

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Nikolajs BRENERS

**TRANSFORMATORU BĀZES
FUNKCIONĒŠANAS DROŠUMA
PAAUGSTINĀŠANAS PASĀKUMU
TEHNISKI EKONOMISKAIS
NOVĒRTĒJUMS**

Promocijas darba kopsavilkums

Rīga 2011

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Enerģētikas un elektrotehnikas fakultāte

Enerģētikas institūts

Nikolajs BRENERS

Doktora studiju programmas „Enerģētika” doktorants

**TRANSFORMATORU BĀZES
FUNKCIONĒŠANAS DROŠUMA
PAAUGSTINĀŠANAS PASĀKUMU
TEHNISKI EKONOMISKAIS
NOVĒRTĒJUMS**

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskā vadītāja

Dr. Sc. Ing. „Asoc. prof.,

S. GUSEVA

Rīga 2011

UDK 621.314(043.2)

Br 354 t

Breners N. Transformatoru bāzes funkcionēšanas drošuma paaugstināšanas pasākumu tehniski ekonomiskais novērtējums. Promocijas darba kopsavilkums.-Rīga.:RTU,2011.-44 lpp.

Iespiests saskaņā ar RTU Enerģētikas institūta 2011. gada 14. jūnija lēmumu, protokols Nr. 2

Šis darbs izstrādāts ar Eiropas Sociālā fonda atbalstu projektā „Atbalsts RTU doktora studiju īstenošanai” ietvaros.

ISBN 978-9934-10-214-1

**PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS
INŽENIERZINĀTŅU DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI
RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ**

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2011.g.21. novembrī, plkst. 15:00
Rīgas Tehniskās universitātes Enerģētikas un elektrotehnikas fakultātē,
Kronvalda bulvārī 1, aktu zālē.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Profesors, Dr. sc. ing. Nikolay Filev Džagarov
Tehniska Universitāte Varna (Bulgārija)

Profesors, Dr. habil. sc. ing. Zigurds Krišāns
LZA Fizikālās enerģētikas institūts.

Asociētais profesors, Dr.sc.ing. Oļegs Linkevičs
Rīgas Tehniskā Universitāte, AS Latvenergo.

APSTIPRINĀJUMS

Es apstiprinu, ka esmu izstrādājis doto promocijas darbu, kas iesniegts izskatīšanai Rīgas Tehniskajā universitātē inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai. Promocijas darbs nav iesniegts nevienā citā universitātē zinātniskā grāda iegūšanai.

Nikolajs Breners(Paraksts)

Datums:

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, satur ievadu, 5 nodaļas, secinājumus, literatūras sarakstu. Darba kopējais apjoms ir 126 lappuses. Darbā iekļautas 26 tabulas, 53 attēli 1 pielikums. Literatūras sarakstā ir 115 nosaukumi.

Saturs

PROMOCIJAS DARBA AKTUALITĀTE	6
DARBA MĒRĶIS UN UZDEVUMI	6
ZINĀTNISKĀ NOVITĀTE	7
PĒTĪJUMU LĪDZEKĻI UN METODES	7
DARBA REZULTĀTU PRAKTISKAIS PIELIETOJUMS	7
DARBA APROBĀCIJA	8
DISERTĀCIJAS STRUKTŪRA UN ORGANIZĀCIJA	10
1. LATVIJAS ENERĢOSISTĒMAS AUGSTSPRIEGUMA TRANSFORMATORU STĀVOKĻA ANALĪZE UN IEKĀRTU ATJAUNOŠANAS TENDENCES	11
ENERĢIJAS RAŽOŠANA LATVIJAS ENERĢOSISTĒMĀ	11
PĀRVADES SISTĒMA	11
TRANSFORMATORU PARKA STĀVOKĻA NOVĒRTĒJUMS	12
EKSPLUATĀCIJAS UZDEVUMU IESPĒJAMAS IZMAIŅAS ENERĢOSISTĒMĀS	14
2. TRANSFORMATORA BOJĀJUMU IEMESLU ANALĪZE UN IEKĀRTU RAKSTUROJUMU UZLABOŠANAS VIRZIENI	15
LIELJAUDAS SPĒKA TRANSFORMATORA IESPĒJAMO BOJĀJUMU IEMESLI	15
TRANSFORMATORU TEHNISKĀ STĀVOKĻA DIAGNOSTIKA	15
PAMATVIRZIENI TRANSFORMATORA TEHNISKĀ LĪMEŅA UN KVALITĀTES UZLABOŠANAI	17
3. TEHNISKO PASĀKUMU IZVĒLES METODIKAS PAMATNOSTĀDNES	18
TRANSFORMATORU IESPĒJAMAS PĀRVIETOŠANAS TRANSFORMATORU PARKA ROBEŽĀS	18
LĒMUMA PIENĒMŠANAS VISPĀRĪGĀ PROCEDŪRA	20
TEHNISKO PASĀKUMU IZVĒLES METODIKAS STRUKTŪRA	20
PASĀKUMU EKONOMISKĀS ANALĪZES METODES	22
PASĀKUMU VISPĀRINĀTS TEHNISKI EKONOMISKAIS MODELIS	23
4. TRANSFORMATORU IEGĀDE UN NOMAIŅA	27
MODERNO TRANSFORMATORU RAKSTUROJUMU SALĪDZINĀJUMS	27
PRAKTISKIE APRĒĶINI JAUNO TRANSFORMATORU IEGĀDES PASĀKUMA NOVĒRTĒŠANAI	28
Pasākuma tehniskā analīze	28
Pasākuma ekonomiskais novērtējums	28
NOVECOJUŠO TRANSFORMATORU NOMAIŅAS TEHNISKAIS PASĀKUMS	30
5. TRANSFORMATORU REMONTS UN MODERNIZĀCIJA	30
TRANSFORMATORU KALPOŠANAS LAIKA PAGARINĀŠANA VIRS NORMATĪVĀ TERMIŅA 30	
TRANSFORMATORA KAPITĀLĀ REMONTA TEHNISKĀ ANALĪZE UN PASĀKUMA EKONOMISKAIS NOVĒRTĒJUMS	31
TRANSFORMATORA SPRIEGUMA REGULĒŠANAS IERĪČU NOMAIŅAS TEHNISKĀ ANALĪZE UN PASĀKUMA EKONOMISKAIS NOVĒRTĒJUMS	33
TRANSFORMATORA AUGSTSPRIEGUMA IEVADU MODERNIZĀCIJAS TEHNISKĀ ANALĪZE UN PASĀKUMA EKONOMISKAIS NOVĒRTĒJUMS	34
TRANSFORMATORA EĻĻAS REĢENERĀCIJAS VAI NOMAIŅAS TEHNISKĀ ANALĪZE UN PASĀKUMA EKONOMISKAIS NOVĒRTĒJUMS	36
TRANSFORMATORA MONITORINGA SISTĒMAS PIELIETOŠANAS TEHNISKĀ ANALĪZE UN PASĀKUMA EKONOMISKAIS NOVĒRTĒJUMS	37
KOPĒJIE SECINĀJUMI	40

PROMOCIJAS DARBA AKTUALITĀTE

Droša un ekonomiska augstsprieguma transformatoru iekārtu darbība ir viens no galvenajiem nosacījumiem, lai nodrošinātu patērētājiem kvalitatīvu elektroapgādi. Daudzās attīstītās valstīs ir nepieciešams risināt rīcības jautājumus par transformatoru iekārtām, kurām beidzies normatīvais kalpošanas ilgums vai tuvojas tā beigas. Šādu iekārtu tālāka ekspluatācija bez drošuma līmeņa paaugstināšanas pasākumiem var negatīvi ietekmēt elektroapgādes kvalitāti un nepārtrauktību. Tādēļ pastāvīgi jāveic transformatoru bāzes atjaunošana un modernizācija.

Tirgus ekonomikas apstākļos iekārtu atjaunošanas un modernizācijas pasākumi jāizvēlas, pamatojoties uz tehniski ekonomiskiem aprēķiniem, lai racionāli izmantotu finanšu resursus.

Mūsdienās Latvijas enerģosistēmas uzņēmumiem trūkst atbilstošas un pareizas novērtēšanas metodikas, kas palīdzētu pamatoti izvēlēties un izvērtēt transformatoru iekārtu modernizācijas un rekonstrukcijas pasākumus iekārtu kalpošanas laika periodā.

Ņemot vērā iepriekšminēto, tika izvēlēts promocijas darba pētījumu virziens, izstrādājot tehnisko pasākumu novērtēšanas un izvēles metodiku, paaugstinot enerģosistēmas transformatoru parka darbības drošumu.

DARBA MĒRĶIS UN UZDEVUMI

Darba mērķis ir enerģosistēmas uzņēmumu vajadzībām izstrādāt kompleksu metodiku tehnisko pasākumu izvēlei, lai ar tās palīdzību varētu pamatot konkrētus tehniskos pasākumus un novērtēt jaunu iekārtu ieviešanas un esošo iekārtu atjaunošanas un modernizācijas ekonomisko efektivitāti.

Mērķa sasniegšanai tika izvirzīti un atrisināti šādi galvenie uzdevumi:

- izanalizēt Latvijas enerģosistēmas 330 - 110 kV transformatoru parka esošo stāvokli un transformatoru iekārtu bojājumu iespējamās iemeslus, kā arī prognozēt situāciju attiecībā uz transformatoru parka novecošanos;
- izveidot tehnisko pasākumu izvēles metodiku transformatoru parka atjaunošanai un modernizācijai, kura iekļautu transformatoru iekārtu esošā tehniskā stāvokļa analīzi un tehnisko pasākumu ekonomisko novērtējumu;
- izstrādāt tehniski ekonomiskos modeļus pasākumu kvalitatīvai novērtēšanai un atbilstošās mērķa funkcijas kvantitatīvai novērtēšanai, balstoties uz mūsdienu attīstības projektu tehniski ekonomiskās analīzes metodēm;
- veikt praktiskos aprēķinus mērķa funkciju aprobācijai konkrētiem tehniskajiem pasākumiem un novērtēt to realizācijas lietderīgumu;
- izstrādāt energouzņēmumiem rekomendācijas transformatoru parka darbības drošuma paaugstināšanas tehnisko pasākumu izvēlei.

ZINĀTNISKĀ NOVITĀTE

Zinātnisko novitāti raksturo šādi aspekti:

- izpildīta Latvijas energosistēmas 330-110 kV transformatoru novecojuma analīze un prognoze transformatoru parka stāvoklim uz 2016. gadu.
- izstrādāta kompleksa metodika tehnisko pasākumu izvēlei transformatoru parka darbības drošuma paaugstināšanai, kura ietver katra pasākuma tehnisko un ekonomisko analīzi;
- izveidots vispārināts tehniski ekonomiskais modelis pasākumu novērtējumam, uz kā bāzes izveidoti modeļi konkrētiem pasākumiem un tiem atbilstošas mērķa funkcijas ar tehnisko un ekonomisko rādītāju konkretizāciju;
- racionālas pasākuma izvēles pamatā ir optimālās summārās diskontētās ikgadējās izmaksas (izmaksu tīrā pašreizējā vērtība) par visu iekārtas dzīves ciklu, ievērojot pasākumu īpatnības, rādītāju izmaiņas laikā, dažādus realizācijas termiņus u.c. faktorus;
- piedāvāta ekonomiski pamatota metode jaunu transformatoru piegādātāja izvēlei konkursa kārtībā, kas ļauj racionāli izmantot investīcijas iekārtu atjaunošanai;
- izstrādāto pasākumu novērtējuma tehniski ekonomisko metodiku var attiecināt un lietot dažādām elektroiekārtām;
- izpildīta pasākumu kopas vispārēja kvantitatīvā analīze, izvērtēts pasākumu ekonomiskais lietderīgums un izstrādātas rekomendācijas energouzņēmumiem, palīdzot izvēlēties transformatoru parka atjaunošanas un modernizācijas paņēmienus.

PĒTĪJUMU LĪDZEKĻI UN METODES

Darba rezultāti iegūti, lietojot šādas pētījumu un izstrādņu metodes:

- pētījuma objekta matemātiskā modelēšana un mērķa funkciju izveide;
- mūsdienu tehniskās ekonomiskās analīzes metode, kas balstīta uz summāro diskontēto ikgadējo izmaksu (izmaksu tīrās pašreizējās vērtības) metodi visam iekārtu dzīves ciklam;
- mērķa funkciju optimuma noteikšana, salīdzinot vairākus pasākumu variantus;
- variantu aprēķini tiek realizēti ar izstrādātu aprēķinu programmu Microsoft Office Excel vidē;
- mērķa funkciju koeficientu aproksimācijai izmantota Mathcad programma.

DARBA REZULTĀTU PRAKTISKAIS PIELIETOJUMS

Darba rezultātus var izmantot transformatoru parka darbības drošuma paaugstināšanas pasākumu novērtēšanai un izvēlei AS Latvenego energouzņēmumos un citās energosistēmās. Izstrādātā tehnisko pasākumu izvēles metodika veicina tehniskās politikas efektīvu realizāciju transformatoru

parka atjaunošanas un modernizācijas virzienā. Teorētiskajā plānā paplašinātas summāro diskontēto ikgadējo metodes lietošanas robežas un tās iespējas tehnisko uzdevumu risinājumā. Aplūkotās mērķa funkcijas konkrētiem pasākumiem dod iespēju izpildīt tehnisko pasākumu analīzi plašā diapazonā, mainot dažādus tehniskos un ekonomiskos rādītājus. Vienotā pieeja tehniski ekonomisko modeļu konstruēšanai ļauj veikt pamatotu tehnisko pasākumu salīdzinājumu vislabākā varianta izvēlei pēc summāro diskontēto ikgadējo izmaksu minimuma (neievērojot ienākumus no produkcijas realizācijas, ja tie ir vienādi) vai maksimuma (ievērojot ienākumus) kritērijiem, ievērojot zaudējumus no patērētājiem nepiegādātās enerģijas.

Darba rezultāti daļēji atspoguļoti:

līgumā ar AS Latvenergo Nr. L7310 (Nr.010000/08-16) „Rīgas augstsprieguma tīkla shēma līdz 2020.gadam” (vadītājs- prof. J.Rozenkrons), 2008 (līdzdalība).

DARBA APROBĀCIJA

Par darba rezultātiem tika ziņots un tie tika apspriesti 12 starptautiskajās konferencēs:

1. 6-th International Conference on Electrical and Control Technologies, ECT-2011, 5-6 May, 2011, Kaunas, Lithuania (referāts).
2. The International Energy Forum 2010, 23-26 June, 2010, Varna, Bulgaria (2 referāti).
3. XI International Scientific Conference „Problems of Present-day Electrotechnics, *PPE-2010*”, 1– 3 June, 2010, Kiev, Ukraine (2 referāti).
4. 5-th International Conference on Electrical and Control Technologies, ECT-2010, 6-7 May, 2010, Kaunas, Lithuania (referāts).
5. 50-th International Scientific Conference „Power and Electrical Engineering”, 14-16 October, 2009, RTU, Riga , Latvia (referāts).
6. 49-th International Scientific Conference „Power and Electrical Engineering”, section „Enerģētika”, 13-15 October, 2008, RTU, Riga, Latvia (referāts).
7. VI Международный Форум „Электротехника-2008”, Петербургский энергетический институт повышения квалификации „ПЭИПК”, 15-19 сентября, 2008, Санкт-Петербург, Россия (referāts).
8. X Международная научная конференция „Проблемы современной электротехники - 2008”, НАН Украины, Институт физико-технических проблем энергетики, 5-9 июня, 2008, Киев, Украина (referāts).
9. 48-th International Scientific Conference „Power and Electrical Engineering”, section „Enerģētika”, 13-15 October , 2007, Riga, RTU, Latvia (referāts).
10. 4-th International Scientific Symposium, Elektrenergetika EE, 19-21 September, 2007, High Tatry-Stara Lesna, Slovak Republic (referāts).
11. XIII International Scientific Conference „Present-day Problems of Power Engineering, APE'07”, 13-15 June, 2007, Gdansk - Jurata, Poland (referāts).

12. 47-th International Scientific Conference „Power and Electrical Engineering”, section „Energētika”, 12-14 October, 2006, Rīga, RTU, Latvia (referāts).

Starptautiskos izdevumos publicēti 16 raksti:

1. N. Breners, S.Guseva, N.Skobeļeva, O.Borsceviskis. Directions to increase reliability of the maintained transformer equipment's functioning // Proceedings of 6-th International Conference on Electrical and Control Technologies, ECT-2011, 5-6 May, 2011, Kaunas, Lithuania. -175-178 p.
2. N.Breners, S.Guseva, N.Skobeļeva, O.Borsceviskis. Choice and efficiency of measures for increase reliability functioning of power transformers // Proceedings of The International Energy Forum 2010, 23-26 June, 2010, Varna, Bulgaria. -269-279 p.
3. S.Guseva, N.Skobeļeva, O.Borsceviskis, N.Breners. Rational approach to the formation of urban power supply system in solving of development problems // Proceedings of The International Energy Forum 2010, 23-26 June, 2010, Varna, Bulgaria. -280-289 p.
4. N.Breners, S.Guseva, O.Borsceviskis, N.Skobeļeva. Применение мониторинга силовых трансформаторов для повышения эффективности функционирования систем электроснабжения. // XI International Scientific Conference „Problems of Present-day Electrotechnics, PPE-2010”, 1-3 June, 2010, Kyiv, Ukraine, 6 p. (digitālā formātā uz CD).
5. S.Guseva, O.Borsceviskis, N.Skobeļeva, N. Breners. The system approach to placement of transformer substations in the power supply system of the city // Proceedings of 5-th International Conference on Electrical and Control Technologies, ECT-2010, 6-7 May, 2010, Kaunas, Lithuania. -211-214 p.
6. S.Guseva, N.Skobeļeva, N. Breners, O.Borsceviskis. Determination of service areas of urban transformer substations and distribution using geometrical templates // Latvian Journal of Physics and Technical Sciences, № 6 (Vol. 46), -Rīga: FEI, 2009, Latvia. -16.-26. p.
7. S.Guseva, N.Breners, N.Skobeļeva, H.Vindbergs. Economic criteria in competitions for deliveries of power transformers // Latvian Journal of Physics and Technical Sciences, N.5 (Vol. 46), Rīga: FEI, 2009, Latvia. – 35.-42. p.
8. S.Guseva, N.Breners, N.Skobeļeva. Eļļas reģenerācijas mērķtiecība spēka transformatoru kalpošanas ilguma pagarinājumam // Energētika un elektrotehnika, 4. sērija, 24. sējums. – Rīga: RTU, 2009, Latvija. -32.-39. lpp.
9. Breners N., Guseva S., Skobeļeva N. The analysis of measures on modernization of the transformer equipment // Energētika un elektrotehnika, Power and Electrical Engineering, 4. sērija, 23. sējums. – Rīga: RTU, 2008, Latvija. -74.-81. lpp.
10. Nikolajs Breners, Svetlana Guseva. Анализ мероприятий по модернизации трансформаторного оборудования // Elektroenergetika

- Journal, Technical University of Košice, Vol.1, No 2 (2008), Slovak Republic. - 9-12 p.
11. Гусева С.А., Бренерс Н.З., Махнитко А.Е., Скобелева Н.Н.. Оценка мероприятий по модернизации устройств регулирования напряжения под нагрузкой // Материалы X Международной научной конференции „Проблемы современной электротехники-2008”, НАН Украины, Институт физико-технических проблем энергетики, 5-9 июня, 2008, Киев, Украина, с. 51-54.
 12. Гусева С.А., Бренерс Н.З., Скобелева Н.Н. Технико-экономическая модель оценки мероприятия по замене силовых высоковольтных трансформаторов // Сборник научных трудов „Методы и технические средства повышения эффективности применения электроэнергии в сельском хозяйстве”. - Ставрополь: Агрус, 2007, Россия, с. 209-215.
 13. Svetlana Guseva, Anatoly Mahnitko, Nikolajs Breners. Evaluation of measures on reliability rise of power transformers by means of generalized mathematical model // Proceedings of IV International Scientific Symposium „Elektroenergetika 2007”, 19-21 September, 2007, Stara Lesna, Slovak Republic, 7 p. (digitālā formātā uz CD).
 14. Svetlana Guseva, Anatoly Mahnitko, Nikolajs Breners, Helmut Vindbergs. Mathematical model of estimation of measures on modernization of high-voltage inputs of transformers // Proceedings of XIII International Scientific Conference “Present-day Problems of Power Engineering, APE'07”, Vol. 3, 13-15 June, 2007, Gdansk- Jurata, Poland. - 65-73 p.
 15. Guseva S., Breners N., Vindbergs H. Economic estimation of updating the bushing of high-voltage transformers // Enerģētika un elektrotehnika, Power and Electrical Engineering, 4. sērija, 20. sējums. –Rīga: RTU, 2007, Latvija. -66.-74. lpp.
 16. Breners N., Guseva S., Kuķļa N. Vienkaršots tehniski ekonomiskais modelis augstsprieguma transformatoru nomaiņas novērtējumam // Enerģētika un elektrotehnika, Power and Electrical Engineering, 4. sērija, 19. sējums. – Rīga: RTU, 2006, Latvija. -79.-84. lpp.

PROMOCIJAS DARBA STRUKTŪRA UN ORGANIZĀCIJA

Promocijas darbs sastāv no ievada, 5 nodaļām un secinājumiem. Tā satur atsauces uz 115 literatūras avotiem, 53 attēlus, 26 tabulas, 1 pielikumu un izklāstīta 126 lappusēs.

1. LATVIJAS ENERĢOSISTĒMAS AUGSTSPRIEGUMA TRANSFORMATORU STĀVOKĻA ANALĪZE UN IEKĀRTU ATJAUNOŠANAS TENDENCES

Enerģijas ražošana Latvijas enerģosistēmā

Latvijas enerģosistēma, ir elektrisko staciju, apakšstaciju, elektropārvades tīklu, siltumtīklu, elektroenerģijas patērētāju kopums, kas ražo, pārvada un sadala elektrisko un siltuma enerģiju patērētājiem.

Latvenergo elektrostaciju ģeneratoru kopējā uzstādītā jauda 2009. gadā bija aptuveni 2080 MW, t.s. Daugavas kaskādes hidroelektrostacijās (DHES) -1334,5 MW, Rīgas termoelektrostacijās TEC-1 un TEC-2 -744 MW, Aiviekstes HES - 0,8 MW un Ainažu vēja elektrostacijā (VES) - 1,2 MW. Elektroenerģiju ražo arī nelielās privātās hidroelektrostacijās (149 mazās HES), koģenerācijas un VES stacijās, bet to saražotās enerģijas apjoms ir neliels [24].

2008. gadā Latvijas enerģosistēmās realizētas patērētājiem 6555 GWh elektroenerģijas, no kurām Latvijas enerģosistēmas elektrostacijas saražoja 4467 GWh elektroenerģijas, no neatkarīgajiem elektroenerģijas ražotājiem tika iepirktas 637 GWh un no Igaunijas, Lietuvas un Krievijas elektroenerģijas ražotājiem tika iepirktas 2841 GWh elektroenerģijas [25].

Ģenerējošās jaudas deficīts Latvijas enerģosistēmā 2006. gadā sastādīja 35%, 2007.gadā – 39,5%, 2008. gadā deficīts palielinājies līdz 43%, 2009. gadā tas bija 47%.

Latvenergo seko elektroenerģijas pieprasījumam, lai apmierinātu pieaugošās patērētāju vajadzības un samazinātu Latvijas Republikas atkarību no importētās elektroenerģijas, jo šobrīd Latvijas enerģosistēma ir deficīta.

Pārvades sistēma

Latvenergo pārvades sistēmu veidojošo 330-110 kV līnijas kopgarums 2009. gada beigās bija 5270 km, t.sk. 1258 km 330 kV sprieguma līniju, 4012 km 110 kV līniju, no tām 60 km 110 kV kabeļu līniju un 134 apakšstacijas.

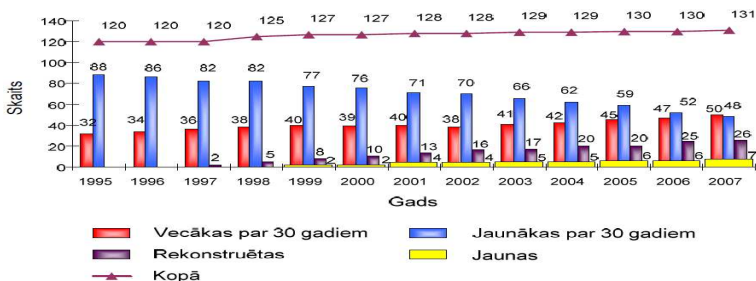
330-110 kV tīkla caurlaides spēja ir ap 12 – 13 TWh/gadā, kas divas reizes pārsniedz esošo pieprasījumu – 6-7 TWh/gadā. Pārvades tīkla caurlaides spēja var nodrošināt pieprasījumu pēc elektroenerģijas ar pietiekami lielu rezervi normālajos režīmos. Augstsprieguma tīkla savienojumi ar kaimiņu valstīm ir pietiekami elektroenerģijas importa un eksporta nodrošināšanai. Pārvadē ir paredzēts izmantot esošo 330 kV un 110 kV spriegumu, kas ļauj nodrošināt prognozēto jaudas plūsmu nākošajos desmit gados. Viena no Latvijas energoapgādes problēmām ir elektroapgādes drošums valsts rietumu reģionā - tas pamatā tiek apgādāts pa vienu 330 kV līniju. Tuvākajos gados tiks pastiprināts Latvijas enerģosistēmas pārvades tīkls Kurzemē, realizējot „Kurzemes loka” projektu [1,24].

Visām 330 kV apakšstacijām, izņemot “Rīgas TEC-1”, “Imanta” un “Daugavpils”, ir divpusēja barošana. Lielākā daļa 110 kV apakšstaciju ir ar diviem transformatoriem un divpusēju barošanu, bet ir 25 viena transformatora apakšstacijas. Turpmākajos 10 gados paredzēts pilnīgi rekonstruēt vai izbūvēt no

jauna vidēji 3 apakšstacijas un daļēji rekonstruēt četras katru gadu. Latvenergo apakšstacijas atjaunošanas lēnie tempi ir ļoti nopietna un sarežģīta problēma.

Transformatoru parka stāvokļa novērtējums

Latvijas enerģosistēmas pārvades tīklos ir 330 un 110 kV apakšstacijas. Pēc 2010. gada datiem tiek ekspluatētas 15 apakšstacijas ar augstāko spriegumu 330 kV un 119 apakšstacijas ar spriegumu 110 kV [11]. Apakšstaciju raksturojums pēc ekspluatācijas ilguma ir parādīts 1.1. attēlā.



1.1. att. 330-110 kV apakšstaciju raksturojums pēc ekspluatācijas ilguma 2007. gadā

Apakšstaciju transformatoru skaits un uzstādītā jauda ir sniegta 1.1. tabulā, iekavās – transformatoru skaits, kas netiek izmantots (nav pieslēgts spriegumam). Darbībā atrodas 159 transformatori ar spriegumu 110 kV un kopējo jaudu 3165,3 MVA un rezervē ir 86 transformatori ar kopējo jaudu 1640,5 MVA. Tālāk tekstā transformatoru skaits var nesakrist ar skaitļiem, kas ir parādīti 1.1. tabulā un 1.2. attēlā, jo ne visi 110 kV transformatori pieder Latvenergo (bet ir LET apkalpošanā). Redzams, ka transformatoru skaits ir diezgan ievērojams samērā nelielai enerģosistēmai. Enerģosistēmas kopējā transformatoru uzstādītā jauda apmēram piecas reizes pārsniedz patērētāju jaudu un ir pietiekama Latvijas enerģosistēmai.

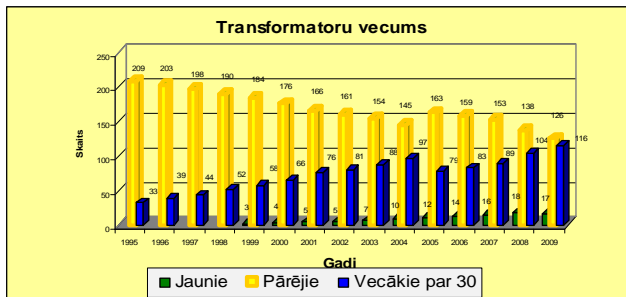
1.1. tabula.

AST 330 un 110 kV apakšstaciju raksturojums

Spriegums	Apakšstaciju skaits	Transformatoru skaits	Transformatoru uzstādītā jauda, MVA
330 kV	15	21	3200
110 kV	119	245 (7)	4805.8
Kopā	134	266 (7)	8005.8

Lai gan transformatoru uzstādītā jauda ir pietiekamā, tomēr eksistē problēma – elektrostaciju un apakšstaciju iekārtas ir pārlieki novecojušas. Līdz deviņdesmito gadu sākumam, galvenokārt, tika būvētas jaunas apakšstacijas, bet maz tika darīts, lai modernizētu vecās iekārtas. Pēdējā laikā liela vērtība tiek veltīta veco iekārtu nomainīšanai un, ja vien iespējams, modernu, turklāt arī nākotnes prasībām

atbilstošu iekārtu uzstādīšanai. 330-110 kV transformatoru sadalījums pēc kalpošanas ilguma, sākot no 1995. gada parādīts 1.2. attēlā. Tālāk analizēts tikai 110 kV transformatoru stāvoklis.



1.2. att. Transformatoru sadalījums pēc kalpošanas ilguma

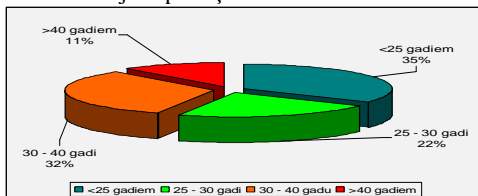
110 kV transformatori uz 2009. gadu pēc vecuma ir sadalīti četras lielās grupās (skatīt 1.3. attēlu)[1]:

pirmā - transformatori, kas nav sasnieguši nominālo (25 gadi) darba mūžu (35% no visiem);

otrā - transformatori, kuru vecums ir no 25 līdz 30 gadiem (22%);

trešā - transformatori, kuru vecums ir no 30 līdz 40 gadiem (32%) un ceturtā „vēsturiskā” daļa – transformatori vecāki par 40 gadiem (11%).

AST plāno pirkt katru gadu 4-5 jaunus transformatorus, tomēr paliek ļoti liels skaits transformatoru, par kuru nākotni jāpieņem nopietni lēmumi. 30 - 40 ekspluatācijas gadi 110 kV transformatoram (protams, arī citiem augstsprieguma transformatoriem) ir uzskatāmi par pietiekami bīstamu transformatora vecumu. Tā kā Latvijas enerģosistēmas darbība balstās uz nestabiliem 110 kV transformatoriem (ar beigušos normatīvo kalpošanas termiņu), ir grūti saglabāt enerģosistēmas drošumu šajos apstākļos.



1.3. att. Transformatoru sadalījums pēc vecuma uz 2009. gadu

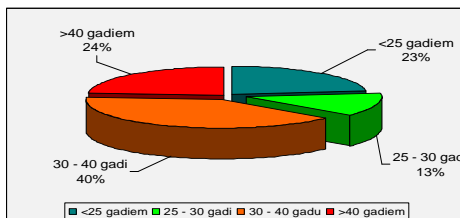
Prognozējot situāciju ar transformatoru parku stāvokli pēc vecuma uz 2016. gadu un, pieņemot, ka transformatoru atjaunošanas temps pēc krīzes perioda būs saglabāts tajā pašā līmenī, varam atspoguļot šo stāvokli tā, kā parādīts 1.4. attēlā:

pirmā grupa - transformatori, kas nav sasnieguši nominālo darba mūžu (23% no visiem);

otrā grupa - transformatori, kuru vecums ir no 25 līdz 30 gadiem (13%);

trešā grupa - transformatori, kuru vecums ir no 30 līdz 40 gadiem (40%) un

ceturrtā grupa – transformatori vecāki par 40 gadiem (24%).



1.4. att. Transformatoru sadalījuma prognoze pēc vecuma uz 2016. gadu

Lai paaugstinātu Latvijas enerģosistēmas drošību, patērētāju nepārtrauktu elektroapgādi un samazinātu ekspluatācijas izdevumus, ir izstrādāta AST elektropārvades līniju un apakšstaciju attīstības un rekonstrukcijas koncepcija laika posmam līdz 2020.gadam, kas ir sastāvdaļa no AS “Latvenergo” attīstības programmas. Šajā programmā ir paredzētas kompleksa visvecāko un visnolietotāko apakšstaciju rekonstrukcija, nomainot visu primāro un sekundāro iekārtu, modernizējot transformatorus, kā arī nomainot bojātos elektropārvades līniju konstrukciju elementus. Šai pieejai tīklu attīstībā ļoti svarīgi izvēlēties racionālu stratēģiju tehnisko pasākumu izvēlē [2].

Ekspluatācijas uzdevumu iespējamas izmaiņas enerģosistēmās

Transformatoru iekārtas, kas tiek izmantotas elektroenerģijas ražošanai, sadalei un patēriņam, ir viens no dārgākajiem un atbildīgākajiem iekārtu veidiem. Pēdējos gados ir radusies virkne jaunu problēmu, no kurām galvenā ir ekspluatējamā iekārtu parka būtiska novecošanās. Eksistē divi virzieni iekārtu novecošanas problēmu risināšanai: veco iekārtu nomaiņa pret jaunām, moderno iekārtu vai iekārtu fiziskā resursa pagarināšana virs normatīvajiem termiņiem. Ekonomiskās situācijas dēļ energouzņēmumi var orientēties pārsvarā uz transformatoru kalpošanas laika pagarināšanu, modernizējot iekārtu.

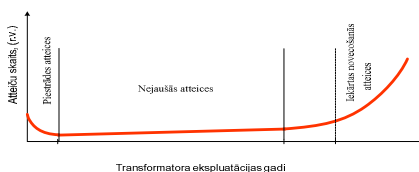
Sakarā ar ekspluatācijas uzdevumu izmaiņām enerģosistēmā ir vēlama jauna ekspluatācijas politika: pāreja no transformatoru profilaktiskiem remontiem uz remontiem pēc faktiskā transformatoru stāvokļa, izmantojot diagnostikas un monitoringa sistēmas [2, 4].

2. TRANSFORMATORA BOJĀJUMU IEMESLU ANALĪZE UN IEKĀRTU RAKSTUROJUMU UZLABOŠANAS VIRZIENI

Lieljaudas spēka transformatora iespējamo bojājumu iemesli

Lieljaudas spēka transformatoru spējas darboties energosistēmā ar noteiktu slodzi ir atkarīgas no atsevišķu mezglu stāvokļa un no tā, vai savlaicīgi tiek novērsti tādi defekti, kas var pāriet transformatora bojājumos. Tas ir viens no galvenajiem nosacījumiem, kas nosaka elektroapgādes drošumu. Lieljaudas spēka transformatoru atteices var izsaukt avārijas situācijas energosistēmā ar smagām sekām. Transformatoru atteices lielā mērā saistītas ar transformatoru kalpošanas laiku. Atteicību sakarība ar transformatora vecumu parādīta 2.1. attēlā. Transformatoru atteices var sadalīt trijās grupās:

- piestrādes atteices, apmēram 3-5 gadi pēc transformatoru uzstādīšanas;
- nejausās atteices līdz normatīva kalpošanas laika beigām 25.-30. gadā;
- iekārtas novecošanas atteices, sākot no 25.-30. gada.



2.1. att. Transformatoru atteicību dinamika

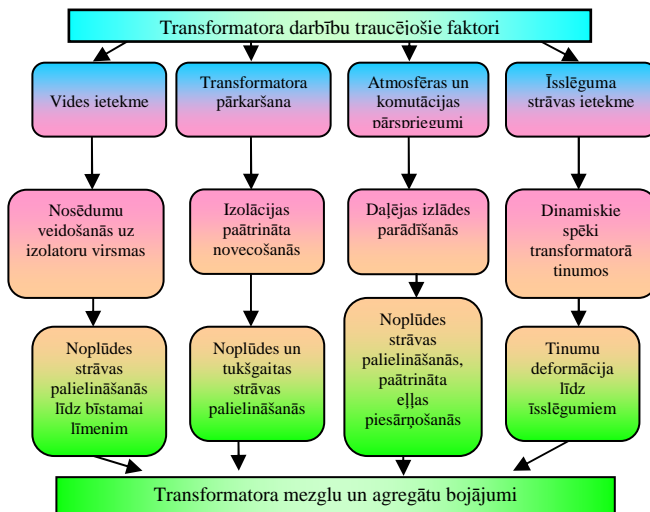
Darba laikā uz spēka transformatoru iedarbojas spēcīgi ārējie faktori un energosistēmās radītie anormālie režīmi, tādi kā (2.2.att.):

- komutāciju radītie pārspriegumi un zibens izlādes, kas var radīt vijumu izolācijas bojājumus;
- darba sprieguma palielināšanās sakarā ar nekompensētu ģenerēto kapacitāto jaudu augstsprieguma līnijās minimālos slodžu režīmos (palielina magnetizēšanas strāvu transformatoros, izsauc serdes pastiprinātu silšanu);
- īsslēguma strāvas, kas rada mehānisku triecienu tīnosmos;
- siltuma režīma traucējumi, kas izsauc izolācijas novecošanos un bojājumus augstākā sprieguma hermētiskajos ievados [4,23].

Transformatoru tehniskā stāvokļa diagnostika

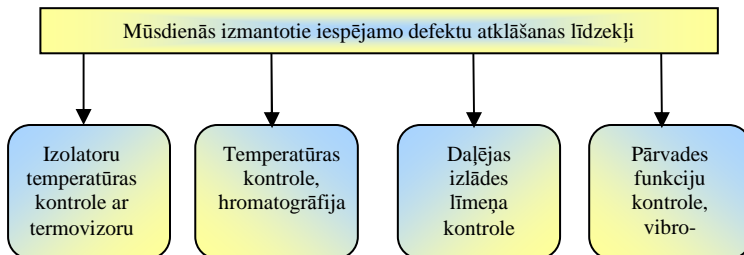
Atbilstoši spēka transformatoru ekspluatācijas instrukciju prasībām tajos tiek kontrolēts darba režīms: strāvas, spriegumi un to atbilstība pieļaujamajām vērtībām. Novirzes no šīm vērtībām nepārtraukti kontrolē releju aizsardzība, tajā skaitā arī gāzes releji. Tiek fiksēts strāvas pārslodžu un pārspriegumu lielums un ilgums, un atkarībā no transformatoram izvirsītājām prasībām var tikt veikta tā apsekošana. Tāpat tiek veikti temperatūras mērījumi dažādos transformatoru punktos, noteikts eļļas līmenis paplašinātājā un veiktas apskates ar mērķi konstatēt defektu un bojājuma ārējās pazīmes. Visi šie kontroles veidi neļauj

kvalitatīvi novērtēt transformatora tehnisko stāvokli. Šādu mērķi var sasniegt veicot transformatora diagnostiku. Transformatora pilna diagnostika notiek ar atslēgšanu no tīkla pirmajā etapā un zem darba sprieguma otrajā etapā.



2.2. att. Transformatoru iespējamo defektu attīstība

Atslēgtā stāvoklī transformatoru var apsekot padziļināti. Atsevišķos gadījumos iespējama tā pilnīga vai daļēja izjaukšana. Transformatora apsekošanu veic tā kapitālā remonta laikā, atbilstoši grafikam vai arī tad, kad plānotais laiks ir ārpus normētām robežām. Diagnostikas metodes augstāk aprakstīto defektu atklāšanai parādītas 2.3. attēlā.

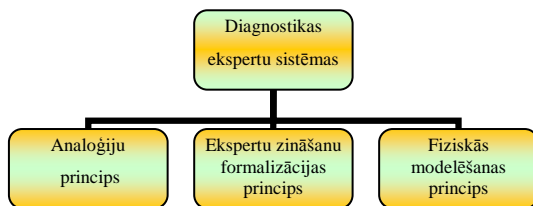


2.3.att. Iespējamo defektu atklāšanas metodes

Gadījumā, ja lieto apkopes stratēģiju atkarība no iekārtas tehniska stāvokļa, apsekošanu veic transformatoram darbojoties, ar periodiskās vai nepārtrauktās kontroles metodēm. Apsekošanu veic arī pēc transformatora avārijas atslēgšanās

no tīkla. Apsekošanas rezultāti dod iespēju veikt remontus savlaicīgi, tajā pat laikā nepieļaujot transformatoru pēkšņas avārijas. Par transformatora apsekošanas iemeslu var kļūt arī modernizācijas iespēju noskaidrošana ar mērķi, piemēram, samazināt zudumus vai palielināt slodzi. Pēdējais gadījums var būt aktuāls tāpēc, ka pārvades tīklu transformatori bieži ir nepilnīgi noslogoti un slēpj sevī intensīvākas izmantošanas iespējas.

Transformatora stāvokļa novērtējums pamatojoties uz saņemto datu analīzi ir vissarežģītākais uzdevums, kas prasa dziļas zināšanas par procesiem, kas noris transformatoros, pieredzi diagnožu noteikšanā, dažkārt intuitīvas izjūtas pie mērījumu informācijas analīzes. Šī stadija diagnostikas uzdevumu risināšanā ir visgrūtākā. Pat salīdzinoši vienkāršos gadījumos ekspluatācijas speciālistu zināšanas dažreiz izrādās nepietiekamas aparāta stāvokļa noteikšanai. Šādos gadījumos palīgā nāk pēdējos gados ātri attīstošās iekārtu stāvokļa novērtēšanas ekspertu sistēmas. Ekspertu sistēmas uzbūve parādīta 2.4.attēlā.



2.4.att. Ekspertu sistēmas uzbūves pamatprincips

Analogiju princips balstīts uz kontrolparametru līdzības analogisku defektu attīstībā. Ekspertu zināšanu formalizācijas princips izmanto speciālistu-diagnostiķu izstrādātus diagnožu noteikšanas algoritmus. Fiziskās modelēšanas principa pamatā ir aparātos notiekošo procesu maģinmodeļu būvēšana un to bāzes kontrolparametru aprēķināšana. Vairāk attīstītās sistēmas izmanto visus trīs principus vienlaicīgi [1,4,23].

Pamatvirzieni transformatora tehniskā līmeņa un kvalitātes uzlabošanai

Transformatoru izstrāde un ražošana notiek valstīs ar augsti attīstīto elektrotehnisko rūpniecību, kuru skaitā ir valstis, kuras ražo materiālus transformatoru izgatavošanai. Pasaules valstu integrācija mūsdienās ļauj izmantot vislielākos sasniegumus gan materiālu, gan arī ražošanas jomā. Mūsdienās šo valstu transformatoru ražotāji izstrādā jaunus transformatoru tipus, kuri nonāk pasaules tirgū un ir atzīti kā labas kvalitātes preces.

Jaunu modernu spēka transformatoru izstrādes pamatvirzieni saistīti ar to tehniskā līmeņa uzlabošanu. Pamatvirzieni, kas nosaka tehniskā līmeņa un kvalitātes paaugstināšanu ir:

- tehnisko raksturojumu uzlabošana;
- elektroenerģijas zudumu samazināšana;
- drošuma paaugstināšana;
- montāžas un ekspluatācijas izdevumu samazināšana.

3. TEHNISKO PASĀKUMU IZVĒLES METODIKAS PAMATNOSTĀDNES

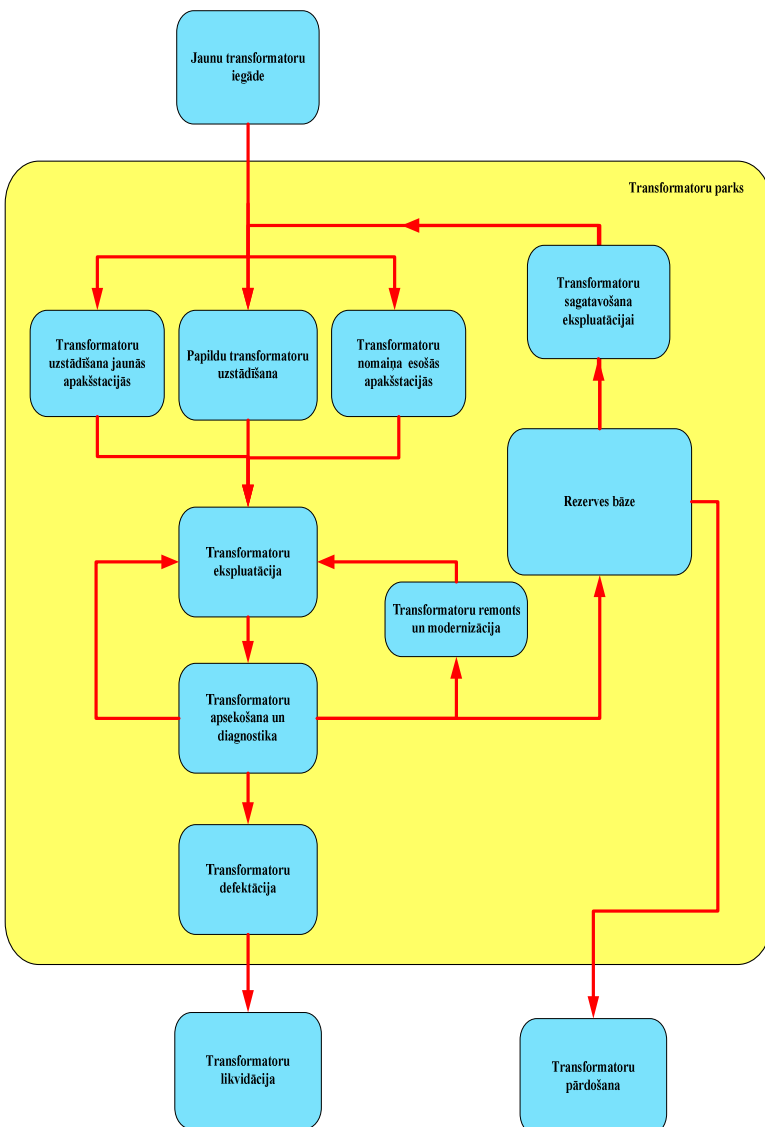
Transformatoru iespējamās pārvietošanas transformatoru parka robežās

Apakšstaciju un to transformatoru ekspluatācijas ilguma analīze, kas izpildīta promocijas darbā 1.3. nodaļā, izgaismo nopietnu problēmu, kas saistīta ar Latvijas enerģosistēmas transformatoru masveida novecošanos. 66 % transformatoru ir nokalpojuši normatīvo laiku (patlaban tas ir 25 gadi). Radikāli transformatoru parka atjaunošanas problēmu varētu risināt, īsos termiņos nomainot novecojušās iekārtas, bet liela daudzuma transformatoru vienlaicīgai nomainībai nepieciešami milzīgi kapitālieguldījumi. Energozņēmumu naudas līdzekļu deficīta apstākļos ekonomikas nelabvēlīgas attīstības periodā ir nepieciešams sabalansēt transformatoru parka atjaunošanu ar fizisko resursu pagarināšanu virs normatīvā kalpošanas laika daļai transformatoru. Tomēr iekārtu atjaunošanas temps nedrīkst atpalikt no to novecošanās tempa. Bez tam, ar veicamajiem transformatoru parka modernizācijas pasākumiem ir jānodrošina transformatoru darbības saglabāšana vai palielināšana apakšstacijās, lai garantētu patērētāju pieprasīto elektroapgādes drošumu.

Līdz ar enerģosistēmas attīstību transformatoru parkā nepārtraukti notiek kvantitatīvas un kvalitatīvas izmaiņas [2,3,5,6,8,9,12]. Latvijas enerģosistēmas transformatoru parka ietvaros iespējami šāda veida manevri, t.i., aktivitātes, kas paredz darbības ar spēka transformatoriem (3.1. att.):

- jaunu transformatoru iepirkšana;
- esošo transformatoru remonts un modernizācija;
- jaunu transformatoru uzstādīšana jaunās apakšstacijās;
- transformatoru nomaiņa esošajās apakšstacijās pret jauniem vai izremontētiem un modernizētiem;
- papildus jaunu vai izremontētu un modernizētu transformatoru uzstādīšana, veicot apakšstaciju rekonstrukciju;
- no ekspluatācijas pagaidām izņemto transformatoru glabāšana rezervju parkā;
- transformatoru pārdošana par likvīdu cenu vai to likvidācija (utilizācija).

Enerģosistēmas nepārtrauktas attīstības procesa dēļ pārmaiņas transformatoru parkā tiks turpinātas. Naudas līdzekļu mērķtiecīgai izmantošanai visiem transformatoru iekārtu darbības palielināšanas tehniskajiem pasākumiem, to rekonstrukcijai un modernizācijai jābūt tehniski racionāliem un ekonomiski pamatotiem. Promocijas darbā izstrādāta metodika ar mērķi radīt tehniski ekonomisko pamatu tehnisko pasākumu izvēlei energozņēmumos.



3.1. att. Iespējamie manevri (pārvietošanas) transformatoru parkā

Lēmuma pieņemšanas vispārīgā procedūra

Veicot noteikta objekta vai objektu transformatora vai transformatoru iekārtu tehniskā stāvokļa analīzi, iespējams nospraust vairākus tehniskos pasākumus, kas paredz iekārtu modernizāciju vai nomaiņu, lai izvēlētos optimālu risinājumu. Lēmumu pieņemšanas procedūru vispārējā veidā var attēlot šādi.

Lēmuma pieņemšana – tā ir viena risinājuma varianta E_n izvēle no kādas iespējamo risinājumu variantu kopas E_m , t.i., $E_n \in E_m$. Katrs risinājuma variants E_n ir viennozīmīgs ar kādu rezultātu e_n , kuram ir kvantitatīvs novērtējums, t.i., $E_n \Leftrightarrow e_n$.

Saskaņā ar lēmumu pieņemšanas klasisko teoriju optimālā varianta E_o izvēli aplūkojamajiem uzdevumiem var veikt ar šādu procedūru:

$$E_o = \left\{ E_{no} \mid E_n \in E_m \wedge e_{no} = \text{opt } e_n \right\}, \quad (3.1)$$

t.i., risinājuma optimālo variantu kopa sastāv no tādiem variantiem E_{no} , kuri pieder visu variantu kopai E_m un novērtējums e_{no} ir optimālais (minimālais vai maksimālais) starp visiem novērtējumiem e_n .

Kvantitatīvais novērtējums e_n var ievērot dažādus uzdevuma nosacījumus, esošās informācijas līmeni, riska faktoru, pieņemtā lēmuma ietekmi uz dažādiem darbības aspektiem utt., t.i., $e \in \{e_n\}$. Saskaņā ar to, ir nepieciešams atrast attiecīgo novērtējuma (mērķa) funkciju

$$e_n = \underset{j}{\text{oper}} \{e_n\}, \quad (3.2)$$

kura visprecīzāk raksturo konkrētu pasākumu transformatoru parka attīstībai, rekonstrukcijai un modernizācijai [7].

Tehnisko pasākumu izvēles metodikas struktūra

Izstrādātajā metodikā ir izdalīti **3 pamatbloki** attiecīgu uzdevumu risinājumam. Pamatbloku galvenie uzdevumi atspoguļoti 3.2. attēlā.

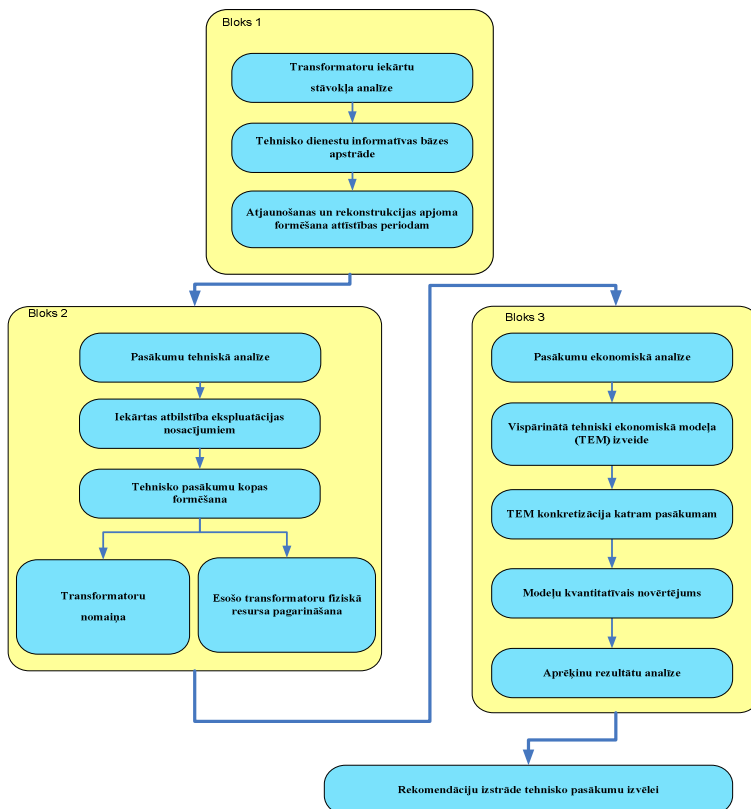
Pirmais bloks - transformatoru parka iekārtu stāvokļa analīze. Balstoties uz energouzņēmumu tehnisko dienestu veikto analīzi un ņemot vērā uzņēmumu īstermiņa, vidējā termiņa un ilgtermiņa attīstības plānus, investīcijas apjomus un pieejamos uzņēmumu pašu līdzekļus, tiek veidots darbu apjoms un termiņi jaunu objektu ieviešanai un esošo objektu rekonstrukcijai energosistēmā un atsevišķos energouzņēmumos. Jaunu transformatoru jaudu ieviešanas vai apakšstaciju rekonstrukcijas darbu apjoms ir pārvades vai sadales tīkla attīstības plāna sastāvdaļa. Pirmajā blokā tiek formēta tehnisko pasākumu kopa E_m .

Otrais bloks - konkrēto objektu veicamo pasākumu padziļināta tehniskā analīze. Iekārtu tehniskā stāvokļa analīze tiek realizēta uz apskašu, plānoto remontu, diagnostikas un tehniskās ekspertīzes pamata. Diagnostikas metodes tiek sīkāk aplūkotas promocijas darbā 2.3. apakšnodaļā.

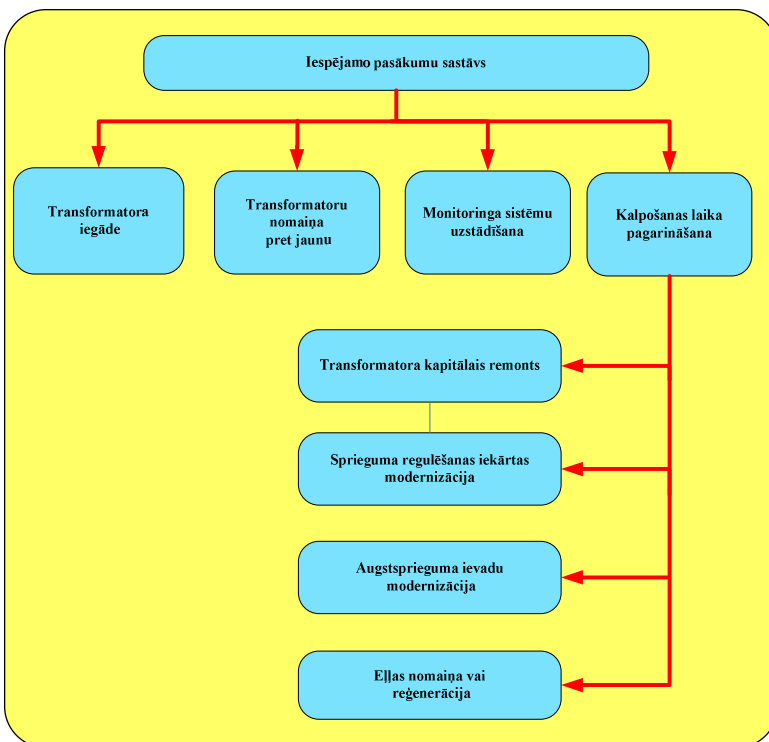
Saskaņā ar analīzes rezultātiem un atkarībā no tā, kādā mērā tiek izpildītas tehniskās prasības un normas esošai iekārtai, kāds ir tās noslodzes līmenis, ir iespējami šādi alternatīvi pasākumi: būvēt jaunas apakšstacijas, aizstāt esošo transformatoru ar jaunu vai pagarināt tā ekspluatācijas ilgumu. Otrajā blokā tiek formēta tehnisko pasākumu kopa E_n . Iespējamo tehnisko pasākumu kopa E_n transformatora iekārtas darbības drošuma paaugstināšanai parādīta 3.3. attēlā.

Trešais bloks – iespējamo tehnisko pasākumu ekonomiskais novērtējums un pamatojums.

Paredzētie pasākumi veido tehnisko pasākumu kopu tālākai ekonomiskajai novērtēšanai trešajā blokā (3.2.att.). Novērtēšanai izmantotas mūsdienīgas ekonomiskās analīzes metodes. Ekonomiskās analīzes rezultātā tiks veikta realizējamo tehnisko pasākumu izvēle un rekomendācijas sagatavošana energouzņēmumiem.



3.2. att. Tehnisko pasākumu izvēles metodikas struktūra



3.3. att. Tehniskie pasākumi transformatora darbības drošuma paaugstināšanai

Konkrēto pasākumu, kas minēti 3.3. attēlā, tehniskā analīze tiek izpildīta 4. un 5. nodaļā.

Pasākumu ekonomiskās analīzes metodes

3.2. attēla 3. blokā parādīti tehnisko pasākumu ekonomiskās analīzes galvenie etapi. Šo etapu realizācijai ir nepieciešams izvēlēties ekonomiskās analīzes metodes.

Naudas plūsmas vērtība mainās laikā un vienai un tai pašai naudas summai ir dažāda vērtība atšķirīgos laika posmos. Naudas vērtību laika gaitā galvenokārt iespaido inflācija un tirgus ekonomikas apstākļi. Tādēļ nepieciešamie ekonomiskie aprēķini jāizdara pēc tīrās vērtības metodes, t.i., visas izmaksas jāreducē uz aplēses perioda sākumu.

Projektu novērtēšanas metodes dažādās valstīs ir atšķirīgas. Latvijā tehnisko pasākumu izvērtēšanai visbiežāk lieto kapitalizēto izmaksu metodi un summāro

diskontēto ikgadējo izmaksu metodi. Darbā tehniski ekonomiskajam novērtējumam izmantota summāro diskontēto ikgadējo izmaksu metode.

Pasākumu vispārināts tehniski ekonomiskais modelis

Lai nodrošinātu energosistēmas transformatoru normālu un drošu darbību, ir jāveic šādi pasākumi:

- morāli vai fiziski novecojušo transformatoru nomaina ar jauniem, modernām tehnoloģijām atbilstošiem transformatoriem;
- reālo fizisko resursu pagarinājums esošajiem transformatoriem pēc diagnostikas izmeklējumiem, defektu novēršanas, modernizācijas un remontu izpildes.

Tirgus ekonomikas apstākļos visiem energosistēmas tehniskajiem pasākumiem, tai skaitā transformatoru funkcionēšanas drošuma paaugstināšanai, ir jābūt pamatotiem ar tehniski ekonomiskajiem aprēķiniem naudas resursu racionālai izmantošanai. Šādus aprēķinus visefektīvāk var veikt ar matemātiskiem vai tehniski ekonomiskajiem modeļiem, izmantojot piemērotas datorprogrammas.

Tehniski ekonomiskie modeļi (TEM) pasākumu (3.3.att.) kvalitatīvai novērtēšanai un atbilstošas mērķa funkcijas kvantitatīvai novērtēšanai promocijas darbā izstrādāti uz transformatora lietotāja summāro diskontēto ikgadējo izmaksu NPV_n (*Net Present Value*) pamata par visu aprēķina periodu (iekārtas dzīves ciklu) [15,17,21,22].

Izvēloties attiecīgo tehnisko pasākumu, ir jāuzskaita visi iekārtas dzīves cikla izdevumi, jo ekspluatācijas izdevumi nereti ir samērojami ar pasākumu realizēšanas izdevumiem vai tos pat pārsniedz.

Visu pasākumu tehniski ekonomiskajiem modeļiem izmantota kopēja pieeja, kas ļauj izveidot vispārinātu tehniski ekonomisko modeli. Tehnisko pasākumu kvantitatīvai novērtēšanai un 3.2. attēla 3. bloka uzdevumu realizācijai uz NPV_n pamata izmantota šāda mērķa funkcija:

$$NPV_n = \sum_{t=0}^T C_{nT,t} \cdot \frac{1}{(1+i_d)^t} = C_{n0} + \sum_{t=1}^T C_{nT,t} \cdot d_t \quad , \quad (3.8)$$

kur $C_{nT,t}$ - transformatora lietotāja reālās ikgadējās izmaksas t -tajā gadā (izdevumi un ienākumi) pasākuma n realizācijai; C_{n0} - n pasākuma izdevumi aprēķina perioda T sākuma momentā $t = 0$; T - aprēķina periods; d_t - diskontēšanas koeficients (dažādu laiku izmaksas attiecinātas uz sākuma momentu); i_d - diskonta likme.

Transformatora lietotāja summārās ikgadējās izmaksas $C_{nT,t}$ t -tajā gadā n pasākuma realizācijai pēc izteiksmes (3.8) satur vairākas sastāvdaļas:

$$C_{nT,t} = C_{nK,t} + C_{nOp.c,t} + C_{nOp.v,t} + C_{nR} \quad , \quad (3.9)$$

pie tam:

$$C_{nK,t} = \frac{i}{100} \cdot K_{nT\Sigma,t}; \quad (3.10)$$

$$C_{nOp.c,t} = \frac{p_{na} + k_{nr,t} p_{nr}}{100} \cdot K_{nT\Sigma,t};$$

$$C_{nOp.v,t} = k_{E,t} (\Delta P_{nnl} \cdot T_d + \beta_T^2 \cdot \Delta P_{nsc} \cdot \tau) \cdot \beta' + (\Delta P_{nnl} + \beta_T^2 \cdot \Delta P_{nsc}) \cdot \beta'';$$

$$C_{nR} = c_{nR} \cdot A_n = c_{nR} \cdot \chi_n \cdot A_{n,max},$$

kur $C_{nK,t}$ - kapitālizmaksas (atskaitījumi no pasākuma $K_{nT\Sigma,t}$ kapitālieguldījumiem, ievērojot procentu likmi (vidējā svērtā kapitāla atdeves likme) i ; $C_{nOp.c,t}$ - pastāvīgie ekspluatācijas izdevumi amortizācijai, kārtējam

remontam un apkalpošanai, ievērojot attiecīgos procentuālos atskaitījumus iekārtas amortizācijai p_{na} un remontam p_{nr} ; $C_{nOp.v,t}$ - mainīgie ekspluatācijas

izdevumi transformatora elektroenerģijas zudumu kompensācijai; $\Delta P_{n nb}$ $\Delta P_{n sc}$ – transformatora tukšgaitas un īsslēguma zudumi; T_d - transformatora darbības laiks gadā; τ - maksimālo zudumu laiks; β_T – plānotais transformatora noslodzes koeficients; β' - 1kWh elektroenerģijas zudumu cena; β'' - 1 kW jaudas cena enerģosistēmas maksimumu laikā; C_{nR} - zaudējumi no patērētājiem nepiegādātās

elektroenerģijas; c_{nR} - patērētājiem nepiegādātās elektroenerģijas īpatnējās izmaksas; A_n - nepiegādātās elektroenerģijas daudzums gadā; χ_n - transformatora avārijas dīkstāves varbūtība (relatīvās vienībās); $A_{n,max}$ - maksimālais caur transformatoru pārvadāmais elektroenerģijas daudzums gadā. Vidējā svērtā kapitāla atdeves likme i :

$$i = i_p \frac{K_p}{K_p + K_{kr}} + i_{kr} \frac{K_{kr}}{K_p + K_{kr}}, \quad (3.11)$$

kur i_p – energouzņēmuma pašu kapitāla atdeves likme; i_{kr} – aizņemtā kapitāla atdeves likme; K_p – pašu kapitāls un K_{kr} – aizņemtais kapitāls. Ievērojot visu augstāk teikto un summāro ikgadējo izmaksu sastāvdaļas, vispārinātās TEM mērķa funkcija ir sekojoša:

$$NPV_n = C_{n0} + \sum_{t=1}^T \left\{ \sum_{j=1}^m \left[\left(\frac{i}{100} \cdot K_{nT\Sigma,tj} \right) + \left(\frac{1}{100} \cdot (p_{na} + k_{nr,t} p_{nr}) \cdot K_{nT\Sigma,tj} \right) + k_{E,t} \cdot \left[(\Delta P_{n nl} \cdot T_d + \beta_T^2 \cdot \Delta P_{n sc} \cdot \tau) \cdot \beta' + (\Delta P_{n nl} + \beta_T^2 \cdot \Delta P_{n sc}) \cdot \beta'' \right] + k_{E,t} \cdot k_{nr,t} \cdot C_{nR} \right] \right\} \cdot \frac{1}{(1+i_d)^t}, \quad (3.12)$$

kur j – kārtējā investīcija pasākuma realizācijai, turklāt $j = 1, \dots, m$; $k_{nr,t}$ – koeficients, kas raksturo transformatora ekspluatācijas izdevumu palielinājumu ekspluatācijas laikā; $k_{E,t}$ – koeficients, kas raksturo enerģijas zudumu vērtības palielinājumu ekspluatācijas periodā.

Koeficients $k_{E,t}$ ir laika funkcija $k_{E,t}(t) = k_{E,0}(1+bt)$, kur koeficients b ir atrasts aproksimējot statistikos datus un ievērojot enerģijas zudumu vērtības palielinājumu pēdējos gados un $b=0,03$; $k_{E,0}$ – aprēķina perioda enerģijas zudumu sākotnējā maksa.

Koeficients $k_{nr,t}$ arī ir laika funkcija. Tas ir noteikts aproksimējot statistiskos datus un ievērojot transformatora ekspluatācijas izdevumu palielinājumu sakarā ar iekārtu novecošanos un atteices riska pieaugumu ekspluatācijas laikā (saskaņā ar funkcionālās atkarības raksturu 2.1. attēlā). Koeficients $k_{nr,t}$ pasākumiem ir atrasts diviem laika intervāliem: pirmajā intervālā 0...25 ekspluatācijas gadiem - $k_{nr,t}(t) = 1+bt$, kur $b = 0,02$; otrajā intervālā 25...40 ekspluatācijas gadiem - $k_{nr,t}(t) = at^2 + bt + c$, kur $a = 0,01$, $b = 0,02$, $c = 1,3$.

TEM saskaņā ar (3.12) nav ievēroti ienākumi no elektroenerģijas realizācijas un elektroapgādes pakalpojumu sniegšanas, uzskatot, ka tie ir vienādi visiem variantiem. Pasākuma plānotos ienākumos var aprēķināt pēc formulas:

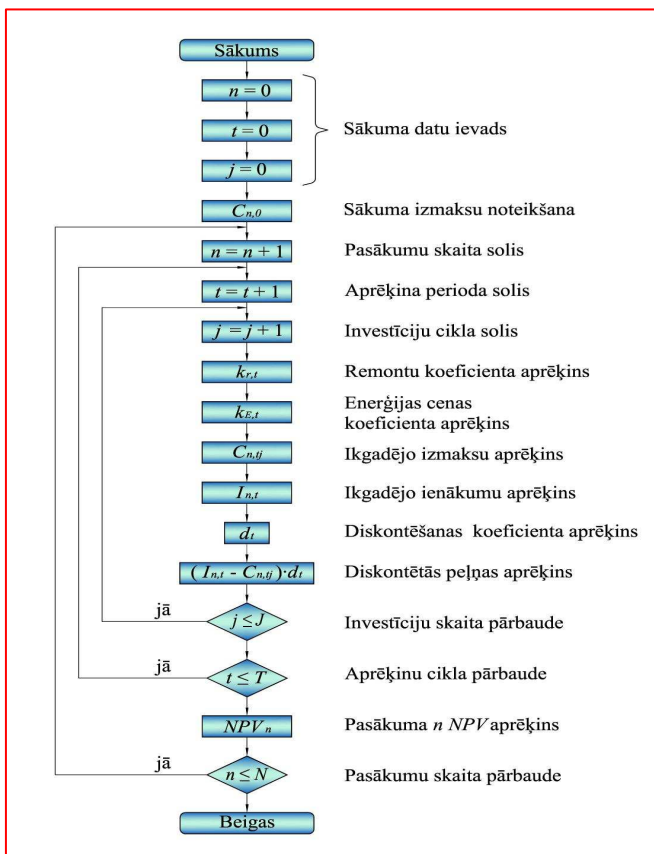
$$I_n = \sum_{t=1}^T [\beta_E \cdot P_T \cdot \beta_T \cdot T_m + \beta_R \cdot P_T \cdot (1 - \beta_T)] \cdot k_{E,t} \cdot k_p, \quad (3.13)$$

kur I_n – summārie ikgadējie ienākumi no elektroenerģijas realizācijas un elektroapgādes pakalpojumu sniegšanas; P_T – transformatoru aktīvā jauda; T_m – maksimālās slodzes izmantošanas laiks gadā; β_E – 1kWh elektroenerģijas pārvades tarifs; β_R – maksa par jaudas uzturēšanu energosistēmā; k_p – ienākumu koeficients, kas parāda ienākumu daļu pēc visu nodokļu samaksāšanas. Minimālās summārās diskontētās izmaksas ($\min NPV_n$) par aprēķina periodu (3.12.) ir optimālā varianta izvēles kritērijs, neievērojot ienākumus no produkcijas (elektroenerģijas) realizācijas, ja tie ir vienādi visiem variantiem. Šajā gadījumā izmaksas pieņemtas ar „+” zīmi.

Ievadot ienākumus, mērķa funkcijai mainās pasākuma izvēles kritērijs. Tagad maksimālās summārās diskontētās ikgadējās izmaksas ($\max NPV_n$) par aprēķina periodu ir optimālā pasākuma varianta izvēles kritērijs. Papildus tam, ievērojot ienākumus, ir iespēja novērtēt pasākumu variantus pēc atmaksāšanās perioda kritērija. Attēlojot aprēķinu rezultātus grafiski vai tabulas veidā, gads, kurā NPV_n iegūst pozitīvu novērtējumu, ir ieguldītā finansējuma seġšanas gads [15, 16]. Apvienojot izmaksas un ienākumus vienā izteiksmē, iegūstam:

$$NPV_n = -C_{n0} + \sum_{i=1}^T \left\{ \begin{aligned} & \left[\frac{P_T \cdot \beta_T \cdot \beta_E \cdot T_m + P_T \cdot (1 - \beta_T) \cdot \beta_{R1}}{100} \cdot k_{Ei} \cdot k_p - \right. \\ & \left. \left[\frac{i}{100} \cdot K_{nT\Sigma,tj} + \frac{1}{100} \cdot (p_{na} + k_{nr} \cdot p_{nr}) \cdot K_{nT\Sigma,tj} \right] - \right. \\ & \left. - k_{Ei} \cdot \left[(\Delta P_{nnt} \cdot T_d + \beta_T^2 \cdot \Delta P_{nsc} \cdot \tau) \cdot \beta^{i'} + \right. \right. \\ & \left. \left. + (\Delta P_{nnt} + \beta_T^2 \cdot \Delta P_{nsc}) \cdot \beta^{i'} \right] - k_{Ei} \cdot k_{nr} \cdot C_{nr} \right\} \cdot \frac{1}{(1+i_d)^i}, \end{aligned} \right. \quad (3.14)$$

Tehnisko pasākumu ekonomiskās novērtēšanas algoritms dots 3.6. attēlā. Algoritms tiek realizēts ar aprēķinu programmu EXCEL vidē. Konkrēto pasākumu ekonomiskā analīze tiek izpildīta 4. un 5. nodaļā.



3.6.att. Tehnisko pasākumu ekonomiskās novērtēšanas algoritms

4. TRANSFORMATORU IEGĀDE UN NOMAIŅA

Moderno transformatoru raksturojumu salīdzinājums

Energosistēmai nepārtraukti attīstoties, ir jāplāno pasākumi, kas virzīti uz transformatoru parka drošas darbības uzturēšanu, tehniskā stāvokļa uzlabošanu un attīstību. Daļa no šiem pasākumiem saistīta ar jaunu transformatoru iegādi.

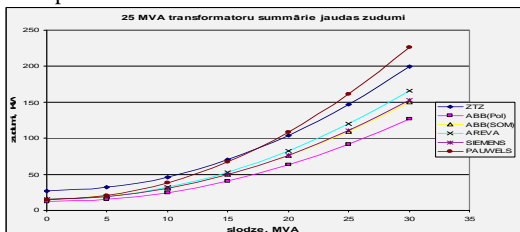
Iegādājoties jaunus transformatorus ir jānodrošina to atbilstība uzlabotiem tehniskajiem rādītājiem. Vadošie izgatavotāji izmanto līdzīgus tehnoloģiskos procesus, tādēļ transformatoru tehniskajiem parametriem ir diezgan nelielas atšķirības. Vissvarīgākie raksturojumi, kuriem pievērš uzmanību izvēloties jaunu transformatoru, ir tukšgaitas zudumi, īsslēguma (slodzes) zudumi, īsslēguma spriegums, tukšgaitas strāva, trokšņa līmenis, svars, eļļas apjoms un citi.

Latvijā darbojas dažādas firmas, kas pārstāv transformatoru iekārtu izgatavotājrūpnīcas. Salīdzināsim piedāvāto iekārtu tehniskos parametrus un raksturojumus. Tukšgaitas un slodzes zudumi nosaka summāros jaudas zudumus transformatorā. Tos aprēķina pēc formulas:

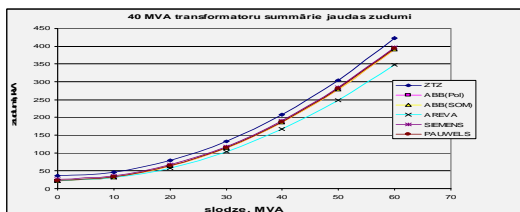
$$\Delta P_T = \Delta P_{nl} + \left(\frac{S_T}{S_{nom}} \right)^2 \cdot \Delta P_{sc} = \Delta P_{nl} + \beta^2 \cdot \Delta P_{sc}, \quad (4.1.)$$

kur S_T , S_{nom} – transformatora reālā un nominālā slodze; β – transformatora noslodzes koeficients; ΔP_{nl} , ΔP_{sc} – transformatora tukšgaitas un īsslēguma zudumi.

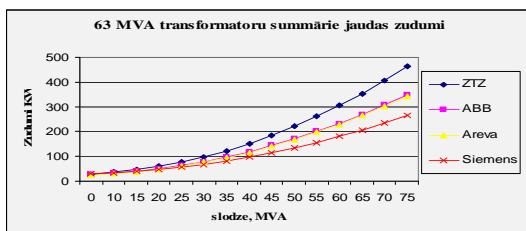
Latvijā izplatītāko piegādātāju transformatoru summārie jaudas zudumi pie dažādām slodzēm parādīti 4.1.- 4.3. attēlā.



4.1. att. 25 MVA transformatoru summārie jaudas zudumi



4.2. att. 40 MVA transformatoru summārie jaudas zudumi



4.3. att. 63 MVA transformatoru summārie jaudas zudumi

Praktiskie aprēķini jauno transformatoru iegādes pasākuma novērtēšanai

Pasākuma tehniskā analīze

Transformatoru parka atjaunošana Latvijas enerģosistēmā notiek nomainot vecos transformatorus pret jauniem, moderniem un šim procesam obligāti jāturpinās arī nākotnē. Transformatoru iegāde jaunajiem un esošajiem objektiem notiek konkursa kārtībā. Pirms konkursa sākuma objekta īpašnieks izvirza tehniskās prasības iekārtai. Parasti tehniskajās prasībās tiek iekļauti vēlamie iekārtu tehniskie parametri un izmēri. Jāatzīmē, ka mūsdienās transformatorus ražo pēc individuāla pasūtījuma. Konkursa pēdējā etapā pasūtītājam jārisina uzdevums – kurš pretendents un kurš piedāvātais variants ir labākais. Optimālā varianta izvēle spēka transformatoru iegādei tiek izskatīta kā iekārtu piegādātāja-uzvarētāja noteikšana uz konkursa pamata (izmantojot tendera procedūru) starp dažādām piegādātājfirmām vai izgatavotāj rūpnīcām [13,15,16,20,22]. Vispirms visiem pretendentiem obligāti jāizpilda pasūtītāja izvirzītās tehniskās prasības. Tomēr, salīdzinot tikai transformatora variantu izpildījuma tehniskos parametrus, grūti piešķirt prioritāti kādam pretendentam, jo katram piegādātājam parametri atšķiras. Transformatoru piegādātāja izvēli ietekmē arī:

- sociālpolitiskās attiecības ar valsti-iegādātāju, rūpnīcas vai firmas reputācija utt.;
- tehniskie radītāji – izpildījuma kvalitāte, atteicu skaits, kalpošanas ilgums, iespējas remontēt vai mainīt atsevišķos agregātus, jaudas un elektroenerģijas zudumi un citi;
- ekonomiskie – tagadējā iekārtas cena, rezerves daļu cena, nākamie ekspluatācijas izdevumi utt.

Veicot visu pretendentu variantu tehnisko analīzi (kā atzīmēts 3.2. att. 2. blokā), daļa variantu var atkrist. Palikušajiem variantiem, kuri atbilst visām tehniskajām prasībām, jāveic ekonomiskā analīze (kā atzīmēts 3.2. att. 3. blokā).

Pasākuma ekonomiskais novērtējums

Tehniski ekonomisko modeli (TEM1) transformatora iegādes pasākumam $n=1$ var iegūt no vispārīnātā modeļa VTEM (3.14), konkretizējot atsevišķas

komponentes un rādītājus. Atbilstošā mērķa funkcija NPV_I šim pasākumam balstās uz summārajām diskontētajām ikgadējām izmaksām transformatora iegādei un tālākai ekspluatācijai visā kalpošanas laikā.

Summārās diskontētās ikgadējās izmaksas NPV_I transformatora iegādes pasākumam $n=1$, ievērojot atsevišķas izmaksu komponentes, var izteikt šādi:

$$NPV_I = -C_{10} + \sum_{t=1}^T \left\{ \begin{array}{l} [P_{nom} \cdot \beta_T \cdot \beta_E \cdot T_m + P_{nom} \cdot (1 - \beta_T) \cdot \beta_R] \cdot k_{E,t} \cdot k_p - \\ \left[\frac{i}{100} \cdot K_{1T\Sigma,t} + \frac{1}{100} \cdot (p_{1a} + k_{vr} \cdot p_{1r}) \cdot K_{1T\Sigma,t} \right] \cdot \frac{1}{(1+i_d)^t}, \\ - k_{E,t} \cdot \left[\begin{array}{l} (\Delta P_{1nl} \cdot T_d + \beta_T^2 \cdot \Delta P_{1sc} \cdot \tau) \cdot \beta' + \\ + (\Delta P_{1nl} + \beta_T^2 \cdot \Delta P_{1sc}) \cdot \beta'' - k_{vr} \cdot C_{1R} \end{array} \right] \end{array} \right\} \quad (4.2)$$

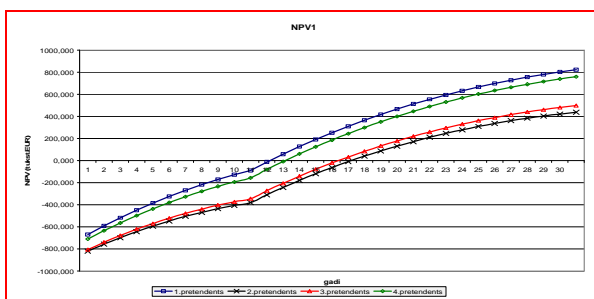
kur C_{10} – izdevumi jauna transformatora iegādei pasākuma aprēķina perioda sākumā $t=0$, kas ir vienādi ar summāriem kapitālieguldījumiem $K_{1T\Sigma}$, t.i., $C_{10} = K_{1T\Sigma}$; $K_{1T\Sigma,t}$ – summārie kapitālie ieguldījumi pasākumam $n = 1$ aprēķina gadam t ; p_{1a} , p_{1r} – procentuālie atskaitījumi no kapitālieguldījumiem iekārtas amortizācijai, remontam un apkalpošanai; ΔP_{1nl} , ΔP_{1sc} – transformatora tukšgaitas un īsslēguma zudumi; C_{1R} – iespējamie zaudējumi no patērētajiem nepiegādātās elektroenerģijas pasākumam $n=1$ [21].

Summārie kapitālieguldījumi $K_{1T\Sigma}$ jauna transformatora iegādei sastāv no atsevišķām komponentēm, t.sk.: transformatora izmaksas K_T ; transformatora transportēšanas izmaksas no izgatavotājrūpnīcas līdz uzstādīšanas vietai K_{tr} ; jaunā transformatora montāžas izmaksas K_i ; rezerves daļu izmaksas K_{sp} (ekspluatācijas nodrošināšanai piecu gadu laikā pēc iegādes); muitas nodevas piegādātājvalsts produkcijai K_{cd} ; papildu izmaksas K_{add} (pieņemšanas izmēģinājumu veikšanai utt.), t.i.,

$$K_{1T\Sigma} = K_T + K_{tr} + K_i + K_{sp} + K_{cd} + K_{add} \quad (4.3)$$

Maksimālās summārās diskontētās ikgadējās izmaksas ($max NPV_I$) spēka transformatora lietotājam (izmantotājam) visam transformatora darbības ciklam T ir galvenais kritērijs konkursa (tendera) uzvarētāja izvēlei un dotā uzdevuma optimālais risinājums. Mērķa funkcijai (4.2), izmantojot optimalitātes kritēriju $NPV_I = max$, ir veikts novērtējums 110 kV 63, 40, 32, 25, 16 MVA transformatoru iegādei no dažādiem iekārtu izgatavotājiem un piegādātājiem.

Praktisko aprēķinu piemērs mērķa funkcijai NPV_I 110 kV, 63 MVA jauno transformatoru piegādei parādīts 4.2. attēlā. Aprēķini veikti pēc (4.2) pasākumam $n=1$, ievērojot gaidītos ienākumus. Konkursā piedalījās četri pretendenti - piegādātāji. Katra pretendenta piedāvatajam variantam veikti NPV_I aprēķini un rezultāti salīdzināti grafikā. Konkursa uzvarētājs – pirmais pretendents ar $NPV_I = max$.



4.1. att. Aprēķinu praktiskā realizācija pasākumam $n=1$

Analizējot iegūtos rezultātus, secinām:

- vislielākā NPV_1 par visu aprēķina periodu ir pirmajam variantam;
- vismazākā NPV_1 ir otrajam variantam;
- vismazākais atmaksāšanās periods ir seši gadi 1. variantam;
- konkursa uzvarētājs ir pretendents ar 1. varianta nosacījumiem.

Novecojušo transformatoru nomaiņas tehniskais pasākums

Esošo spēka transformatoru nomaiņas nepieciešamībai pret jauniem, ar uzlabotiem tehniskiem raksturojumiem (mazāki tukšgaitas un īsslēguma zudumi, mazāks tērauda svars u.c.), var būt vairāki iemesli: fiziski nolietotu vai morāli novecojušu iekārtu maiņas vajadzība, iziešana no ekspluatācijas avārijas dēļ un darba stāvokļa atjaunošanas neiespējamība, neatbilstība patērētāju slodzēm u.c. Nomainas kopējā pasākuma sastāvdaļas ir jauno transformatoru iepirkums, piegāde un montāža, esošā transformatora demontāža un pārdošana. Salīdzinot tikai tehniskos parametrus, grūti izvēlēties, kuram ražotājam atdot priekšroku, jo katram pretendētājam tie atšķiras. Optimālās summārās diskontētās ikgadējās izmaksas NPV_n transformatora iegādei ienāk kopējā pasākumā kā sastāvdaļa.

Atšķirībā no iepriekš apskatītā pasākuma $n=1$, formulā (4.2) nāk klāt papildu ienākumi – vecā transformatora likvidā vērtība K_{likv} , un tā demontāžas izdevumi K_d . Ja pieņem likvidā vērtību vienādu ar izdevumiem vecā transformatora demontāžai, tad funkcija principiāli neatšķiras no funkcijas (4.2) transformatora iegādei. Maksimālās summārās ikgadējās diskontētās izmaksas ($max NPV_2$) aprēķina periodā ir uzdevuma optimālais risinājums [20].

5. TRANSFORMATORU REMONTS UN MODERNIZĀCIJA

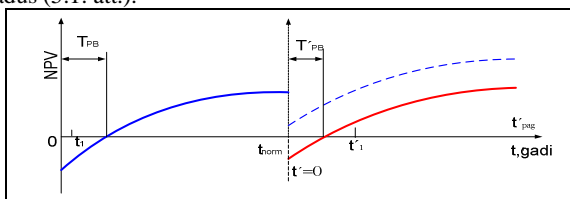
Transformatoru kalpošanas laika pagarināšana virs normatīvā termiņa

Vēsturiski vislielākais transformatoru skaita pieaugums Latvijas enerģosistēmā bija pagājušā gadsimta 50., 60. un 80. gados, tāpēc liels transformatoru skaits jau pārsniedzis normatīvā kalpošanas laika robežu. Vienlaicīgi nomainīt lielu transformatoru skaitu ir grūti gan no tehniskā, gan arī no ekonomiskā viedokļa, jo tam nepieciešamas lielas investīcijas. Šo problēmu

var mēģināt risināt pagarinot kalpošanas laiku esošajiem transformatoriem pēc to diagnostikas izmeklējumiem, defektu novēršanas, modernizācijas un remontu izpildes. Visu transformatoru defektu un bojājumu ievērojama daļa attiecas uz komplektējošām palīģierīcēm.

Turpmāk aplūkoti šādi transformatoru kalpošanas laika pagarināšanas pasākumi: sprieguma regulēšanas ierīču un augstsprieguma ievadu nomaiņa un modernizācija; transformatoru eļļas reģenerācija vai nomaiņa; diagnostikas un monitoringa sistēmas pielietošana. Starp pasākumiem transformatoru kalpošanas laika pagarināšanai apskatīti: sprieguma regulēšanas ierīču (SRI) nomaiņa un modernizācija; augstsprieguma ievadu nomaiņa un modernizācija; transformatoru eļļas reģenerācija vai nomaiņa; diagnostikas un monitoringa sistēmu lietošana. Minēto pasākumu ekonomiskajam novērtējumam ir lietoti tehniski ekonomiskie modeļi (TEM), kas izveidoti konkrētiem pasākumiem uz vispārinātā modeļa VTEM (3.12) vai (3.14) pamata.

Ja pasākumi paredzēti transformatoru kalpošanas laika pagarināšanai, tad attiecīgas mērķa funkcijas aprēķina periods sākas no transformatora normatīvā termiņa t_{norm} beigām un šis gads pieņemts kā $t=t'=0$. Aprēķinu periods virsnormatīvam termiņam (darba pagarināšanas periods) sastāda $t'_{pag} = T_{vnorm} = 15 - 20$ gadus (5.1. att.).



5.1.att. Aprēķinu perioda pieņemšana dažādiem pasākumiem

Zemāk ir izpildīta transformatora kalpošanas laika pagarināšanas pasākumu tehniskā analīze un ekonomiskais novērtējums [1].

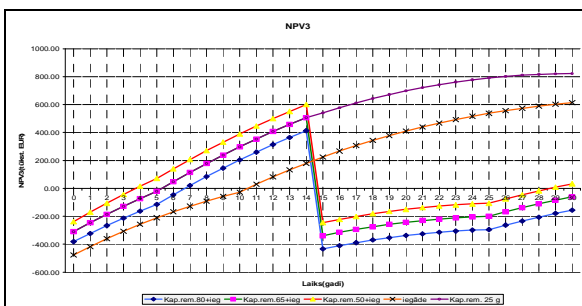
Transformatora kapitālā remonta tehniskā analīze un pasākuma ekonomiskais novērtējums

Spēka transformators energosistēmā ir viens no galvenajiem elementiem, kas nosaka elektroapgādes drošumu. Bāzes transformatoru atteice var izsaukt avāriju energosistēmā ar plaša mēroga sekām. Elektroapgādes drošuma līmeņa uzturēšanai ir nepieciešama transformatoru pareiza ekspluatācija. Svarīgi arī savlaicīgi novērst tādas defektus, kas var pāriet transformatora bojājumos. Pēc darba apjoma izšķir uzturēšanas (ekspluatācijas) un kapitālo remontu. Uzturēšanas remontus elektrostaciju un apakšstaciju galvenajiem transformatoriem veic vienu reizi gadā. Kapitālos remontus plāno pēc vajadzības, ņemot vērā transformatoru apsekošanas un diagnostikas rezultātus. Pēc darba apjoma izšķir tekošo (ekspluatācijas) un kapitālo remontu. Kapitālajā remontā var būt iekļauta tinumu nomaiņa bez magnētva remonta un tinumu nomaiņa ar daļēju vai pilnu magnētva remonto. Jebkurš remonts, kas saistīts ar eļļas tvertnes atvēršanu, ir uzskatāms par kapitālo.

Transformatora kapitālajam remontam ir nepieciešami salīdzinoši lieli naudas līdzekļi. Lai novērtētu šo pasākumu, pamatojoties uz VTEM, iegūts tehniski ekonomiskais modelis TEM3 un attiecīga mērķa funkcija NPV_3 . Mērķa funkcijai NPV_3 ir precizētas funkcijas (3.14) atsevišķas sastāvdaļas. Transformatora kalpošanas laika pagarinājumam funkcijā ieviests laiks t' , pie kam laiks t' sākas pēc transformatora normatīvā kalpošanas laika beigām un mainās robežās no $t'=0$ līdz $t'=t'_{paq}$. Mērķa funkcija NPV_3 kapitālā remonta pasākuma $n=3$ novērtēšanai ir šāda:

$$NPV_3 = -C_{30} + \sum_{t'=0}^{t'_{paq}} \left\{ \begin{aligned} & \left[\frac{P_{nom} \cdot \beta_T \cdot \beta_E \cdot T_m + P_T \cdot (1 - \beta_T) \cdot \beta_R}{100} \cdot k_p \cdot k_{E,t} - \right. \\ & \left. \left[\frac{i}{100} \cdot K_{3T\pi,t'} + \frac{1}{100} \cdot (p_{3a} + k_{3rt} p_{3r}) \cdot K_{3T\pi,t'} \right] - \right. \\ & \left. - k_{E,t} \cdot \left[\frac{(\Delta P_{3nl} \cdot T_d + \beta_T^2 \cdot \Delta P_{3sc} \cdot \tau) \cdot \beta' +}{+(\Delta P_{3nl} + \beta_T^2 \cdot \Delta P_{3sc}) \cdot \beta''} \right] - k_{E,t} \cdot k_{3rt} C_{3R} \right\} \cdot \frac{1}{(1+i_d)^{t'}} \quad (5.1) \end{aligned} \right.$$

kur C_{30} ir vienāds ar summārajiem kapitālieguldījumiem $K_{3T\pi}$ transformatora kapitālajam remontam; $k_{3rt} = at'^2 + bt' + c$, un $a=0,01$, $b=0,02$, $c=1,3$; $k_{E,t} = 1 + bt'$ un $b=0,02$. Nosacījuma $NPV_3 \leq NPV_2$ izpilde pierāda kapitālā remonta pasākuma $n=3$ lietderīgumu. 110 kV transformatora ar jaudu 32 MVA kapitālā remonta pasākumam tika veikti aprēķini, izskatot trīs remonta izmaksu variantus: 80%, 65%, 50% no jauna transformatora cenas un transformatora nomaiņu 15. darbības pagarinājuma gadā. Aprēķini tika veikti pēc NPV_3 formulas (5.1). Vienam variantam ar remonta cenu 65% no jauna transformatora cenas veikts aprēķins pēc formulas (5.1) visam aprēķina periodam no $t'=0$ līdz T' bez transformatora nomaiņas. Salīdzinājumam arī novērtēta mērķa funkcija NPV_2 novecojušā transformatora nomaiņai aprēķina perioda sākumā $t'=0$ un tālākai ekspluatācijai līdz aprēķina perioda beigām T' . Rezultātu salīdzinājums parādīts 5.2. attēlā.



5.2.att. NPV_3 variantu salīdzinājums 110 kV 32 MVA transformatora kapitālajam remontam

Analizējot iegūtos rezultātus secinām:

- pēc summārajām izmaksām labākais variants ir transformatora ilggadīgais ekspluatācijas pagarinājums pēc kapitālā remonta ar cenu līdz 65-70% no jauna transformatora cenas, bet tas lielā mērā atkarīgs no remonta kvalitātes;
- transformatora nomaīņa normatīvā kalpošanas laika beigās ($t=t_{norm}$ vai $t'=0$) ir ekonomiski izdevīga un pamatota ar jauna transformatora paaugstināto drošumu;
- transformatora kapitālais remonts un vēlāka nomaīņa jau 15. darbības pagarinājuma gadā transformatora lietotājam nav ekonomiski izdevīga, jo inflācijas dēļ pieaug jauna transformatora cena.

Transformatora sprieguma regulēšanas ierīču nomaīņas tehniskā analīze un pasākuma ekonomiskais novērtējums

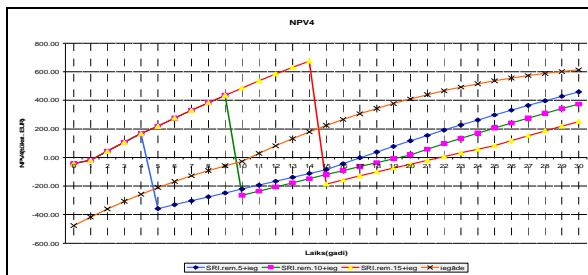
Lieljaudas spēka transformatoros spriegumu regulē, mainot primārā tinuma vijumu skaitu. Šim nolīkam tinumos izveido pārslēdzamus atzarojumus. Lieljaudas 110 kV transformatoriem izmanto sprieguma regulēšanas ierīci (SRI), kas ļauj pārslēgt tinuma atzarojumus slodzes režīmā. SRI ir viens no nedrošākajiem spēka transformatora elementiem. Aptuveni 40% transformatora avāriju ir saistītas ar regulēšanas ierīces bojājumiem [14]. Transformatora avārija, kas ir saistīta ar SRI, noved pie nopietnām sekām – transformators pēc šādiem bojājumiem jāremontē rūpnīcā. Šī iemesla dēļ SRI prasa paaugstinātu uzmanību.

Lai novērtētu pasākumu, kas ietver sprieguma regulēšanas ierīču nomaīņu un modernizāciju, pamatojoties uz VTEM, ir izveidots tehniski ekonomiskais modelis TEM4 un attiecīga mērķa funkcija NPV_4 . Mērķa funkcijai NPV_4 ir precizētas funkcijas 3.14 atsevišķas sastāvdaļas. Pasākuma realizācijai nav ņemts bankas kredīts un finansējums tiek nodrošināts no pašu līdzekļiem. Ar sprieguma regulēšanas ierīču nomaīņu un modernizāciju saistītam pasākumam $n=4$ ir šāda mērķa funkcija:

$$NPV_4 = -C_{40} + \sum_{t=0}^{t'_{norm}} \left\{ \begin{aligned} & \left[\frac{P_{norm} \cdot \beta_T \cdot \beta_E \cdot T_m + P_{norm} \cdot (1 - \beta_T) \cdot \beta_R}{100} \cdot k_p \cdot k_{EJ} - \right. \\ & \left. \left[\frac{1}{100} \cdot k_{4r,t} \cdot P_{4r} \cdot K_{4TS,t} \right] - \right. \\ & \left. - k_{EJ} \cdot \left[\left(\Delta P_{4nl} \cdot T_d + \beta_T^2 \cdot \Delta P_{4sc} \cdot \tau \right) \cdot \beta' + \right. \right. \\ & \left. \left. + \left(\Delta P_{4nl} + \beta_T^2 \cdot \Delta P_{4sc} \right) \cdot \beta'' \right] \cdot k_{EJ} \cdot k_{4r,t} \cdot C_{4R} \right\} \cdot \frac{1}{(1+i_d)^t} + NPV_2, \end{aligned} \right. \quad (5.2)$$

Mērķa funkcijai NPV_4 ir veikti aprēķini novecojuša 110 kV transformatora ar jaudu 32 MVA RZS iekārtu nomaīņai un modernizācijai. Pasākumam $n=4$ ir aplūkoti trīs varianti, kas ietver RZS iekārtu nomaīņu un modernizāciju pēc transformatora normatīvā kalpošanas laika beigām ($t=t_{norm}$ vai $t'=0$) un tā vēlāku nomaīņu pret jaunu pēc 5., vai 10., vai 15. darbības pagarinājuma gada. Visiem trim variantiem jauna transformatora iegādei nav ņemts bankas kredīts. Finansējums tiek nodrošināts no līdzekļiem, ko transformatora lietotājs ir

iekārjis iekārtas darbības termiņa pagarinājuma laikā. Salīdzinājumam novērtēta novecojušā transformatora nomaiņa pret jaunu aprēķina perioda sākumā $t'=0$. Aprēķini veikti pēc formulas (5.2). RZS iekārtu nomaiņa notiek normatīvā kalpošanas ilguma beigās. Grafikā parādīts arī pasākums NPV_2 , lai atvieglotu variantu salīdzināšanu. Rezultātu salīdzinājums parādīts 5.2. attēlā.



5.3.att. NPV_4 variantu salīdzinājums 110 kV 32 MVA transformatora RZS modernizācijai.

Analizējot iegūtos rezultātus secinām:

- transformatora nomaiņa pēc normatīvā kalpošanas laika beigām ($t=t_{norm}$ vai $t'=0$) ir ekonomiski izdevīga un pamatota ar jauna transformatora paaugstināto drošumu;
- RZS iekārtu nomaiņas un modernizācijas pasākums dod īslaicīgu ekonomisko efektu darbības pagarinājuma sākuma periodā līdz transformatora nomaiņai pret jaunu;
- transformatora nomaiņa pret jaunu jāveic agrīnos darbības pagarinājuma gados, pat pēc SRI nomaiņas un modernizācijas, jo vēlāk inflācijas dēļ pieaug transformatora cena.

Transformatora augstsprieguma ievadu modernizācijas tehniskā analīze un pasākuma ekonomiskais novērtējums

Augstsprieguma ievadus uzskata par visbīstamākajiem mezgliem transformatorā. Bojājumi augstsprieguma ievados izsauc smagas sekas: sprādzienu, ugunsgrēku, eļļas noplūdi no transformatora, tie var radīt transformatora tīnumu bojājumus. Vairums Latvijā ekspluatēto ievadu ir ražots Maskavas rūpnīcā «Mosizolator». Jauniem, modernizētiem – GTT, GTD, GMTB tipa un ar gāzi pildītajiem ievadiem – ir konstruktīvas izmaiņas, kuras ļauj paaugstināt to ekspluatācijas drošumu. Modernizētie ievadi no GBMT tipa ievadiem atšķiras ar jauna tipa izolāciju un ar to, ka eļļa ievados kalpo tikai dzesēšanai, un elektrisko parametru kontrole nav nepieciešama. Ar gāzi pildītajiem ievadiem ir virkne priekšrocību, kuras ir saistītas ar izmantotās elegāzes īpatnībām: ugunsdrošība un sprādziendrošība, ekoloģiskā tīrība un darbība bez nomaiņas visā kalpošanas laikā. Jaunos ievadus var uzstādīt vecā

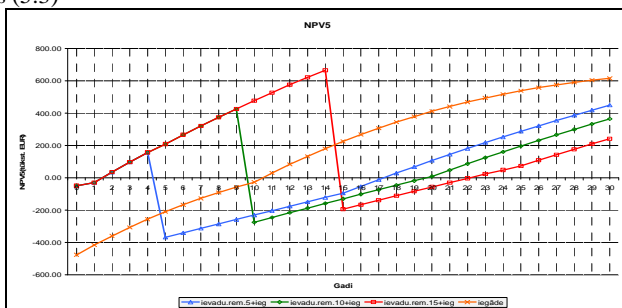
tipa ievadu vietā, jo tiem ir saglabāti savienojuma vietas izmēri un apakšējās daļas garums [13, 18].

Lai novērtētu šo pasākumu, pamatojoties uz VTEM, ir izveidots tehniski ekonomiskais modelis TEM5 un attiecīga mērķa funkcija NPV_5 . Paredzētā ievadu nomaiņas un modernizācijas pasākuma novērtēšanai var būt divi varianti: ievadu nomaiņa līdz transformatora normatīvā kalpošanas laika beigām un pēc transformatora normatīvā kalpošanas laika beigām. Pasākuma realizācijai nav ņemts bankas kredīts un finansējums tiek nodrošināts no pašu līdzekļiem.

Otrajam variantam ir aplūkots sarežģīts pasākums. Tas sastāv no diviem parastiem pasākumiem: ievadu nomaiņas gadā $t = t' = 0$ transformatora kalpošanas laika pagarināšanai un novecojušā transformatora nomaiņas pret jaunu 5., vai 10., vai 15. darbības pagarinājuma gadā. Mērķa funkcija sarežģītajam pasākumam $n=5$ ir šāda:

$$NPV_5 = -C_{s0} + \sum_{t=0}^{t_{nom}} \left\{ \begin{aligned} & \left[P_{nom} \cdot \beta_T \cdot \beta_E \cdot T_m + P_{nom} \cdot (1 - \beta_T) \cdot \beta_R \right] \cdot k_p \cdot k_{Ez} - \\ & \left[\frac{1}{100} \cdot (P_{5a} + k_{sr,f} P_{5r}) \cdot K_5 T_{z,t} \right] - \\ & - k_{Ez} \cdot \left[\left(\Delta P_{5nl} \cdot T_d + \beta_T^2 \cdot \Delta P_{5sc} \cdot \tau \right) \cdot \beta' + \right. \\ & \left. + \left(\Delta P_{5nl} + \beta_T^2 \cdot \Delta P_{5sc} \right) \cdot \beta'' \right] - k_{Ez} k_{sr,f} \cdot C_{5R} \end{aligned} \right\} \cdot \frac{1}{(1+i_d)^t} + NPV_2, \quad (5.3)$$

Mērķa funkcijai NPV_5 izdarīti aprēķini trim variantiem: novecojušā transformatora ar jaudu 32 MVA augstsprieguma ievadu nomaiņai un modernizācijai normatīvā kalpošanas laika beigās ($t=t_{nom}$ vai $t'=0$) un tā tālākai nomaiņai pēc 5., 10. un 15. darbības pagarinājuma gada [19]. Visiem trim variantiem jauna transformatora iegādei nav ņemts bankas kredīts. Finansējums tiek nodrošināts no līdzekļiem, kurus transformatora lietotājs iekrājis iekārtas darbības termiņa pagarinājuma laikā. Salīdzinājumam parādīta novecojušā transformatora nomaiņa aprēķina perioda sākumā $t'=0$. Aprēķini veikti pēc formulas (5.3)



5.4.att. NPV_5 variantu salīdzinājums 110 kV 32 MVA transformatora augstsprieguma ievadu nomaiņai.

Analizējot iegūtos rezultātus secinām:

- transformatora nomaiņa kalpošanas laika beigās ($t=t_{norm}$ vai $t'=0$) ir ekonomiski izdevīga un pamatota ar jauna transformatora paaugstināto drošumu;
- pasākums, kas paredz augstsprieguma ievadu nomaiņu un modernizāciju, dod īslaicīgu ekonomisko efektu darbības pagarinājuma perioda sākumā līdz transformatora nomaiņai pret jaunu;
- transformatora nomaiņa pret jaunu jāveic agrīnos darbības pagarinājuma gados pat pēc augstsprieguma ievadu nomaiņas un modernizācijas, jo vēlāk inflācijas dēļ pieaug transformatora cenas

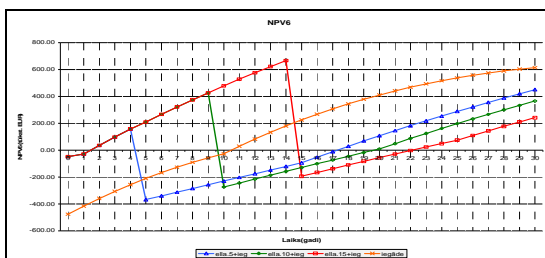
Transformatora eļļas reģenerācijas vai nomaiņas tehniskā analīze un pasākuma ekonomiskais novērtējums

Samērā liels defektu skaits rodas ne tikai pasliktinoties tinumu un magnētiskās sistēmas serdes presējumam vai uzkrājoties netīrumiem un mitrumam uz cietās izolācijas, bet arī uzkrājoties netīrumiem eļļā un tai novecojoties. Svarīgākās parādības un faktori, kuri būtiski ietekmē transformatora darbības spēju, ir izolācijas samitrināšanās un novecošanās, kas lielā mērā nosaka visa transformatora kalpošanas ilgumu. Ļoti būtiski izolācijas elektrisko stiprību un kalpošanas ilgumu ietekmē ūdens saturs tajā. Mitruma iekļūst eļļā no apkārtējā gaisa un tālāk difundē cietajā izolācijā. Mainoties tinumu un eļļas temperatūrai, notiek mitruma apmaiņas process starp eļļu un papīra izolāciju. Eļļas piesārņošanās, tāpat kā samitrināšanās, izsauc elektriskās stiprības pazeminājumu. Piesārņojums izpaužas kā dažādu daļiņu, svešķermeņu un piemaisījumu nokļūšana eļļā. Palielinoties transformatora darbības ilgumam, noveco arī eļļa. Uz eļļu vienlaicīgi iedarbojas temperatūra, elektriskais lauks, atmosfēras skābeklis, transformatora konstrukcijas materiāli. Ja izdotos nepieļaut eļļas saskari ar atmosfēras gaisu, tad nozīmīgi samazinātos skābju veidošanās process darbībā esošā transformatora eļļā. Eļļas reģenerācija, un īpaši eļļas nomaiņa, krietni samazina mitruma saturu cietajā izolācijā. Lai novērtētu pasākumu, kas paredz transformatora eļļas reģenerāciju vai nomaiņu, pamatojoties uz VTEM, ir izveidots tehniski ekonomiskais modelis TEM6 un attiecīga mērķa funkcija NPV_6 . Mērķa funkcijai NPV_6 ir precizētas funkcijas (3.14.) atsevišķas sastāvdaļas (5.4). Pasākuma realizācijai nav ņemts bankas kredīts un finansējums tiek nodrošināts no pašu līdzekļiem [10].

Ar eļļas reģenerāciju vai nomaiņu saistītam pasākumam $n=6$ ir šāda mērķa funkcija NPV_6 :

$$NPV_6 = -C_{60} + \sum_{t=1}^{t_{pas}} \left\{ \begin{aligned} & \left[\frac{P_{nom} \cdot \beta_t \cdot \beta_E \cdot T_m + P_{nom} \cdot (1 - \beta_t) \cdot \beta_k}{100} \cdot k_p \cdot k_{E_d} - \right. \\ & \left. \left[\frac{1}{100} \cdot (p_{6a} + k_{6r} \cdot p_{6r}) \cdot K_{6T2,t} \right] - \right. \\ & \left. - k_{E_d} \cdot \left[\frac{(\Delta P_{6nl} \cdot T_d + \beta_T^2 \cdot \Delta P_{6sc} \cdot \tau) \cdot \beta'}{+(\Delta P_{6nl} + \beta_T^2 \cdot \Delta P_{6sc}) \cdot \beta''} \right] - k_{E_d} \cdot k_{6r} \cdot C_{6R} \right\} \cdot \frac{1}{(1+i_d)^t} + NPV_2 \end{aligned} \right. \quad (5.4)$$

Mērķa funkcijai NPV_6 ir veikti aprēķini trim variantiem: novecojušā transformatora ar jaudu 32 MVA eļļas reģenerācijai vai nomainībai normatīvā kalpošanas laika beigās ($t=t_{norm}$ vai $t'=0$) un tā tālākai nomainībai pēc 5., 10. un 15. darbības pagarinājuma gada. Visiem trim variantiem jauna transformatora iegādei nav ņemts bankas kredīts. Finansējums tiek nodrošināts no līdzekļiem, kurus transformatora lietotājs iekrājis iekārtas darbības termiņa pagarinājuma laikā. Salīdzinājumam parādīta novecojušā transformatora nomainīšana pret jaunu aprēķinu perioda sākumā $t'=0$. Aprēķini veikti pēc formulas (5.4). Rezultātu salīdzinājums parādīts 5.5. attēlā.



5.5.att. NPV_6 variantu salīdzinājums 110 kV 32 MVA transformatora eļļas nomainībai

Analizējot iegūtos rezultātus secinām:

transformatora nomainīšana pret jaunu pēc normatīvā kalpošanas laika beigām (sākuma periodā $t'=0$) ir ekonomiski izdevīga un pamatota;

pasākums, kas paredz transformatora eļļas reģenerāciju vai nomainīšanu, dod īslaicīgu ekonomisko efektu darbības pagarinājuma perioda sākumā līdz transformatora nomainībai pret jaunu;

transformatora nomainīšana pret jaunu jāveic agrīnos darbības pagarinājuma gados pat pēc transformatora eļļas reģenerācijas vai nomainīšanas, jo vēlāk inflācijas dēļ pieaug transformatora cena.

Transformatora monitoringa sistēmas pielietojuma tehniskā analīze un pasākuma ekonomiskais novērtējums

Vislielāko efektivitāti transformatora avāriju novēršanā var panākt, izmantojot nepārtrauktās kontroles sistēmas ar devēju kompleksu, kas reaģē uz maksimālo skaitu defektu.

Parametru mērījumu rezultāti šādās sistēmās tiek pārveidoti lietotājam ērtā veidā un uzkrāti analīzei un izmaiņu tendences noteikšanai. Bez tieši mērījumu iegūtajiem datiem sistēmā tiek ievadītas ziņas par iepriekšējās ekspluatācijas apstākļiem. Nepārtrauktās kontroles dati, kas veido operatīvo bāzi, kalpo par pamatu diagnozes noteikšanai. Iepriekšējie parametru mērījumi, kā arī ziņas par darbības režīmiem ļauj pilnīgāk novērtēt transformatora stāvokli un prognozēt procesu attīstību [4].

Kopīgais mērķis visām nepārtrauktās kontroles sistēmām ir tieši darbības laikā agrīnā stadijā atklāt transformatora defektus. Tāpat kopīga ir parametru un citu datu apstrāde, analīze un pārveidošana tādā veidā, lai ekspluatācijas personāls to varētu ērti izmantot. Atšķirīgi ir uz dažādiem defektiem reaģējošie devēji, kā arī transformatora bīstamā stāvokļa noteikšanas metodes. Izmantojot monitoringa sistēmas, var pāriet no iekārtas profilaktiskajiem remontiem pie remontiem pēc iekārtas faktiskā stāvokļa. Šis pasākums ļauj samazināt transformatora lietotāja izdevumus. Monitoringa sistēmas uzstādīšanas pasākuma novērtēšanai ir izveidota mērķa funkcija NPV_7 :

$$NPV_7 = C_{70} + \sum_{i=1}^T \left\{ \sum_{j=1}^m \left[\frac{i}{100} \cdot K_{7T2,ij} + \frac{1}{100} \cdot (p_{7a} + k_{7r,i} \cdot p_{7r}) \cdot K_{7T2,ij} \right] + \right. \quad (5.5)$$

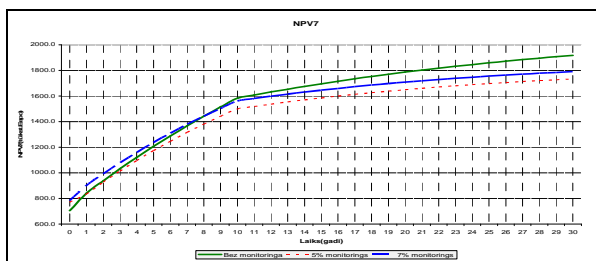
$$\left. + k_{Ex} \cdot \left[(\Delta P_{7nl} \cdot T_d + \beta_T^2 \cdot \Delta P_{7sc} \cdot \tau) \cdot \beta' + \right. \right. \\ \left. \left. + (\Delta P_{7nl} + \beta_T^2 \cdot \Delta P_{7sc}) \cdot \beta'' \right] + k_{Ex} \cdot k_{7r,i} \cdot C_{7r} \right\} \cdot \frac{1}{(1+i_d)^t}$$

Pasākuma optimālajam variantam ir $NPV_7 = \min$ visam aprēķinu periodam, jo nav ievēroti vienādi visiem variantiem ienākumi no produkcijas realizācijas.

Mērķa funkcijai NPV_7 ir veikti aprēķini trim variantiem jauna 110 kV transformatora ar jaudu 63 MVA piegādei: transformatoram bez monitoringa sistēmas, transformatoram ar monitoringa sistēmu, kuras cena sastāda 5% no jaunā transformatora cenas un transformatoram ar monitoringa sistēmu, kuras cena sastāda 7% no jauna transformatora cenas. Aprēķinos netiek ņemti vērā visiem variantiem vienādie ienākumi no elektroenerģijas realizācijas. Kā optimālais variants tiek ņemts nosacījums $NPV_7 = \min$. Aprēķini veikti pēc formulas 5.5. Rezultātu salīdzinājums parādīts 5.6. attēlā.

Analizējot iegūtos rezultātus secinām:

- kontrolējamo parametru skaita palielināšana nedaudz pasliktina ekonomiskos radītājus.
- monitoringa sistēmu izmantošana ļauj samazināt ekspluatācijas izmaksas un ir ekonomiski izdevīgāka, nekā transformatora ekspluatācija bez monitoringa sistēmu.



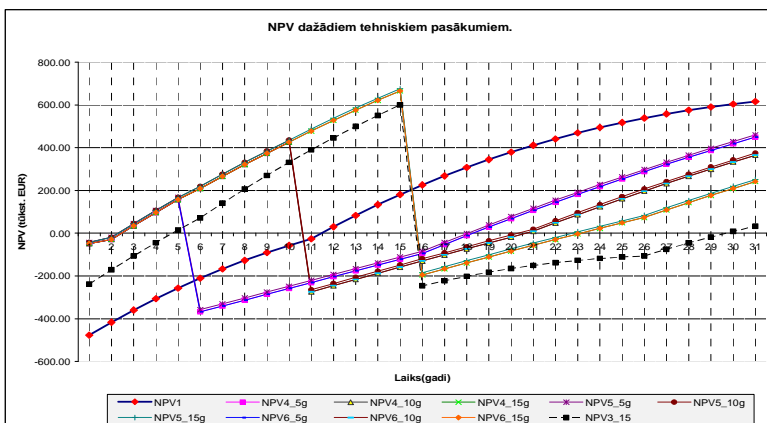
5.6.att. NPV_7 variantu salīdzinājums 110 kV 32 MVA transformatora iegādei ar monitoringa sistēmu

Aprēķinu rezultātu salīdzinājums dažādiem tehniskajiem pasākumiem 110 kV 32 MVA transformatoram parādīts 5.7. attēlā. Salīdzinājumam izmantoti aprēķini mērķa funkcijām: NPV_1 – jauna transformatora iegādei, NPV_3 – transformatora kapitālajam remontam, NPV_4 – sprieguma regulēšanas ierīču modernizācijai, NPV_5 – augstsprieguma ievadu nomaīnai, NPV_6 – izolācijas eļļas reģenerācijai vai nomaīnai. Mērķa funkciju komponentes un koeficienti konkrētiem tehniskiem pasākumiem apkopoti 5.1. tabulā

5.1.tabula

Mērķa funkciju komponentes un koeficienti konkrētiem tehniskiem pasākumiem

Izmaksu komponents	Komponentu aprēķinu formula
Sakuma izmaksas C_{n0}	$C_{10} = K_{1T\Sigma} = K_T + K_{Tr} + K_i + K_{sp} + K_{cd} + K_{add}$ $C_{20} = K_{2T\Sigma} = K_{1T\Sigma} - K_L + K_d$ $C_{30} = K_{3T\Sigma} = K_{rT} + K_{Tr} + K_{add}$ $C_{40} \cdot C_{70} = K_{4T\Sigma} \cdot K_{7T\Sigma} = K_{rT} + K_{add}$
Kapitālizmaksas $C_{nC,t}$	$C_{nC,t} = i/100 \cdot K_{nT\Sigma}; n = 1..7$
Pastāvīgās ekspluatācijas izmaksas $C_{nOp,c,t}$	$C_{nOp,c,t} = 1/100 \cdot (p_{na} + k_{nr,t} p_{nr}) \cdot K_{nT\Sigma},$ $k_{1r,t} = 1 + bt'; k_{2r,t} = 1 + bt'; k_{3r,t} \cdot k_{7,t} = at'^2 + bt' + c;$ $p_{3a} \cdots p_{7a} = 0$
Mainīgās ekspluatācijas izmaksas $C_{nOp,v,t}$	$C_{nOp,v,t} = k_{E,t} \cdot \left[(\Delta P_{nnl} \cdot T_{n,m} + \beta_T^2 \cdot \Delta P_{nsc} \cdot \tau) \cdot \beta_n^{l'} + \right.$ $\left. + (\Delta P_{nnl} + \beta_T^2 \cdot \Delta P_{nsc}) \cdot \beta_n^{l'} \right]$ $k_{E,t} = 1 + bt'$
Izmaksas par nepiegādāto elektroenerģiju C_{nR}	$C_{nR} = c_R \cdot A_n = c_R \cdot \chi_{n,dam} \cdot A_{n,max}; n = 1..7$



5.7.att. Dažādu tehnisko pasākumu 110 kV 32 MVA transformatoram NPV salīdzinājums

KOPĒJIE SECINĀJUMI

1. Latvijas un ārvalstu enerģosistēmu 110 kV transformatoru parka stāvokļa analīzes rezultāti liecina, ka pastāv izteikta transformatoru iekārtu novecošanās problēma.
2. Ekonomiskās situācijas dēļ Latvijā un pasaulē energouzņēmumiem ir jāorientējas gan uz novecojušo transformatoru nomaiņu pret jauniem, modernākiem, gan arī uz esošo transformatoru kalpošanas laika pagarināšanu.
3. Sakarā ar ekspluatācijas uzdevumu izmaiņām enerģosistēmās ir vēlama jauna ekspluatācijas politikas izveide: jāveic pāreja no transformatoru profilaktiskajiem remontiem uz remontiem pēc transformatoru faktiskā stāvokļa.
4. Izstrādāta transformatoru parka darbības drošuma paaugstināšanas tehnisko pasākumu izvēles kompleksā metodika, kas ietver sevī katra pasākuma tehnisko un ekonomisko analīzi.
5. Izstrādātais vispārīgais tehniski matemātiskais modelis un modeļi konkrētiem tehniskajiem pasākumiem ļauj kvalitatīvi novērtēt pasākumus, bet tiem atbilstošās mērķa funkcijas spēj kvantitatīvi novērtēt NPV un pasākumu efektivitāti.
6. Tehnisko pasākumu novērtēšanai lietderīgi izmantot summāro diskontēto ikgadējo izmaksu kritēriju visā iekārtas dzīves ciklā, lietojot metodi ar optimālo NPV vērtību.

7. Izstrādāta metode konkursa uzvarētāju izvēlei starp pretendentiem transformatoru iegādei pamatojoties uz NPV_I maksimālo vērtību (maksimālā peļņa) un minimālo atmaksāšanās periodu.
8. Kapitālā remonta veikšana normatīvā kalpošanas laikā nav efektīva ilgtermiņā, jo pasliktina transformatora ekspluatācijas ekonomiskos rādītājus.
9. Monitoringa sistēmas izmantošana transformatoros ir tehniski un ekonomiski efektīva, jo ļauj samazināt ekspluatācijas izdevumus, pārejot uz apkalpošanas kārtību, ņemot vērā transformatoru reālo tehnisko stāvokli.
10. Transformatoru atsevišķu mezglu nomaiņa vai to modernizācija ir efektīva transformatoru kalpošanas laika pagarināšanai virs normatīvā termiņa tikai investīciju ekonomijas dēļ, bet tā nerisina transformatoru bāzes novecošanās problēmu pēc būtības.
11. Izstrādāto metodiku var lietot dažādu elektrotehnisko iekārtu nomaiņas un modernizācijas pasākumu novērtēšanai.
12. Piedāvātās metodikas pielietojums dod iespēju racionālāk un efektīvāk izmantot enerģētikas uzņēmumos investējamus līdzekļus.

BIBLIOGRĀFISKAIS SARAKSTS

1. N. Breners, S.Guseva, N.Skobeļeva, O.Borscevsķis. Directions to increase reliability of the maintained transformer equipment's functioning // Proceedings of 6-th International Conference on Electrical and Control Technologies, ECT-2011, 5-6 May, 2011, Kaunas, Lithuania.
2. S.Guseva, N.Skobeļeva, O.Borscevsķis, N.Breners. Rational approach to the formation of urban power supply system in solving of development problems // Proceedings of The International Energy Forum 2010, 23-26 June, 2010, Varna, Bulgaria. -280-289 p.
3. S.Guseva, N.Skobeļeva, O.Borscevsķis, N. Breners. Geometrical modelling of service areas and distribution of urban transformer substations in the city territory // XI International Scientific Conference „Problems of Present-day Electrotechnics, PPE-2010”, 1 - 3 June, 2010, Kyiv, Ukraine, 4 p. (digitālā formātā uz CD).
4. N.Breners, S.Guseva, O.Borscevsķis, N.Skobeļeva. Применение мониторинга силовых трансформаторов для повышения эффективности функционирования систем электроснабжения. // XI International Scientific Conference „Problems of Present-day Electrotechnics, PPE-2010”, 1-3 June, 2010, Kyiv, Ukraine, 6 p. (digitālā formātā uz CD).
5. S.Guseva, O.Borscevsķis, N.Skobeļeva, N. Breners. The system approach to placement of transformer substations in the power supply system of the city // Proceedings of 5-th International Conference on Electrical and Control Technologies, ECT-2010, 6-7 May, 2010, Kaunas, Lithuania. -211-214 p.
6. S.Guseva, N.Skobeļeva, N. Breners, O.Borscevsķis. Determination of service areas of urban transformer substations and distribution using geometrical templates // Latvian Journal of Physics and Technical Sciences, № 6 (Vol. 46), -Rīga: FEI, 2009, Latvia. -16.-26. p.
7. S.Guseva, N.Breners, N.Skobeļeva, H.Vindbergs. Economic criteria in competitions for deliveries of power transformers // Latvian Journal of Physics and Technical Sciences, N.5 (Vol. 46), Rīga: FEI, 2009, Latvia. – 35.-42. p.
8. S.Guseva, O.Borscevsķis, N.Skobeļeva, N. Breners. Load forecasting till 2020 of existing and perspective transformer substations in Riga // Enerģētika un elektrotehnika, Power and Electrical Engineering, 4. sērija, 25. sējums. – Rīga: RTU, 2009, Latvija. -77.-80. lpp.
9. S.Guseva, N.Skobeļeva, N.Breners, O.Borščevskis. Pilsētu transformatoru apakšstaciju apkopes zonu modelēšana // Enerģētika un elektrotehnika, Power and Electrical Engineering, 4. sērija, 24. sējums. – Rīga: RTU, 2009, Latvija. -24.-31. lpp.
10. S.Guseva, N.Breners, N.Skobeļeva. Eļļas reģenerācijas mērķtiecība spēka transformatoru kalpošanas ilguma pagarinājumam//Enerģētika un elektrotehnika, 4. sērija, 24. sējums.– Rīga: RTU, 2009, Latvija. -32.-39. lpp.

11. Breners N., Guseva S., Skobeļeva N. The analysis of measures on modernization of the transformer equipment // *Enerģētika un elektrotehnika, Power and Electrical Engineering*, 4. sērija, 23. sējums. – Rīga: RTU, 2008, Latvija. -74.-81. lpp.
12. Nikolajs Breners, Svetlana Guseva. Анализ мероприятий по модернизации трансформаторного оборудования // *Elektroenergetika Journal, Technical University of Košice, Vol.1, No 2 (2008), Slovak Republic*. - 9-12 p.
13. Гусева С.А., Бренерс Н.З., Скобелева Н.Н. Техничко-экономическое моделирование оценки мероприятия по замене силовых высоковольтных трансформаторов //Сборник научных статей по материалам IV Международной научно-практической конференции СтГАУ „Информационные системы, технологии и модели управления производством”, Ставрополь, 13-14 марта, 2008, Россия, с. 74-78.
14. Гусева С.А., Бренерс Н.З., Махнитко А.Е., Скобелева Н.Н.. Оценка мероприятий по модернизации устройств регулирования напряжения под нагрузкой // *Материалы X Международной научной конференции „Проблемы современной электротехники-2008”, НАН Украины, Институт физико-технических проблем энергетики, 5-9 июня, 2008, Киев, Украина, с. 51-54.*
15. С.А. Гусева С.А., А.Е. Махнитко А.Е., Н.З. Бренер Н.З., Н.Н. Скобелева. Экономический анализ технических мероприятий по повышению надежности функционирования трансформаторного оборудования //Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е.Алексеева. Актуальные проблемы электроэнергетики. Том 66 - Н. Новгород: НГТУ, 2007, Россия, с. 88-92.
16. Гусева С.А., Бренер Н.З., Скобелева Н.Н. Техничко-экономическая модель оценки мероприятия по замене силовых высоковольтных трансформаторов // Сборник научных трудов „Методы и технические средства повышения эффективности применения электроэнергии в сельском хозяйстве”. - Ставрополь: Агрус, 2007, Россия, с. 209-215.
17. Svetlana Guseva, Anatoly Mahnitko, Nikolajs Breners. Evaluation of measures on reliability rise of power transformers by means of generalized mathematical model // *Proceedings of IV International Scientific Symposium „Elektroenergetika 2007”, 19-21 September, 2007, Stara Lesna, Slovak Republic, 7 p. (digitālā formātā uz CD).*
18. Svetlana Guseva, Anatoly Mahnitko, Nikolajs Breners, Helmut Vindbergs. Mathematical model of estimation of measures on modernization of high-voltage inputs of transformers // *Proceedings of XIII International Scientific Conference “Present-day Problems of Power Engineering, APE’07”, Vol. 3, 13-15 June, 2007, Gdansk- Jurata, Poland. - 65-73 p.*
19. Guseva S., Breners N., Vindbergs H. Economic estimation of updating the bushing of high-voltage transformers // *Enerģētika un elektrotehnika, Power and Electrical Engineering*, 4. sērija, 20. sējums. –Rīga: RTU, 2007, Latvija. -66.-74. lpp.

20. Breners N., Guseva S., Kukļa N. Vienkaršots tehniski ekonomiskais modelis augstsprieguma transformatoru nomaiņas novērtējumam // Enerģētika un elektrotehnika, Power and Electrical Engineering, 4. sērija, 19. sējums. – Rīga: RTU, 2006, Latvija. -79.-84. lpp.
21. Z.Krišāns, I. Oļeiņikova. Elektroenerģētisko uzņēmumu vadības pamati. Rīga, RTU, 2007. -158 lpp.
22. Guseva S., Mahnitko A., Krishans Z. NPV as a criterion for electrotechnical equipments' suppliers selection // Power and Electrical Engineering, ser. 4, part 9, -Riga, Riga Technical University, 2003. -P. 49-54.
23. Цурпал С.В. Причины повреждаемости и меры по повышению надежности мощных силовых трансформаторов и шунтирующих реакторов. (Тезисы X Международной научно- технической конференции „Трансформаторостроение – 2000„ Запорожье, 2000г.)
24. Internets. – <http://www.energo.lv>
25. Internets. – <http://www.ast.energo.lv/ast>