1**, pārtraucas tā kontakti **SQ1.1** un izslēdzas palaidējs **KM1**. Pārtraucas kontakti **KM1.1**, **KM1.2** un elektrodzinējs tiek atslēgts no sprieguma, bet kontakts **KM1.3** saslēdzas un ieslēdz bremsēšanas palaidēju **KM2**. Pārtraucas tā kontakts **KM2.3** un **neļauj** ieslēgt palaidēju **KM1**, saslēdzas spēka kontakti **KM2.1**, kas pieslēdz elektrodzinēju **M1** spriegumam ar mainītu fāzu secību, un kontakti **KM2.2**, kas caur noslēgto kontaktu **K3.2** bloķē palaidēs-pogu **SB4**.

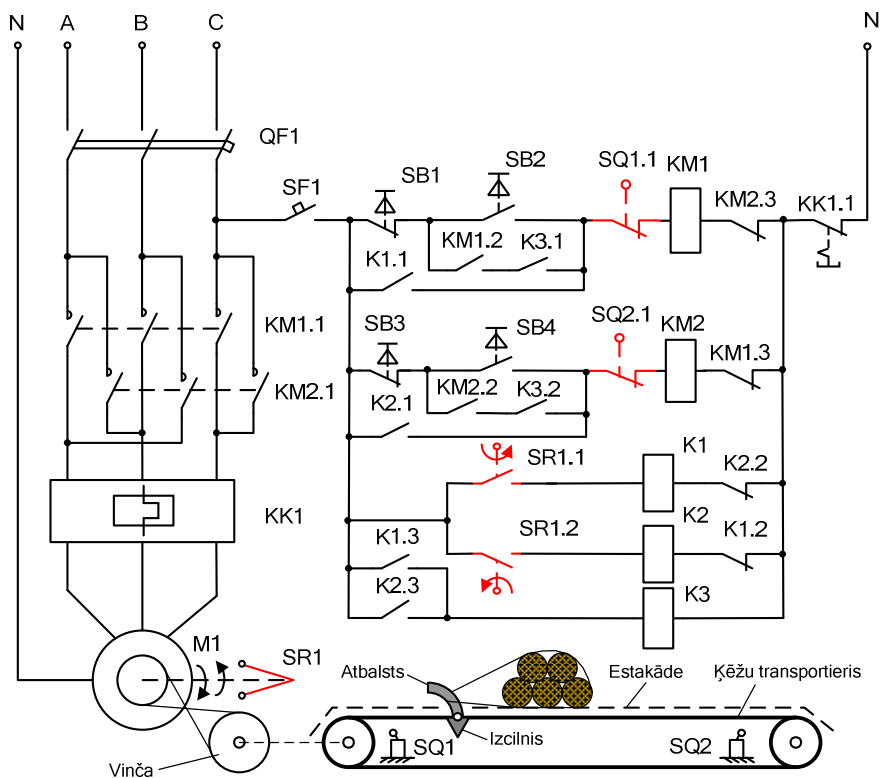
Pretējā virzienā rotējošais magnētiskais lauks strauji bremsē elektrodzinēju un apstādina transportieri, novēršot inerces izraisītu, izcilņa pārslēdēšanu pār gala slēdzi **SQ1**. Kad rotācijas ātrums samazinās līdz minimumam, rotācijas slēdža kontakts **SR1.2** pārtraucas, izslēdzas starpreleji **K2** un **K3**, pārtraucas to kontakti **K2.1**, **K3.2** un izslēdz bremsēšanas palaidēju **KM2**. Visi shēmas elementi atgriežas sākuma stāvoklī.

Kad stumbru paka ir atkabināta, elektrodzinēju reversē, lai atgrieztu transportieri izejas pozīcijā nākamās stumbru pakas novilkšanai uz estakādes. Vadības shēma darbojas līdzīgi, kā aprakstīts iepriekš. Atšķirība ir tāda, ka mainās palaidēju darbības funkcijas. **KM2** tagad ir vadības palaidējs, bet **KM1** – bremsēšanas palaidējs.

Nospiežot palaidēs-pogu **SB4**, ieslēdzas palaidējs **KM2**. Pārtraucas kontakts **KM2.3** un **neļauj** ieslēgt palaidēju **KM1**, bet saslēdzas spēka kontakti **KM2.1**, kas maina fāzu secību un iedarbina elektrodzinēju **M1** pretējā virzienā.

Iegriežoties elektrodzinējam **M1**, saslēdzas rotācijas slēdža kontakts **SR1.1** un ieslēdz starpreleju **K1**, atslēdzas kontakts **K1.2** un **neļauj** ieslēgties starpreļam **K2**, bet **K1.1** un **K1.3** saslēdzas. **K1.1** sagatavo darbam palaidēju **KM1** elektrodzinēja

Kad izcilnis nospiež gala slēdzi **SQ2**, pārtraucas tā kontakti **SQ2.1** un izslēdz palaidēju **KM2**. Tā kontakti **KM2.1**, **KM2.2** pārtraucas un elektrodzinējs tiek atslēgts no sprieguma, bet kontakts **KM2.3** saslēdzas un **ieslēdz** bremsēšanas palaidēju **KM1**. Elektrodzinējs tiek atkārtoti pieslēgts elektriskajam tīklam ar mainītu fāzu secību un notiek tā strauja bremsēšana. Bremsēšanas procesa beigās pārtraucas rotācijas slēdža kontakts **SR1.1**, atslēdzas starpreleji **K1**, **K3** un palaidējs **KM1**, un elektrodzinējs tiek atslēgts no elektriskā tīkla.



3.3. att. Reversējama asinhronā elektrodzinēja automātiskās bremsēšanas ar pretslēgumu elektriskā shēma stumbru pakas pozicionēšanai.

Priekšrocības:

- ❑ augsta bremzēšanas efektivitāte (mazs bremzēšanas laiks);
- ❑ nav nepieciešams papildus enerģijas avots un dārga aparatūra.

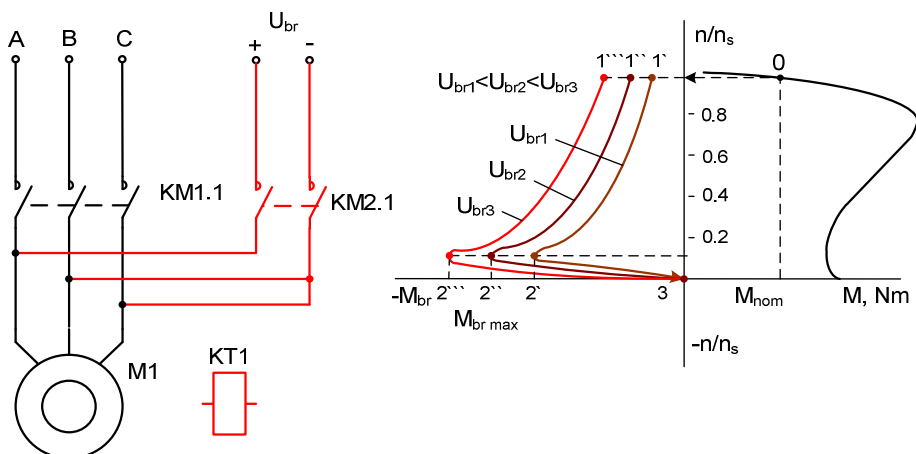
Trūkumi:

- rodas lielas mehāniskās pārslodzes pārvados, tādēļ nav izmantojams mehānismu ar lielu inerci, piemēram, centrifūgu bremzēšanai;
- lieli elektroenerģijas zudumi bremzēšanas procesā, tādēļ nav izmantojams vidējas un lielas jaudas elektrodzinēju bremzēšanai, kā arī elektrodzinējiem, kas darbojas atkārtoti-īslaicīgā darba režīmā S3;
- ar konstantu elektriskā tīkla spriegumu nav iespējams regulēt bremzēšanas laiku, to nosaka tikai elektrodzinēja un slodzes mehāniskās īpašības.

3.2. Trīsfāzu asinhrono elektrodzinēju dinamiskā bremzēšana

3.2.1. Bremzēšanas princips, raksturlīknes un laiks

Atslēdzot vadības palaidēju **KM1**, pārtraucas tā spēka kontakti **KM1.1** un atslēdz elektrodzinēju **M1** no trīsfāzu elektriskā tīkla. Vienlaicīgi ieslēdzas bremzēšanas palaidējs **KM2**, saslēdzas tā spēka kontakti **KM2.1** un pieslēdz elektrodzinēju līdzstrāvas elektriskajam tīklam ar maināmu bremzēšanas spriegumu U_{br} . Statora tinumos plūstošās līdzstrāvas radīto magnētisko plūsmu šķēļ rotora rotējošie tinumi, kuros inducējas elektriskā strāva. Statora strāvas magnētiskais lauks saķēdējas ar rotora strāvas magnētisko lauku un rada bremzējošu momentu M_{br} uz elektrodzinēja vārpstas. Lai paaugstinātu bremzēšanas efektivitāti, bremzēšanas līdzspriegumu padod uz trim fāzē (3.4. att.).



3.4. att. Bremzēšanas ar līdzstrāvu princips un mehāniskās raksturlīknes.

Pārejot no darba režīma (**punkts 0**) uz bremzēšanas režīmu (**punkti1',1''1'''**), rodas bremzējošs moments M_{br1} , kas atkarīgs no bremzēšanas sprieguma lieluma un palielinās proporcionāli bremzēšanas sprieguma kvadrātam. Sākuma bremzējošais moments ir mazāks par nominālo momentu $M_{br1} = (0.3...0.4) M_{nom}$. Samazinoties rotācijas ātrumam, M_{br} palielinās un bremzēšanas procesa beigās pie rotācijas ātruma $n = (0.3...0.1) n_{nom}$ (**punkts 2**) sasniedz maksimālo (kritisko) lielumu $M_{brmax} = (3...4)M_{nom}$ (**punkti2',2''2'''**). Atšķirībā no bremzēšanas ar pretslēgumu, nav jākontrolē rotācijas ātrums, jo līdzstrāva nerada griezes momentu.

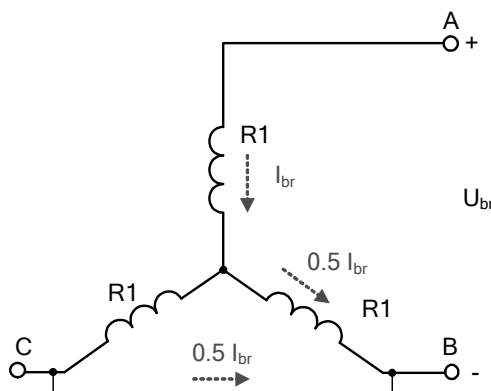
Dinamisko bremzēšanu var automatizēt izmantojot laika releju **KT1** (sk. 2.2.4. nodaļu) ar mazu darbības kavējumu (dažas sekundes), kas nepieciešams, lai pilnībā apturētu elektrodzinēju. Procesa beigās laika relejs izslēdz bremzēšanas palaidēju **KM2** un elektrodzinējs tiek atslēgts no līdzstrāvas elektriskā tīkla.

Dinamiskās bremzēšanas laika aprēķins.

Zvaigznē slēgta elektrodzinēja bremzēšanas shēmā (3.5. att.) tinumi savienoti jauktajā (virknes-paralēlajā) slēgumā, kura kopējā pretestība $R = R_1 + R_1/2 = 1.5R_1$, kur R_1 - fāzes tinuma aktīvā pretestība, Ω . Aprēķināsim elektriskās ķēdes kopējo strāvu I_{br} un patērēto jaudu P_{br} :

$$I_{br} = U_{br}/R = U_{br}/(1.5R_1), A;$$

$$P_{br} = U_{br} \cdot I_{br} = U_{br}^2/(1.5 R_1) = 1.5 I_{br}^2 \cdot R_1, W.$$



3.5. att. Dinamiskās bremzēšanas elektriskā shēma.

Aprēķiniem ērti izmantot rotācijas ātruma un bremsēšanas momenta relatīvos lielumus: $k_k = M_{br \max}/M_{nom}$ – relatīvo kritisko bremsēšanas momentu; $n_k^* = n_k/n_s$ – relatīvo kritisko rotācijas ātrumu pie momenta $M_{br \max}$.

Lielumus k_k un n_k^* var aprēķināt, ja zināmi elektrodzinēja parametri un bremsēšanas strāva:

$$k_k = \frac{11.75 \cdot I_{br}^2 \cdot X_{\mu}^2 \cdot n_{nom}^*}{9.55 \cdot P_{nom} \cdot (X_{\mu} + X_2')}, \quad n_k^* = \frac{R_2'}{X_{\mu} + X_2'}, \quad (3.6)$$

kur $n_{nom}^* = n_{nom}/n_s$ – elektrodzinēja relatīvais nominālais rotācijas ātrums;

X_{μ} – elektrodzinēja magnetizācijas ķēdes induktīvā pretestība, Ω ;

X_2' – pie statora reducētā rotora ķēdes induktīvā pretestība, Ω ;

R_2' – pie statora reducētā rotora ķēdes aktīvā pretestība, Ω .

Relatīvo momentu var tuvināti izteikt ar Klosa formulu (3.4). Integrējot to slīdes izmaiņas apgabalā no $s_{br1} = s_{nom}$ līdz $s_{br3} = 1$, iegūst vidējo bremsēšanas momentu:

$$k_{br}^v = \frac{k_k \cdot s_k}{1 - s_{nom}} [\ln(s_k^2 + 1) - \ln(s_k^2 + s_{nom}^2)], \quad (3.7)$$

kur $s_k = 1 - n_k^*$ – kritiskā slīde; $s_{nom} = 1 - n_{nom}^*$ – nominālā slīde.

Jāatzīmē, ka izteiksme (3.7) dod par aptuveni 25% paaugstinātu rezultātu.

Piemērs. Aprēķināt asinhronā elektrodzinēja **M2AA90S** dinamiskās bremsēšanas laiku, ja $P_{nom} = 1500W$, $I_{nom} = 3.5A$, $n_s = 1500$ apgr./min, $n_{nom} = 1420$ apgr./min, $J = 0.43 \cdot 10^{-2} kg \cdot m^2$, $n_{nom}^* = 1420/1500 = 0.95$, $J_{sl} = J$, $I_{br} = 1.8I_{nom} = 1.8 \cdot 3.5 = 6.3 A$, $k_{sl} = 0.7$, $R_1 = 7.3 \Omega$, $R_2' = 5.9 \Omega$, $X_2' = 7.1 \Omega$, $X_{\mu} = 110 \Omega$. $U_{br} = 1.5I_{br} \cdot R_1 = 1.5 \cdot 6.3 \cdot 7.3 = 70V$.

1. Relatīvais kritiskais bremsēšanas moments:

$$k_k = \frac{11.75 \cdot I_{br}^2 \cdot X_{\mu}^2 \cdot n_{nom}^*}{9.55 \cdot P_{nom} \cdot (X_{\mu} + X_2')} = \frac{11.75 \cdot 6.3^2 \cdot 110^2 \cdot 0.95}{9.55 \cdot 1500 \cdot (110 + 7.1)} = 3.2.$$

2. Relatīvais kritiskais rotācijas ātrums:

$$n_k^* = \frac{R_2'}{X_{\mu} + X_2'} = \frac{5.9}{110 + 7.1} = 0.05.$$

3. Relatīvais sākuma bremsēšanas moments:

$$k_{br1} = \frac{2k_k}{\frac{s_{nom}}{s_k} + \frac{s_k}{s_{nom}}} = \frac{2 \cdot 3.2}{\frac{0.05}{0.95} + \frac{0.95}{0.05}} = 0.34.$$

4. Vidējais bremzēšanas moments:

$$k_{br}^v = \frac{k_k \cdot s_k}{1 - s_{nom}} [\ln(s_k^2 + 1) - \ln(s_k^2 + s_{nom}^2)] = \frac{3.2 \cdot 0.95}{0.95} [\ln(0.95^2 + 1) - \ln(0.95^2 + 0.05^2)] = 1.7$$

Tā kā ir liela atšķirība starp relatīvā bremzēšanas momenta sākuma lielumu $k_{br1} = 0.34$ un beigu kritisko lielumu $k_k = 3.2$ un momenta izmaiņa laikā ir nevienmērīga, tad Klosa formulas vienkārša integrēšana dod samērā aptuvenu rezultātu. To var uzlabot, izmantojot empīrisku sakarību, ko iegūst, pieņemot, ka dinamiskās bremzēšanas moments pieaug proporcionāli slīdes kvadrātam:

$$k_{br}^v = k_{br1} + \frac{k_k - k_{br1}}{3} = 0.34 + \frac{3.2 - 0.34}{3} = 1.3.$$

5. Izmantojot dotos un aprēķinātos elektriskās piedziņas parametrus aprēķinām elektrodzinēja nobremzēšanās laiku:

$$t_{br2} = \frac{(J + J_{sl}) \cdot n_{nom}^2}{9.55^2 \cdot P_{nom} \cdot (k_{br}^v + k_{sl}^v)} = \frac{2 \cdot 0.43 \cdot 10^{-2} \cdot 1420^2}{9.55^2 \cdot 1500 \cdot (1.3 + 0.7)} = 0.06 \text{ s}.$$

Aprēķins nepretendē uz augstu precizitāti, taču tas dod iespēju salīdzināt un novērtēt dažādu faktoru iespaidu uz bremzēšanas efektivitāti.

3.2.2. Dinamiskās bremzēšanas shēma ar laika releju

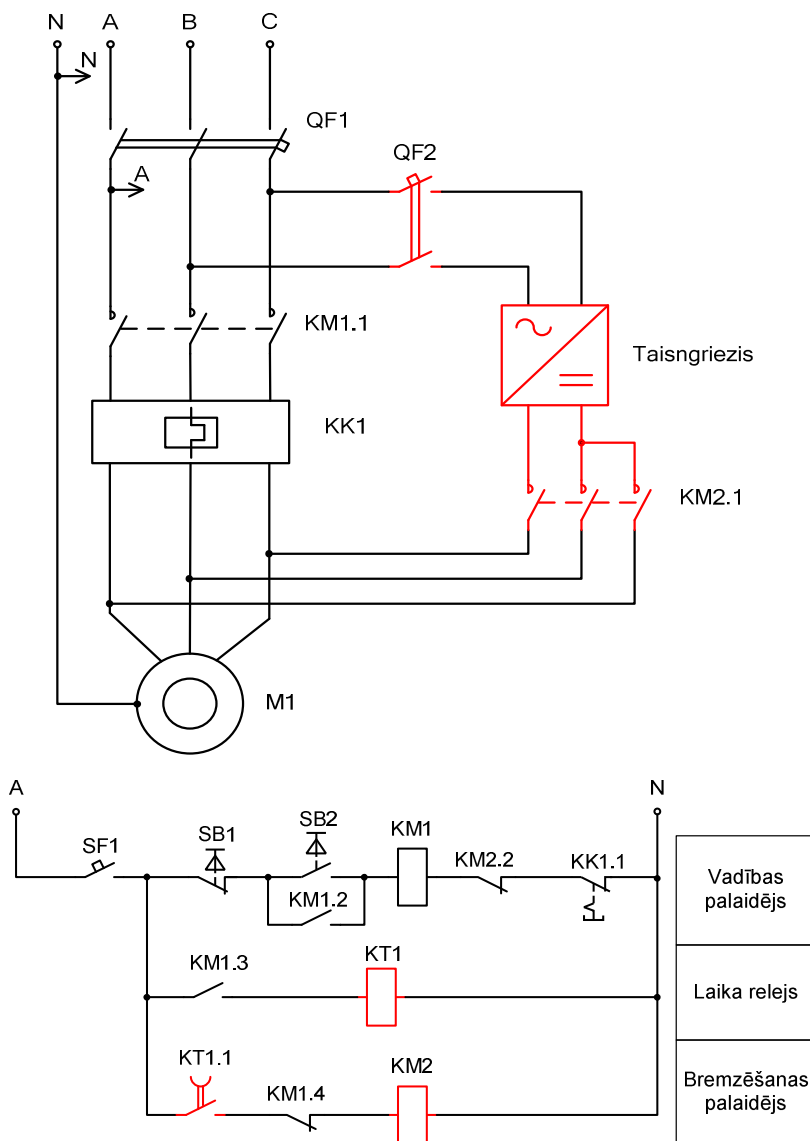
Trīsfāzu asinhronā elektrodzinēja dinamiskās bremzēšanas ar līdzstrāvu spēka ķēdes un vadības ķēdes elektriskā shēma parādīta 3.6. attēlā.

Ieslēdzot automātslēdžus **QF1** un **QF2**, tiek padots spriegums uz spēka ķēdi un vadības ķēdi. Spriegumam tiek pieslēgts taisngriezis, kurš bremzēšanas laikā tiek izmantots kā līdzsprieguma avots.

Nospiežot palaides-pogu **SB2**, ieslēdzas vadības palaidējs **KM1**. Pārtraucas tā kontakts **KM1.4** un **neļauj** ieslēgt bremzēšanas palaidēju **KM2**, vienlaicīgi saslēdzas spēka kontakti **KM1.1**, kas pieslēdz spriegumam elektrodzinēju **M1**, bloķēšanas kontakts **KM1.2**, kas bloķē palaides-pogu **SB2** un vadības kontakts **KM1.3**, kas pieslēdz spriegumam laika releju **KT1**. Saslēdzas kontakts **KT1.1** un sagatavo darbam bremzēšanas palaidēju **KM2**. Pagaidām **KM2** nevar ieslēgties, jo tā spoles ķēdi pārtraucis vadības palaidēja kontakts **KM1.4** (3.6. att.).

Nospiežot stop-pogu **SB1**, atslēdzas vadības palaidējs **KM1**. Pārtraucas tā kontakti **KM1.1**, **KM1.2** un **KM1.3**. No sprieguma tiek atslēgts elektrodzinējs **M1** un laika relejs **KT1**, bet kontakts **KT1.1** paliek saslēgtā stāvoklī, jo laika releja atlaišanās

notiek ar kavējumu. Saslēdzas normāli slēgtais kontakts **KM1.4** un ieslēdz bremzēšanas palaidēju **KM2**. Pārtraucas tā atslēdzošais kontakts **KM2.2** un **neļauj** ieslēgt vadības palaidēju **KM1**, bet spēka kontakti **KM2.1** pieslēdz elektrodzinēja tinumus bremzēšanas līdzspriegumu. Tinumos plūstošā līdzstrāva rada bremzējošu momentu un elektrodzinējs tiek strauji apturēts.



3.6. att. Asinhronā elektrodzinēja automātiskās dinamiskās bremzēšanas spēka shēma un vadības shēma ar laika releju KT1.

Visu bremzēšanas laiku relejs **KT1** notur palaidēju **KM2** ieslēgtā stāvoklī. Kad iztecējis iestatītais laika kavējums, kuru izvēlas nedaudz lielāku par elektrodzinēja apturēšanas laiku, pārtraucas kontakts **KT1.1** un atslēdzas palaidējs **KM2**. Pārtraucas kontakti **KM2.1** un elektrodzinējs tiek atslēgts no līdzsprieguma avota.

3.2.3. Bremzēšanas laika eksperimentāla noteikšana

Lai eksperimentāli uzņemtu elektrodzinēja dinamiskās bremzēšanas laika-spieguma raksturlīkni $t_{br} = f(U_{br})$, spēka ķēdē (3.6. att.) slēdz regulējamu taisngriezi, kura izejas spriegumu U_{br} var vienmērīgi mainīt no nulles līdz nominālai vērtībai. Vadības ķēdē laika releju **KT1** aizstāj ar jutīgu rotācijas slēdzi, kurš automātiski atslēdz palaidēju **KM2**, kad elektrodzinēja rotācijas ātrums ir tuvs nullei. Vadības ķēdi papildina ar elektronisko hronometru, bremzēšanas laika nolasīšanai. Hronometru ieslēdz un izslēdz bremzēšanas palaidējs ar papildus kontaktu.

Pēc attiecīga bremzēšanas sprieguma iestatīšanas, nospiež palaides-pogu **SB2** un iedarbina elektrodzinēju. Pēc tam nospiež stop-pogu **SB1**. Izslēdzas palaidējs **KM1** un ieslēdzas bremzēšanas palaidējs **KM2**, kurš pieslēdz elektrodzinēja tinumiem līdzspriegumu U_{br} un palaiž hronometru. Kad rotācijas ātrums samazinās tuvu nullei, rotācijas slēdzis atslēdz bremzēšanas palaidēju un hronometru.

Neslogota trīsfāzu asinhronā elektrodzinēja (**550 W**) dinamiskās bremzēšanas raksturlīkne parādīta 3.7. attēlā. To var sadalīt trīs raksturīgās zonās.

Nejutības zonā ($U_{br} = 0...10 \text{ V}$) bremzēšanas laiks praktiski nemainās. Elektrodzinējs bremzējas no iekšējiem un ārējiem pretestības spēkiem (berze, ventilatora pretestība, slodzes pretestība).

Vienmērīgas bremzēšanas zonā ($U_{br} = 20...50 \text{ V}$) bremzēšanas laiks izmainās gandrīz apgriezti proporcionāli spriegumam.

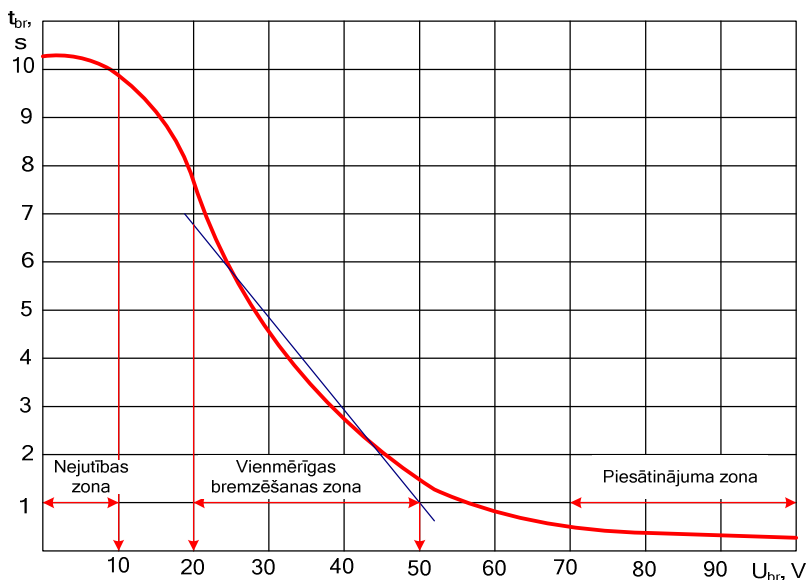
Piesātinājuma zonā ($U_{br} > 70 \text{ V}$) bremzēšanas laiki ir mazi pēc absolūtās vērtības (sekundes desmitdaļas un simtdaļas). Tādēļ, lai uzskatāmi parādītu sakarību $t_{br} = f(U_{br})$ visā sprieguma izmaiņas diapazonā, raksturlīkni (3.7. att.) ieteicams attēlot logaritmiskā mērogā.

Dinamiskās bremzēšanas veida novērtējums.

Priekšrocības:

- iespēja plašās robežās mainīt bremzēšanas laiku, mainot līdzspriegumu ;

- universāls pielietojums, jo var izmantot visa veida asinhronās elektriskās piedziņas bremsēšanai neatkarīgi no iekārtas jaudas un inerces.



3.7. att. Dinamiskās bremsēšanas laika-spieguma raksturlīkne $t_{br} = f(U_{br})$.

Trūkumi:

- relatīvi lieli papildus kapitālieguldījumi lielas jaudas elektriskās piedziņas bremsēšanai, jo nepieciešams taisngriezis līdztsprieguma iegūšanai;
- bremsēšanas moments nav vienmērīgs visā bremsēšanas procesā, sākumā tas ir mazs un maksimālo lielumu sasniedz tikai bremsēšanas beigu stadijā.

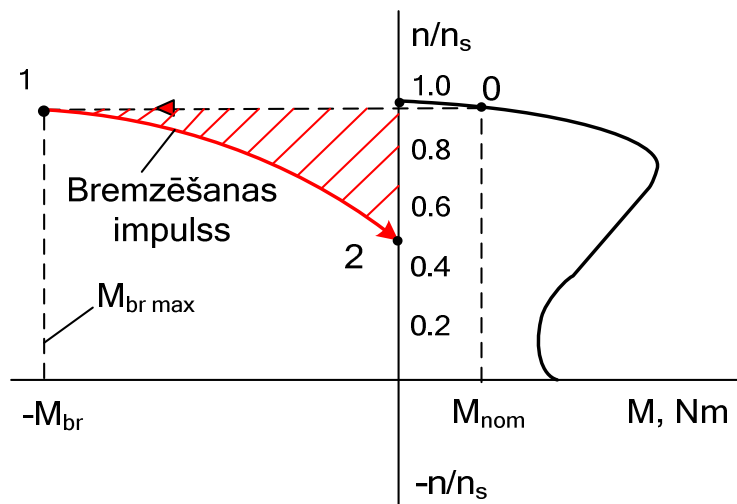
3.3. Kondensatoru un magnētiskā bremsēšana

3.3.1. Kondensatoru bremsēšanas raksturlīknes un shēmas

Bremzēšanu realizē ar elektrodzinēja tinumiem pastāvīgi pieslēgtiem **kondensatoriem**, kas parasti savienoti **trīsstūra slēgumā** vai tos pieslēdz ar palaidēju pēc elektrodzinēja atslēgšanas no elektriskā tīkla.

Bremzējošo momentu rada kondensatoru izlādes strāva, kas plūst statora tinumos un rada lēni rotējošu magnētisko lauku. Elektrodzinējs pāriet ģenerators režīmā. Bremsēšanas efekts izbeidzas, kad elektrodzinēja rotācijas ātrums samazinās līdz magnētiskā lauka rotācijas ātrumam.

Pārejot no darba režīma (**punkts 0**) uz bremzēšanas režīmu (**punkts1**), rodas bremzējošā momenta pīķis M_{brmax} (3.8.att), kurš pie lielām kondensatoru kapacitātēm var **seškārtīgi** pārsniegt nominālo momentu. Līdz ar to bremzēšana ir trieciena veida un tā izraisa strauju rotora kinētiskās enerģijas absorbciju. Krītoties rotācijas ātrumam līdz $n \approx 0.4n_s$, bremzējošais moments samazinās līdz nullei.



3.8. att. **Kondensatoru bremzēšanas mehāniskā raksturlīkne $n/n_s = f(M_{br})$.**

Bremzēšanas momenta raksturlīknes dažādām kondensatoru kapacitātēm parādītas 3.9. attēlā. Par nominālo kapacitāti C_{nom} tiek uzskatīta tāda trīsstūra slēguma vienā fāzē ieslēgta kondensatora kapacitāte, kas pilnībā **kompensē** dotā elektrodzinēja strāvas **induktīvo komponenti**. Palielinot kondensatoru kapacitāti, pieaug maksimālais bremzēšanas moments un bremzēšana turpinās līdz zemākam rotācijas ātrumam. Optimālo kapacitāti izvēlas robežās $C_{opt} = 4...6C_{nom}$.

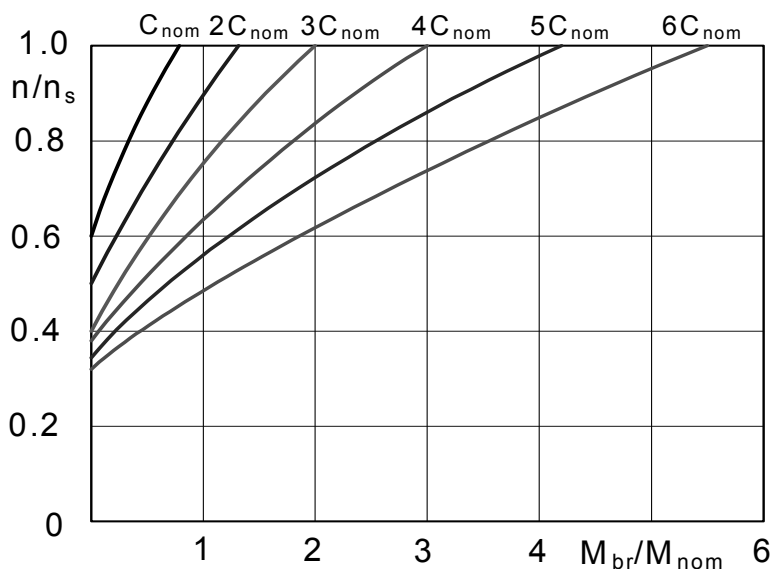
Trīsstūra slēgumā savienotu kondensatoru nominālo kapacitāti mikrofāros (μF) vienai fāzei, ja elektriskā tīkla frekvence ir 50 Hz, var aprēķināt pēc formulām:

$$C_{nom} = 1840 \frac{I_{\mu}}{U_l}, \quad I_{\mu} = \frac{U_f}{X_{\mu}}, \quad U_f = \frac{U_l}{\sqrt{3}}, \quad (3.8)$$

kur I_{μ} - elektrodzinēja magnetizācijas (ideālas tukšgaitas) strāva, A;

U_l - līnijas spriegums, V; U_f - zvaigznes slēguma fāzes spriegums, V;

X_{μ} - elektrodzinēja magnetizācijas ķēdes induktīvā pretestība, Ω .



3.9. att. Kondensatoru bremzēšanas mehāniskās raksturīgnes $n/n_s = f(M_{br}/M_{nom})$ atkarībā no kondensatoru kapacitātes.

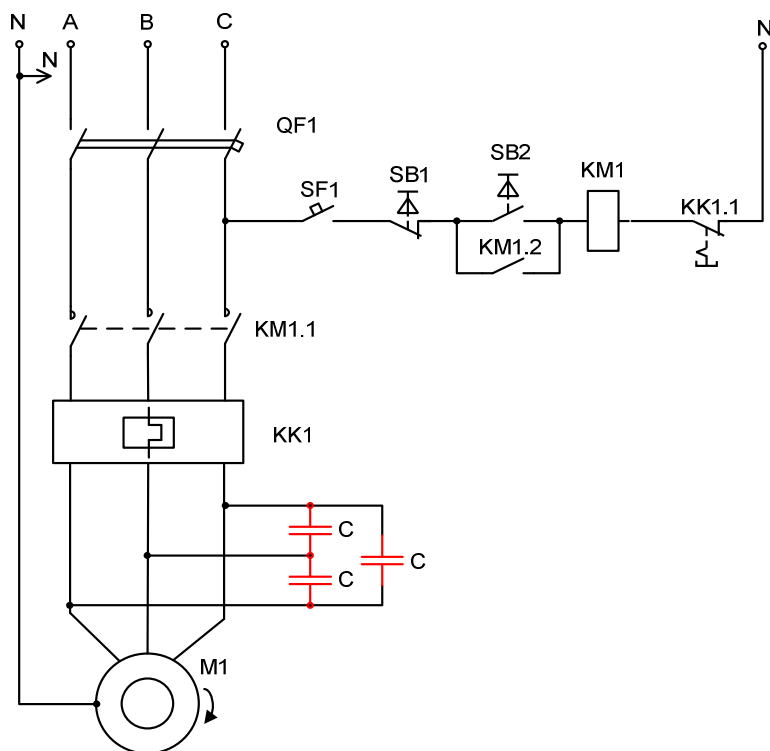
Dažu mazas un vidējas jaudas trīsfāzu asinhrono elektrodzinēju bremzēšanas kondensatoru nominālās kapacitātes, kas aprēķinātas pēc formulām (3.8.), ja līnijas spriegums $U_l = 380 \text{ V}$, dotas 3.1. tabulā.

3.1. tabula

Bremzēšanas kondensatoru kapacitātes izvēle atbilstoši elektrodzinēja datiem

Nr. p. k.	Trīsfāzu asinhronais elektrodzinējs	Jauda P_{nom} , kW	I_{nom} , A	$X\mu$, Ω	C_n , μF	C_{opt} , μF
1.	4A71A4	0.55	1.55	203	5.2	20....30
2.	4A80B4	1.5	3.5	120	8.8	35....50
3.	4A100L4	4	8.3	62	17.1	70....100
4.	4A132M4	10	21	32	33.2	120..180

Mazas jaudas elektrodzinēja ar pastāvīgi pieslēgtiem un trīsstūrī savienotiem kondensatoriem vadības un bremzēšanas elektriskā shēma parādīta 3.10. attēlā.



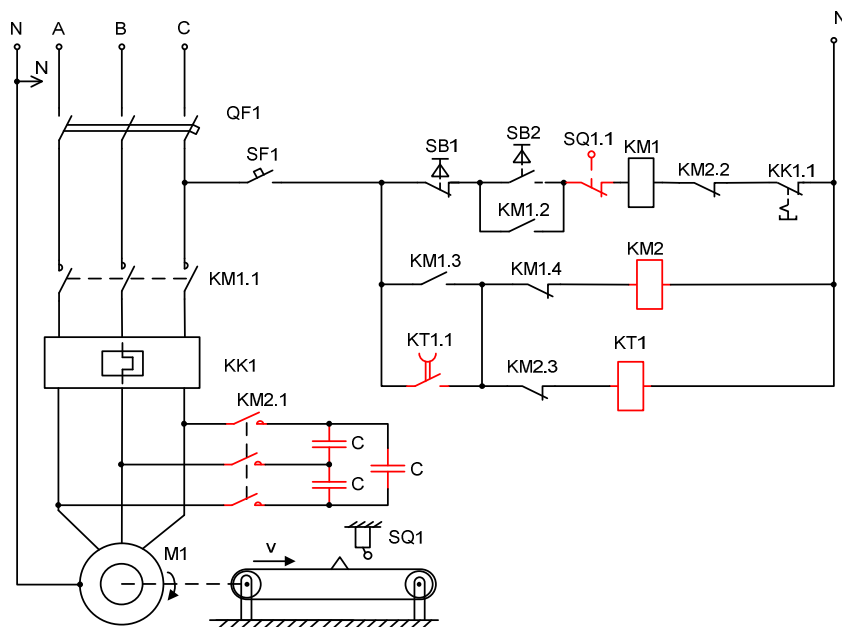
3.10. att. Mazas jaudas asinhronā elektrodzinēja bremsēšanas shēma ar statora tinumiem pastāvīgi pievienotu kondensatoru bateriju.

Ieslēdzot automātslēdzus **QF1** un **SF1**, tiek padots spriegums uz spēka ķēdi un vadības ķēdi. Nospiežot palaidēs-pogu **SB2**, ieslēdzas palaidējs **KM1**. Saslēdzas tā spēka kontakti **KM1.1** un pieslēdz spriegumam elektrodzinēju **M1**, bet kontakts **KM1.2** bloķē palaidēs-pogu **SB2**.

Nospiežot stop-pogu **SB1**, izslēdzas palaidējs **KM1** un atslēdz elektrodzinēju **M1**. Uzlādētie kondensatori **C** sāk izlādēties caur statora tinumiem. To izlādes strāva rada bremsējoša momenta impulsu, kurš absorbē aptuveni 75% no rotējošo masu kinētiskās enerģijas un strauji bremsē rotoru. Lai elektrodzinēju precīzi apturētu, izmantojot kondensatoru bremsēšanas metodi precīzās pozicionēšanas sistēmā, jāievēro sekojošs nosacījums: slodzes momentam jābūt vismaz **30% M_{nom}** . Pretējā gadījumā jāveido kombinētā bremsēšana: **kondensatoru - dinamiskā** vai **kondensatoru-magnētiskā** bremsēšana.

Lielākas jaudas elektrodzinēju bremsēšanai nepieciešama lielas kapacitātes kondensatoru baterija (sk. 3.1. tabulu). To tiešs pieslēgums tinumiem rada reaktīvās

induktīvās jaudas **pārkompensāciju** un kapacitatīvās enerģijas patēriņu. Lai to novērstu, kondensatorus **C** pieslēdz statora tinumiem ar palaidēju **KM2** tūlīt pēc elektrodzinēja atslēgšanas no elektriskā tīkla (3.11. att.).



3.11. att. **Automātiskās bremsēšanas shēma ar kondensatoru baterijas komutāciju pēc elektrodzinēja atslēgšanas no elektriskā tīkla.**

Pusautomātiskā vadība tiek realizēta ar laika releju **KT1** un gala slēdzi **SQ1**. Ieslēdzot automātslēdžus **QF1**, **SF1**, tiek padots spriegums uz spēka ķēdi un vadības ķēdi. Nospiežot palaišanas pogu **SB2**, ieslēdzas vadības palaidējs **KM1**. Tā kontakts **KM1.4** pārtraucas un **neļauj** ieslēgt bremsēšanas palaidēju **KM2**. Kontakti **KM1.1**, **KM1.2** un **KM1.3** saslēdzas. Spēka kontakti **KM1.1** padod spriegumu uz elektrodzinēju **M1**, **KM1.2** bloķē slēdzi **SB2**, bet **KM1.3** ieslēdz laika releju **KT1**. Kontakts **KT1.1** šuntē **KM1.3** un nodrošina bremsēšanas palaidēja **KM2** spoles barošanu pēc palaidēja **KM1** atslēgšanās.

Kad transporta moduļa izcilnis nospiež gala slēdzi **SQ1**, izslēdzas palaidējs **KM1** un atslēdz elektrodzinēju no sprieguma. Saslēdzas **KM1.4** un caur kontaktu **KT1.1** ieslēdzas palaidējs **KM2**. Pārtraucas **KM2.3** un laika relejs sāk kavētu izslēgšanos, bet spēka kontakti **KM2.1** pieslēdz statora tinumiem kondensatorus **C**.

Sabrūkošais magnētiskais lauks pārlādē kondensatorus un tinumos plūstošā strāva strauji bremzē elektrodzinēju. Bremzēšanas procesa beigās laika relejs izslēdzas, pārtraucas kontakts **KT1.1** un atslēdz palaidēju **KM2**.

Kondensatoru bremzēšanas veida novērtējums.

Priekšrocības:

- liels sākuma bremzējošais moments, kas nodrošina strauju rotācijas ātruma samazinājumu un inerciālo masu kinētiskās enerģijas efektīvu absorbciju;
- nav nepieciešams papildus enerģijas avots, mazi elektroenerģijas zudumi, lēta tehniskā realizācija, augsts drošums un vienkāršas apkopes.

Trūkumi:

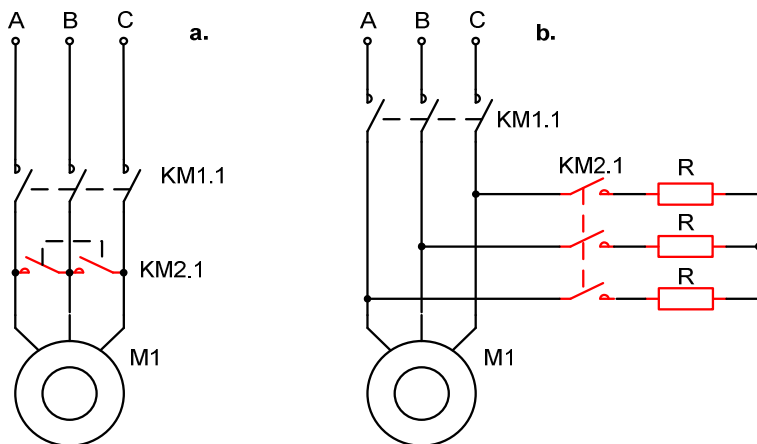
- sakarā ar lielo trieciena momentu bremzēšanas sākumā, pielietojams tikai mazas jaudas un nelielas inerces elektrisko piedziņu bremzēšanai;
- bremzēšanas efekts darbojas īslaicīgi un pilnīgi izbeidzas kad rotācijas ātrums samazinās līdz $n \leq 0.4 n_s$.

3.3.2. Magnētiskās bremzēšanas raksturlīknes un shēmas

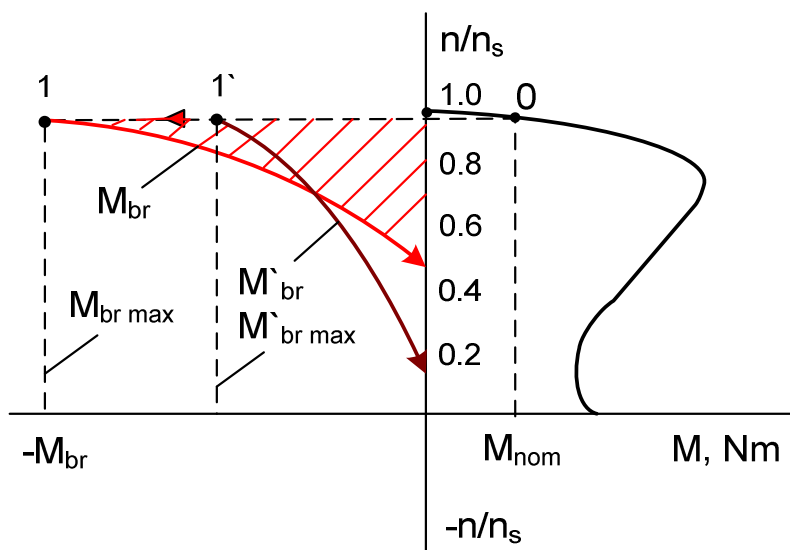
Bremzēšanas momentu rada elektrodzinēja tinumos akumulētā magnētiskā enerģija. Ja atslēdzot elektrodzinēju no elektriskā tīkla, tā statora tinumus saslēdz īsi (3.12.a att.), tad sabrūkošais magnētiskais lauks tajos inducē stipru strāvu, kas rada lielu bremzējošo trieciena momentu – $M_{br \max} = 4...7M_{nom}$ (3.13. att.), pie kam elektrodzinējs intensīvi bremzējas tikai **0.02...0.06 s**, jo īssavienojuma strāva tinumos ātri samazinās līdz nullei. Taču, ņemot vērā lielo bremzēšanas sākuma momentu, mazas jaudas (**līdz 1kW**) un mazas inerces ($J_{slodzes} \leq 2 J_{el.dzin.}$) elektriskajā piedziņā šajā īsajā laikā tiek absorbēts vairāk kā **85%** kinētiskās enerģijas, kas nodrošina elektrodzinēja strauju apturēšanu.

Lai ierobežotu momenta pīķi **1.5...2** reizes un lai samazinātu mehāniskos triecienus pārvados, lielākas jaudas elektrodzinēju (**virs 1 kW**) bremzēšanas ķēdē slēdz rezistorus, kuru pretestību **R** izvēlas atkarībā no dotā elektrodzinēja tinumu aktīvās pretestības **R1** (**$R = 4...5R1$**) (3.12.b att.). Izmantojot rezistorus **R**, samazinās maksimālais moments M_{brmax} , bet kopējais bremzēšanas efekts paliek nemainīgs, jo palielinās bremzēšanas momenta M_{br} darbības laiks (3.13. att.).

Magnētiskai bremsēšanai ir līdzīgas priekšrocības un trūkumi kā kondensatoru bremsēšanai, taču pozitīvās īpašības ir vairāk izteiktas, jo vienādu bremsēšanas efektu var panākt ar vienkāršākiem līdzekļiem un mazākiem enerģijas zudumiem.



3.12. att. **Asinhronā elektrodzinēja magnētiskā bremsēšana:**
a - statora tinumus saslēdzot īsi; b - izmantojot balasta rezistorus.

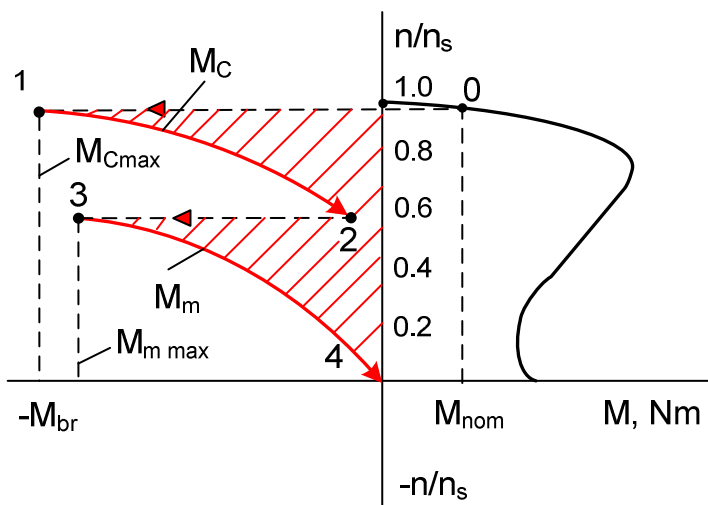


3.13. att. **Magnētiskās bremsēšanas mehāniskās raksturlīknes:**
 $n/n_s = f(M_{br})$ - tinumi savienoti īsi; $n/n_s = f(M'_{br})$ - tinumi savienoti caur balasta rezistoriem.

3.4. Trīsfāzu asinhrono elektrodzinēju kombinētā bremsēšana

3.4.1. Kondensatoru - magnētiskā bremsēšana

Ja kondensatoru bremsēšana nenodrošina vajadzīgo efektu, to kombinē ar magnētisko bremsēšanu. **Kondensatoru-magnētiskās** bremsēšanas mehāniskās raksturlīknes parādītas 3.14. attēlā. Pārejot no darba režīma (**punkts 0**) uz bremsēšanas režīmu (**punkts1**), vispirms rodas kondensatoru izlādes strāvas bremsējošā momenta pīķis $M_{C \max}$. Kondensatoru kapacitāti parasti izvēlas vienādu ar $4 C_{nom}$. Kad kondensatoru spriegums samazinās līdz minimumam (**punkts2**), ko kontrolē ar sprieguma releju, tiek ieslēgta magnētiskā bremsēšana (**punkts 3**).



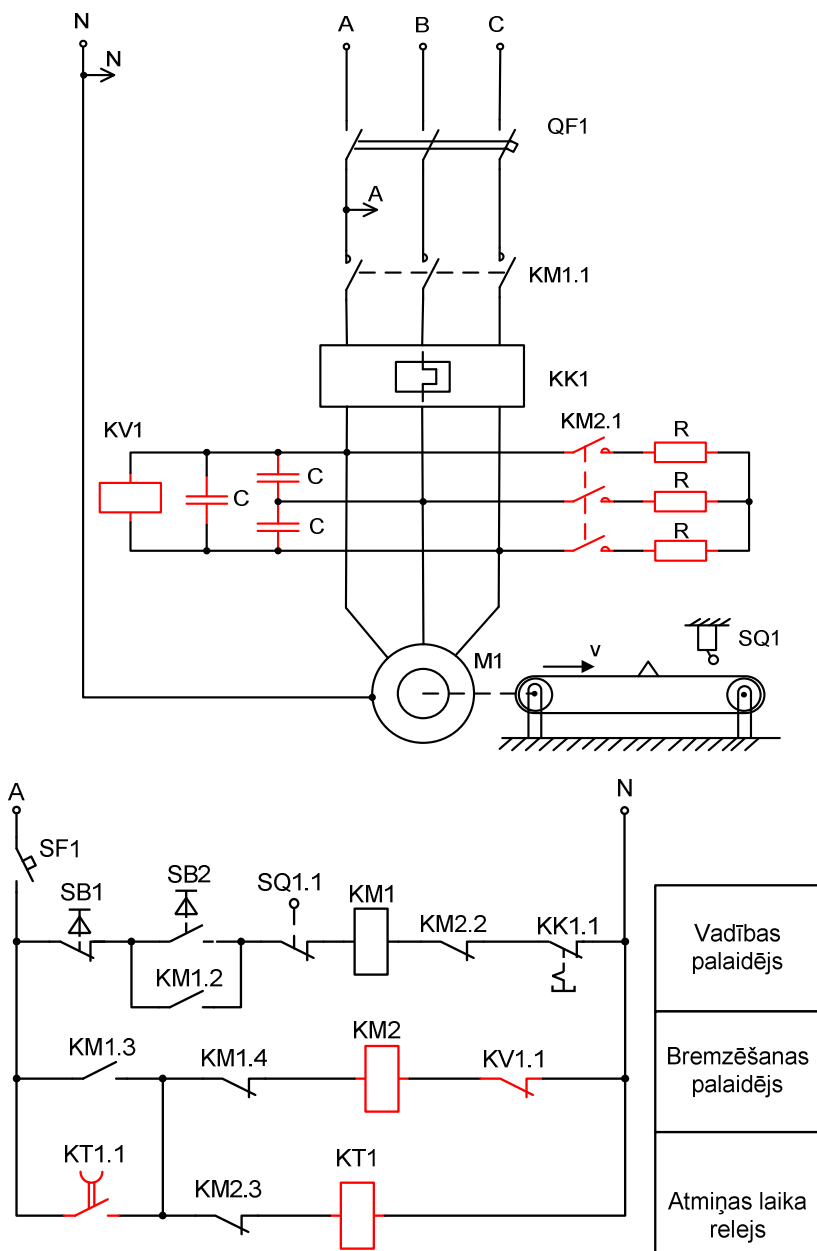
3.14. att. **Kombinētās bremsēšanas mehāniskās raksturlīknes:**

$n/n_s = f(M_C)$ - kondensatoru bremsēšana; $n/n_s = f(M_m)$ - magnētiskā bremsēšana.

Kondensatoru izlādes strāvas tinumos magnētiskais lauks rada magnētiskās bremsēšanas momenta pīķi $M_{m \max}$, kurš nodrošina otro bremsēšanas etapu. Kondensatoru-magnētiskās bremsēšanas elektriskā shēma parādīta 3.15. attēlā.

Lai automātiski vadītu bremsēšanas procesu, elektrodzinēja spēka ķēdē paralēli kondensatoram **C** pievienota sprieguma releja spole **KV1**. Palaidējs **KM2** komutē magnētiskās bremsēšanas ķēdi ar rezistoriem **R**, bremsēšanas pīķa ierobežošanai.

Vadības shēmā, kas līdzīga 3.11. attēlā parādītajai, virknē ar palaidēja **KM2** spoli slēgts sprieguma releja atslēdzošais kontakts **KV1.1**.



3.15. att. **Kombinētās kondensatoru - magnētiskās bremsēšanas spēka shēma un vadības shēma ar sprieguma releju KV1 un atmiņas laika releju KT1.**

Ieslēdzot automātslēdžus **QF1**, **SF1**, tiek padots spriegums uz spēka ķēdi un vadības ķēdi. Nospiežot palaides-pogu **SB2**, ieslēdzas vadības palaidējs **KM1**. Tā kontakts **KM1.4** pārtraucas un **neļauj** ieslēgt bremsēšanas palaidēju **KM2**. Kontakti

KM1.1, **KM1.2** un **KM1.3** saslēdzas. Spēka kontakti **KM1.1** padod spriegumu uz elektrodzinēju **M1**, **KM1.2** blokē slēdzi **SB2**, bet **KM1.3** ieslēdz laika releju **KT1**, kurš sagatavo darbam bremsēšanas palaidēju **KM2**. Kondensatoru **C** spriegums ieslēdz releju **KV1**. Pārtraucas **KV1.1** un neļauj ieslēgt magnētisko bremsēšanu kondensatoru bremsēšanas laikā.

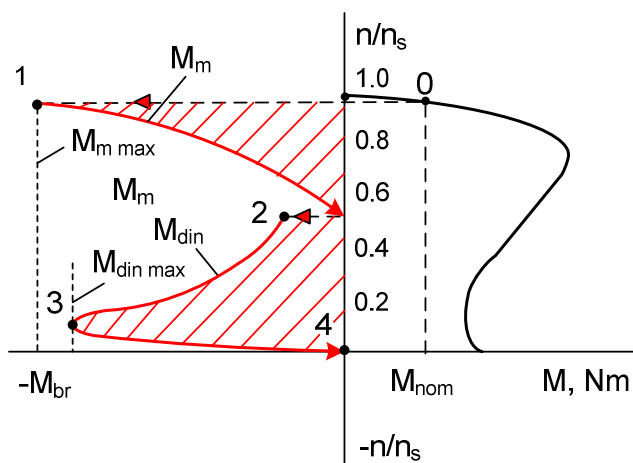
Kad transporta moduļa izcilnis nospiež gala slēdzi **SQ1**, izslēdzas palaidējs **KM1**, atslēdz elektrodzinēju no sprieguma un sākas kondensatoru bremsēšana. Bremsēšanas procesa beigās atslēdzas sprieguma relejs **KV1** un saslēdzas tā kontakts **KV1.1**. Caur **KT1.1**, **KM1.4** un **KV1.1** ieslēdzas palaidējs **KM2** un sākas magnētiskā bremsēšana. Beidzoties bremsēšanas procesam, laika relejs **KT1** izslēdzas, pārtraucas kontakts **KT1.1** un atslēdz palaidēju **KM2**.

Kondensatoru-magnētisko bremsēšanu izmanto mazas inerces elektrisko piedziņu ar jaudu līdz **10 kW** precīzai pozicionēšanai. Izvēloties atbilstošus bremsēšanas ķēžu parametrus – kondensatoru kapacitāti $C \approx 4C_{nom}$ un rezistoru pretestību $R \approx 4R1$, var iegūt bremsēšanas laiku $t_{br} \approx 0.05...0.08$ s. Bremsēšanas laikā elektrodzinēja vārpsta pagriežas ne vairāk kā par **0.5...1** apgriezienam.

3.4.2. Magnētiskā - dinamiskā bremsēšana

Sākumā darbojas **magnētiskā bremsēšana**, pēc tam tiek aktivizēta **dinamiskā bremsēšana**, izmantojot rotācijas ātruma kontroles slēdzi. Pārejot no darba režīma (**punkts 0**) uz bremsēšanas režīmu (**punkts 1**), vispirms rodas magnētiskās bremsēšanas momenta pīķis $M_{m\ max}$. Kad rotācijas ātrums samazinās līdz $n \approx 0.5n_s$, nostrādā rotācijas slēdzis, atslēdzas magnētiskā bremsēšanā un tiek ieslēgta dinamiskā bremsēšana (**punkts 2**), kuras maksimālais moments (**punkts 3**) $M_{din\ max}$ tiek sasniegts, kad rotācijas ātrums samazinās līdz $n \approx 0.05n_s$ (3.16. att.).

Ieslēdzot automātslēdžus **QF1**, **SF1**, tiek padots spriegums uz spēka ķēdi un vadības ķēdi. Nospiežot palaides-pogu **SB2**, ieslēdzas vadības palaidējs **KM1**. Tā kontakts **KM1.3** pārtraucas un neļauj ieslēgt bremsēšanas palaidējus **KM2**, **KM3**. Kontakti **KM1.1** un **KM1.2** saslēdzas. Spēka kontakti **KM1.1** padod spriegumu uz elektrodzinēju **M1**, bet **KM1.2** blokē slēdzi **SB2**. Kad elektrodzinējs iedarbinās, rotācijas slēdzis **SR1** ieslēdz starpreleju **K1**, saslēdzas **K1.1** un sagatavo darbam magnētiskās bremsēšanas palaidēju **KM2**.



3.16. att. **Kombinētās bremsēšanas mehāniskās raksturlīknes:**
 $n/n_s = f(M_m)$ – magnētiskā bremsēšana; $n/n_s = f(M_{din})$ – dinamiskā bremsēšana.

Nospiežot stop-pogu **SB1**, izslēdzas palaidējs **KM1** un atslēdz elektrodzinēju no sprieguma. Kontakts **KM1.3** saslēdzas un ieslēdz magnētiskās bremsēšanas palaidēju **KM2**. Pārtraucas kontakti **KM2.2**, **KM2.4** un **neļauj** ieslēgt palaidējus **KM1** un **KM3**, bet kontakti **KM2.1** un **KM2.3** saslēdzas. **KM2.1** ieslēdz magnētisko bremsēšanu, bet **KM2.3** - laika releju **KT1**, kurš iegaumē, ka sācies bremsēšanas process.

Samazinoties rotācijas ātrumam, rotācijas slēdzis **SR1** atslēdz **K1** un **KM2**. Atslēdzas magnētiskā bremsēšana, bet caur **KT1.1**, **KM2.4** un **KM1.3** ieslēdzas palaidējs **KM3** un sākas dinamiskā bremsēšana. Pārtraucas **KM3.3** un sākas laika releja **KT1** atlaišanās. Dinamiskās bremsēšanas beigās izslēdzas laika relejs **KT1**, pārtraucas kontakts **KT1.1** un atslēdz bremsēšanas palaidēju **KM3**.

4. Regulējamā asinhronā elektriskā piedziņa

4.1. Rotācijas ātruma regulēšana ar polu skaita maiņu

Pirmajā nodaļā tika noskaidrots, ka asinhronā elektrodzinēja rotācijas ātrumu n var izmainīt divējādi:

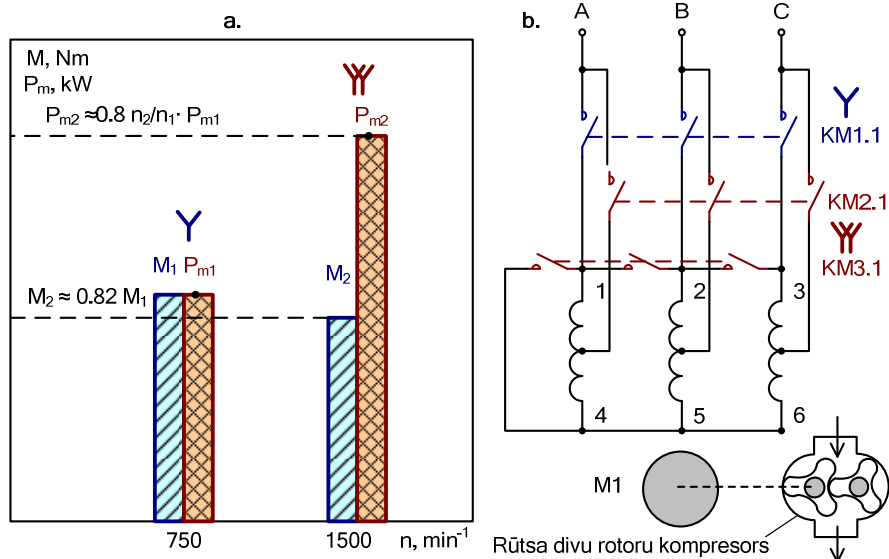
- mainot statora tinuma polu pāru skaitu p ;
- mainot barošanas sprieguma frekvenci f .

Polu pāru skaitu p var izmainīt vairāku ātrumu elektrodzinējiem, mainot tinumu spoļu slēgumus. Šādi elektrodzinēji tiek baroti no trīsfāzu maiņstrāvas tīkla ar nemainīgu spriegumu $U = \text{const.}$ un frekvenci $f = \text{const.}$ Asinhronā elektrodzinēja rotācijas ātrumu un polu pāru skaitu saista sekojoša izteiksme:

$$n \cdot p = 60 \cdot f \cdot (1 - s). \quad (4.1)$$

Ja elektrodzinēja slīde $s = 1 - n/n_s = \text{const.}$ un $f = \text{const.}$, tad $n \cdot p = \text{const.}$ Pie šādiem nosacījumiem **rotācijas ātrums n ir apgriezti proporcionāls polu pāru skaitam p** . Palielinot p 2 reizes, rotācijas ātrums n tikpat reizi samazinās – un otrādi.

Asinhronā elektrodzinēja rotācijas ātruma divkārtējai izmaiņai tiek izmantotas **Dālandera shēmas** -tinumu spoļu **zvaigznes-dubultās zvaigznes (Y/YY)** slēgums (4.1. att.) un **trīsstūra-dubultās zvaigznes (Δ /YY)** slēgums (4.2. att.).



4.1. att. Divu ātrumu elektriskā piedziņa ar zvaigznes - dubultās zvaigznes slēgumu:
a - momenta un jaudas diagrammas; b - elektriskā shēma.

Elektrodzinēji ar **zvaigznes-dubultās zvaigznes** slēgumu piemēroti tādu mehānismu piedziņai, kuru pieprasītais moments praktiski nemainās no rotācijas ātruma, bet jauda palielinās tieši proporcionāli rotācijas ātrumam, piemēram, konveijeri, transportieri, celšanas un padeves mehānismi, kā arī Rūtsa divu rotoru kompresori (4.1.b att.), kurus plaši izmanto notekūdeņu bioloģiskās attīrīšanas ietaisēs. Apskatīsim konkrēta elektrodzinēja kataloga datus.

Piemērs. Divu ātrumu asinhronais elektrodzinējs: **M2CA 280 SMA, Y/YY, 8/4.**

Kataloga dati. 1. Mazajam ātrumam: $n_{s1}=750\text{min}^{-1}$; $2p_1=8$ (8 poli); $P_{m1}=40\text{kW}$;

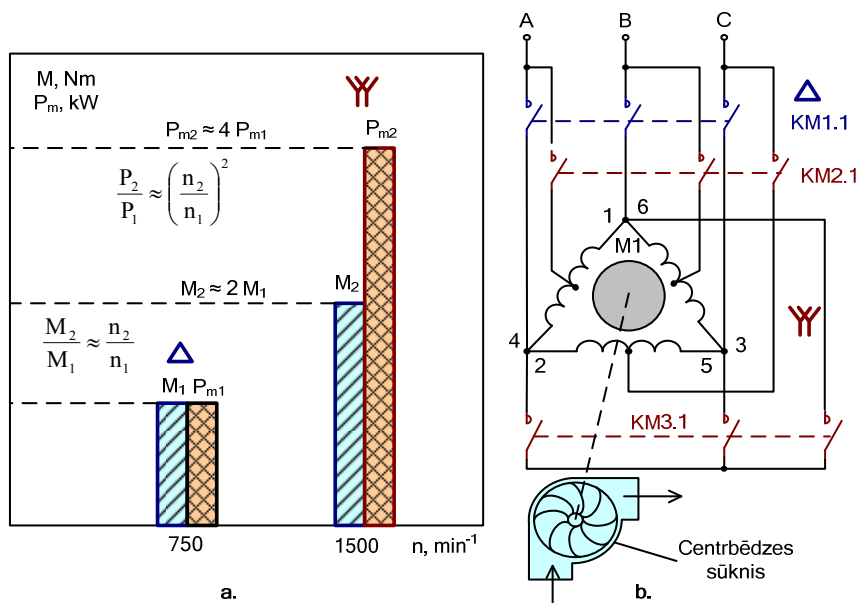
$M_1=514\text{Nm}$; $I_1=92\text{A}$; $n_1=743\text{min}^{-1}$; $\cos\varphi_1=0.69$; $\eta_1=0.92$, $I_{\text{pal1}}/I_1=7.7$.

2. Lielajam ātrumam: $n_{s2}=1500\text{min}^{-1}$; $2p_1=4$ (4 poli); $P_{m2}=65\text{kW}$;

$M_2=420\text{Nm}$; $I_2=115\text{A}$; $n_2=1486\text{min}^{-1}$; $\cos\varphi_2=0.88$; $\eta_2=0.93$, $I_{\text{pal2}}/I_2=7.7$.

Salīdzināšanai noteiksim datu relatīvo attiecību: $n_{s2}/n_{s1}=1500/750=2$; $P_{m2}/P_{m1}=65/40=1.63$; $M_2/M_1=420/514=0.82$; $I_2/I_1=115/92=1.25$; $\cos\varphi_2/\cos\varphi_1=0.88/0.69=1.28$.

Zvaigznes-dubultās slēgumā elektrodzinēja moments no ātruma izmainās maz, bet jauda mainās gandrīz proporcionāli ātrumam (4.1.a att.). Elektrodzinēju palaiž **Y-slēgumā** pie mazākas jaudas un zemākas palaišanas strāvas ar palaidēju **KM1**. Atslēdzot palaidēju **KM1**, var ieslēgt palaidējus **KM2** un **KM3** (4.1.b att.).



4.2. att. Divu ātrumu elektriskā piedziņa ar trīsstūra - dubultās zvaigznes slēgumu:
a - momenta un jaudas diagrammas; b - elektriskā shēma.

Kontakti **KM2.1** pieslēdz spriegumam tinumu viduspunktus, bet kontakti **KM3.1** savieno īsi tinumu sākumus un beigas, veidojot dubultās zvaigznes **YY** –slēgumu.

Elektrodzinēja mehānisko jaudu var aprēķināt pēc jaudas formulas: $P_{m1} = 3 \cdot I_1 \cdot U_{f1} \cdot \cos \varphi_1 \cdot \eta = 3 \cdot 92 \cdot 220 \cdot 0.69 \cdot 0.92 = 38550 \text{ W} = 39 \text{ kW}$, kur U_{f1} - fāzes spriegums.

Elektrodzinēji ar **trīsstūra-dubultās zvaigznes** slēgumu piemēroti turbo mehānismu piedziņai, kuru pieprasītais moments mainās **proporcionāli rotācijas ātrumam**, bet jauda palielinās tieši **proporcionāli rotācijas ātruma kvadrātam**, piemēram, centrifūgas, centrālās ventilatori un kompresori, kā arī centrālās sūkņi (4.2.b att.), kurus plaši izmanto ūdensapgādes un kanalizācijas sistēmās.

Salīdzināsim divu ātrumu elektrodzinēja ar Δ/YY -slēgumu kataloga datus.

Piemērs. Divu ātrumu asinhronais elektrodzinējs: **M2CA 280 SMA, Δ/YY , 8/4.**

Kataloga dati. 1. Mazajam ātrumam: $n_{s1} = 750 \text{ min}^{-1}$; $2p_1 = 8$ (8 poli); $P_{m1} = 20 \text{ kW}$;

$M_1 = 257 \text{ Nm}$; $I_1 = 50 \text{ A}$; $n_1 = 743 \text{ min}^{-1}$; $\cos \varphi_1 = 0.63$; $\eta_1 = 0.915$; $I_{pa1}/I_1 = 5.4$.

2. Lielajam ātrumam: $n_{s2} = 1500 \text{ min}^{-1}$; $2p_1 = 4$ (4 poli); $P_{m2} = 80 \text{ kW}$;

$M_2 = 514 \text{ Nm}$; $I_2 = 150 \text{ A}$; $n_2 = 1486 \text{ min}^{-1}$; $\cos \varphi_2 = 0.83$; $\eta_2 = 0.938$; $I_{pa2}/I_2 = 8.4$.

Noteiksim galveno datu attiecību abiem ātrumiem: $n_{s2}/n_{s1} = 1500/750 = 2$; $P_{m2}/P_{m1} = 80/20 = 4$; $M_2/M_1 = 514/257 = 2$; $I_2/I_1 = 150/50 = 3$; $\cos \varphi_2 / \cos \varphi_1 = 0.83/0.63 = 1.32$. Ja rotācijas ātrums palielinās 2-reizes, moments arī pieaug 2-reizes, bet jauda – četrkārtīgi. Tātad $M_2/M_1 = n_2/n_1$ un $P_{m2}/P_{m1} = (n_2/n_1)^2$ - moments ir tieši proporcionāls rotācijas ātrumam, bet jauda – tā kvadrātam (4.2.a att.).

Elektrodzinēju palaiž ar palaidēju **KM1 Δ -slēgumā**, jo palaišanas strāva trīsstūrī ir ($I_{pa1} = 5.4 \cdot I_1 = 5.4 \cdot 50 = 270 \text{ A}$) ir mazāka par palaišanas strāvu dubultās zvaigznes slēgumā ($I_{pa2} = 8.4 \cdot I_2 = 8.4 \cdot 150 = 1260 \text{ A}$) 4.7-reizes.

Atslēdzot palaidēju **KM1**, var ieslēgt palaidējus **KM2** un **KM3** (4.2.b att.). Kontakti **KM2.1** pieslēdz spriegumam tinumu viduspunktus, bet kontakti **KM3.1** savieno īsi **Δ -slēguma** virsotnes, veidojot dubultās zvaigznes **YY** –slēgumu.

4.2. Rotācijas ātruma regulēšana ar frekvences maiņu

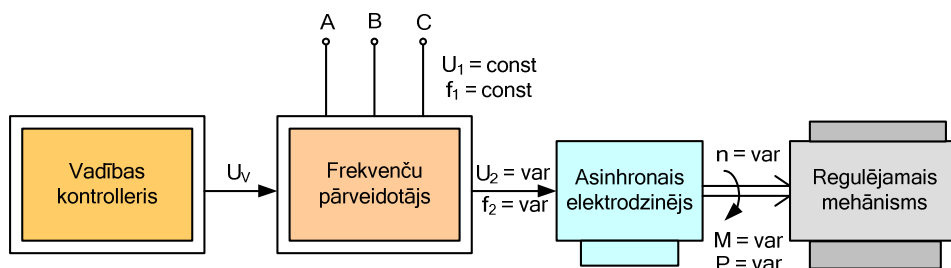
Perspektīvs un plaši pielietots asinhronās elektriskās piedziņas rotācijas ātruma regulēšanas veids – ar barošanas sprieguma frekvences maiņu. Elektrodzinējs tiek barots no regulējamās elektroniskās iekārtas-frekvenču pārveidotāja, kurš pārveido elektriskā tīkla nemainīgo spriegumu $U_1 = \text{const.}$ ar nemainīgu frekvenci $f_1 = \text{const.}$ mainīgā spriegumā $U_2 = \text{var.}$ Ar mainīgu frekvenci $f_2 = \text{var.}$ (4.3. att.).

Mainot asinhronā elektrodzinēja barošanas sprieguma frekvenci f , mainās magnētiskā lauka sinhronais rotācijas ātrums un līdz ar to mainās arī elektrodzinēja rotora asinhronais rotācijas ātrums:

$$n / f = 60 \cdot (1 - s) / p. \quad (4.2)$$

Ja elektrodzinēja slīde $s = \text{const.}$ un polu pāru skaits $p = \text{const.}$, tad attiecība $n/f = \text{const.}$ Pie šādiem nosacījumiem **rotācijas ātrums n ir tieši proporcionāls barošanas sprieguma frekvencei f .**

Frekvenču regulējamā elektriskā piedziņa sastāv no **vadības kontrollera**, kurš parasti ir iebūvēts frekvenču pārveidotājā, paša **frekvenču pārveidotāja** un **asinhronā elektrodzinēja**, kurš darbina regulējamo mehānismu, piemēram, sūkni (4.3. att.). Atkarībā no slodzes rakstura, vienlaicīgi ar frekvenci f_2 tiek regulēts arī spriegums U_2 . Tas nodrošina frekvenču regulējamās elektriskās piedziņas vislabākos enerģētiskos rādītājus.



4.3. att. **Frekvenču regulējamās elektriskās piedziņas funkcionālā shēma.**

Frekvenču metodes galvenās priekšrocības:

- iespēja vienmērīgi regulēt elektrodzinēja rotācijas ātrumu plašās robežās kā zem nominālās vērtības, tā virs tās;
- iegūst stabilas (cietas) elektrodzinēja mehāniskās raksturlīknes, kuras var ideāli saskaņot ar mehānisma raksturlīknēm, mainot vienlaicīgi spriegumu U_2 un frekvenci f_2 atbilstoši slodzes izmaiņas likumam;
- augsti enerģētiskie un ekonomiskie rādītāji (augsts lietderības koeficients, liels elektroenerģijas ietaupījums salīdzinot ar neregulējamo elektrisko piedziņu);
- iespēja veidot drošas tehnoloģisko iekārtu elektriskās piedziņas automātiskās regulēšanas sistēmas ar augstu darbības stabilitāti un energoefektivitāti.

4.3. Sprieguma un frekvences regulēšanas likumi

Lai iegūtu regulējamās elektriskās piedziņas augstu lietderības koeficientu η un aktīvās jaudas koeficientu $\cos \varphi$, vienlaicīgi ar barošanas sprieguma frekvenci f regulē arī sprieguma lielumu U .

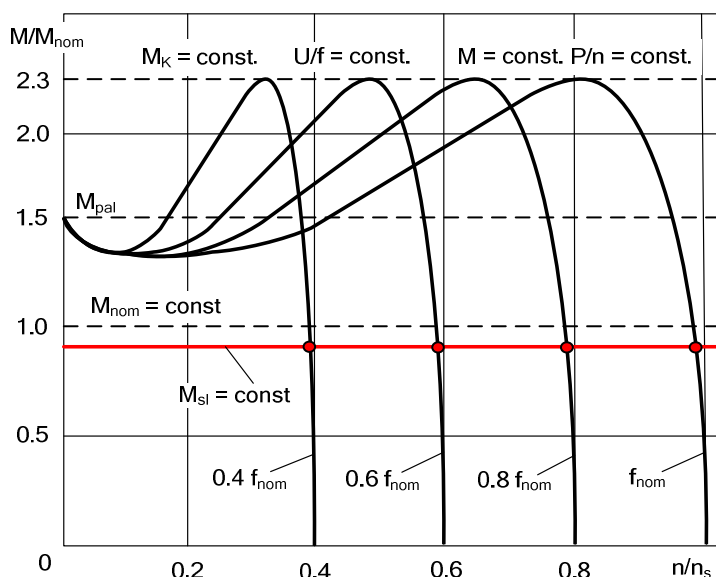
Kā sprieguma regulēšanas kritēriju izvēlas elektrodzinēja pārslodzes spēju, ko izsaka ar koeficientu - $k_m = M_k / M_{sl}$, kur M_k – kritiskais moments, Nm; M_{sl} – slodzes moments, Nm. Lai iegūtu iespējami augstu elektriskās piedziņas lietderības koeficientu visā frekvences un rotācijas ātruma regulēšanas apgabalā, jāizpilda sekojošs nosacījums:

$$k_m = M_{k1} / M_{sl1} = M_{k2} / M_{sl2} = const., \quad (4.3)$$

kur indeksi „1” un „2” atbilst divām dažādām frekvencēm f_1 un f_2 , un diviem dažādiem rotācijas ātrumiem n_1 un n_2 . Kritisko momentu var tuvināti izteikt ar spriegumu un frekvenci: $M_k \approx \mu \cdot U^2 / f^2$, kur μ – dotā elektrodzinēja konstante. Tad no (4.3) iegūst sprieguma regulēšanas likumu:

$$U_2 / U_1 = f_2 / f_1 \cdot \sqrt{M_{sl2} / M_{sl1}}. \quad (4.4)$$

Konstantai slodzei ($M_{sl} = const.$) spriegumu regulē proporcionāli frekvencei (4.4. att.).



4.4. att. Asinhronā elektrodzinēja mehāniskās raksturlīknes – $M = f(n/n_s)$, ja spriegums U tiek regulēts proporcionāli frekvencei f ($U/f = const.$).

ievietojot izteiksmē (4.4) $M_{s12}/M_{s11}=1$, iegūst sprieguma regulēšanas likumu:

$$U_2/U_1 = f_2/f_1 \quad \text{jeb} \quad U/f = \text{const} \quad (4.5)$$

Elektrodzinēja palaides moments, kritiskais moments un nominālais moments nemainās no frekvences un rotācijas ātruma. **Ja moments ir konstants**, tad elektrodzinēja **jauda mainās tieši proporcionāli rotācijas ātrumam: $P/n = \text{const}$** .

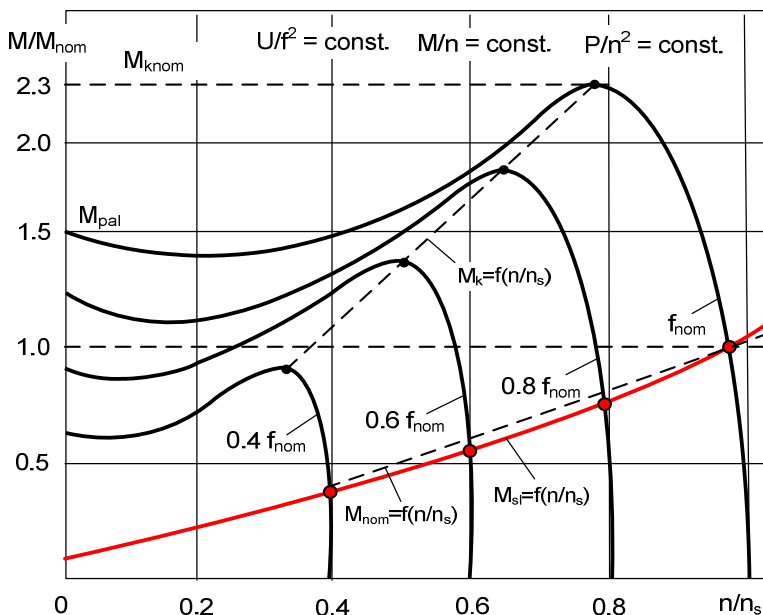
Šāds regulēšanas veids ir ideāls elektrodzinējiem ar konstantu slodzi.

Centrbēdzes mehānismi rada tā saucamo ventilatora slodzi, kuras moments mainās proporcionāli rotācijas ātruma kvadrātam, tātad tas mainās arī proporcionāli sprieguma frekvences kvadrātam. Ievietojot izteiksmē (4.4) $M_{s12}/M_{s11} = (f_2/f_1)^2$, iegūst sprieguma regulēšanas likumu ventilatora slodzei:

$$U_2/U_1 = f_2^2/f_1^2 \quad \text{jeb} \quad U/f^2 = \text{const} \quad (4.6)$$

Elektrodzinēja **moments mainās tieši proporcionāli** sprieguma frekvencei un **rotācijas ātrumam - $M/n = \text{const.}$** , bet **jauda - tieši proporcionāli** sprieguma frekvences un **rotācijas ātruma kvadrātam: $P/n^2 = \text{const.}$** (4.5. att.)

Šāds regulēšanas veids ir atbilstošs elektrodzinējiem ar ventilatora slodzi.



4.5. att. Asinhronā elektrodzinēja mehāniskās raksturlīknes – $M = f(n/n_s)$, ja spriegums tiek regulēts proporcionāli frekvences kvadrātam ($U/f^2 = \text{const.}$).

4.4. Pusvadītāju frekvenču pārveidotāji

4.4.1. Frekvenču pārveidotāju uzbūve un darbība

Frekvenču pārveidotāji formē trīsfāzu spriegumu ar regulējamu efektīvo vērtību un frekvenci no elektriskā tīkla sinusoidālā sprieguma divos veidos.

Tiešie frekvenču pārveidotāji jauno maiņspriegumu formē no elektriskā tīkla sinusoidālā sprieguma pozitīvajiem un negatīvajiem pusvilņiem, izmantojot pusvadītāju slēdžus – **tiristorus**. Formējamā izejas **sprieguma lielumu maina ar tiristoru atvēršanas leņķi**. Izejas sprieguma **frekvenci regulē, mainot ieejas sprieguma pusvilņu skaitu un kombināciju** vienā izejas sprieguma periodā.

Neskatoties uz dažām priekšrocībām, piemēram, notiek tikai vienreizēja enerģijas pārveidošana ar maziem zudumiem, var notikt brīva reaktīvās jaudas apmaiņa starp elektrodzinēju un elektrisko tīklu, **tiešajiem frekvenču pārveidotājiem ir būtiski trūkumi**:

- liels spēka elektronikas elementu - **tiristoru** skaits (6-uz katru fāzi) un sarežģīta vadības shēma;
- izejas sprieguma frekvenci var regulēt tikai zem elektriskā tīkla frekvences ($f_{iz}=0...50\text{Hz}$), pie frekvencēm **virš 25Hz** pasliktinās sprieguma kvalitāte.

Visplašāko pielietojumu ieguvuši **netiešie frekvenču pārveidotāji** ar izteiktu līdzstrāvas posmu, kuros notiek **divkārtēja enerģijas pārveidošana**. Vispirms **no elektriskā tīkla maiņsprieguma iegūst līdzspriegumu**, pēc tam **no līdzsprieguma formē jaunu maiņspriegumu** ar regulējamu sprieguma lielumu un frekvenci.

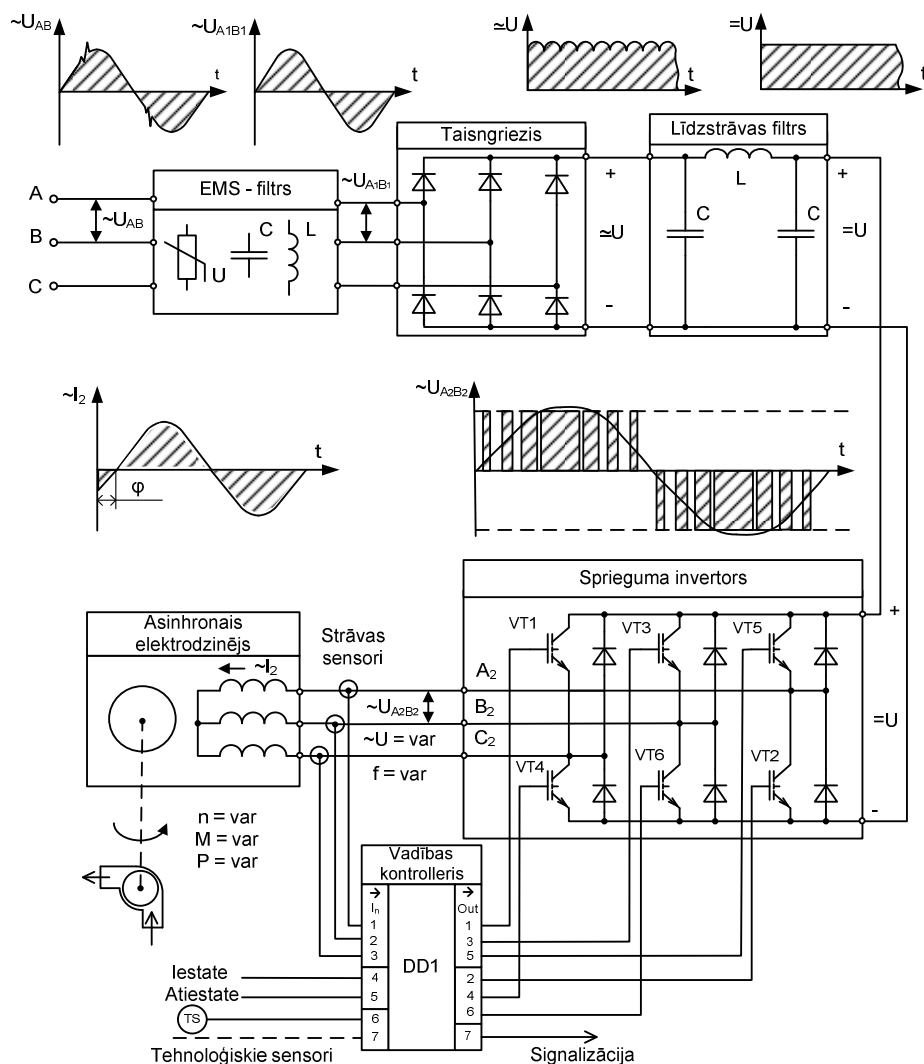
Netiešajiem frekvenču pārveidotājiem ir vairākas **būtiskas priekšrocības**:

- mazs spēka elektronikas elementu - **izolētās bāzes bipolāro tranzistoru** skaits (2-uz katru fāzi) ar mazu izkliedes zudumu jaudu;
- izejas sprieguma frekvenci var regulēt plašās robežās kā zem, tā virs elektriskā tīkla sprieguma frekvences ($50\text{Hz} \geq f_{iz} > 50\text{Hz}$);
- vienmērīga, droša un energoefektīva asinhronā elektrodzinēja rotācijas ātruma, momenta un jaudas regulēšana.

Netiešais frekvenču pārveidotājs (**NFP**) ar izteiktu līdzstrāvas posmu sastāv no elektromagnētiskās saderības filtra (**EMSF**), trīsfāzu tilta taisngrieža (**TT**), līdzstrāvas filtra (**LF**) un sprieguma invertora (**SI**) (4.6. att.). Tā darbību vada iebūvēts programmējams regulējošais vadības kontroleris (**VK**) ar loģiskās vadības, kontroles un aizsardzības interfeisa shēmām. Uz **VK** ieejas termināliem tiek padoti signāli no

elektrodzinēja strāvas kontroles sensoriem (**SKS**) un vadības objekta (piemēram, ūdensapgādes sistēmas) tehnoloģisko parametru (piemēram, spiediena, vai patēriņa) kontroles sensoriem (**TS**).

Gaismas displejs parāda **FP** iestates, darbības un kontroles parametrus.



4.6. att. Netiešais frekvenču pārveidotājs ar izteiktu līdzstrāvas posmu.

Elektromagnētiskās saderības filtrs paredzēts pievadītā sprieguma attīrīšanai no **pārsprieguma impulsiem** un **augstu frekvenču harmonikām**, kas var iekārtu sabojāt vai traucēt tās darbību. **EMS** shēmā slēgti varistori **U** (rezistori, kuru

pretestība atkarīga no pieliktā sprieguma), kondensatori **C** un spoles **L**. Varistori nofiltrē pārsprieguma impulsus, **C** un **L** – augsto frekvenču komponentes. Nofiltrēto maiņspriegumu padod uz **TT**, kura izejā iegūst pulsējošu līdzspriegumu $\approx U$.

Maiņstrāvas komponenti nofiltrē ar **LF**. Nogludināto līdzspriegumu $=U$ padod uz sprieguma inverteru **SI**, kas ir **NFP** galvenā sastāvdaļa. **SI** sastāv no sešiem spēka tranzistoriem **VT1...VT6**, kuri savienoti virknē pa pāriem -VT1 ar VT4, VT3 ar VT6 un VT5 ar VT2. Tranzistoru pāri saslēgti paralēli un pievienoti spriegumam $=U$. Katrs tranzistors šuntēts ar diodi, kas nodrošina strāvas divvirzienu plūsmu un aizsargā tranzistorus pret komutācijas pārspriegumiem.

SI formē trīsfāzu maiņspriegumu no konstantas amplitūdas līdzsprieguma $=U$ impulsiem ar modulētu platumu. Viena līnijas sprieguma U_{A2B2} raksturlīkne parādīta 4.6. attēlā. Līnijas spriegums U_{B2C2} aizkavējas attiecībā pret U_{A2B2} par 120° elektriskajiem grādiem jeb par $1/3$ perioda **T**, bet U_{C2A2} par tādu pašu lielumu apsteidz spriegumu U_{A2B2} . Neskatoties uz izejas sprieguma diskrēto impulsveida formu, strāva, kas pūst elektrodzinēja tinumos $I_2 = f(t)$ ir nepārtraukta un gandrīz ideāli sinusoidāla. To nodrošina tinumu induktivitātes, kas darbojas kā gludinātāj-filtrs. Lai uzlabotu strāvas I_2 formu, starp **AD** un **SI** var pieslēgt induktīvo motorfiltru.

Strāvas sensori (strāvas transformatori, Holla elementi) kontrolē elektrodzinēja darba strāvu, līniju strāvu asimetriju, nepilnu fāzu režīmu un elektrodzinēja slodzi. Avāriju un ilgstošu pārslodžu gadījumos **AD** un **FP** tiek atslēgts no elektriskā tīkla.

4.4.2. Sprieguma invertora darbība un raksturlīknes

Sprieguma inverteros izmanto izolētās bāzes bipolāros tranzistorus (**IBBT**) (Japānas patents no 1989. g.), kuros, apvienojot lauka tranzistora (ļoti augsta izejas pretestība) un bipolārā tranzistora (ļoti zema izejas pretestība piesātinājuma stāvoklī) pozitīvās īpašības, izdevās ievērojami samazināt izkliedes zudumus un izveidot kompakts frekvenču pārveidotājus ar jaudu no **dažiem simtiem W** līdz **vairākiem MW**. **IBBT** guvuši plašu pielietojumu sērijveida frekvenču pārveidotājos.

IBBT darbojas kā slēdža elementi, kuru komutēšanai (ieslēgšanai- izslēgšanai) izmanto takts ģeneratoru (**TG**) ar loģiskās vadības shēmu. Ja **SI** izejas sprieguma $\sim U_2$ periods **T** tiek formēts no n_T taktīm un takts impulss sekošanas frekvence ir f_g , tad $\sim U_2$ frekvence:

$$f_2 = f_g / n_T. \quad (4.7)$$

Vienkāršākā **6-taktu** invertora izejā formējas maiņspriegums, kura periods sastāv no 6 taktīm, kurās mainās pauzes un līdzsprieguma impulsi ar konstantu

amplitūdu un platumu, un mainīgu polaritāti (4.7. att.). 1. un 4. taktī ir pauzes, 2. un 3. taktī ir sprieguma impulsi ar pozitīvu polaritāti, bet 5. un 6. taktī – ar negatīvu polaritāti. Tas tiek iegūts ar tranzistoru **VT1...VT6** (4.6. att.) noteiktu komutācijas kārtību. Katrā taktī viens tranzistors tiek ieslēgts un viens – izslēgts.

Apzīmējot tranzistoru ieslēgšanos (atvēršanos) ar „+”, bet izslēgšanos (aizvēršanos) ar „-”, katrai taktij var uzrakstīt sekojošu komutācijas algoritmu:

1.-(+VT1,-VT4); 2.- (+VT2,-VT5); 3. - (+VT3,-VT6); 4.- (+VT4,-VT1); 5.- (+VT5,-VT2); 6.- (+VT6,-VT3).

Katrs no 6 tranzistoriem ir ieslēgts **3-taktis**. Katrā taktī ir ieslēgti 3 tranzistori, jo vienlaicīgi tiek formēti trīs par 120 elektriskajiem grādiem savstarpēji nobīdīti līnijas spriegumi **U_{A2B2}, U_{B2C2}, U_{C2A2}**, kuru efektīvā vērtība:

$$U_{2l} = (2/3)^{0.5} \cdot U_2 = 0.816 \cdot U_2. \quad (4.8)$$

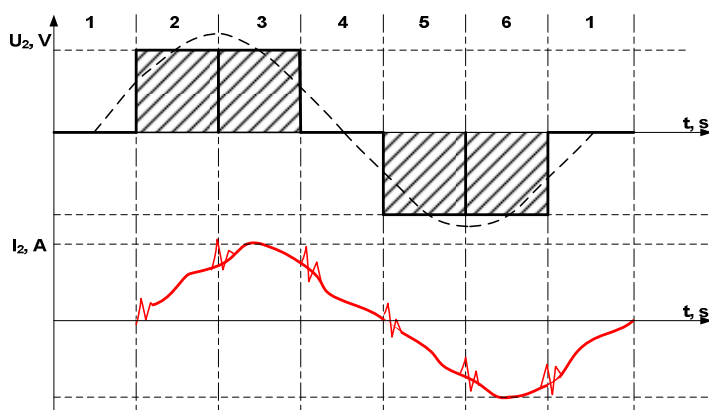
Mainot takts ģenerators impulsu sekošanas frekvenci, var vienmērīgi regulēt izejas sprieguma frekvenci. Ja, piemēram, **f_g=120 Hz**, tad **f₂=120/6=30Hz**. Tā kā līdzsprieguma impulsi ir ar konstantu amplitūdu un nemainīgu platumu, tad, lai regulētu arī spriegumu, jāizmanto regulējams taisngriezis.

Sešu taktu invertors uzskatāmi parāda sprieguma ar maināmu frekvenci formēšanas principu, bet praksē netiek izmantots, jo iegūtās strāvas kvalitāte ir ļoti zema. Pievadot šādu spriegumu trīsfāzu asinhronajam elektrodzinējam, tā tinumos plūstošā strāva **I₂** nav sinusoidālas formas un satur ievērojamu augstāko frekvenču komponenti (4.7. att.). Tas rada vairākus negatīvus efektus:

- pastiprinās elektrodzinēja silšana, jo palielinās elektriskie un magnētiskie zudumi, kā rezultātā pazeminās arī lietderības koeficients ;
- samazinās elektrodzinēja mehāniskā jauda un moments, elektrodzinējs darbojas nevienmērīgi, īpaši pie zemākām frekvencēm.

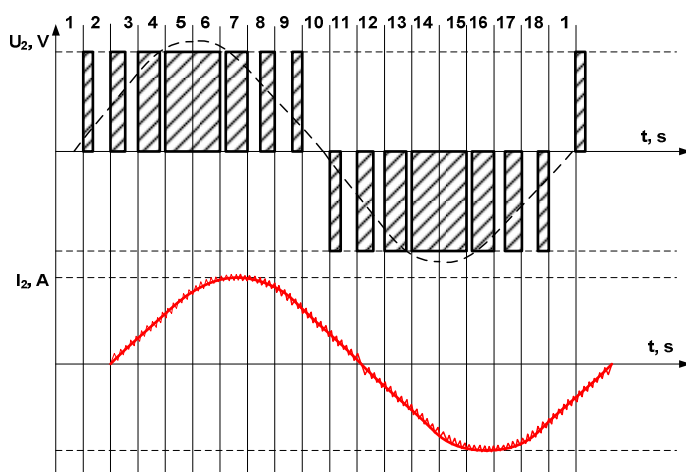
Lai novērstu minētos trūkumus, sērijveida frekvenču pārveidotājos izmanto daudztaktu sprieguma invertorus ar tranzistoru komutācijas frekvenci **f_g = (2...12) kHz** un sprieguma **U₂** impulsu platuma modulāciju. Impulsu platumu pakāpeniski palielina no vismazākā pusperioda sākumā līdz vislielākajam pusperioda vidū un pēc tam atkal pakāpeniski samazina līdz pusperioda beigām. Jo mazāks būs impulsu platums **t_i** dotajā periodā **T**, jo mazāks būs līnijas spriegums **~U_{2l}** izejā:

$$U_{2l} = U_2 \cdot \sum_{i=1}^{n_T} t_i / T, \text{ kur } t_i \text{ ir } i - \text{tā impulsa platums vienā periodā } T, \text{ s.} \quad (4.8)$$



4.7. att. Elektrodzinēja sprieguma U_2 un strāvas I_2 raksturlīknes ar 6 taktu sprieguma invertoru un konstantu sprieguma impulsa platumu.

FP ar **18-taktu** sprieguma invertoru un impulsa platumu modulāciju izejas sprieguma radītā strāva ir **sinusoidāla ar mazu augstāko frekvenču komponenti** (4.8. att.). Strāva pēc kvalitātes ir tuva ideālai un praktiski nerada papildus zudumus elektrodzinējā. Izejas sprieguma frekvenci, tāpat kā iepriekš, regulē mainot takts impulsu frekvenci. Piemēram, izejas sprieguma frekvenci $f_2 = 25 \text{ Hz}$ iegūst, ja **TG** frekvence $f_g = 25 \cdot 18 = 450 \text{ Hz}$. Jo lielāks taktu skaits, un jo lielāka takts frekvence, jo labāka ir strāvas forma un mazāki enerģijas zudumi elektrodzinējā.

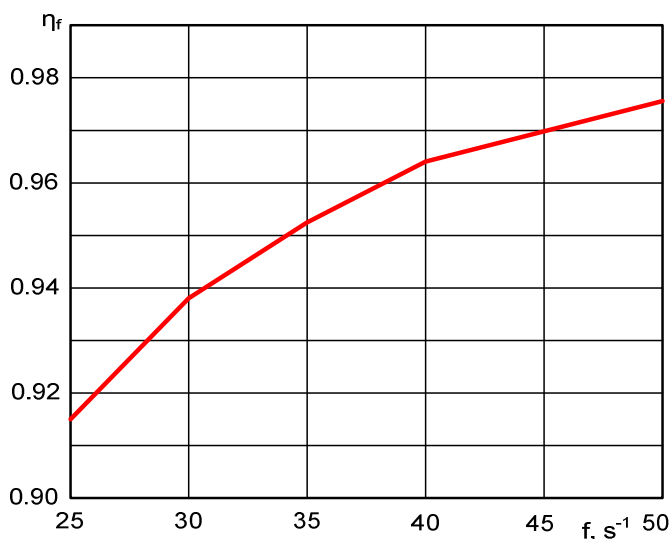


4.8. att. Elektrodzinēja sprieguma U_2 un strāvas I_2 raksturlīknes ar 18 taktu sprieguma invertoru un impulsa platumu modulāciju.

4.4.3. Frekvenču regulējamas elektriskās piedziņas enerģētika

Frekvenču pārveidotāja un frekvenču regulējamās elektriskās piedziņas labumu, no enerģētikas viedokļa, raksturo **lietderības koeficients**. Frekvenču pārveidotājā, tāpat kā jebkurā elektriskā iekārtā, rodas **enerģijas zudumi**. Tos galvenokārt sastāda siltuma zudumi **taisngrieža** un **sprieguma invertora** spēka elektronikas elementos, kā arī **ventilācijas zudumi** vidējas un lielas jaudas iekārtās, ko rada dzesēšanas ventilatoru patērētā elektroenerģija.

Frekvenču pārveidotāja **ACS 600** lietderības koeficients η_f (pēc firmas „Flygt” datiem) mainās no **97...98%** pie nominālās frekvences **50 Hz** (s^{-1}) līdz **91...92%**, ja frekvence ir **25 Hz**. Pie zemākām frekvencēm palielinās relatīvie zudumi attiecībā pret pievadīto elektrisko jaudu (4.9. att.).



4.9. att. Frekvenču pārveidotāja ABB ACS 600 lietderības koeficients $\eta_f(f)$.

Elektriskās piedziņas (**EP**) kopējo lietderības koeficientu nosaka **FP** lietderības koeficients un asinhronā elektrodzinēja (**AD**) lietderības koeficients. Barojot **AD** no frekvenču pārveidotāja, tā lietderības koeficients samazinās par aptuveni **1%**. Tā cēlonis ir elektrodzinēja strāvas augstāko harmoniku radītie papildus zudumi, jo **FP** izejas sprieguma radītā strāva, kas plūst **AD** tinumos nav ideāli sinusoidāla. EP lietderības koeficientu arī būtiski iespaido **FP** izejas sprieguma regulēšanas veids un

atbilstība griezes momenta un slodzes momenta sakritībai visā regulēšanas diapazonā. Ideālā gadījumā iegūst augstāko lietderības koeficientu (4.10. att. r. – l.1).

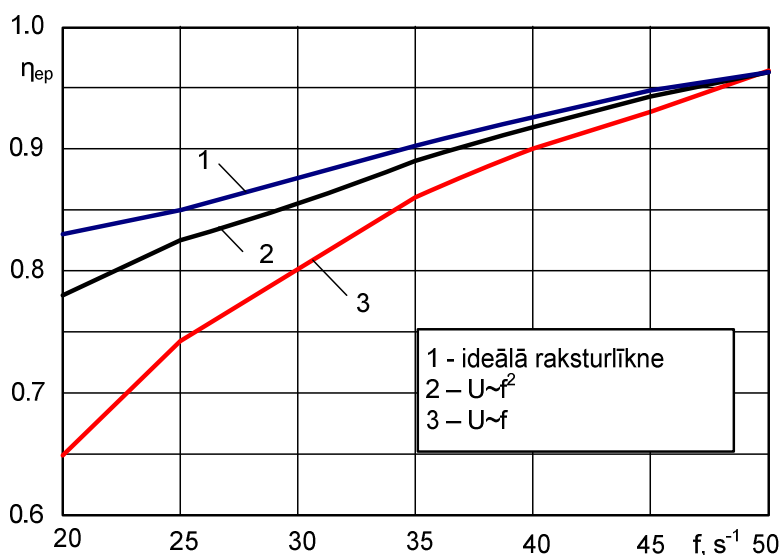
Regulējot centrālās sūkņa elektrodzinēja spriegumu pēc likuma $U \sim f^2$, iegūst reālo optimālo raksturlielni **2**. Reālais lietderības koeficients ir mazāks par ideālo, jo **AD** griezes momenta izmaiņa atkarībā no rotācijas ātruma ideāli nesakrīt ar slodzes momenta izmaiņu. Lietderības koeficients būtiski samazinās (r. l. -3), ja izvēlētais sprieguma regulēšanas likums ($U \sim f$) neatbilst ventilatora slodzei.

Regulējamās **EP** lietderības koeficientu var aprēķināt, izmantojot **AD** kataloga datus un raksturlieknes (4.9., 4.10. att.):

$$\eta_{ep} = \eta_f \cdot [\eta - (\Delta\eta_h + \Delta\eta_U)], \quad (4.7)$$

kur η - AD lietderības koeficients no kataloga; $\Delta\eta_h$ - labojums pēc augstāko harmoniku zudumiem; $\Delta\eta_U$ - labojums pēc sprieguma regulēšanas likuma.

Piemērs. Sūkņa **AD** sprieguma vidējā frekvence $f_v = 30$ Hz, lietderības koeficients $\eta = 0.95$, $\Delta\eta_h = 0.01$ $\eta = 0.01 \cdot 0.95 \approx 0.01$. FP lietderības koeficients $\eta_f = 0.94$ (4.9. att.), $\Delta\eta_h = 0$. Tad idealizētais $\eta_{ep} = 0.94 \cdot (0.95 - 0.01) = 0.88$. Reālais η_{ep} ir par **2,5%** mazāks.



4.10. att. Regulējama centrālās sūkņa elektriskās piedziņas (frekvenču pārveidotājs + asinhronais elektrodzinējs) lietderības koeficients $\eta_{ep}(f)$ atkarībā no sprieguma regulēšanas veida ($U \sim f$ vai $U \sim f^2$).

4.5. Sūkņu iekārtas ar frekvenču regulējamu elektrisko piedziņu

4.5.1. Centrbēdzes sūkņa elektrodzinēja izvēles aprēķins

Sūkņa elektrodzinēja jaudu gan regulējamai, gan neregulējamai piedziņai aprēķina pēc formulas:

$$P_{apr} = \frac{Q \cdot p}{1000 \cdot \eta_s \cdot \eta_p} = \frac{Q \cdot \gamma \cdot g \cdot H}{1000 \cdot \eta_s \cdot \eta_p}, \quad (4.8)$$

kur Q – nepieciešamais sūkņa ražīgums, m^3/s ;

$p = \gamma \cdot g \cdot H$ – nepieciešamais sūkņa spiediens (Paskāli), N/m ;

$\gamma = 1000 \text{ kg}/m^3$ – ūdens tilpuma masa; $g = 9.81 \text{ m}/s^2$ – brīvās krišanas paātrinājums;

$H = H_g + \Delta H$ – nepieciešamais sūkņa celšanas augstums, m (H_g – ģeodēziskais celšanas augstums (m), ΔH – spiediena zudumi cauruļvadu tīklā (m));

η_s – sūkņa lietderības koeficients; η_p – pārvada lietderības koeficients (tiešajam pārvadam -1, ķīļsiksna pārvadam - 0.98, plakansiksna pārvadam - 0.95).

Sūkņa elektrodzinēja nominālo jaudu izvēlas lielāku par aprēķināto jaudu, jo darba laikā var rasties pārslodzes un ūdens noplūdes:

$$P_{nom} \geq k_r \cdot P_{apr}, \quad (4.9)$$

kur k_r – rezerves koeficients, kuru izvēlas atbilstoši aprēķinātajai jaudai.

$$P_{apr} \text{ (kW)} = \leq 1 \quad 2 \quad 3 \quad 4 \quad 5 \quad 8 \quad 10 \leq 100 \quad >100.$$

$$k_r = 2.0 \quad 1.7 \quad 1.33 \quad 1.25 \quad 1.2 \quad 1.12 \quad 1.1 \dots 1.05 \quad 1.05.$$

Mazas jaudas iekārtai ir lielāks k_r , jo to vairāk iespaido pārslodzes un noplūdes.

Piemērs. Izvēlēties sūkņa piedziņas elektrodzinēju un frekvenču pārveidotāju atbilstoši ūdensapgādes sistēmas parametriem.

Dots. Ūdens padeves daudzums $Q = 400 \text{ m}^3/h = 0.11 \text{ m}^3/s$, nepieciešamais celšanas augstums $H = 40 \text{ m}$, ūdens tilpuma masa $\gamma = 1000 \text{ kg}/m^3$, brīvās krišanas paātrinājums $g = 9.81 \text{ m}/s^2$, sūkņa lietderības koeficients $\eta_s = 0.85$, ķīļsiksna pārvada lietderības koeficients $\eta_p = 0.98$, sūkņa rotācijas ātrums $n_s = 1425 \text{ min}^{-1}$.

Aprēķini. Elektrodzinēja aprēķinātā un nominālā jauda:

$$P_{apr} = \frac{Q \cdot \gamma \cdot g \cdot H}{1000 \cdot \eta_s \cdot \eta_p} = \frac{0.11 \cdot 1000 \cdot 9.81 \cdot 40}{1000 \cdot 0.85 \cdot 0.98} = 51.8 \text{ kW}, \quad P_{nom} \geq k_r \cdot P_{apr} = 1.05 \cdot 51.8 = 54.4 \text{ kW}.$$

Elektrodzinēja izvēle. Trīsfāzu asinhronais elektrodzinējs **380V, 50 Hz ar $P_{nom} = 55 \text{ kW}$, $I_{nom} = 103 \text{ A}$, $n_{nom} = 1475 \text{ min}^{-1}$, $\eta_{nom} = 0.943$, $\cos \varphi = 0.86$.**

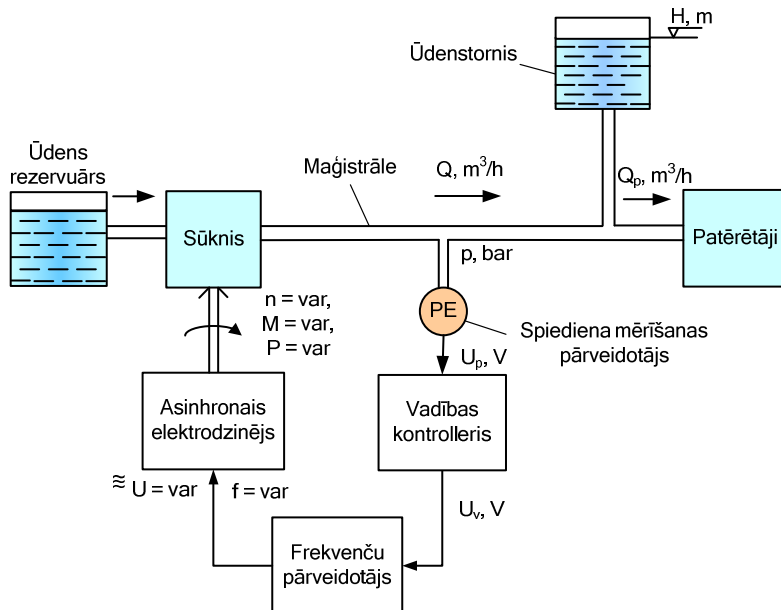
Tā kā **AD** rotācijas ātrums atšķiras no sūkņa rotācijas ātruma, tad ķīļsiksna pārvada skriemeļiem jābūt ar atšķirīgiem diametriem. Nosakām pārnese skaitli $i = n_{\text{nom}} / n_s = 1475 / 1425 = 1.04$. Skriemeļim uz sūkņa vārpstas jābūt ar **1.04** reizes lielāku diametru.

Frekvenču pārveidotāja izvēle. 1. **FP** jaudai jābūt vienāgai vai lielākai par **AD** jaudu: $P_{\text{nom } f} \geq P_{\text{nom}}$. 2. Veic pārbaudi pēc nominālās strāvas: $I_{\text{nom } f} \geq I_{\text{nom}}$.

Abām prasībām atbilst frekvenču pārveidotājs **ACS 601 – 0070 – 3**: barošanas spriegums **380 V / 50 Hz**, jauda $P_{\text{nom } f} = 55 \text{ kW}$ un nominālā strāva $I_{\text{nom } f} = 112 \text{ A}$.

4.5.2. Regulējamas ūdensapgādes sistēmas vadības shēmas

Frekvenču regulējama ūdensapgādes vadības sistēma (4.11. att.) sastāv no spiediena mērīšanas pārveidotāja **PE**, kurš izmēra ūdens spiedienu (bāri) maģistrālē un pārveido normētā elektriskā spriegumā (**0...10 V**). **PE** izejas signāls U_p tiek padots uz vadības kontrolleri, kurš formē vadības signālu U_v frekvenču pārveidotājam.



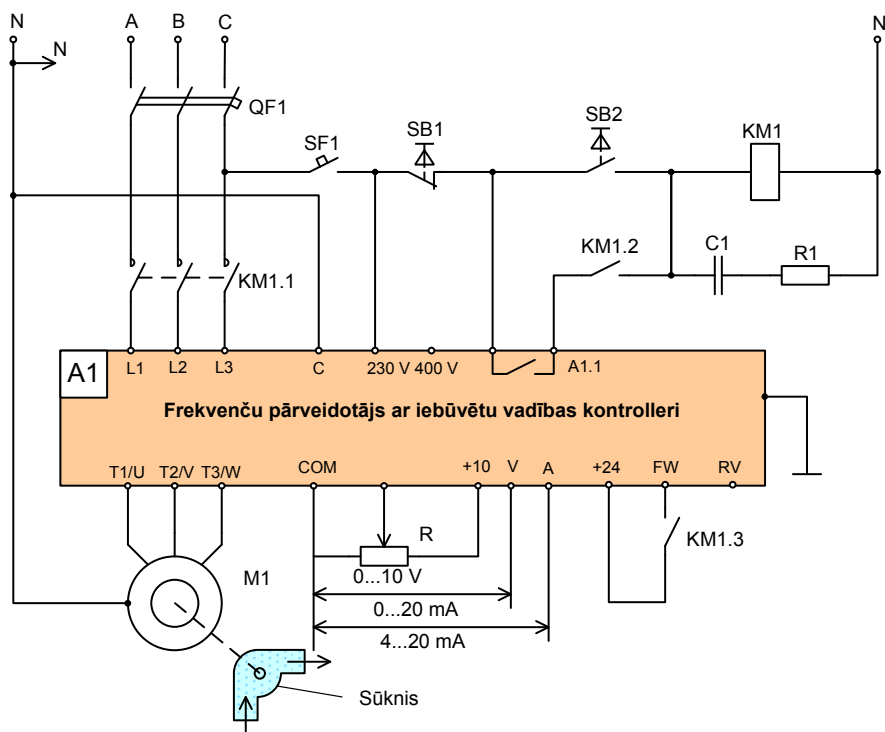
4.11. att. Ūdensapgādes sūkņa vadības sistēmas tehnoloģiskā shēma.

Frekvenču pārveidotājs atbilstoši izmaina asinhronā elektrodzinēja barošanas spriegumu $U = \text{var}$. un frekvenci $f = \text{var}$. Tiek izmainīts sūkņa rotācijas ātrums n , ražīgums Q un spiediens p tā, ka tiek kompensēta spiediena novirze Δp no uzdotā

lieluma (piemēram, $p_0 = 3 \text{ bar}$) maģistrālē, kuru izraisa ūdens patēriņa Q_p svārstības. Sūkņa vadības sistēma ir noslēgta sistēma ar negatīvu atgriezenisko saiti, kurā slēgts spiediena mērīšanas pārveidotājs **PE**. Līdz ar to spiediena kontrole un regulēšana notiek nepārtraukti, nodrošinot galvenās perturbācijas – ūdens patēriņa Q_p iespaيدا uz spiedienu maģistrālē automātisku kompensāciju.

Sūkņa elektrodzinēja vadības elektriskā shēma ar palaidēju **KM1** un frekvences pārveidotāju **A1** ar iebūvētu kontrolleri parādīta 4.12. attēlā. Spiediena mērīšanas pārveidotāju **PE** ar augstomīgu (sprieguma) izeju pievieno spailēm „Com” un „V”. Izvēloties **PE** ar zemomīgu (strāvas) izeju, to pievieno spailēm „Com” un „A”. Sūkņa ražīgumu un spiedienu rokas vadības režīmā regulē ar potenciometru **R**.

Palaidēja kontaktu **KM1.3** pievieno spailēm „+24” un „Fw” (forward) – tiešajam griešanās virzienam. Reversais virziens „RV” netiek izmantots. **C1 R1** ķēde filtrē palaidēja spoles **KM1** ģenerētos komutācijas pārsprieguma impulsus. **FP** nodrošina asinhronā elektrodzinēja mīksto palaidi, ātruma regulēšanu un aizsardzību.



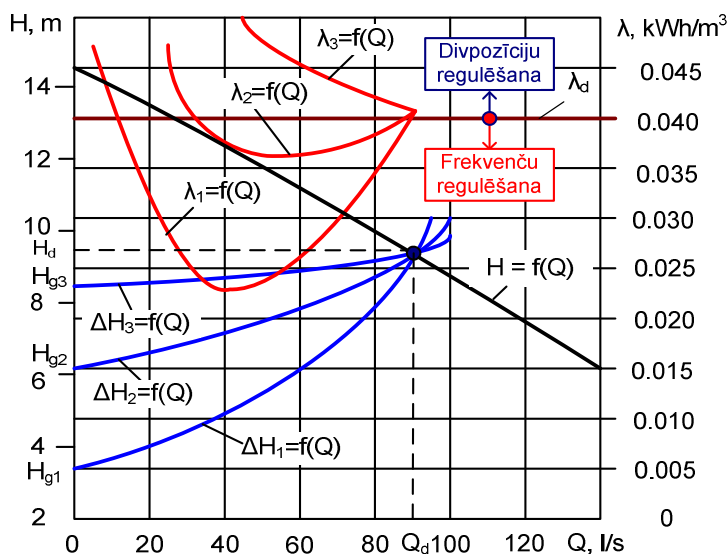
4.12. att. Sūkņa ar frekvenču regulējamu elektrisko piedziņu elektriskā shēma.

Ieslēdzot automātslēdžus **QF1** un **SF1**, tiek padots spriegums uz **A1** un **KM1** spēka ķēdi un vadības ķēdi. Nospiežot pogas slēdži **SB2**, ieslēdzas palaidējs **KM1**, saslēdzas spēka kontakti **KM1.1** un tiek padots spriegums uz frekvenču pārveidotāja **A1** jaudas moduli, bet saslēdzoties kontaktiem **A1.1**, **KM1.2** un **KM1.3** sākas elektrodzinēja palaide un rotācijas ātruma regulēšana. Ja darba laikā rodas pārslodzes avārijas režīms, nostrādā **FP** aizsardzība, pārtraucas kontakts **A1.1** un elektrodzinējs tiek atslēgts no elektriskā tīkla.

4.5.3. Sūkņa vadības veida izvēle un elektroenerģijas patēriņš

Regulējamo elektrisko piedziņu izvēlas tad, ja tā dod pozitīvu ekonomisko efektu, kas izpaužas elektroenerģijas ietaupījumā. Ja ietaupītā elektroenerģija kompensē frekvenču regulējamās elektriskās piedziņas ieviešanas papildus kapitālieguldījumus un ekspluatācijas izdevumus normatīvajā atmaksāšanās laikā (5 gadi), tad tās pielietošana ir ekonomiski pamatota.

Kā piemēru apskatīsim firmas „Flygt” pētījumu datus par trim hidrauliskajām sistēmām, kurās tiek izmantots viens un tas pats sūknis ar hidraulisko raksturlīkni $H=f(Q)$ un darba punktu $H_d = 9.3\text{ m}$ un $Q_d = 93\text{ l/s}$ (4.13. att.).



4.13. att. Ūdensapgādes sistēmas hidrauliskās raksturlīknes un ūdens tilpuma pārnesei īpatnējais elektroenerģijas patēriņš $\lambda = f(Q)$, kWh/m^3 .

Hidrauliskās sistēmas atšķiras ar ģeodēzisko celšanas augstumu ($H_{g1} = 3\text{ m} < H_{g2} = 6\text{ m} < H_{g3} = 8.5\text{ m}$) un hidrauliskajiem zudumiem, kurus nosaka darba punktā ($\Delta H_{1d} = H_d - H_{g1} = 6.3\text{ m}$, $\Delta H_{2d} = H_d - H_{g2} = 3.3\text{ m}$, $\Delta H_{3d} = H_d - H_{g3} = 0.8\text{ m}$). Elektroenerģijas īpatnējā patēriņa raksturlielnes **frekvenču regulēšanai** ir $\lambda_1 = f(Q)$, $\lambda_2 = f(Q)$ un $\lambda_3 = f(Q)$. Regulējot sūkni divpozīciju režīmā enerģijas īpatnējais patēriņš $\lambda_d = \text{const}$.

Lai aprēķinātu enerģijas patēriņu un ietaupījumu, ko dod frekvenču regulēšana salīdzinājumā ar divpozīciju regulēšanu, reģistrē sūkņu stacijas darba ražīguma laika diagrammu $Q = f(t)$ gadam (4.14. att.). Aprēķinu vienkāršošanai to sadala diskrētos apgabalos ar vidēju ūdens padeves daudzumu.

Aprēķināsim elektroenerģijas patēriņu A_f , izmantojot frekvenču regulēšanu, sistēmai ar lielākajiem zudumiem un īpatnējo enerģijas patēriņu $\lambda_1 = f(Q)$ (4.13. att.):

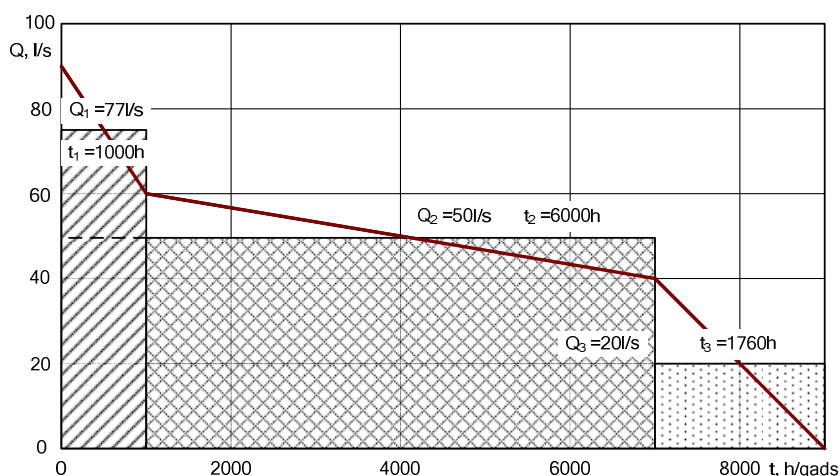
$$A_f = 3.6 \cdot (\lambda_{11} \cdot Q_1 \cdot t_1 + \lambda_{12} \cdot Q_2 \cdot t_2 + \lambda_{13} \cdot Q_3 \cdot t_3) = 3.6 \cdot (0.035 \cdot 77 \cdot 1000 + 0.025 \cdot 50 \cdot 6000 + 0.026 \cdot 20 \cdot 1760) = 40.000 \text{ kWh}.$$

Aprēķināsim elektroenerģijas patēriņu A_d , izmantojot divpozīciju regulēšanu:

$$A_f = 3.6 \cdot \lambda_d (Q_1 \cdot t_1 + Q_2 \cdot t_2 + Q_3 \cdot t_3) = 3.6 \cdot 0.04 \cdot (77 \cdot 1000 + 50 \cdot 6000 + 20 \cdot 1760) = 59.280 \text{ kWh}.$$

Elektroenerģijas ietaupījums: $\Delta A = A_d - A_f = 59.280 - 40.000 = 19.280 \text{ kWh}$.

Secinājumi. 1. Hidrauliskajās sistēmās ar lieliem zudumiem frekvenču regulēšana dod ievērojamu elektroenerģijas ietaupījumu. 2. Hidrauliskajās sistēmās ar maziem zudumiem (sūknis atrodas tuvu patērētājam) jāizmanto divpozīciju regulēšana.



4.14. att. Sūkņu stacijas ūdens padeves daudzuma laika diagramma gadam.

LITERATŪRAS SARAKSTS

1. Ribickis L., Valeinis J.. Elektriskā piedziņa mehatronikas sistēmās. – R.: RTU, 2008. - 286 lpp.
2. Valeinis J.. Ievads elektriskās piedziņas vadības sistēmās. – R.: RTU, 2007. - 163 lpp.
3. Greivulis J., Raņķis I. Iekārtu vadības elektroniskie elementi un mezgli. – Rīga: Avots, 1997. – 288 lpp.
4. Cūbergs I. Regulējamā automātiskā elektriskā piedziņa. – R.: RTU, 1998. - 68 lpp.
5. Baltiņš A., Kanbergs A., Miesniece S. Zemsprieguma elektriskie aparāti. – R.: Jumava, 2003. – 331 lpp.
6. Bunžs Z., Miesniece S. Bezkontakta komutācijas aparāti. – R.: RTU-RTK, SIA Drukātava, 2008. - 308 lpp.
7. Šnīders A., Leščevics P., Galiņš A. Tehnoloģisko iekārtu automatizācija: Mācību-metodiskais līdzeklis. – Jelgava: LLU, 2008. - 60 lpp.
8. Šnīders A. Automātiskās vadības pamati. – Jelgava: LLU, 2008. - 159 lpp.
9. Šnīders A. Kokapstrādes automatizācija. – R.: Avots, 1989. - 158 lpp.
10. Dirba J., Ketners K. Elektriskās mašīnas. – R.: RTU, 2007. - 517 lpp.
11. Power electronics and variable frequency drives: technology and applications / edited Bimal K. Bose. – New York: IEEE Press, 1997. - 640 p.
12. Sen P.C. Principles of electric machines and power electronics. – New York etc.: John Wiley & Sons, 1997. – 615 p.
13. ABB Industrial Manual. – Lund: Wallin&Dalholm Tryckeri AB, 1998. – 1191 p.
14. Variable drives and soft starters. – Lund: Telemecanique, 2001. – 2/138 p.
15. Электрооборудование и автоматизация сельскохозяйственных агрегатов и установок / под редакцией И.Ф.Кудрявцева. – Москва: Агропромиздат, 1988. – 480 с.
16. Практикум по электроприводу в сельском хозяйстве / П. И. Савченко и др.; под редакцией П.И.Савченко. – Москва: Колос, 1996. – 223 с.
17. Петрушин В.С. Асинхронные двигатели в регулируемом электро-приводе: Учебн. пособие. – Одесса: Наука и техника, 2006. - 320 с.
18. Черных И.В. SIMULINK: среда создания инженерных приложений. - М.: Диалог - МИФИ, 2004. – 496 с.