

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Oļegs BORŠČEVSKIS

**LIELPILSĒTU SADALES TĪKLU SPRIEGUMA LĪMEŅA IZMAIŅAS
PROCESA VADĪBAS METODIKA, TEHNISKIE LĪDZEKĻI UN
OPTIMIZĀCIJA (UZ RĪGAS PIEMĒRA)**

Promocijas darba kopsavilkums

Rīga 2013

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE
Enerģētikas un elektrotehnikas fakultāte
Enerģētikas institūts

Oļegs BORŠČEVSKIS

Doktora studiju programmas „Enerģētika” doktorants

**LIELPILSĒTU SADALES TĪKLU SPRIEGUMA LĪMEŅA IZMAIŅAS
PROCESA VADĪBAS METODIKA, TEHNISKIE LĪDZEKĻI UN
OPTIMIZĀCIJA (UZ RĪGAS PIEMĒRA)**

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskā vadītāja
Dr. sc. ing., asoc. profesore
S. GUSEVA

Rīga 2013

Borščevskis O. Lielpilsētu sadales tīklu sprieguma līmeņa izmaiņas procesa vadības metodika, tehniskie līdzekļi un optimizācija (uz Rīgas piemēra). Promocijas darba kopsavilkums. – R.: RTU, 2013. – 38 lpp.

Iespiests saskaņā ar RTU Promocijas padomes P-05 (Enerģētika) 2013.gada 02. maija lēmumu Nr.8/13.



Šis darbs izstrādāts ar Eiropas Sociālā fonda atbalstu Nacionālās programmas „Atbalsts doktorantūras programmu īstenošanai un pēcdoktorantūras pētījumiem” projekta „Atbalsts RTU doktorantūras attīstībai” ietvaros.

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

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2013.gada 6.jūnijā plkst. 15:00 Rīgas Tehniskās universitātes Enerģētikas un elektrotehnikas fakultātē, Kronvalda bulvārī 1, 117. auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Valdes priekšsēdētājs, Dr.sc.ing. Vilnis Krēsliņš
Latvijas Elektroenerģētiku un Energobūvnieku asociācija

Profesors, Dr.sc.ing. Michal Kolcun
Tehniskā Universitāte Košice (Slovākija)
Elektroenerģētikas un informātikas fakultāte
Elektroenerģētikas departamenta vadītājs

Docents, Dr.sc.ing. Antons Kutjuns
Rīgas Tehniskā Universitāte

APSTIPRINĀJUMS

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.

Oļegs Borščevskis(Paraksts)

Datums:

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, satur ievadu, 5 nodaļas, secinājumus un rekomendācijas, literatūras sarakstu, 2 pielikumus, 82 attēlus, 23 tabulas, kopā 165 lappuses. Literatūras sarakstā norādīti 113 nosaukumi.

Saturs

Promocijas darba aktualitāte	5
Darba mērķi un uzdevumi	5
Zinātniskā novitāte	6
Pētījumu un izstrādņu metodes un līdzekļi	6
Darba rezultātu praktiskais pielietojums	6
Promocijas darba aprobācija	7
Promocijas darba struktūra	9
1. Lielpilsētu elektroapgādes sistēmu raksturojums	10
2. 20 kV sprieguma izmantošana ārzemju lielpilsētās un Rīgas pilsētas tīklos	13
2.1 Dažāda nominālā sprieguma izmantošana lielās Eiropas un pasaules pilsētās	13
2.2. Rīgas pilsētās esošā 20 kV sprieguma elektrotīkla raksturojums	14
3. Sadales tīklu sprieguma līmeņa izmaiņas procesa vadības pamatprincipi	16
3.1. 20 kV sprieguma ieviešanas procesa vadības koncepcija	16
3.2. Lielpilsētas elektroapgādes sistēmas optimālo parametru noteikšanas metodika	17
3.3. 110-10-0.4 kV un 110-20-0.4 kV pilsētas elektroapgādes sistēmas tehniski ekonomiskie modeļi	19
4. 10-20 kV tīkla optimālie parametri un darba režīmi	25
4.1. 10-20 kV tīkla optimālo parametru noteikšana	25
4.2. 20 kV tīkla neitrāles darba režīmu analīze un izvēle	28
4.3. Sprieguma regulēšanas iespējas 110-20-10-0.4 kV elektroapgādes sistēmā	29
5. 20 kV sprieguma ieviešanas ekonomiskais lietderīgums un tehniskā iespējamība	30
5.1. 20 kV sprieguma ieviešanas ekonomiskais lietderīgums Rīgas pilsētas elektroapgādes sistēmā	30
5.2. Tehniskie pasākumi 20 kV sprieguma ieviešanai	32
5.2.1. 20 kV un 0.4 kV tīklu piedāvātās divstaru shēmas īpatnības	32
5.2.2. 110/20 kV divtinumu transformatoru iegādes iespējas	33
5.2.3. Vidēja sprieguma pārslēdzamo transformatoru izmantošana	33
5.2.4. 20 kV sprieguma slēgiekārtu lietošanas tīklos pieredze	33
5.2.5. Vidēja sprieguma kabeļi ar plastmasas izolāciju	33
5.3. Piedāvātās 110/20 kV TA tehniski ekonomiskais pamatojums	33
5.4. 20 kV sprieguma ieviešanas sākuma etapa piemēri Rīgas pilsētā un tās apkaimēs	35
Kopējie secinājumi	35
Bibliogrāfiskais saraksts	36

PROMOCIJAS DARBA AKTUALITĀTE

Jebkuru pasaules attīstītu valsti vai pilsētu nav iespējams iedomāties bez jaudīgas elektroenerģētikas – vienas no rūpniecības galvenajām nozarēm, kas aptver elektroenerģijas ražošanu, tās pārvadi, sadali un patēriņu.

Elektroenerģētika ir vadošā infrastruktūras nozare, kas praktiski bez alternatīvām nosaka ekonomiskās un industriālās attīstības iespēju robežas, tāpēc tai nepieciešams nodrošināt apsteidzošu ģenerējošo jaudu pieaugumu, kā arī realizēt drošu un kvalitatīvu elektroapgādi. Elektrifikācijai ir izšķiroša ietekme visu tautsaimniecības nozaru attīstībā, tādēļ galvenais ilggadējais valsts attīstības uzdevums ir tautsaimniecības un sabiedriskā sektora nodrošinājums ar tiem nepieciešamo enerģiju.

Rīgas pilsētas elektroapgādes sistēma ir neatņemama valsts energosistēmas sastāvdaļa. Rīgas elektroapgādes sistēmas attīstība bieži notiek diezgan haotiski, tāpēc ir ļoti svarīgi izstrādāt un pareizi pieņemt tīklu veidošanas virzienus un lēmumus jau sākuma projektēšanas stadijās.

Lielo pilsētu elektroapgādes koncepcijas ir mainījušās līdz ar pilsētas augšanu, elektriskās slodzes pieaugumu, tehnikas un tehniskās domas attīstību. Ne visi lēmumi pilsētas elektroapgādes attīstībā ir izturējuši laika pārbaudi un daži no tiem ir radījuši grūti pārvaramas problēmas šodien.

Saskaņā ar Rīgas pilsētas Attīstības plānu, pilsētas attīstības mērķis ir veicināt daudzpusīgu ekonomisko attīstību, izmantojot Rīgas pilsētas ģeogrāfisko novietni, dabiskās iespējas un tradīcijas, lai nostiprinātu pilsētas ekonomisko patstāvību, kā arī celtu iedzīvotāju dzīves līmeņa kvalitāti, ievērojot vides resursu racionālu izmantošanu.

Tas nav iespējams bez elektroenerģētikas attīstības un drošas pilsētas elektroapgādes sistēmas veidošanas. Lai izveidotu pēc iespējas drošāku un ekonomiskāku pilsētas elektroapgādes sistēmu, jānosaka vispārējie tīkla izbūves pamatprincipi, jaunu sistēmas elementu izbūves secība, kā arī jaunu un vecu sistēmas elementu mijiedarbības iespējas.

Lielpilsētu komunālo sadzīves patērētāju slodzes pieaugums, dzīvojamās un administratīvās apbūves stāvu skaita palielināšanās, milzīgo punktveida slodžu un atsevišķo pilsētas rajonu ar lielu slodzes blīvumu veidošanās rada nepieciešamību ieviest lielākus sprieguma līmeņus pilsētas elektroapgādes sistēmā. Šādas tendences ir raksturīgas Rīgas pilsētai, kas ir Latvijas galvaspilsēta un galvenais administratīvais, industriālais, finanšu, biznesa un kultūras centrs. Jaunas sprieguma pakāpes ieviešanai jābūt mērķtiecīgai un pamatotai, ņemot vērā ekonomiskās un tehniskās iespējas un iegūstamās priekšrocības salīdzinājumā ar esošo elektroapgādes sistēmu.

Tirgus ekonomikas apstākļos sadales tīkla sprieguma maiņa jāveic, pamatojoties uz tehniski ekonomiskajiem aprēķiniem un balstoties uz šī sprieguma līmeņa ekspluatācijas pieredzi Latvijā un citās attīstītajās Eiropas un pasaules valstīs.

Visi augstākminētie aspekti un to apskatīšanas aktualitāte noteica šī promocijas darba tēmas, mērķu un satura izvēli.

DARBA MĒRĶI UN UZDEVUMI

Darba mērķis ir izstrādāt koncepciju 20 kV sprieguma ieviešanai Rīgas pilsētā, novērtēt tehniskās un ekonomiskās iespējas pakāpeniskai vai straujai sprieguma izmaiņai, izveidot lielpilsētu sadales tīkla sprieguma līmeņa izmaiņas procesa vadības metodiku.

Mērķa sasniegšanai ir nepieciešams apskatīt un atrisināt šādus galvenos uzdevumus:

- izanalizēt esošo 110-20-10-0.4 kV Rīgas pilsētas elektroapgādes sistēmu;
- iepazīties ar 20 kV barošanas sprieguma pielietošanu Eiropas un pasaules valstīs, salīdzinot tīklu stāvokli Latvijā un ārzemēs;
- izveidot pilsētas elektroapgādes sistēmas tehniski ekonomiskos modeļus kvalitatīvai un kvantitatīvai novērtēšanai;

- noteikt pilsētas elektroapgādes sistēmas optimālos parametrus un tehniski ekonomiskos rādītājus pie dažādiem slodzes blīvumiem pilsētā vai tās rajonos;
- pamatot 20 kV sprieguma ieviešanas lietderīgumu; apskatīt un izanalizēt tehniskās iekārtas un līdzekļus 20 kV sprieguma ieviešanai un tīklu darba režīmu nodrošināšanai.

ZINĀTNISKĀ NOVITĀTE

Zinātnisko novitāti raksturo šādi aspekti:

- izpētītas Rīgas un citu Eiropas lielpilsētu elektroapgādes shēmas, kurās izmanto 20 kV spriegumu, un veikta augstāka sprieguma ieviešanas problēmu analīze;
- izstrādāta un pamatota 20 kV barošanas sprieguma ieviešanas koncepcija Rīgas pilsētā;
- optimizācijas nolūkos pamatots elektroapgādes sistēmu trīs sprieguma pakāpju (110-10-0.4 kV un 110-20-0.4 kV) vispārinātais tehniski ekonomiskais modelis;
- izstrādāta 110/10 kV un 10/0.4 kV, kā arī 110/20 kV un 20/0.4 kV transformatoru apakšstaciju (TA) optimālās jaudas, apkalpes zonu un darbības rādiusu izvēles metodika un atbilstošs algoritms;
- saskaņā ar tehniski ekonomiskajiem apsvērumiem noteiktas 20 kV sprieguma lietošanas lietderīguma robežas atkarībā no slodzes blīvuma pilsētā vai tās rajonos;
- sintezētas 110-20-0.4 kV elektroapgādes sistēmas shēmas, pamatoti konstruktīvā izpildījuma risinājumi un veikts to ekonomiskais novērtējums;
- izstrādāta tāda 20 kV barošanas sprieguma ieviešanas koncepcija un optimālo parametru izvēles metodika, kuras var lietot arī citās lielpilsētās, veicot nepieciešamo korekciju konkrētiem apstākļiem.

PĒTĪJUMU UN IZSTRĀDŅU METODES UN LĪDZEKĻI

Darba rezultāti iegūti, lietojot šādas pētījumu metodes un līdzekļus:

- pētījumu objektu matemātiskā un ģeometriskā modelēšana un mērķa funkciju izveide;
- pētījumu objekta tehniski ekonomiskās analīzes metode;
- nelineārās diskretās programmēšanas metode mērķa funkcijas minimuma meklēšanai;
- lēmumu pieņemšana nenoteiktas informācijas apstākļos;
- Microsoft Office Excel programma elektroapgādes sistēmas variantu aprēķinu veikšanai;
- datorprogramma AutoCAD, kas paredzēta aprēķinu un rezultātu vizuālai attēlošanai;
- datorprogramma MatLAB, kas paredzēta intensīvai skaitļošanai, datu analīzei un to vizuālai attēlošanai;
- datorprogramma MathCAD inženieru uzdevumu risināšanai un rezultātu vizualizēšanai un analīzei.

DARBA REZULTĀTU PRAKSTISKAIS PIELIETOJUMS

Darbā piedāvātos algoritmus un metodikas var izmantot:

- teorētiskos un zinātniskos pētījumos, kas saistīti ar pilsētas elektroapgādes sistēmu racionālo izbūvi un parametru optimizāciju;
- enerģētiskos uzņēmumos, organizācijās, kompānijās, kuras nodarbojas ar pilsētas elektroapgādes shēmu attīstības un projektēšanas jautājumiem;
- jaunu 110/20 kV transformatoru apakšstaciju un 20 kV tīklu projektēšanai, izmantojot galvenās konstatētās likumsakarības;
- sadales tīkla operatora ekspluatācijas departamenti un darbinieki, ņemot vērā izstrādātās 20 kV sprieguma līmeņa ieviešanas metodiku un rekomendācijas elektroiekārtu, līniju un 110/20-10 kV TA efektīvākai izmantošanai.

Darba rezultāti daļēji atspoguļoti:

- līgumā ar AS „Latvenergo” Nr. L7310 (Nr.010000/08-16) „Rīgas augstsprieguma tīkla shēma līdz 2020. gadam” (vadītājs- profesors J. Rozenkrons), 2008. (līdzdalība);
- līgumā Nr.5-21/-2012 no 23.04.2012 ar Mārupes novada Domi „Jaunas 110 kV transformatoru apakšstacijas Mārupes novadā tehniski ekonomiskais pamatojums” (vadītājs- profesors J. Rozenkrons), 2012. (līdzdalība).

PROMOCIJAS DARBA APROBĀCIJA

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

1. The 7th International Conference on Electrical and Control Technologies ECT-2012, 4 – 5 May, Kaunas, Lithuania, 2012.
2. The 10th International Scientific Conference "Control of Power Systems 2012", "Energetika 2012. Power engineering 2012", 14 –18 May, Tatranske Matliare, Slovakia, 2012.
3. The 52nd International Scientific Conference. Power and Electrical Engineering and Environmental Sciences, 14 – 15 October, Riga, Latvia, 2011.
4. The 7th International conference-workshop: Compatibility and power Electronics 2011, CPE 2011, 1–3 June, Tallinn, Estonia, 2011.
5. Compatibility and power Electronics 2011, CPE 2011, Student Forum, 1–3 June, Tallinn, Estonia, 2011.
6. The 6th International Conference on Electrical and Control Technologies ECT-2011, 5 – 6 May, Kaunas, Lithuania, 2011.
7. International conference World Academy of Science, Engineering and Technology, WASET 2011, 27–29 April, Venece, Italy, 2011.
8. 10th International Symposium „Topical problems in the field of electrical and power engineering”, Doctoral school of energy and geotechnology II, 10–15 January, Parnu, Estonia, 2011.
9. The 51st International Scientific Conference. Power and Electrical Engineering and Environmental Sciences, 14-16 October, Riga, Latvia, 2010.
10. XI International Scientific-Technical Conference "Problems of Present-day Electrotechnics-2010", 1 – 3 June, Kyiv , Ukraine, 2010.
11. The 5th International Conference on Electrical and Control Technologies ECT-2010, 6 – 7 May, Kaunas, Lithuania, 2010.
12. The 50th International Scientific Conference. Power and Electrical Engineering and Environmental Sciences, 14 – 16 October, Riga, Latvia, 2009.

Darba materiāli publicēti 20 starptautiskajos izdevumos:

1. N.Skobeleva, **O.Borscevskis**, S.Guseva, L.Petrichenko. An integrated approach to the formation of service areas for urban substations of different voltage // Journal of Energy and Power Engineering 6 (2012) 1358-1362 (JEPE ISSN1934-8975), David Publishing Company, Inc. USA, 2012.
2. S.Guseva, **O.Borscevskis**. Mathematical model for 110/10 kV transformer substations` optimum power choice // Proceedings of the 7th International Conference on Electrical and Control Technologies ECT 2012, 4 – 5 May, Kaunas, Lithuania, -p.202-205.
3. S.Guseva, **O.Borscevskis**, N.Skobeleva. Forecast and load determination of 110/20-10 kV transformer substations for Riga city till 2025 // Proceedings of the 10th International Scientific Conference "Control of Power Systems 2012", 14 –18 May, Tatranske Matliare, Slovakia, 2012, -p.159-160.
4. S.Guseva, **O.Borscevskis**. The system approach to the transformer substations` in the territory of small cities // Proceedings of the 52nd International Scientific Conference of

- Riga Technical University on Power and Electrical Engineering, 14 – 15 October, RTU, Riga, Latvia, 2011 (digitālā formātā uz CD).
5. G.Gavrilovs, **O.Borscevskis**. Power transformer diagnostic // Proceedings of the 10th International Symposium „Topical problems in the field of electrical and power engineering”, Doctoral school of energy and geotechnology II, 10 - 15 January, Parnu, Estonia, 2011, -p. 224-228.
 6. S.Guseva, **O.Borscevskis**, N.Skobeleva, L.Petrichenko. Perspective loads of transformer substations at development of urban power supply systems // Proceedings of the XV International Scientific Conference “Present-day problems of power engineering APE’11”, vol. III, 8-10 June, Gdansk-Jurata, Poland, 2011, -p. 51-59.
 7. S.Guseva, **O.Borscevskis**, N.Skobeleva, L.Petrichenko. Urban Power supply system’s development in conditions of uncertain information // Proceedings of the tenth IASTED European Conference “Power and Energy Systems”, Crete, Greece, 2011, CD, -p. 27-31.
 8. N.Skobeleva, **O.Borscevskis**, S.Guseva, L.Petrichenko. An integrated approach to the formation of service areas for urban substations of different voltage // Proceedings of the 6th International Conference on Electrical and Control Technologies ECT-2011, 5- 6 May, Kaunas, Lithuania, 2011, -p. 202-205.
 9. N.Breners, S.Guseva, N.Skobeleva, **O.Borscevskis**. Directions to increase reliability of maintained transformer equipment’s functioning // Proceedings of the 6th International Conference on Electrical and Control Technologies ECT 2011, 5- 6 May, Kaunas, Lithuania, 2011, -p. 175-178.
 10. **O.Borscevskis**, G.Gavrilovs. Useful lifetime and rational replacement of power transformers // Proceedings of the IEEE the 7th International conference-workshop: Compatibility and power Electronics 2011, Tallinn, Estonia, 2011, -p. 40-43.
 11. **O.Borscevskis**, G.Gavrilovs. 20kV voltage adaptation problems in urban electrical networks // Compatibility and power Electronics 2011, Student Forum, Tallinn, Estonia, 2011, -p. 68-71.
 12. S.Guseva, **O.Borscevskis**, N.Skobeleva, L.Kozireva. Load determination and selection of transformer substations` optimal power for tasks of urban networks' development // Proceedings of the 51st International Scientific Conference of Riga Technical University on Power and Electrical Engineering, Vol. 27, Riga, Latvia, 2010, -p.31-36.
 13. S.Guseva, **O.Borscevskis**, N.Skobeleva, N.Breners. The system approach to placement of transformer substations in the power supply system of the city // Proceedings of the 5th International conference on electrical and control technologies ECT-2010, 6-7 May, Kaunas, Lithuania, 2010, -p. 211-214.
 14. S.A.Guseva, N.N.Skobeleva, **O.I.Borscevskis**, N.Z.Breners. Geometrical modeling of service areas and distribution of urban transformer substations in the city territory // Proceedings of the XI International Conference "Problems of Present-day Electrotechnics-2010", 1-4 June, Kyiv, Ukraine, 2010 (digitālā formātā uz CD)
 15. S.Guseva, N.Skobeleva, **O.Borscevskis**, N.Breners. Rational approach to the formation of urban power supply system in solving of development problems // Proceedings of the Scientific and Technical Union of the Power Engineers, ENERGY FORUM 2010, Varna, Bulgaria, 2010, -p. 211-214.
 16. S.Guseva, N.Breners, N.Skobeleva, **O.Borscevskis** Choice and efficiency of measures for increase reliability functioning of power transformers // Proceedings of the Scientific and Technical Union of the Power Engineers, ENERGY FORUM 2010, Varna, Bulgaria, 2010, -p. 280-289.
 17. S.A.Guseva, N.Z.Breners, N.N.Skobeleva, **O.I.Borscevskis**. Применение мониторинга силовых трансформаторов для повышения эффективности функционирования систем электроснабжения // Proceedings of the XI International Conference "Problems of Present-day Electrotechnics-2010", 1-4 June, Kyiv, Ukraine, 2010 (digitālā formātā uz CD).

18. Guseva S., Skobeļeva N., Breners N., **Borščevskis O.** Pilsētu transformatoru apakšstaciju apkalpes zonu modelēšana // Energētika un elektrotehnika, 4.sērija, 24.sējums. – Rīga, RTU, Latvija, 2009, – 24.-31. lpp.
19. S.Guseva, N.Skobeļeva, N.Breners, **O.Borscevsks.** Load forecasting till 2020 of existing and perspective transformer substations in Riga // Power and Electrical Engineering, 4.sērija, 25.sējums. – Rīga, RTU, Latvia, 2009, – p. 77-80.
20. S.Guseva, N.Skobeļeva, N.Breners, **O.Borscevsks.** Determination and distribution of service areas of urban transformer substations with geometrical templates // Latvian Journal of Physics and Technical Sciences, Nr.6 (Vol.46), Riga, Latvia, 2009, - p. 16-26.

PROMOCIJAS DARBA STRUKTŪRA

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, satur ievadu, 5 nodaļas, secinājumus un rekomendācijas, literatūras sarakstu, 2 pielikumus, 82 zīmējumus un ilustrācijas, 23 tabulas, kopā 165 lappuses. Literatūras sarakstā norādīti 113 literatūras avoti.

Pirmajā nodaļā dots Rīgas pilsētas elektroapgādes sistēmas 330, 110, 20-10 un 0.4 kV tīklu stāvokļa raksturojums, darba shēmas pamatprincipi un tehniskie dati, atspoguļotas vairākas pilsētu elektrisko tīklu un līniju nominālā sprieguma izvēles metodes, ka arī salīdzināti 10 un 20 kV sprieguma tīklu rādītāji.

Otrajā nodaļā ir apkopota informācija par 20 kV sprieguma izmantošanu lielo Eiropas un pasaules pilsētu elektroapgādes sistēmās, detalizēti izpētīts katras Rīgas pilsētas esošās 110/20-10 kV transformatoru apakšstacijas stāvoklis, izpildīta TA „Bišuciems”, „Zolitūde”, „Mārupe” un „Tiraine” reālo slodžu analīze un veiktas prognozes laika periodam no 2000. gada līdz 2026. gadam, kā arī atzīmētas galvenās neatrisinātās problēmas.

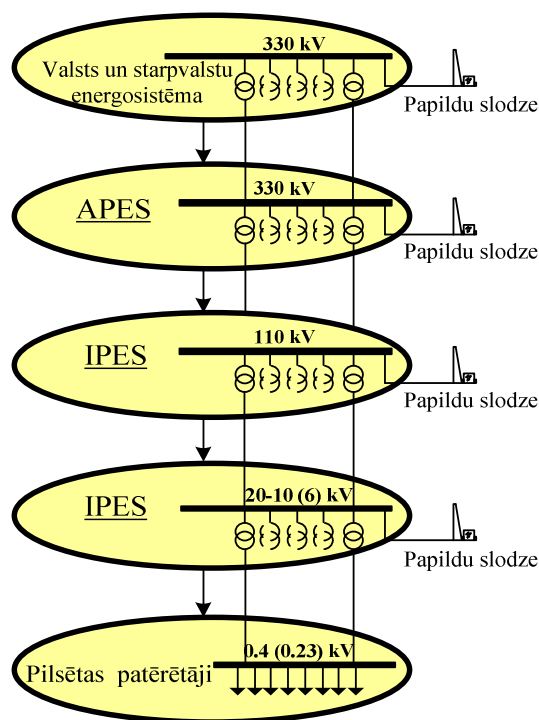
Trešajā nodaļā piedāvāta 20 kV sprieguma ieviešanas procesa vadības koncepcija, izstrādāta pilsētas elektroapgādes sistēmas optimālo parametru noteikšanas metodika, izveidoti 110-20-0.4 kV un 110-10-0.4 kV pilsētas elektroapgādes sistēmas vispārināti tehniski ekonomiskie modeļi un attiecīgas mērķa funkcijas, realizēts mērķa funkcijas optimizācijas pirmais etaps ar lokālo ekstrēmu noteikšanu. Optimizācijas aprēķini 110/10 kV un 110/20kV TA optimālās jaudas izvēlei ir realizēti ar speciāli izstrādāto programmu Microsoft Excel vidē.

Ceturtajā nodaļā realizēts mērķa funkcijas optimizācijas otrais etaps un noteikti svarīgi 110-20-0.4 kV PES un 110-10-0.4 kV PES tīkla optimālie parametri plašā slodzes blīvuma diapazonā. Nodaļā ir analizētas dažāda veida neitrāles darba režīmu priekšrocības un trūkumi un izvēlēts 20 kV kabeļu tīkla neitrāles darba režīms ar zemēšanu caur mazrezistīvu aktīvo pretestību, kā arī analizētas sprieguma regulēšanas iespējas 110/20 kV un 110/20-10 kV transformatoros.

Piektajā nodaļā pierādīts 20 kV sprieguma ieviešanas ekonomiskais lietderīgums Rīgas pilsētas elektroapgādes sistēmā, aprakstīti 20 kV sprieguma ieviešanas tehniskie pasākumi, piedāvāts 110/20 kV TA konstruktīvais izpildījums un veikts to tehniski-ekonomiskais pamatojums, sintezētas tīklu shēmas, demonstrētas 110-20-0.4 kV sistēmas pielietošanas iespējas divos jaunos Rīgas pilsētas rajonos: Dreiliņi un Rumbula un Rīgas apkaimes rajonā-Mārupes novadā.

1. LIELPILSĒTU ELEKTROAPGĀDES SISTĒMU RAKSTUROJUMS

Lielpilsētas elektroapgādes sistēma parasti ir valsts energosistēmas neatņemamā sastāvdaļa. Latvijas pilsētu patērētāju kvalitatīva elektroapgāde ir cieši saistīta ar 330 kV un 110 kV tīklu drošo darbu un to racionālo uzbūvi. Latvijas lielo pilsētu elektroapgādes sistēmu (PES) lietoto spriegumu hierarhiju var atspoguļot ar diagrammu, kas parādīta 1.1. attēlā [10-14].



1.1. att. Latvijas pilsētu elektroapgādes sistēmu spriegumu hierarhiskā struktūra:

APES – ārējā pilsētas elektroapgādes sistēma,

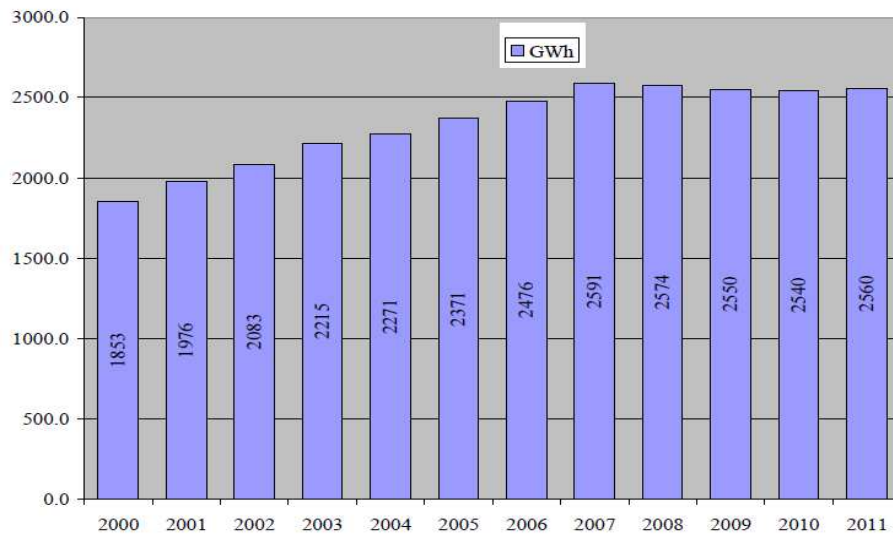
IPES – iekšējā pilsētas elektroapgādes sistēma

Rīga ir Latvijas galvaspilsēta un galvenais industriālais, darījumu, kultūras un finanšu centrs Baltijā, nozīmīga ostas pilsēta [25]. Tā ir viens no lielākajiem elektroenerģijas patērētājiem Latvijas energosistēmā. Rīgas pilsētas elektroenerģijas patēriņš ir atspoguļots 1.2. attēlā. 2008. gadā Rīgas pilsētas maksimālā slodze sastādīja 580 MW un elektroenerģijas patēriņš - 2574 GWh, t.i., 40% no visas energosistēmas patērina. Liela daļa no valsts uzstādītās un patērētās jaudas pieder galvaspilsētai. Samazinoties iedzīvotāju skaitam un ekonomiskās situācijas dēļ valstī, mazliet pazeminājās Rīgas pilsētas slodze un elektroenerģijas patēriņš: 2010. gadā maksimālā slodze sastādīja tikai 485 MW un patēriņš – 2540 GWh. Pēdējos gados slodzes pieaugums praktiski nav novērots.

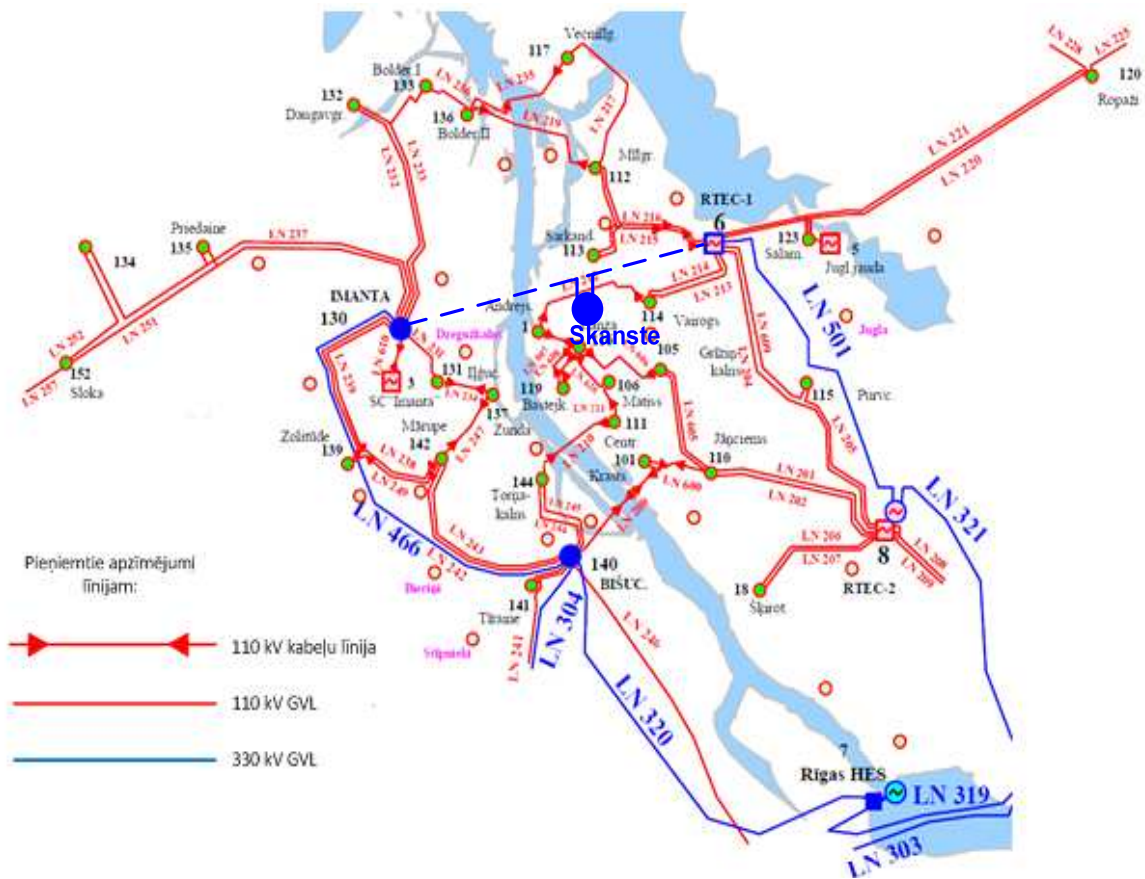
Pilsētu elektroapgādes sistēmu drošums ir atkarīgs no 330 kV tīkla, kurš ir izveidots ar gaisvadu 38.8 km garuma līnijām (GVL) un strādā pēc radiālā principa. 110 kV tīkls izveidots gan ar GVL (107.6 km pilsētas apkaimēs), gan ar kabeļu līnijām (KL) (6.7 km pilsētas centrā ar lielu apbūves blīvumu).

Rīgas elektroapgādes shēma 2011. gadā ar 330 kV un 110 kV gaisvadu un kabeļu līnijām ir parādīta 1.3. attēlā [23].

Dažāda sprieguma barošanas transformatoru apakšstaciju (TA) un tīklu izpildījuma veidi Latvijas pilsētās apkopoti un atspoguļoti 1.4. attēlā.



1.2. att. Rīgas pilsētas elektroenerģijas patēriņš GWh laika periodā no 2000. gada līdz 2011. gadam



1.3. att. Rīgas pilsētas 330-110 kV tīkla elektroapgādes shēma

Pilsētas 330 kV elektrotīkls ir viens no Rīgas elektroapgādes nodrošinājuma pamatelementiem. Diemžēl esošās 330 kV GVL ir vecas: LN 321– 46 gadu veca (ieviesta ekspluatācijā 1964. gadā) un LN 466 – 24 gadu veca (ieviesta ekspluatācijā 1986. gadā).

TA veids				Savienojumu līniju veids											
ārta		iebūveta		GVL				KL							
Tīkla spriegums, kV		Tīkla spriegums, kV		Tīkla spriegums, kV		Tīkla spriegums, kV		Tīkla spriegums, kV		Tīkla spriegums, kV					
330	110	10-20	0.4	330	110	10-20	0.4	330	110	10-20	0.4				
●	●	●	●	—	—	—	—	●	●	●	●	—	—	—	—
●	●	●	●	—	—	●	—	●	●	●	●	—	—	●	●
—	●	●	●	●	●	●	●	—	—	—	●	—	●	●	●
—	—	—	—	●	●	●	●	—	—	—	—	—	●	●	●

1.4. att. Latvijas pilsētu dažāda sprieguma barošanas TA un tīklu izpildījuma veidi

110 kV pilsētas pārvades elektrotīkls veidots pēc loka shēmas ar savienojošām diagonālēm, ietverot tajā arī ārpus pilsētas izvietoto Rīgas TEC-2. Loka shēmā ir četras 330/110 kV bāzes apakšstacijas: „Bišuciems”, „Imanta”, „Rīgas TEC-1” un ārpus pilsētas izvietotā „Rīgas TEC-2” TA. 330/110 kV bāzes apakšstacijām ir saites ar ārpus loka un pilsētas robežas izvietotajām 110 kV apakšstacijām. Lai paaugstinātu Rīgas pilsētas elektroapgādes sistēmas, konkrēti 330 kV tīkla, drošumu ir nepieciešams izveidot noslēgto loku caur visām 330 kV barojošām apakšstacijām. Tā realizēšanai ir nepieciešams izveidot 330 kV savienojuma saiti starp TA Rīgas „TEC-1” un TA „Imanta”, perspektīvā ieslēdzot tranzītā jaunu 330 kV TA „Skanste” (1.3. attēlā 330 kV tīkla savienojums ir parādīts ar punktveida zilu līniju).

Rīgas vidējā sprieguma 6-10-20 kV sadales elektrotīkls veidots pamatā ar kabeļu līnijām. Tīkli izbūvēti pēc cilpveida shēmas, bet strādā radiālā režīmā. Ievērojamai 10 kV kabeļu tīkla daļai ir pārsniegts kalpošanas ilgums, to konstruktīvais spriegums bieži ir 6 kV. Kabeļiem ir piesūcināta papīra izolācija, mazi šķērsgriezumi un daudz savienojuma uznavu [25]. Tikai pēdējos 10-15 gados notiek vecu, nepietiekoša šķērsgriezuma un nekenetrējamo kabeļu globāla maiņa pret vidējā sprieguma kabeļiem ar polivinilhlorīda un šūtā polietilēna (tā saucamo „plastmasas”) izolāciju, kuras rezultātā būtiski uzlabojas Rīgas vidējā sprieguma elektrotīkla drošums. Esošo 20 kV kabeļu līniju pietiekošais daudzums Rīgas pilsētā, ka arī izbūvēto 20 kV līniju un iekārtu ekspluatācijas pieredze Latvijā var atvieglot nākotnē paaugstināta sprieguma ieviešanu lielpilsētās pie augstiem slodzes blīvumiem.

Novērtējot esošo sadales punktu stāvokli, var secināt, ka tas ir neapmierinošs. No kopējā sadales punktu skaita (78 gabali) tikai 25% ir pilnībā rekonstruēti, 14% sadales punktos daļēji nomainītas iekārtas, bet 61% gadījumā nekas nav atjaunots. Tātad, pašlaik 25% sadales punktu ir fiziski novecojuši un tiem ir nepieciešama renovācija.

Zemsprieguma tīklā galvenokārt tiek lietotas kabeļu līnijas. Rīgas pilsētas centrā līdz šim laikam nav pabeigta tīklu pārbūve visiem elektroenerģijas lietotājiem, kas joprojām saņem elektroenerģiju ar nestandarta spriegumu 3x220V (vecais trīsfāžu tīkls bez nullvada) [7,36].

Lai garantētu pilsētas patērētāju nepārtrauktu elektroapgādi, nodrošinātu ar kvalitatīvu elektroenerģiju perspektīvos daudzstāvu dzīvojamajos mikrorajonos ar lielu slodzes blīvumu, pieslēgtu lielus jaudīgus patērētājus (ASV vēstniecība, Latvijas Nacionālā bibliotēka, Z-towers VIP biroju ēkas pie Ķīpsalā u.c.) ir nepieciešama elastīga, droša un ekonomiski pamatota elektriskā shēma ar pietiekošiem sprieguma līmeņiem tajā. Nepieciešamība nodrošināt Rīgas pilsētas gatavību pārejai uz 20 kV sprieguma līmeni izvirza virkni aktuālu tehnisko un ekonomisko uzdevumu.

Darbā rūpīgi analizēta sadales tīklu sprieguma līmeņa izmaiņas problēma un tīklu pārejas uz 20 kV spriegumu tehniskās iespējas un ekonomiskais lietderīgums.

20 kV sprieguma ieviešanas priekšnoteikumi ir:

- lielu administratīvo ēku, finanšu, biznesa un kultūras centru, lielu jaudīgo punktveida patērētāju un dzīvojamo daudzstāvu mikrorajonu ar augstu slodzes blīvumu esamība;
- pietiekošs 110/10-20 kV TA daudzums, lai nodrošinātu savlaicīgu elektroapgādes rezervēšanu avārijas gadījumā un pēcavārijas režīmos;
- attiecīgu elektroiekārtu (transformatoru, sadaļņu, releju un automātikas aizsardzības iekārtu, 20 kV kabeļu) esamība, atrisināta tīkla neitrāles režīmu problēma;
- stabils ekonomiskais stāvoklis valstī, finanšu, materiālu un darba resursu esamība.

20 kV sprieguma priekšrocības. Paaugstinot tīklu spriegumu, uzlabojas to tehniskie un vairāki tehniski ekonomiskie parametri un rādītāji. Par galvenajām 20 kV tīkla sprieguma priekšrocībām caurlaides spējā, sprieguma zudumos, aktīvās, reaktīvās jaudas un elektroenerģijas zudumos salīdzinājumā ar 10 kV tīklu var secināt no matemātiskajām sakarībām starp tīklu tehniskajiem parametriem [2-4,7]:

$$P_{\max} = \sqrt{3} \cdot U \cdot I_{\max} \cdot \cos \varphi; \Delta U = \frac{\sum P_L \cdot R + \sum Q_L \cdot X}{U}; \Delta A = \frac{S_{\max}^2 \cdot R \cdot \tau \cdot 10^{-3}}{U^2}, \quad (1.1)$$

kur P_{\max} – līnijas caurlaides spēja; U – tīkla barošanas spriegums; I_{\max} – līnijas maksimālā strāva (parasti jaudas slēdža nominālā strāva I_{nom}), $\cos \varphi$ – tīkla jaudas koeficients; P_L – līnijas pārvadāmā aktīvā jauda; Q_L – līnijas pārvadāmā reaktīvā jauda; R – līnijas aktīvā pretestība; X – līnijas reaktīvā pretestība.

Salīdzinot izteiksmes pie 20 un 10 kV spriegumiem, var secināt, ka 20 kV sprieguma tīklam ir divas reizes lielāka jaudas caurlaides spēja nekā 10 kV tīklam pie vienādas strāvas slodzes.

Tā pati sakarība saglabājas tīklu elementu pārvadāmajai jaudai. Palielinot spriegumu divas reizes, 20 kV līnijai sprieguma zudumi samazinās divas reizes, aktīvās un reaktīvās jaudas un elektroenerģijas zudumi samazinās četras reizes.

Šādas 20 kV sadales tīkla priekšrocības ir ļoti svarīgas, lai garantētu drošu un kvalitatīvu elektroapgādi rajonos ar lielu slodzes blīvumu, lieljaudīgu patērētāju pieslēgšanu un pilsētas tīklu attīstību, kas paredz slodzes pieaugumu.

Lai gan 20 kV sprieguma tīkls piedāvā virkni priekšrocību, tā lietošana un ieviešana pilsētas elektroapgādes sistēmā, tai skaitā Rīgā, ir ļoti sarežģīts un darbietilpīgs process, kas tehnisku un ekonomisku iemeslu dēļ nav ātri paveicams. Tas prasa gan laiku, gan arī pakāpenisku, tehniski sagatavotu un pareizi izstrādātu pieeju, kurai jābūt pamatotai ar atbilstošiem tehniski ekonomiskajiem aprēķiniem, ievērojot, ka tīklu attīstības uzdevumi jārisina nepilnīgas sākotnējās informācijas apstākļos.

2. 20 KV SPRIEGUMA IZMANTOŠANA ĀRZEMJU LIELPILSĒTĀS UN RĪGAS PILSĒTAS TĪKLOS

2.1. Dažāda nominālā sprieguma izmantošana lielās Eiropas un pasaules pilsētās

Daudzus gadus 20 kV sprieguma ieviešana lielās pilsētās bija aktuāls diskusijas jautājums. 20 kV spriegumu ir vērts lietot pilsētās vai tās rajonos ar lielu slodzes blīvumu un attālinātos no slodzes centra rūpniecības uzņēmumos, ja 10 kV spriegums vairs nav pietiekams slodzes noseigšanai. Pašreiz pilsētas tīklu 20 kV sprieguma nomināls ir iekļauts daudzu valstu standartos, kā arī Starptautiskās elektrotehniskās komisijas (IEC) normās [31]. Darbā ir sīki apskatīti un aprakstīti šādu lielo Eiropas un pasaules pilsētu, kurās lieto 20 kV barošanas spriegumu, elektroapgādes sistēmu darbības pamatprincipi: Parīze, Stokholma, Helsinki, Maskava, Berlīne, Dubaija. Līdztekus šo pilsētu sistēmu elektrisko shēmu atspoguļojumam, ir norādītas to elektroapgādes sistēmu vājās un stiprās puses [27,30,33,35]. Ir secināts, ka neeksistē vienādas pieejas un nav izstrādāta vienota metodika, kuru var pielietot, risinot sprieguma paaugstināšanas jautājumus pilsētā ar esošu elektroapgādes

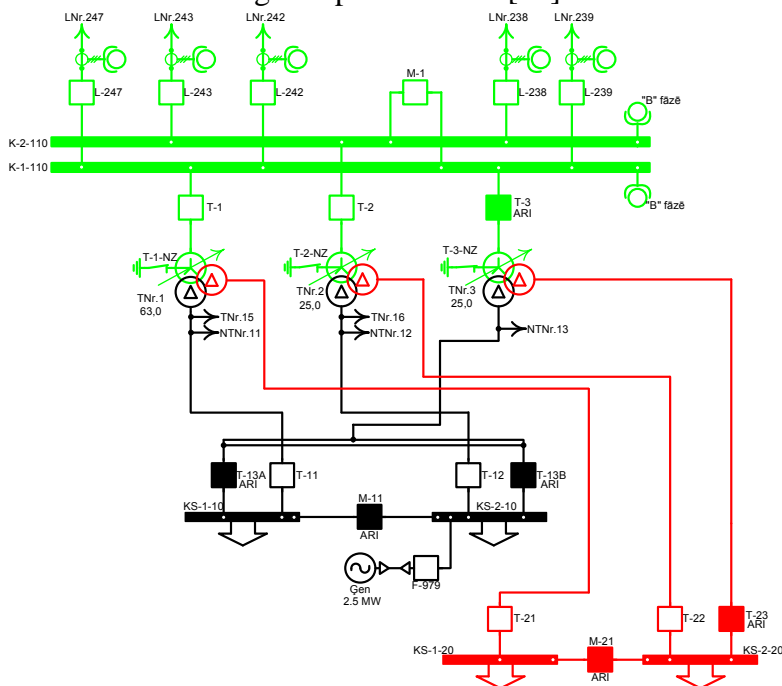
sistēmu, jo katrai pilsētai atšķiras ģeogrāfiskie nosacījumi, tīklu shematiskie risinājumi, apbūves veidi, tehniskie un ekonomiskie apstākļi.

2.2. Rīgas pilsētās esošā 20 kV sprieguma elektrotīkla raksturojums

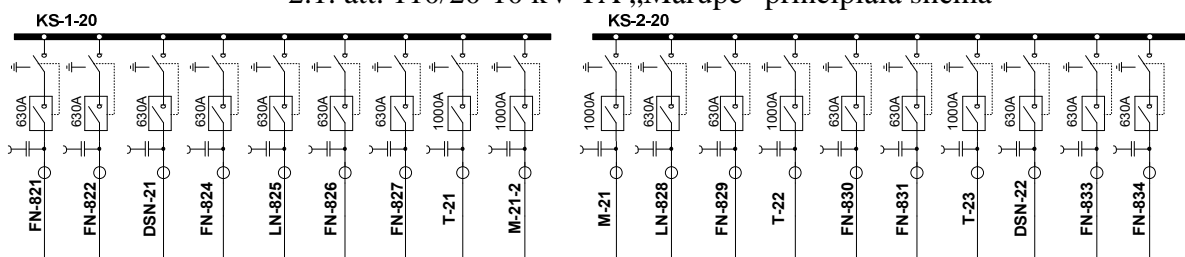
Rīgas pilsētas teritoriju pašreiz apkalpo divdesmit septiņas 110/20-10kV apakšstacijas. Esošais pamatbarošanas vidējais spriegums Rīgas pilsētā ir 10 kV. Pašlaik Rīgas pilsētā 20 kV spriegums pastāv tā saucamajās Rīgas pilsētas apkaimēs (nomalēs): Dreiliņu rajons, Vecmīlgrāvis, Bergi, Mangaļsala, Vecāķi, Jaunciems, Dārziņi. Šie tīkli robežojas ar 20 kV „piepilsētas” tīkliem. 20 kV sadales iekārtas eksistē 330/110/20-10 kV TA „Bišuciems” un 110/20-10 kV TA „Zolitūde”, „Vecmīlgrāvis”, „Mārupe” un „Tīraine”. Izmantojot vienu 20 kV līniju no 110 kV TA „Salamandra”, caur starptransformatoru 6/20 kV tiek realizēta ūdens sūkņu stacijas "Baltezers" barošanas rezervēšana.

No šīm apakšstacijām iziet 20 kV sprieguma KL un GVL līnijas, kas baro teritorijas jau ārpus pilsētas. 20 kV barošanas sprieguma ieviešanu Rīgā jāsāk no pilsētas apkaimēm, kur jau eksistē 20 kV barošanas spriegums, jo tur būs vienkāršāk realizēt rezervēšanu izmantojot 20 kV tīklu. Visvairāk 20 kV sprieguma tīklu atrodas t/c Spices rajonā, kuru apkalpo 110/20-10 kV TA „Mārupe”.

TA Nr. 142 “Mārupe” principiālā shēma ir parādīta 2.1. un 2.2. attēlā [7]. TA “Mārupe” ir uzstādīti trīs 110/20-10 kV trīsfāzīgu transformatori. 2004. gadā apakšstacijas „Mārupe” rekonstrukcijas laikā tika nomainītas 20 un 10 kV sadalnes un uzstādītas papildu ligzdas. Pēc rekonstrukcijas darbu pabeigšanas sākās ļoti intensīva būvniecība apakšstacijas rajonā. Pēdējo gadu laikā pie rekonstruētās apakšstacijas tika pieslēgtas lielas jaunas slodzes: lidostas pasta termināls, ASV vēstniecība, vairāki lielveikali („Spice”, „Spice mēbeles” u.c.). Rezultātā apakšstacijas sadalnēs tikai dažas ligzdas palika brīvas [24].



2.1. att. 110/20-10 kV TA „Mārupe” principiālā shēma

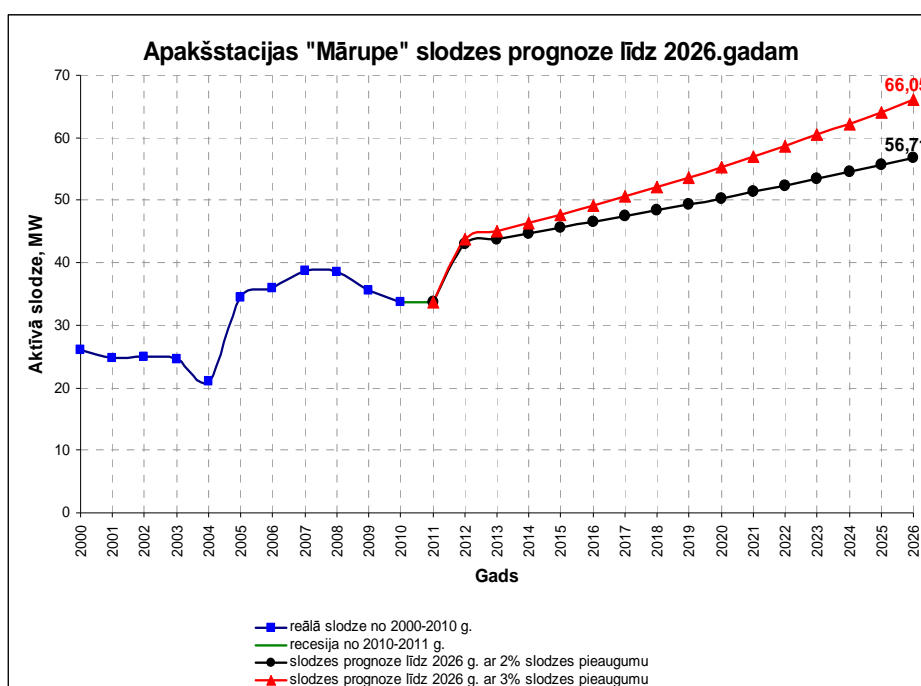


2.2. att. TA „Mārupe” KS-1-20 un KS-2-20 principiālās shēmas

Viens no lielākajiem patērētājiem, kas vēl ir pieslēgts TA „Mārupe” 20 kV barošanas spriegumam, ir jauno dzīvojamo māju komplekss Ventspils ielā, 60. Šajā rajonā ir daudzstāvu apbūve ar diezgan lielu slodzi (vienlaicīgā maksimālā slodze $P_{max}=4.1$ MW) un ļoti lielu slodzes blīvumu σ māju apbūves zonā – ap 44 MVA/km² [24].

No TA „Mārupe” 20 kV sekcijām saņem barošanu ne tikai jaudīgie Rīgas pilsētas patērētāji, bet caur divām GVL līnijām no katras 20 kV sekcijas barojas arī vairāk nekā puse Mārupes novada teritorijas. Diemžēl joprojām pastāv liela problēma ar jaunu slodžu pieslēgšanu Mārupes novadā, jo tā teritorijā nav savas 110/20 kV TA.

Darbā tika izpildīta 110/20-10 kV TA Nr. 142 „Mārupe” slodzes analīze no 2000. līdz 2011. gadam un veikta prognoze laika periodam no 2011. līdz 2026. gadam (skat. 2.3. attēlu). 110/20-10 kV TA „Mārupe” reālā slodze (pēc AS „Latvijas Elektriskie tīkli” (LET) mērījumu datiem) 2000.-2011.gadā ir parādīta 2.3. attēlā ar zilu krasu. Pie papildu pieprasītās slodzes $P_{piepr}=14.0$ MW 2012.gadā (AS “Sadales Tīkls” (ST) un LET datiem) un ar tālāku vienmērīgu 2% slodzes pieaugumu gadā, TA „Mārupe” slodze 2026. gadā sastādīs $P_{2026}=56.7$ MW, bet ar 3% slodzes pieaugumu gadā – $P_{2026}=66$ MW.



2.3. att. 110/20-10 kV TA „Mārupe” slodzes analīze un prognoze laika periodā no 2000. līdz 2026. gadam

Tas nozīmē, ka pie jebkura no pieņemtajiem attīstības scenārijiem, būs nepieciešama 110/20-10 kV transformatoru jaudas maiņa. Tā kā apakšstacijā jau ir uzstādīts viens transformators ar jaudu $S_{nom}=63$ MVA, jāmaina pārējie divi transformatori ar jaudu $S_{nom}=25$ MVA pret transformatoriem ar jaudu $S_{nom}=63$ MVA. Viena tāda trīstinumu transformatora cena ir aptuveni 850000 EUR. Pie kam, visticamāk, būs jāveic papildu pasākumi lielu īsslēgumu strāvu ierobežošanai pie tik lielām transformatoru jaudām.

Promocijas darbā ir ļoti sīki aprakstītas Rīgas pilsētas 110/20-10 kV TA (Mārupe, Zolitūde, Tīraine, Bišuciems), kurās plaši pielieto 20 kV spriegumu Rīgas pilsētas patērētāju elektroapgādei kā arī izanalizēts katras 110/20-10 kV TA stāvoklis un galvenās neatrisinātās problēmas [18,24].

Elektroenerģijas patēriņa pieaugums komunālajā sfērā, apbūves stāvu skaita palielināšanās, strauja attīstība moderno biroja, banku un komerciālo ēku apbūves sektorā, punktveida slodžu rašanās palielina slodzes blīvumu atsevišķos pilsētas rajonos vai visā pilsētā. Kā parādīja aprēķini, kuri izpildīti [28], slodzes blīvums Rīgas pilsētas centrālajos rajonos var sasniegt

līdz pat 30 MVA/km². Ekonomiskās situācijas stabilizācija valstī tikai pozitīvi ietekme slodzes pieauguma un elektroenerģijas patēriņa palielināšanos. Šajos apstākļos atsevišķos pilsētas rajonos (un nākotnē Rīgā kopumā) kļūst būtiska Rīgas pilsētas elektroapgādes sistēmas pakāpeniskā pāreja no 110-10-0.4 kV uz 110-20-0.4 kV sistēmas elektroapgādi. Tāda pāreja tehniski ir iespējama, jo atsevišķos pilsētas rajonos jau eksistē 20 kV sprieguma tīkls un 110/20-10 kV transformatoru apakšstacijas, kā arī ir uzkrāta pieredze ekspluatācijā.

3. SADALES TĪKLU SPRIEGUMA LĪMEŅA IZMAIŅAS PROCESA VADĪBAS PAMATPRINCIPI

3.1. 20 kV sprieguma ieviešanas procesa vadības koncepcija

20 kV sprieguma ieviešana Rīgas pilsētā ir ļoti sarežģīts un darbietilpīgs process, kuru fiziski un praktiski nevar veikt ļoti ātri. Pilsētā jau ir izveidots 110-10-0.4 kV tīkls, bet dažos rajonos daļēji izmantots 20 kV spriegums. Pārejas uz 20 kV spriegumu ietvaros jārisina jautājumi par tā ieviešanas visā pilsētā ekonomisko un tehnisko lietderīgumu, kā arī esošā tīkla elementu saglabāšanu, rekonstrukciju vai jaunu elementu izbūvi pārejas periodā, lai varētu izveidot 110-20-0.4 kV elektroapgādes sistēmu. Tas prasa pakāpenisku un pareizi izstrādātu pieeju, kura jāpamato ar tehniski ekonomiskajiem aprēķiniem sākotnējās nepilnas un nenoteiktas informācijas apstākļos, kā arī laiku pārejas realizācijai.

Darbā izstrādāta koncepcija 20 kV sprieguma ieviešanai Rīgas pilsētā, aizstājot 10 kV spriegumu. Šī koncepcija ir shematiski atspoguļota 3.1. attēlā.

Koncepcija 20 kV sprieguma ieviešanai Rīgas pilsētā iekļauj:

- esošās 110-20-10-0.4 kV elektroapgādes sistēmas padziļinātu analīzi un esošā 110-10 kV tīkla sagatavošanu pārejai uz 110-20 kV (1. bloks);
- jaunu 110/20 kV TA izbūvi un jaunu 110 kV kabeļu līniju ierīkošanu TA pieslēgšanai tīklam (2. bloks);
- jaunu 20/0.4 kV TA izbūvi un jauna 20 kV tīkla izveidošanu, sākot no Rīgas pilsētas apkaimēm, kur tas jau eksistē (3. bloks).

Katra bloka uzdevumu un pasākumu realizācijai ir nepieciešams atrisināt teorētiskus un praktiskus uzdevumus.

1. bloka teorētiskie uzdevumi:

- jauno 110/10 kV TA optimālo jaudu noteikšana esošo tīklu attīstībai, īpaši pilsētas centrālajos rajonos, līdz tiek radīti apstākļi pārejai uz jaunu sistēmu;
- jauno 110/10 kV TA apkalpes zonu un darbības rādīsu noteikšana.

1. bloka praktiskie pasākumi:

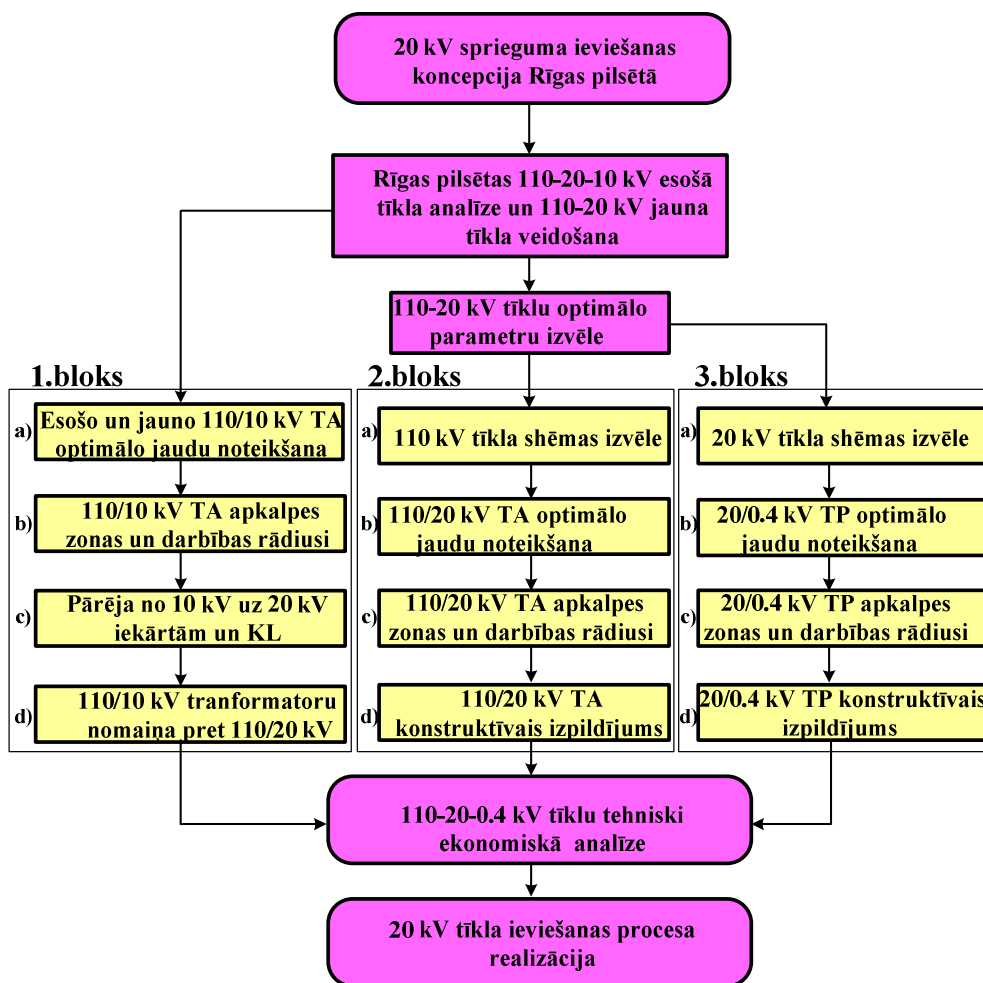
- jaunu iekārtu un kabeļu piegāde esošās 110-10-0.4 kV sistēmas attīstības nodrošinājumam un pārejai uz jaunu 110-20-0.4 kV sistēmu;
- 110/10 kV transformatoru pakāpeniska, pēc iespējām, aizstāšana ar jauniem 110/20 kV transformatoriem.

2. bloka teorētiskie uzdevumi:

- 110 kV tīkla racionālās shēmas izvēle;
- jauno 110/20 kV TA optimālo jaudu noteikšana;
- 110/20 kV TA apkalpes zonu un darbības rādīsu noteikšana.

2. bloka praktiskais uzdevums:

- 110/20 kV TA konstruktīvā izpildījuma izvēle.



3.1. att. 20 kV sprieguma ieviešanas koncepcija Rīgas pilsētā

3. bloka teorētiskie uzdevumi:

- 20 kV tīkla racionālās shēmas izvēle;
- 20/0.4 kV transformatoru apakšstaciju vai punktu (TP) optimālo jaudu noteikšana;
- 20/0.4 kV TP apkalpes zonu un darbības rādiusu noteikšana.

3. bloka praktiskais uzdevums:

- 20/0.4 kV TP konstruktīvā izpildījuma izvēle.

Koncepcijas teorētisko un praktisko uzdevumu risinājumi apskatīti 3.- 5. nodaļā.

3.2. Lielpilsētas elektroapgādes sistēmas optimālo parametru noteikšanas metodika

Elektroapgādes sistēmu optimālo parametru noteikšanas jautājumi tika apskatīti un izpētīti daudzos zinātniskajos darbos. Liela loma šo jautājumu izstrādē pieder Latvijas un ārzemju zinātniekiem un vadošajiem inženieriem: V. Veņikovam, A. Glazunovam, V. Blokam, G. Pospelovam, V. Fedinam, V. Kozlovam, V. Dālem, Z. Krišānam, S. Gusevai [31,32].

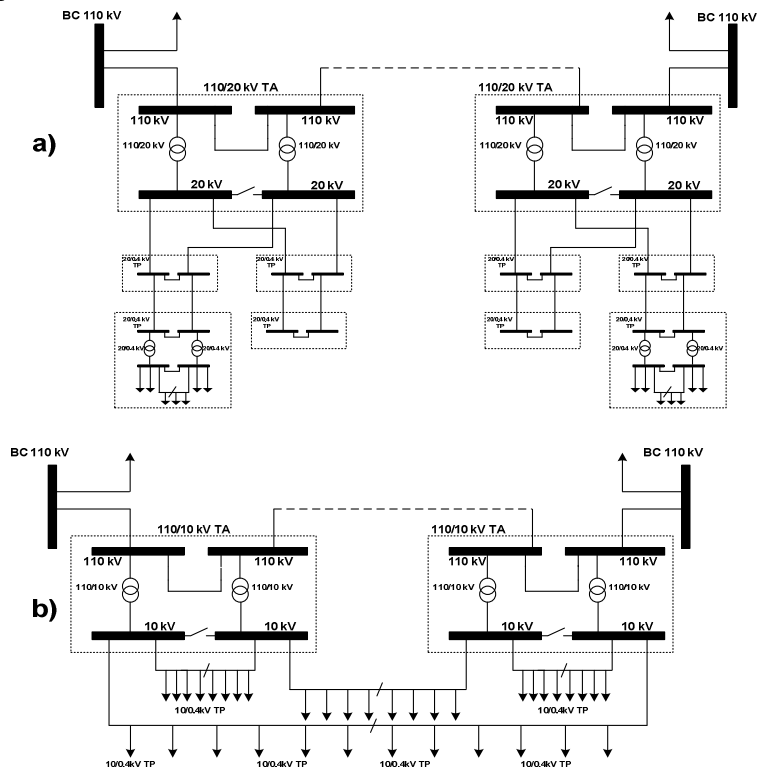
Darbā [28] veikta 110/10 kV TA optimālo jaudu novērtēšana Rīgas pilsētas 110 kV perspektīvās shēmas izvēles līdz 2020. gadam ietvaros, taču tā ir orientējoša, ar dažiem vienkāršojumiem un nav pietiekoša pilsētas sistēmas dziļai analīzei. Analizējot literatūras avotus, var secināt, ka trūkst pieņemamas metodikas mūsdienu lielpilsētu sprieguma daudzpakāpju elektroapgādes sistēmas novērtējumam apbūves principu un tehniski ekonomisko analīzes metožu izmaiņu dēļ.

Risinot lielo pilsētu elektroapgādes attīstības problēmas un jaunās sprieguma pakāpes ieviešanas uzdevumu, ir ļoti svarīgi jau sākotnējās projektēšanas stadijās pareizi izvēlēties

jauno 110/20 kV transformatoru apakšstaciju optimālās jaudas, to skaitu un izvietojumu pilsētas teritorijā, kā arī novērtēt pārejas uz jauno spriegumu lietderīgumu. Bez tam jāievēro, ka pārejas periodā trūkst 110/20 kV TA un 20 kV līniju patērētāju barošanas rezervēšanai, īpaši pilsētas centrālajos rajonos. Tādēļ jauna sprieguma ieviešanas periodā esošais 110-10 kV tīkls vēl tiek saglabāts un pat attīstīts. Sakarā ar slodzes pieaugumu jābūvē jaunas 110/10 kV TA arī vecajā sprieguma sistēmā. Vienlaicīgi jānovērtē jauno TA optimālās jaudas, skaits un izvietojums pilsētas teritorijā. Šī jautājumu kompleksa risināšana ir sarežģīts un darbietilpīgs uzdevums, ņemot vērā to, ka tā notiek nenoteiktas un nepilnas sākotnējās informācijas apstākļos (par jaunu iekārtu raksturojumiem, attīstības tempiem, izbūves secību, objektu nodošanas ekspluatācijā termiņiem utt.).

Attīstības uzdevumu risinājumam promocijas darbā ir izstrādāts vispārināts tehniski ekonomiskais modelis 110-10-0.4 kV un 110-20-0.4 kV elektropārvades sistēmas optimālo parametru noteikšanai un tehniski ekonomisko rādītāju analīzei. Uzdevuma risinājums ir veikts uz pilsētas elektroapgādes sistēmu attīstības variantu salīdzinājuma pamata [9,11]. Gan 110-10-0.4 kV, gan 110-20-0.4 kV Rīgas pilsētas elektroapgādes sistēmas tehniski ekonomisko modeļu izstrāde ir veikta, ievērojot noteiktus nosacījumus, vienkāršojumus un pieņēmumus:

1. 110/10 kV un 110/20 kV divtransformatoru TA ir iekštipa apakšstacija ar 110 kV kabeļu pievadiem un 10-20 kV kabeļu izvadiem.
2. 110 kV tīkls izveidots pēc loka shēmas, 20 kV tīkls – pēc divstaru radiālās shēmas, 10 kV tīkls – pēc cilpveida shēmas ar dalījumu plūsmu sateces punktos, 0.4 kV tīkls visos variantos izveidots pēc cilpveida shēmas ar dalījumu (tīkla principiālā shēma ir parādīta 3.2. attēlā).
3. 20-10/0.4 kV TP (visbiežāk divtransformatoru) ir kompaktas transformatoru apakšstacijas ar mazu apbūves laukumu (līdz 15m²). Visi 0.4 kV izvadi no 20-10/0.4 kV TP līdz patērētājiem ir kabeļu izpildījumā.
4. Optimizācijas aprēķinos pilsētai ar dažādu apbūves stāvu skaitu pieņemts slodzes blīvuma diapazons $\sigma=3\div 24$ MVA/km².



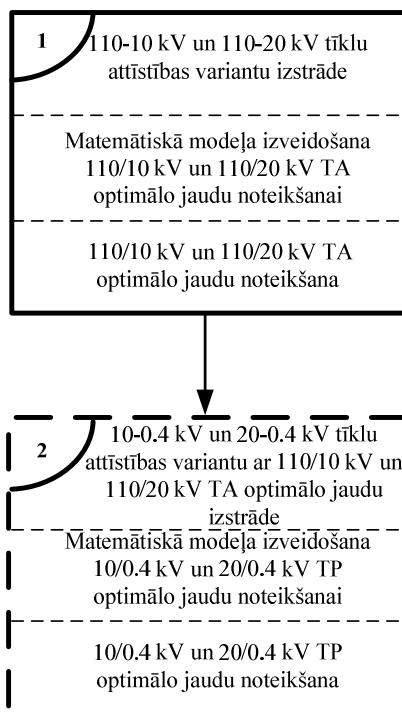
3.2. att. Pilsētas elektrisko tīklu principiālās shēmas:

- a) 110-20-0.4 kV elektroapgādes sistēmas 20 un 0.4 kV divstaru radiālā shēma ,
- b) 110-10-0.4 kV elektroapgādes sistēmas 10 un 0.4 kV cilpveida shēma

Izstrādātā metodika pilsētas elektroapgādes sistēmas (PES) optimālo parametru noteikšanai satur divas sastāvdaļas un ir parādīta 3.3. attēlā divos blokos:

- 1.blokā ir paredzēta 110/10 kV un 110/20 kV TA optimālo jaudu noteikšana atkarībā no slodzes blīvuma attīstības rajonos;
- 2.blokā ir paredzēta 10/0.4 kV un 20/0.4 kV TP optimālo jaudu noteikšana, zinot 110/10 kV vai 110/20 kV TA optimālo jaudu no 1. bloka aprēķiniem.

Pēdējais uzdevums ir sīkāk apskatīts un risināts 4. nodaļā [9].



3.3. att. 110-10-0.4 kV un 110-20-0.4 kV elektroapgādes sistēmas TA un TP optimālo jaudu noteikšanas metodikas sastāvdaļas

3.3. 110-10-0.4 kV un 110-20-0.4 kV pilsētas elektroapgādes sistēmas tehniski ekonomiskie modeļi

Esošās 110-10-0.4 kV un jaunas 110-20-0.4 kV pilsētas elektroapgādes sistēmas analīzei ir izstrādāti tehniski ekonomiskie modeļi. Par attiecīgu mērķa funkciju, ņemot vērā nepilnīgas sākotnējās informācijas apstākļus, izvēlēti summārie kapitālieguldījumi sistēmu izveidei.

Summārie kapitālieguldījumi pilsētas vai tās rajona elektroapgādes sistēmas izbūvei K_{Σ} iekļauj sevī kapitālieguldījumus 110/10 kV vai 110/20 kV transformatoru apakšstaciju un 10/0.4 kV vai 20/0.4 kV transformatoru punktu izbūvei, kā arī kapitālieguldījumus TA, TP un patērētāju pieslēgšanai tīklam paredzēto kabeļu līniju ierīkošanai.

Summāro kapitālieguldījumu mērķa funkcija n tīkla izpildījuma variantiem vispārējā veidā izskatās šādi [9,17,26]:

$$K_{\Sigma,n} = f(A_i, S_{TAnom,i}, S_{TPnom,i}, \sigma_i) = K_{\Sigma TA} + K_{\Sigma AL} + K_{\Sigma TP} + K_{\Sigma VL} + K_{\Sigma ZL} \quad (3.1)$$

kur $K_{\Sigma TA}$ – kapitālieguldījumi 110/10 kV vai 110/20 kV transformatoru apakšstaciju (TA) izbūvei; $K_{\Sigma AL}$ – kapitālieguldījumi 110 kV kabeļu līniju izbūvei TA pieslēgumiem; $K_{\Sigma TP}$ – kapitālieguldījumi 10/0.4 kV vai 20/0.4 kV transformatoru apakšstaciju (TP) izbūvei; $K_{\Sigma VL}$ – kapitālieguldījumi 10 kV vai 20 kV kabeļu līniju izbūvei TP pieslēgumam; $K_{\Sigma ZL}$ – kapitālieguldījumi 0.4 kV kabeļu līniju izbūvei patērētāju pievienošanai.

Mērķa funkcija (3.1) un tās sastāvdaļas ir izteiktas no mainīgajiem $S_{TA,nom,i}$ (110/10 kV vai 110/20 kV TA transformatoru nominālā jauda) un $S_{TP,nom,i}$ (10/0.4 kV vai 20/0.4 kV TP transformatoru nominālā jauda) pie uzdotajiem, bet variējamajiem slodzes blīvumiem σ_i pilsētā (vai tās rajonos) ar platību $\Pi_{pils,i}$, un konstantēm A_i , kuras ir atkarīgas no sākotnējiem tehniskajiem, kā arī tehniski ekonomiskajiem tīklu rādītājiem.

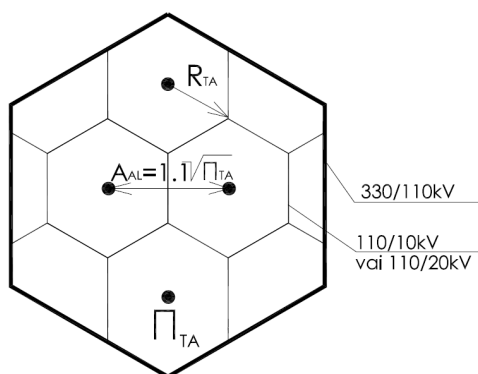
Elektroapgādes sistēmas tehniski ekonomiskā modeļa izstrādei izmantoti tīklu un to elementu ģeometriskie modeļi un matemātiskās sakarības starp tīklu parametriem [15,16].

Pilsētas vai tās sastāvdaļas (rajona, mikrorajona) summārā slodze S_{pils} ir izteikta šādi:

$$S_{pils} = k_{o,v} \cdot \sum_{i=1}^{n_{TA}} S_{TA,i} = \sigma_{vid} \cdot \Pi_{pils} = \sigma_{vid} \cdot \sum_{i=1}^{n_{TA}} \Pi_{TA,i} \quad (3.2)$$

kur $S_{TA,i}$ – i -tās transformatoru apakšstacijas slodze; n_{TA} – TA skaits pilsētā vai tās sastāvdaļā; Π_{pils} – pilsētas teritorijas platība; σ_{vid} – vidējais slodzes blīvums pilsētā vai tās rajonā; $\Pi_{TA,i}$ – i -tās TA apkalpes zona; $k_{o,v}$ – TA slodžu maksimuma un energosistēmas maksimuma vienlaicīguma koeficients dažādās sprieguma hierarhijas pakāpēs v , atkarībā no TA skaita.

Transformatoru apakšstaciju faktiskās apkalpes zonas $\Pi_{TA,i}$ ir modelētas ar idealizēto ekvivalento platību pareizā sešstūra veidā (3.4.att.). Starp sešstūra ģeometriskajiem pamatizmēriem un galvenajiem transformatoru apakšstacijas tehniskajiem parametriem eksistē šādas noteiktas matemātiskās sakarības (3.3) [19-21].

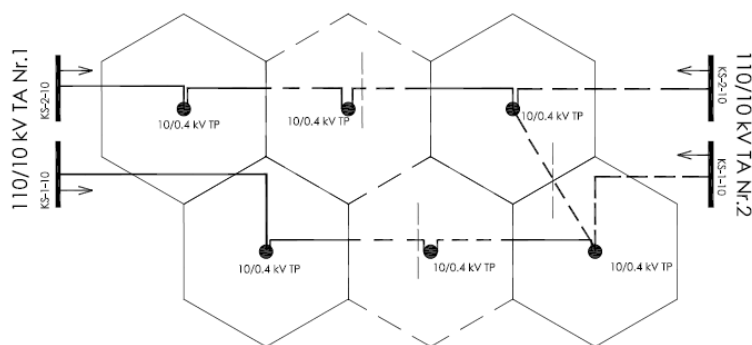


$$\begin{aligned} \Pi_{TA} &= \frac{n_{tr} \cdot \beta_{piel,TA} \cdot S_{TA,nom}}{\sigma_{vid}} = 2.6 \cdot R_{TA}^2 \\ R_{TA} &= 0.62 \cdot \sqrt{\frac{n_{tr} \cdot \beta_{piel,TA} \cdot S_{TA,nom}}{\sigma_{vid}}} = 0.62 \cdot \sqrt{\Pi_{TA}} \\ A_{AL} &= 1.1 \cdot \sqrt{\frac{n_{tr} \cdot \beta_{piel,TA} \cdot S_{TA,nom}}{\sigma_{vid}}} = 1.1 \cdot \sqrt{\Pi_{TA}} \end{aligned} \quad (3.3)$$

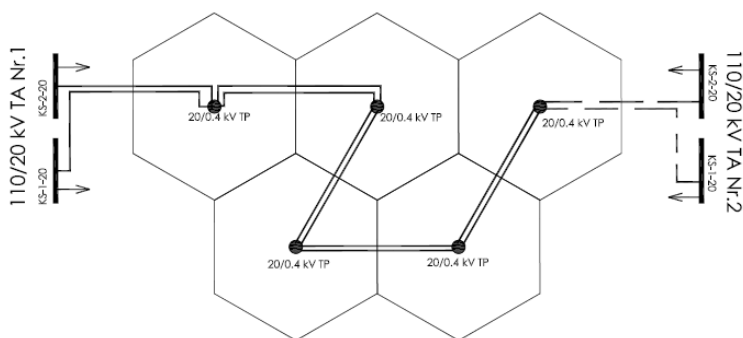
3.4. att. Transformatoru apakšstaciju apkalpes zonas ideālais modelis dažādām sprieguma pakāpēm

(3.3) izteiksmē pieņemti šādi apzīmējumi: Π_{TA} – transformatoru apakšstacijas apkalpes zona; R_{TA} – aploces, kas apvilktā apkārt sešstūrim, rādiuss, vai apakšstacijas darbības rādiuss, vai sešstūra mala; A_{AL} – teorētiski minimālais attālums starp blakus esošajām apakšstacijām; n_{tr} – transformatoru skaits vienā TA; $S_{TA,nom}$ – TA transformatoru nominālā jauda; $\beta_{piel,TA}$ – TA transformatora pieļaujama noslodzes koeficients.

3.2. attēlā redzamajām pilsētas 10 kV un 20 kV elektrisko tīklu shēmām ir pieņemti ģeometriskie modeļi, kas parādīti 3.5. un 3.6. attēlā.



3.5. att. 10 kV tīkla ar 10/0.4 kV TP un 10 kV cilpveida kabeļu līnijām modelis



3.6. att. 20 kV tīkla ar 20/0.4 kV TP un 20 kV divstaru kabeļu līnijām modelis

Ievērojot pieņemtos modeļus un matemātiskās sakarības starp tīkla parametriem, darbā ir iegūti pilsētas 110-10-0.4 kV un 110-20-0.4 kV elektroapgādes sistēmas vispārinātie tehniski ekonomiskie modeļi un attiecīgas mērķa funkcijas (3.4) un (3.5), kuras ir atkarīgas no mainīgajiem S_{TA} un S_{TP} .

Mērķa funkcija 110-10-0.4 kV elektroapgādes sistēmai [9]:

$$K_{\Sigma 110-10-0.4} = A_1 \cdot \sigma_{vid} \cdot S_{TA,nom}^{-1} + A_2 \cdot \sigma_{vid}^{0.5} \cdot S_{TA,nom}^{-0.5} + A_3 \cdot \sigma_{vid} \cdot S_{TP,nom}^{-1} + A_{4(10)} \cdot \sigma_{vid}^{0.5} \cdot S_{TA,nom}^{0.5} \cdot S_{TP,nom}^{-1} + A_{5(10)} \cdot \sigma_{vid}^{0.5} \cdot S_{TP,nom}^{1.5} \quad (3.4)$$

Mērķa funkcija 110-20-0.4 kV elektroapgādes sistēmai:

$$K_{\Sigma 110-20-0.4} = A_1 \cdot \sigma_{vid} \cdot S_{TA,nom}^{-1} + A_2 \cdot \sigma_{vid}^{0.5} \cdot S_{TA,nom}^{-0.5} + A_3 \cdot \sigma_{vid} \cdot S_{TP,nom}^{-1} + A_{4(20)} \cdot \sigma_{vid}^{0.5} \cdot S_{TA,nom}^{0.5} \cdot S_{TP,nom}^{-1} + A_{5(20)} \cdot \sigma_{vid}^{0.5} \cdot S_{TP,nom}^{1.5} \quad (3.5)$$

Mērķa funkcijas 110-10-0.4 kV un 110-20-0.4 kV PES atšķiras ar konstantēm $A_{4(10)}$, $A_{4(20)}$, $A_{5(10)}$, $A_{5(20)}$, kuru vērtības nosaka tehniskie, ekonomiskie un tehniski ekonomiskie tīklu rādītāji. Visas mērķa funkcijas konstantes ir apkopotas 3. tabulā.

3.1. tabula

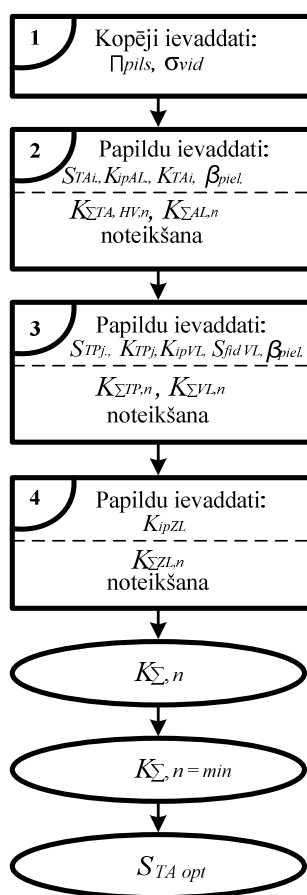
PES mērķa funkcijas konstantes

Nr.p/k.	Mērķa funkcijas konstantes
1	$A_1 = 1.1 \cdot \Pi_{pils} \cdot K_{TA}$
2	$A_2 = 2.1 \cdot K_{ipAL} \cdot \Pi_{pils}$
3	$A_3 = 0.84 \cdot \Pi_{pils} \cdot K_{TP}$
4	$A_{4(10)} = 3.6 \cdot K_{ipVL} \cdot \Pi_{pils}$
5	$A_{4(20)} = 2.53 \cdot K_{ipVL} \cdot \Pi_{pils}$
6	$A_{5(10)} = 6.87 \cdot K_{ZL} \cdot \Pi_{pils}$
7	$A_{5(20)} = 9.69 \cdot K_{ZL} \cdot \Pi_{pils}$

Mērķa funkcijas ir nelineāras funkcijas ar veselskaitļu mainīgajiem. Optimālo atrisinājumu meklēšanai izmantota nelineārās diskrētās programmēšanas metode. Mērķa funkcijas optimālais atrisinājums atbilst summāro kapitālieguldījumu minimuma nosacījumam: $K_{\Sigma,n} = \min$.

110/10 kV vai 110/20 kV TA optimālo jaudu noteikšanas struktūrshēma ir parādīta 3.7. attēlā un sastāv no šādām galvenajām sastāvdaļām sistēmas izpildījuma n variantam:

- ievaddati rezultātu iegūšanai;
- summāro kapitālieguldījumu $K_{\Sigma TA,n}$ un $K_{\Sigma AL,n}$ noteikšana 110/10 kV vai 110/20 kV TA izbūvei un 110 kV kabeļu līniju, kas paredzētas TA pieslēgšanai 110 kV tīklam, izbūvei;
- summāro kapitālieguldījumu $K_{\Sigma TP,n}$, $K_{\Sigma VL,n}$ noteikšana 10/0.4 kV vai 20/0.4 kV TP izbūvei ar pieslēgumiem attiecīgi 10 kV vai 20 kV kabeļu līnijām;
- summāro kapitālieguldījumu $K_{\Sigma ZL,n}$ noteikšana 0.4 kV kabeļu līniju izbūvei no 10/0.4 kV vai 20/0.4 kV TP līdz abonentiem;
- elektroapgādes sistēmas attīstības varianta summāro kapitālieguldījumu $K_{\Sigma,n}$ noteikšana.
- mērķa funkcijas minimuma $K_{\Sigma,n} = \min$ atrašana un optimālās jaudas $S_{TA,opt}$ fiksācija.



3.7. att. 110/10 kV vai 110/20 kV TA optimālo jaudu noteikšanas struktūrshēma

110/10 kV un 110/20 kV TA optimālās jaudas meklēšana notiek mērķa funkcijām (3.4) un (3.5) pie mainīgo parametru iespējamajām vērtībām saskaņā ar TA un TP transformatoru nominālo skalu:

$$S_{TA,nom} = 16, 25, 32, 40, 63, 80 \text{ MVA};$$

$$S_{TP,nom} = 0.1, 0.16, 0.25, 0.4, 0.63, 1.0, 1.6 \text{ MVA};$$

un pie variējamiem parametriem:

$$\Pi_{pils} = 74, 148 \text{ km}^2;$$

$$\sigma_{vid} = 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24 \text{ MVA/km}^2.$$

Mērķa funkcijas konstanšu A_1-A_5 noteikšanai pieņemtas tehnisko un tehniski ekonomisko rādītāju un koeficientu vērtības n_{tr} , k_{01} , k_{02} , K_{TA} , K_{TP} , K_{ipAL} , K_{ipVL} , K_{ipZL} , λ_{AL} , λ_{VL} , λ_{ZL} (λ – tīklu konfigurācijas koeficienti), kuras iegūtas no tehniskajiem projektiem vai balstoties uz teorētiskajiem apsvērumiem.

Mērķa funkcijas optimālais risinājums ir sasniegts pie pilsētas elektroapgādes sistēmas attīstības variantu minimālajiem summārajiem kapitālieguldījumiem PES izbūvei.

Visi aprēķini tika veikti ar speciāli izstrādāto programmu Microsoft Excel vidē [9,11] atbilstoši 3.7. attēlā parādītajai struktūrshēmai. Mainot ievaddatus un parametrus, iegūti rezultāti mūsdienu pilsētas elektroapgādes sistēmai ar dažādām pilsētas platībām un slodzes blīvumiem tajā. Analizējot aprēķinu rezultātus, apkopoti un grafiski attēloti daži svarīgi PES rādītāji.

Pilsētas elektroapgādes sistēmas vispārīgā analīzei ir izmantoti summāro kapitālieguldījumu īpatnējie rādītāji uz 1 km^2 pilsētas platības.

110-10-0.4 kV un 110-20-0.4 kV elektroapgādes sistēmas summāro kapitālieguldījumu īpatnējo rādītāju uz 1 km^2 (Ls/km^2) aprēķina pēc formulām:

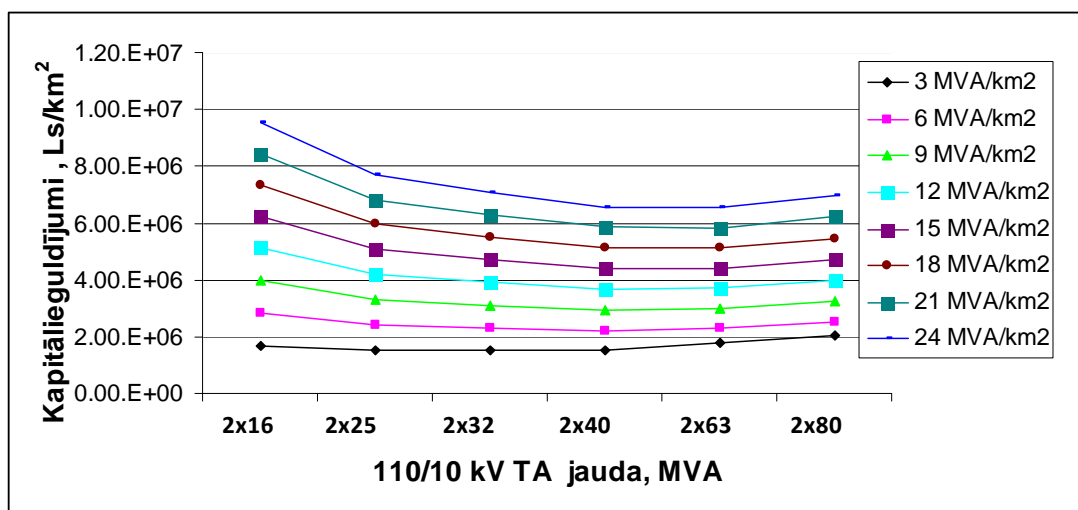
$$K_{ip\Sigma 110-10-0.4} = \frac{K_{\Sigma 110-10-0.4}}{\Pi_{pils}}, \quad (3.6)$$

$$K_{ip\Sigma 110-20-0.4} = \frac{K_{\Sigma 110-20-0.4}}{\Pi_{pils}}, \quad (3.7)$$

kur $K_{\Sigma 110-10-0.4}$, $K_{\Sigma 110-20-0.4}$ - summārie kapitālieguldījumi 110-10-0.4 kV vai 110-20-0.4 kV PES veidošanai.

Optimizācijas aprēķini mērķa funkcijām (3.6) un (3.7) pie mainīgo parametru $S_{TA,nom}$ un $S_{TP,nom}$ iespējamajām vērtībām un pieņemtajiem parametriem $\Pi_{pils}=74 \text{ km}^2$ un $\sigma_{vid}=3\div 24 \text{ MVA/km}^2$ ir parādīti grafiskā veidā 3.8. – 3.9. attēlā.

Tā, piemēram, 110-10-0.4 kV PES summāro kapitālieguldījumu uz 1 km^2 (Ls/km^2) atkarības no 110/10 kV TA jaudas, izmantojot 10/0.4 kV TP ar jaudu $S_{TP}=2\times 1000 \text{ kVA}$, ir atspoguļotas 3.8. attēlā.

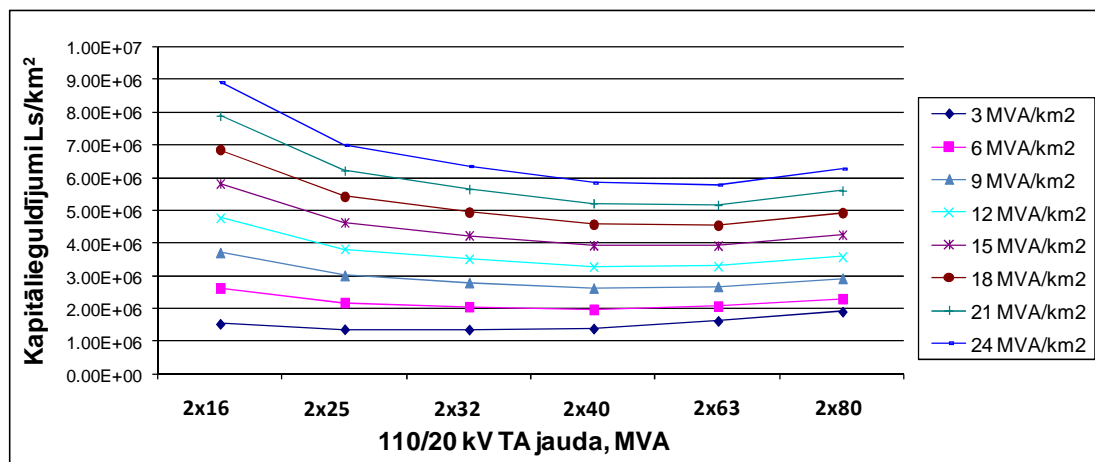


3.8. att. 110-10-0.4 kV PES summāro kapitālieguldījumu uz 1 km^2 (Ls/km^2) atkarība no 110/10 kV TA jaudas, izmantojot 10/0.4 kV TP ar jaudu $S_{TP}=2\times 1000 \text{ kVA}$

Izanalizējot 3.8. attēlā atspoguļotos rezultātus, var secināt, ka 110-10-0.4 kV PES ekonomiski izdevīgi un ieteicams izmantot 110/10 kV TA ar jaudu $S_{TA}=2\times 32 \text{ MVA}$, ja slodzes blīvums pilsētā vai tās apkaimēs ir $3 \leq \sigma_{vid} \leq 6 \text{ MVA/km}^2$, 110/10 kV TA ar jaudu $S_{TA}=2\times 40 \text{ MVA}$, ja

slodzes blīvums ir $6 < \sigma_{vid} \leq 12 \text{ MVA/km}^2$, un 110/10 kV TA ar jaudu $S_{TA}=2 \times 63 \text{ MVA}$, ja slodzes blīvums ir diapazonā $12 < \sigma_{vid} \leq 24 \text{ MVA/km}^2$.

110-20-0.4 kV PES summāro kapitālieguldījumu uz 1 km^2 (Ls/km^2) atkarības no 110/20 kV TA jaudas, izmantojot 20/0.4 kV TP ar jaudu $S_{TP}=2 \times 1000 \text{ kVA}$, ir atspoguļotas 3.9. attēlā.



3.9. att. 110-20-0.4 kV PES summāro kapitālieguldījumu uz 1 km^2 (Ls/km^2) atkarība no 110/20 kV TA jaudas, izmantojot 20/0.4 kV TP ar jaudu $S_{TP}=2 \times 1000 \text{ kVA}$

Ka redzams no 3.9. attēla datiem, 110-20-0.4 kV PES ekonomiski izdevīgas un ieteicamas izmantošanai ir 110/20 kV TA ar jaudu $S_{TA}=2 \times 32 \text{ MVA}$, ja slodzes blīvums pilsētā vai tās apkaimēs ir $3 \leq \sigma_{vid} \leq 6 \text{ MVA/km}^2$, 110/20 kV TA ar jaudu $S_{TA}=2 \times 40 \text{ MVA}$ – ja slodzes blīvums ir $6 < \sigma_{vid} \leq 12 \text{ MVA/km}^2$, un 110/20 kV TA ar jaudu $S_{TA}=2 \times 63 \text{ MVA}$ – ja slodzes blīvums ir $12 < \sigma_{vid} \leq 24 \text{ MVA/km}^2$.

Salīdzinot iegūtos rezultātus, kas atspoguļoti 3.8.-3.9. attēlos, var secināt, ka pie lieliem slodzes blīvumiem no $\sigma_{vid} = 12 \text{ MVA/km}^2$, lietojot 20 kV spriegumu, elektroapgādes sistēmas summārie kapitālieguldījumi uz 1 km^2 (Ls/km^2) praktiski neatšķiras (t.i., atšķiras par mazāk nekā 5%). Tas nozīmē, ka ar lielākiem slodzes blīvumiem ($\sigma_{vid} \geq 12 \text{ MVA/km}^2$) izdevīgāk izmantot 110-20-0.4 kV pilsētas elektroapgādes sistēmu, jo šādai PES ir lielāka caurlaides jauda un tīkla attīstības perspektīvas no tehniskā un ekonomiskā viedokļa.

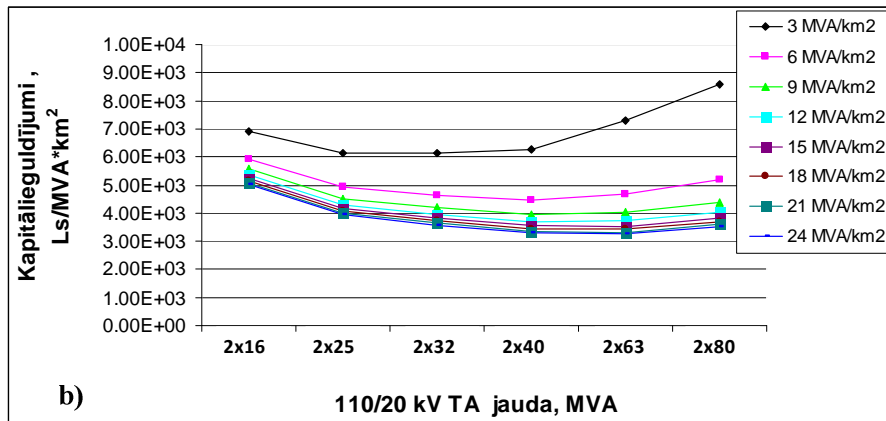
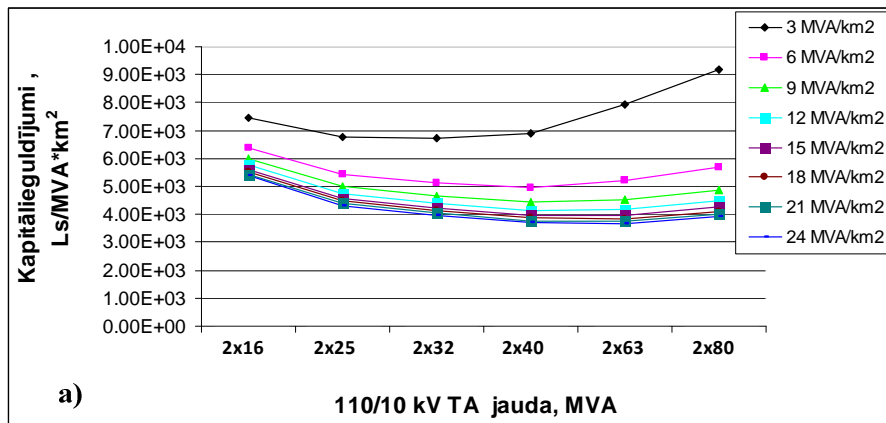
Lielākai optimizācijas rezultātu unifikācijai ir konstruētas summāro kapitālieguldījumu atkarības no slodzes blīvuma uz 1 MVA pārvadāmās jaudas un uz 1 km^2 aizņemtās pilsētas teritorijas ($\text{Ls/MVA} \cdot \text{km}^2$).

110-10-0.4 kV un 110-20-0.4 kV pilsētas elektroapgādes sistēmas unificētos rādītājus ($\text{Ls/MVA} \cdot \text{km}^2$) aprēķina pēc formulām:

$$K_{unif\Sigma 110-10-0.4} = \frac{K_{\Sigma 110-10-0.4}}{\Pi_{pils} \cdot S_{pils}}, \quad (3.8)$$

$$K_{unif\Sigma 110-20-0.4} = \frac{K_{\Sigma 110-20-0.4}}{\Pi_{pils} \cdot S_{pils}}. \quad (3.9)$$

110-10-0.4 kV un 110-20-0.4 kV pilsētas elektroapgādes sistēmas unificēto rādītāju atkarība no 110/10 kV vai 110/20 kV TA jaudas, izmantojot sadales tīklā 10/0.4 kV vai 20/0.4 kV TP ar jaudu $S_{TP}=2 \times 1000 \text{ kVA}$, ir atspoguļota 3.10. attēlā.



3.10. att. Pilsētas elektroapgādes sistēmas unificētie rādītāji ($Ls/MVA \cdot km^2$) atkarībā no TA jaudas, izmantojot sadales tīklā
 a) 10/0.4 kV TP ar jaudu $S_{TP}=2 \times 1000$ kVA;
 b) 20/0.4 kV TP ar jaudu $S_{TP}=2 \times 1000$ kVA

Izanalizējot iegūtos rezultātus, kas iekļauti 3.10. a) un b) attēlā atspoguļotajos datos, redzams, ka tie apstiprina balstoties uz summāro kapitālieguldījumu īpatnējām vērtībām (Ls/km^2) izdarītos secinājumus par transformatoru nominālās jaudas robežu lietošanu 110-10-0.4 kV un 110-20-0.4 kV pilsētas elektroapgādes sistēmā. Iegūto rezultātu analīze apliecina, ka mūsdienu lielpilsētas 110-10-0.4 kV vai 110-20-0.4 kV elektroapgādes sistēmās ekonomiski izdevīgi izmantot 110/10 kV vai 110/20 kV TA ar jaudu $S_{TA}=2 \times 32$ MVA, ja slodzes blīvums pilsētā vai tās apkaimēs ir $3 \leq \sigma_{vid} \leq 6$ MVA/ km^2 , TA ar jaudu $S_{TA}=2 \times 40$ MVA, ja slodzes blīvums ir $6 < \sigma_{vid} \leq 12$ MVA/ km^2 , un TA ar jaudu $S_{TA}=2 \times 63$ MVA, ja slodzes blīvums ir diapazonā $12 < \sigma_{vid} \leq 24$ MVA/ km^2 .

4. 10-20 KV TĪKLA OPTIMĀLIE PARAMETRI UN DARBA REŽĪMI

4.1. 10-20 kV tīkla optimālo parametru noteikšana

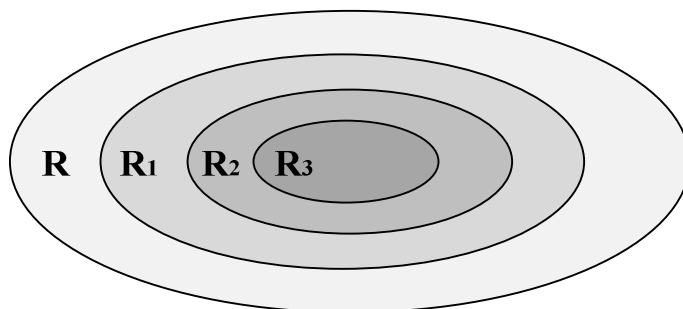
Darba 3. nodaļā 20 kV sprieguma ieviešanas koncepcijas pirmā etapa realizācijas gaitā (3.3. attēla struktūrshēmas 1. bloks), tika iegūti PES mērķa funkciju (3.4) un (3.5) lokālie ekstrēmi, minimizējot funkcijas pēc mainīgā $S_{TA\ nom,i}$ (pie $S_{TP\ nom,i} = const$) slodzes blīvuma diapazonā $\sigma=3-24$ MVA/ km^2 katram optimizācijas ciklam (aprēķinu rezultātu kopa R_I no visiem eksistējošiem risinājumiem R). Funkciju minimumam atbilst noteiktas 110/10 kV un 110/20 kV TA apakšstaciju uzstādītās jaudas, kuras ir optimālas pētījamajai elektroapgādes sistēmai [9]. Apakšstaciju optimālo jaudu atrašana ir svarīgs uzdevums, taču tas ir tikai pirmais 110-10-0.4 kV un 110-20-0.4 kV elektroapgādes sistēmas optimālo parametru noteikšanas metodikas etaps. Optimizācijas otrajā etapā (3.3. attēla 2. bloks) ir nepieciešams izdalīt optimizācijas ciklos visminimālākās no summāro kapitālieguldījumu minimālajām vērtībām pie $S_{TP\ nom,i} = const$,

kuras jau atbilst mērķa funkciju minimumam pie mainīgajiem $S_{TA\ nom,i}$ un $S_{TP\ nom,i}$ vienlaicīgi, nodrošinot uzdevuma risinājumu apgabala sašaurinājumu (optimizācijas rezultātu kopa R_2). Optimālo mainīgo $S_{TA\ opt,i}$ un $S_{TP\ opt,i}$ vērtības līdz ar minimālajiem PES summāro kapitālieguldījumu unificētajiem rādītājiem veido mērķa funkciju optimizācijas rezultātu apgabalu (kopa R_3).

Mērķa funkciju (3.4) un (3.5) optimizācijas gaitu var attēlot vispārīgā veidā kā operāciju secību:

Sākotnējā kopa R $\xrightarrow[\text{pēc } S_{TA\ nom} (S_{TP\ nom} = const)]{\text{optimizācija}}$ R_1 $\xrightarrow[\text{pēc } S_{TP} (S_{TA\ opt})]{\text{optimizācija}}$ R_2 $\xrightarrow[\text{pēc } S_{TA\ opt}, S_{TP\ opt}]{\text{optimizācija}}$ R_3 (risinājumu kopa)

Risinājumu apgabala sašaurinājumu optimizācijas gaitā var attēlot arī grafiskā veidā (4.1. att.):



4.1. att. Risinājumu apgabala sašaurinājuma grafiskā interpretācija

Visi aprēķini, kuri ir nepieciešami analīzei, TA un TP optimālo jaudu noteikšanai otrajā etapā, ir jau veikti optimizācijas pirmajā etapā. Aprēķinu rezultātu analīzes gaitā 4. nodaļā tika iegūti PES optimālie parametri, kuri atspoguļoti 4.1. un 4.2. tabulās.

4.1. tabula

110-10-0.4 kV PES optimālie parametri slodzes blīvuma diapazonā

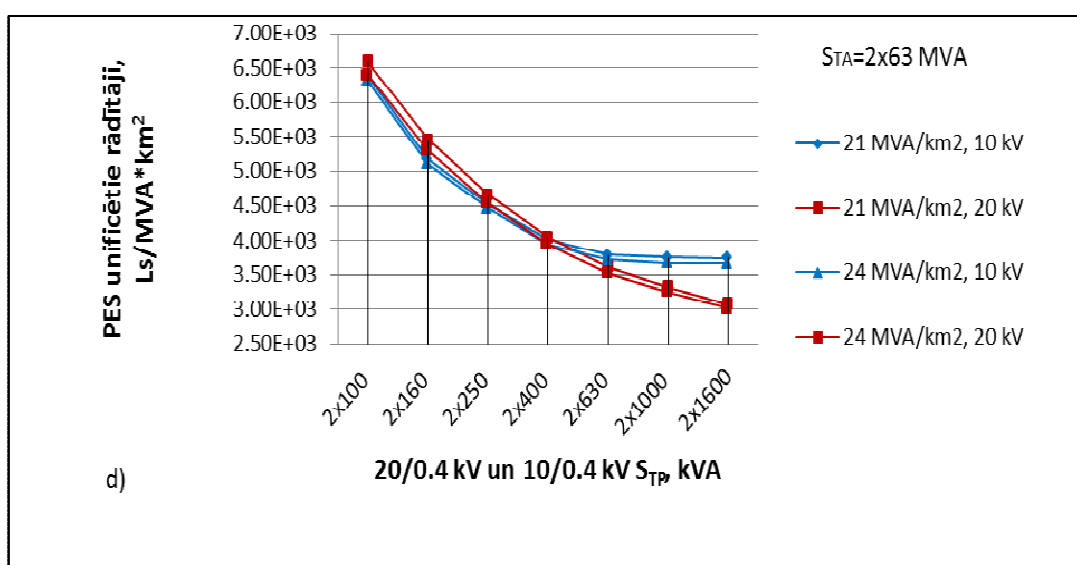
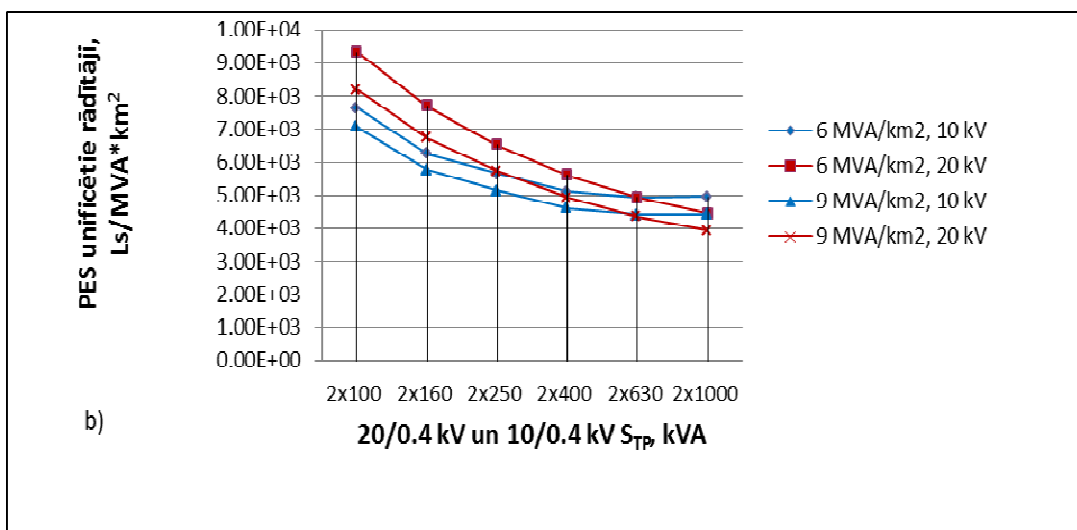
σ , MVA/km^2	$S_{TA\ opt}$, MVA	$S_{TP\ opt}$, MVA	$K_{\Sigma\ ip, min}$, Ls/km^2	$K_{\Sigma\ unif, minmin}$, $Ls/MVA \cdot km^2$
3-5	2x32	2x0.63	$1.47 \cdot 10^6$	$6.64 \cdot 10^3$
6-9	2x40	2x0.63	$(2.2-2.95) \cdot 10^6$	$(4.95 - 4.42) \cdot 10^3$
12-15	2x40	2x1.00	$(3.69-4.42) \cdot 10^6$	$(4.15 - 3.98) \cdot 10^3$
18-24	2x63	2x1.00	$(5.13-6.53) \cdot 10^6$	$(3.85 - 3.68) \cdot 10^3$

4.2. tabula

110-20-0.4 kV PES optimālie parametri slodzes blīvuma diapazonā

σ , MVA/km^2	$S_{TA\ opt}$, MVA	$S_{TP\ opt}$, MVA	$K_{\Sigma\ ip, min}$, Ls/km^2	$K_{\Sigma\ unif, minmin}$, $Ls/MVA \cdot km^2$
3-5	2x32	2x1.00	$1.24 \cdot 10^6$	$6.12 \cdot 10^3$
6-9	2x40	2x1.00	$(1.79-2.4) \cdot 10^6$	$(4.45 - 3.95) \cdot 10^3$
12-15	2x40	2x1.00	$(3.0-3.6) \cdot 10^6$	$(3.70 - 3.53) \cdot 10^3$
18-24	2x63	2x1.00	$(4.19-5.35) \cdot 10^6$	$(3.41 - 3.26) \cdot 10^3$

Optimizācijas procesā iegūtas PES minimālo unificēto rādītāju $K_{\Sigma\ unif, min}$ grafiskas atkarības no TP nominālās jaudas, kas parādītas 4.2. attēlā. No grafikiem var redzēt, ka pie augstiem slodzes blīvumiem un lielām TP uzstādītajām jaudām 110-10-0.4 kV un 110-20-0.4 kV PES unificētie rādītāji satuvinās, bet ar slodzes blīvumiem $\sigma > 12$ MVA/km² 110-20-0.4 kV PES ir ekonomiski izdevīga pēc minimālajiem unificētajiem rādītājiem.



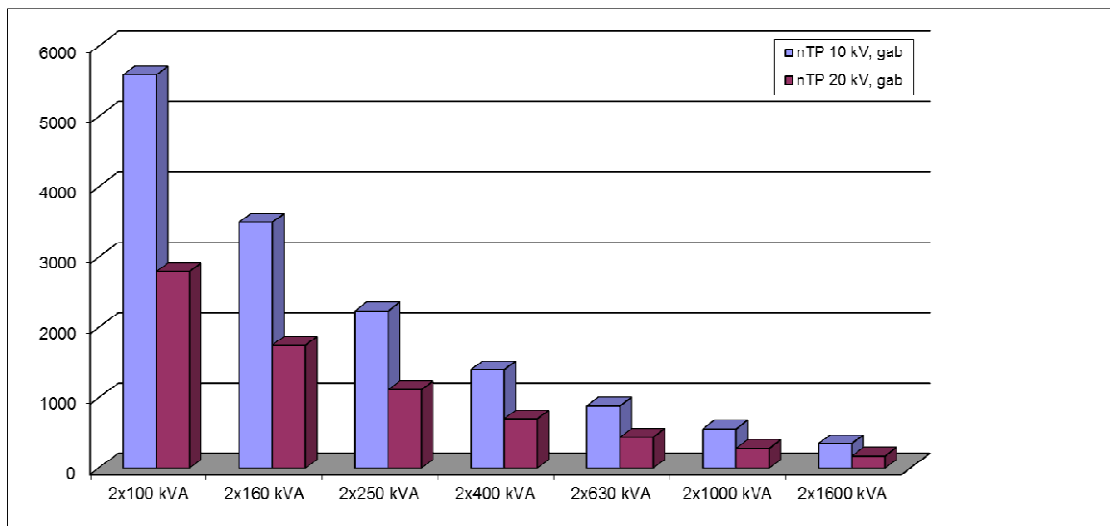
4.2 att. PES minimālo unificēto rādītāju grafiskas atkarības no TP nominālās jaudas pie slodzes blīvuma rajonos: b) $\sigma=6-9$ MVA/km²; d) $\sigma=21-24$ MVA/km².

Promocijas darba 4.nodaļā ir atspoguļotas PES minimālo unificēto rādītāju grafiskas atkarības no TP nominālās jaudas arī citiem slodzes blīvuma diapazoniem ($\sigma=3$ MVA/km², $\sigma=12-15$ MVA/km²).

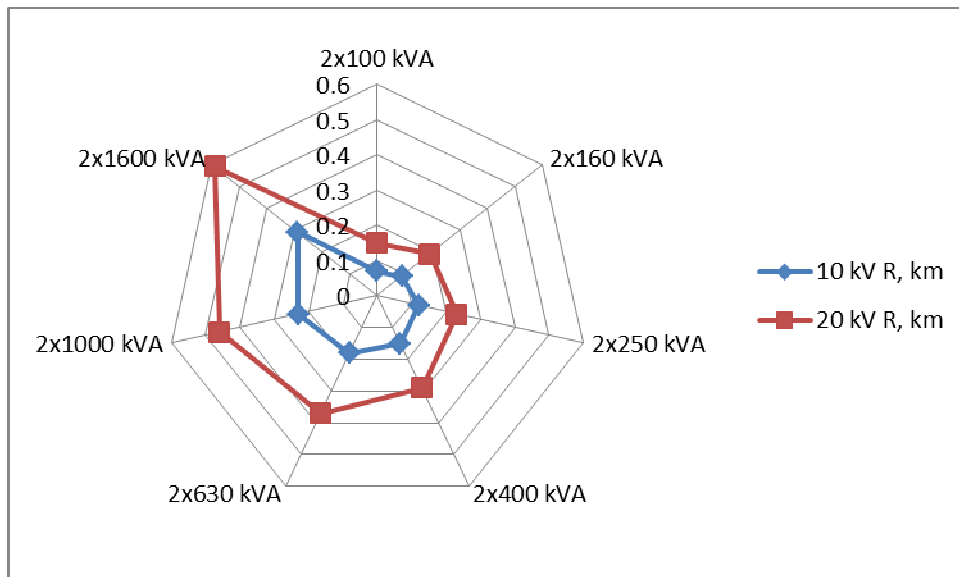
Analizējot aprēķinu un optimizācijas rezultātus, iegūti vēl daži svarīgi PES rādītāji.

4.3. attēlā ir parādīts salīdzinājumā iespējamais 10/0.4 kV un 20/0.4 kV TP skaits 110-10-0.4 kV un 110-20-0.4 kV pilsētas elektroapgādes sistēmā (PES) atkarībā no TP uzstādītās jaudas pie pilsētas platības $\Pi_{pils} = 74$ km², 110 kV TA jaudas $S_{TA} = 2x40$ MVA un slodzes blīvuma $\sigma_{vid} = 9$ MVA/km².

4.4. attēlā ir parādīts apkalmes rādīsu kopskats polārajās koordinātēs (saskaņā ar (3.3)) vienai TA ar uzstādīto jaudu 2x40 MVA pie dažādām 20/0.4 kV TP un 10/0.4 kV TP uzstādītajām jaudām pilsētas rajonā ar slodzes blīvumu $\sigma_{vid} = 9$ MVA/km².



4.3. att. 10/0.4 kV un 20/0.4 kV TP skaita atkarība 110-10-0.4 kV un 110-20-0.4 kV elektroapgādes sistēmās no TP uzstādītās jaudas (pie $\Pi_{pils} = 74 \text{ km}^2$, $S_{TA} = 2 \times 40 \text{ MVA}$ un $\sigma_{vid} = 9 \text{ MVA/km}^2$)



4.4. att. 20/0.4 kV TP un 10/0.4 kV TP apkalpes rādus grafiskais attēlojums vienas $2 \times 40 \text{ MVA}$ TA ietvaros pie slodzes blīvuma $\sigma_{vid} = 9 \text{ MVA/km}^2$

Izanalizējot iegūtos rezultātus, var secināt, ka mūsdienu pilsētas 110-10-0.4 kV elektroapgādes sistēmās kopā ar optimālās jaudas TA ekonomiski izdevīgi izmantot 10/0.4 kV TP ar jaudu $S_{TP} = 2 \times 0.63 \text{ MVA}$, ja slodzes blīvums pilsētā vai tās apkaimēs ir $3 \leq \sigma_{vid} \leq 9 \text{ MVA/km}^2$, TP ar jaudu $S_{TP} = 2 \times 1.0 \text{ MVA}$, ja slodzes blīvums ir $9 < \sigma_{vid} \leq 24 \text{ MVA/km}^2$; 110-20-0.4 kV PES kopā ar optimālās jaudas TA ekonomiski izdevīgi izmantot 20/0.4 kV TP ar jaudu $S_{TP} = 2 \times 1.0 \text{ MVA}$, visā optimizācijas procesa pieņemtā slodzes diapazonā: $3 \leq \sigma_{vid} \leq 24 \text{ MVA/km}^2$.

4.2. 20 kV tīkla neitrāles darba režīmu analīze un izvēle

Risinot jautājumus par 20 kV sprieguma ieviešanu Rīgas pilsētā, ir nepieciešams izvēlēties jaunu 20 kV tīkla neitrāles darba principu. Promocijas darbā ir apskatīti visi Rīgas pilsētā izmantojamie neitrāles darba režīmi. Sīkāk tiek pētīta caur mazresistīvu aktīvo pretestību zemētā tīkla neitrāle. Šī neitrāle nodrošina elektroapgādes sistēmas drošu funkcionēšanu pie lielām zemesslēguma strāvām, kuras ir raksturīgas Rīgas pilsētai.

Saīsinājumā šo neitrāles darba režīmu bieži sauc „NOSPE” no vācu vārda „Niederohmige Sternpunktterdnung” [1].

Izmantojot Vācijas un Lielbritānijas valstu pieredzi un Latvijas energosistēmā veikto pētījumu rezultātus, 10 kV pilsētu kabeļu tīklos pakāpeniski pāriet uz mazrezistīvas neitrāles darba režīmu. Zemomīgs neitrāles veidotājs, sastāvošs no trīstinumu zemēšanas transformatora un zemēšanas rezistora R_{ZR} , tiek pieslēgts uzreiz aiz 110/20-10 kV spēka transformatora.

Mazrezistīvas neitrāles galvenās priekšrocības:

- ja tīkls strādā ar neitrāli, kura zemēta caur mazrezistīvu aktīvo pretestību, bojājuma gadījumā sprieguma pieaugums tajā ir vismazākais no tiem, kas mēdz rasties visu citu veidu netieši zemētajās neitrālēs (parasti sprieguma līmenis bojājuma gadījumā ir robežās $1.8 \div 3.1 U_f$);
- neitrāles zemēšanas princips ļauj novērst lielus pārspriegumus un vienkārši noteikt zemesslēguma vietu;
- atšķirībā no neitrāles zemēšanas caur kompensācijas spoli, NOSPE neitrāles zemēšanas ietaišu konstrukcija nav atkarīga no tīkla garuma izmaiņām;
- neitrāle neaizņem lieku ligzdu vidējā sprieguma slēgiekārtā, jo tiek pieslēgta uzreiz aiz 110/20-10 kV transformatora izvadiem;
- salīdzinoši ar citiem neitrāles zemēšanas veidiem lēts un viegli izveidojams neitrāles zemēšanas veids, kas ir ļoti vienkāršs ekspluatācijā (jāpārbauda tikai eļļas līmenis neitrāles veidojošā transformatorā) un praktiski neprasa pastāvīgu apkalpošanu.

Mazrezistīvas neitrāles trūkumi:

- bez papildu drošības un relejaizsardzības konfigurācijas pasākumiem to nevar lietot vidējā sprieguma gaisvadu un jauktos (KL un GVL) tīklos nepietiekamas potenciālu izlīdzināšanas dēļ [22];
- atšķirībā no neitrāles zemēšanas caur kompensācijas spoli, pie zemesslēguma var rasties augstāki zemējuma ietaišu potenciāli pret zemi, taču uz neilgu laiku, kurā relejaizsardzība atslēdz bojāto līniju.
- tīklam ar mazrezistīvo neitrāli ir nepieciešama dažāda veida relejaizsardzība.

Neitrāles NOSPE pielietošanas prakse pierādīja, kā tas ir visdrošākais neitrāles režīms tīklos ar lielām zemesslēguma strāvām. 110-20-0.4 kV PES kabeļu līniju izpildījumā obligāti jāizmanto NOSPE neitrāles zemēšanas režīms, kas ļaus droši ekspluatēt šo pilsētas elektroapgādes sistēmu.

4.3. Sprieguma regulēšanas iespējas 110-20-10-0.4 kV elektroapgādes sistēmā

110-20-0.4 kV elektroapgādes sistēmas ieviešanas pārejas periodā saglabājas arī esošā 110-20-10-0.4 kV sistēma. Tādēļ sprieguma regulēšana jānodrošina kā eksistējošajā, tā arī jaunajā sistēmā.

Par pamatlīdzekli sprieguma regulēšanai gan esošā 10 kV, gan jaunā 20 kV sadales tīkla barošanas centros kalpo 110 kV spēka transformatori ar sprieguma regulēšanas zem slodzes (RZS) iekārtu [5,6,34]. RZS izmantošana rada iespēju diennakts laikā automātiski pārslēgt, neatslēdzot transformatoru no tīkla, nozarojumu pakāpes, izmainīt ar to transformācijas koeficientu zem slodzes un tādējādi nodrošināt saskaņoto sprieguma regulēšanu sadales tīkla barošanas centrā.

Kā jauna 20 kV sprieguma ieviešanas procesā, tā esošajā tīklā, rodas problēmas ar sprieguma regulēšanu trīstinumu 110/20-10 kV transformatoros neatkarīgi no transformatora nominālās jaudas. Trīstinumu transformatoros eksistē 110 kV augstākā sprieguma (ASp) tinums, 20 kV vidējā (VSp) un 10 kV zemākā sprieguma (ZSp) tinumi, bet RZS iekārta ir tikai AS tinumā. Divtinumu transformatoriem un transformatoriem ar šķeltiem tinumiem nav īpašu problēmu regulējot spriegumu ar RZS iekārtu. RZS iekārtu uzstāda ASp tinumā, pēc vajadzības lietojot modernus sprieguma automātiskus regulatorus, tādējādi nodrošinot sprieguma izmaiņu arī VSp tinumā [2].

Latvijas energosistēmā 110/20-10 kV TA pielieto trīs sprieguma regulēšanas režīmus.

- **Stabilizācijas režīms.** Šādu režīmu parasti lieto 110/20-10 kV apakšstacijās ar 20 kV un 10 kV spriegumu, kurām pieslēgti patērētāji ar nevienmīgu slodzi (piemēram, 10 kV spriegumam pieslēgta rūpnieciskā slodze, bet 20 kV spriegumam – sadzīves slodze);
- **Kompensācijas režīms.** Parasti režīmu lieto 110/20-10 kV apakšstacijās, pie kurām ir pieslēgti jaudīgie patērētāji ar viendabīgu slodzi. Jo lielāka slodze uz transformatora izvadiem, jo lielāks sprieguma regulatora iestatījums;
- **Diennakts režīms.** Attiecīgai 110/20-10 kV apakšstacijai izveido vasaras un ziemas apakšstacijas regulēšanas grafikus diennakts slodzes režīmā un saskaņā ar tiem iestāda sprieguma regulatora parametrus. Visas Rīgas pilsētas 110/20-10 kV TA sprieguma regulēšanas automātika strādā diennakts slodzes režīmā.

Esošās sprieguma regulēšanas automātikas galvenās nerisinātās problēmas:

- Latvijā izmantotajos trīstinumu transformatoros var regulēt spriegumu tikai pēc viena sekundārā sprieguma. Atsevišķos gadījumos 20 kV tinumam ir pārslēdzis, ar kuru bezsprieguma stāvoklī var mainīt šī tinuma transformācijas koeficientu attiecībā pret 110 kV tinumu;
- 110/20-10 kV TA ir grūti pareizi izvēlēties sprieguma regulēšanas režīmu, ja slodžu grafiki ir krasi atšķirīgi (piemēram, 10 kV kopnēm pieslēgta rūpnieciskā slodze, bet 20 kV – sadzīves slodze);
- transformatoros ar šķeltiem tinumiem spriegumi abos tinumos nav vienādi un praksē pie nevienādas slodzes mēdz atšķirties pat līdz 4%;
- 110/20-10 kV TA ar trīstinumu transformatoriem būtu vēlams regulēt spriegumu ar diviem regulatoriem attiecīgi 20 kV un 10 kV pusē. Latvijā pagaidām nav transformatoru ar tādiem sprieguma regulatoriem, jo tie sadārdzina 110/20-10 kV transformatora cenu;
- bieži vien galvenais automātikas atslēgšanās iemesls ir nekvalitatīvas transformatoru eļļas sabiezēšana aukstumā. Sprieguma regulatoriem jābūt tādai konstrukcijai, lai tie spētu darboties pie jebkuras iespējamās eļļas temperatūras, vai arī jālieto eļļa, kura nesabiezē.

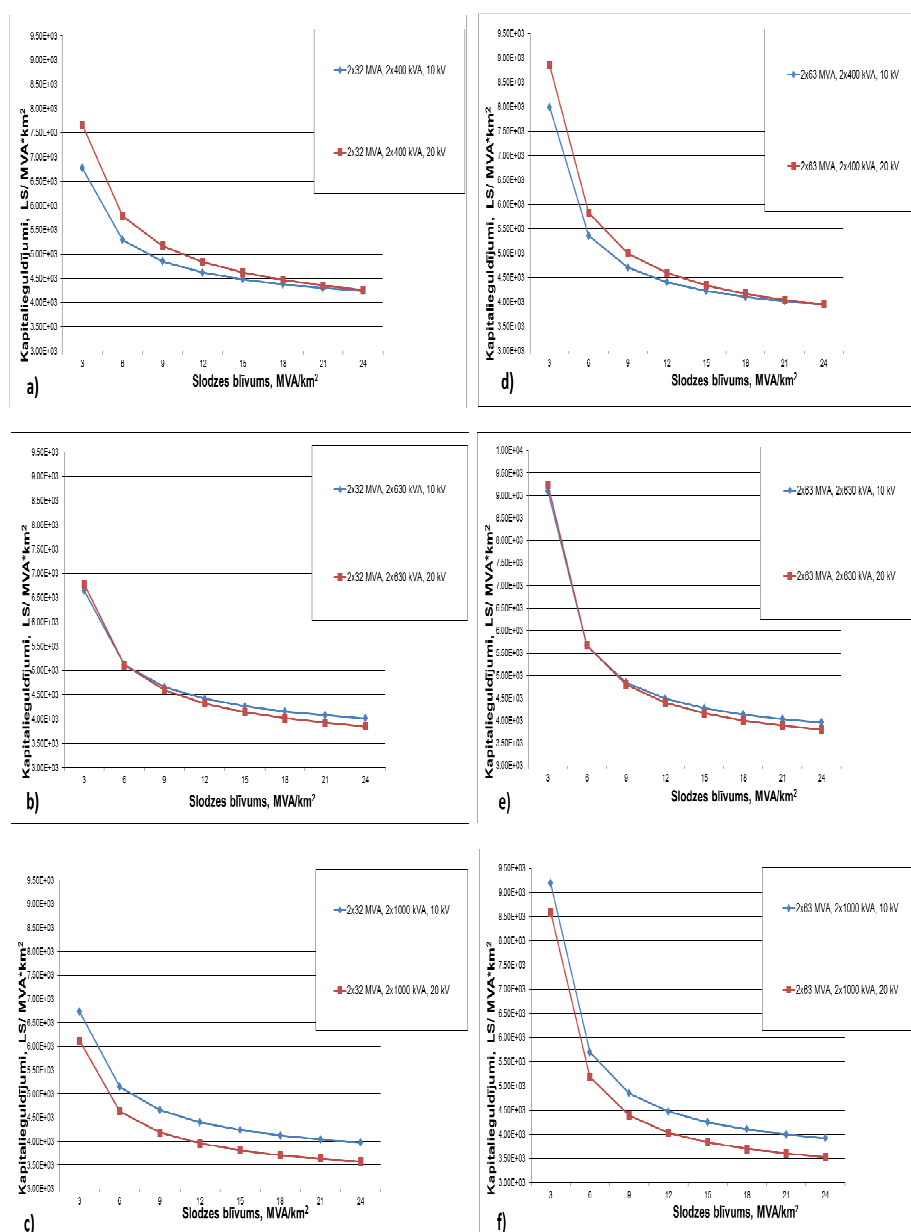
110/20-10 kV TA jāizmanto modernas sprieguma regulēšanas iekārtas, kuras spēj veikt 20 kV un 10 kV sprieguma regulēšanu 110/20-10 kV transformatora tinumos vienlaicīgi. Cenas ziņā tādas regulēšanas iekārtas ir ļoti dārgas un ievērojami palielina jau tā augsto trīstinumu 110/20-10 kV transformatora cenu. 110/20 kV TA un 110/10 kV transformatoriem tāda problēma nepastāv, tāpēc tajos var izmantot standarta sprieguma regulēšanas iekārtas.

5. 20 KV SPRIEGUMA IEVIEŠANAS EKONOMISKAIS LIETDERĪGUMS UN TEHNISKĀ IESPĒJAMĪBA

5.1. 20 kV sprieguma ieviešanas ekonomiskais lietderīgums Rīgas pilsētas elektroapgādes sistēmā

Jebkuram tehniskajam pasākumam jābūt pamatotam, kā no tehniskā, tā arī no ekonomiskā viedokļa. Analizējot ekonomisko lietderīgumu 20 kV sprieguma ieviešanai Rīgas pilsētas elektroapgādes sistēmā, ir veikts 110-10-0.4 kV un 110-20-0.4 kV pilsētas elektroapgādes sistēmu tehniski ekonomiskais salīdzinājums. Par tehniski ekonomisko rādītāju salīdzinājumam pieņemti unificētie summārie kapitālieguldījumi augšminēto sistēmu izbūvei, kuri iegūti mērķa funkciju (3.4) un (3.5) minimizācijas rezultātā. Pēc rezultātiem no 1. pielikuma ir konstruētas PES unificēto summāro kapitālieguldījumu atkarības $K_{\Sigma}=f(\sigma)$ no slodzes blīvuma pilsētā (vai tās rajonā) TA jaudu robežās $S_{TA} = (2 \times 32 - 2 \times 63)$ MVA un TP jaudu robežās $S_{TP}=(2 \times 400 - 2 \times 1000)$ kVA. Detalizētai atkarību analīzei unificētie summārie

kapitālieguldījumi 110-10-0.4 kV un 110-20-0.4 kV pilsētas elektroapgādes sistēmu izbūvei salīdzināti savā starpā pie vienādām TA un TP uzstādītajām jaudām 5.1., a-f, attēlā.



5.1. att. 110-10-0.4 kV un 110-20-0.4 kV PES unificēto summāro kapitālieguldījumu ($Ls/MVA \cdot km^2$) atkarība no slodzes blīvuma, izmantojot 110/10 kV vai 110/20 kV TA ar jaudām $S_{TA}=(2x32-2x63)$ MVA un 10/0.4 kV vai 20/0.4 kV TP ar jaudām $S_{TP}=(2x400-2x1000)$ kVA

Analizējot 5.1. attēla atkarības, var secināt, ka 110-10-0.4 kV PES, izmantojot 110/10 kV TA ar jaudām $S_{TA}=(2x32-2x63)$ MVA un 10/0.4 kV TP ar jaudām $S_{TP}=2x400$ kVA, ir ekonomiski izdevīgāka, nekā 110-20-0.4 kV PES ar analogiskās jaudas 110/20 kV TA un 20/0.4 kV TP, visā slodzes blīvuma pētāmā diapazonā pie mūsdienu elektrotīklu celtniecības un elektromontāžu cenām.

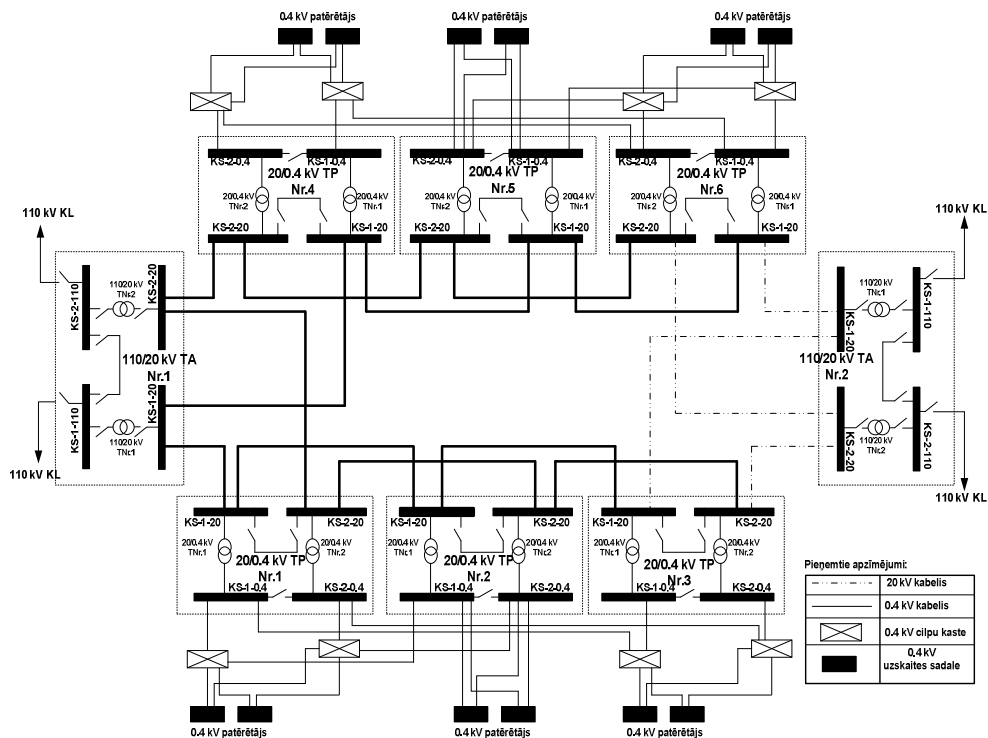
Ekonomiskie rādītāji 110-10-0.4 kV un 110-20-0.4 kV PES, izmantojot 110/10 kV TA vai 110/20 kV TA ar jaudām $S_{TA}=(2x32-2x63)$ MVA un 10/0.4 kV vai 20/0.4 kV TP ar jaudām $S_{TP}=2x630$ kVA, praktiski ir vienādi visā slodzes blīvuma pētāmā diapazonā. Faktiski tās ir robežvērtības pārejai no 110-10-0.4 kV PES uz 110-20-0.4 kV PES.

110-20-0.4 kV PES, izmantojot 110/20 kV TA ar jaudām $S_{TA}=(2 \times 32-2 \times 63)$ MVA un 20/0.4 kV TP ar jaudu $S_{TP}=2 \times 1000$ kVA, ir ekonomiski izdevīgāka, nekā 110-10-0.4 kV PES ar analogiskās jaudas 110/10 kV TA un 10/0.4 kV TP, visā slodzes blīvuma pētāmā diapazonā. Ievērojot 5.1. attēla atkarības un 4.2. tabulas rezultātus, 110-20-0.4 kV PES ir ekonomiski pamatota, sākot no slodzes blīvuma $\sigma \geq 12$ MVA/km² pie 110/20 kV TA ar jaudām $S_{TA}=(2 \times 40-2 \times 63)$ MVA un 20/0.4 kV TA ar jaudu $S_{TP}=2 \times 630$ kVA, ņemot vērā mūsdienu elektrotīklu celtniecības un elektromontāžas izmaksas.

5.2. Tehniskie pasākumi 20 kV sprieguma ieviešanai

5.2.1. 20 kV un 0.4 kV tīklu piedāvātās divstaru shēmas īpatnības

Ieviešot elektriskā tīkla jaunu nominālā sprieguma pakāpi, ļoti svarīgi pareizi izvēlēties barošanas un sadales tīkla shēmu, nodrošinot tālāku šīs shēmas attīstību. Visgrūtākā pastāvošā problēma, lai normāli veiktu rezervēšanu 20 kV sprieguma pusē, ir 110/20 kV TA nepietiekošais daudzums Rīgas pilsētas apkaimēs, kur reāli jau eksistē 20 kV spriegums, un 110/20 kV TA neesamība Rīgas pilsētas centrā. Jaunos 20 kV tīklos visdrošākā un visefektīvākā no elektroapgādes drošuma viedokļa varētu būt divstaru shēma. 110-20-0.4 kV PES izstrādātā un piedāvātā ideālā „divstaru” elektroapgādes shēma ir parādīta 5.2. attēlā.



5.2. att. 110-20-0.4 kV PES ideālā „divstaru” elektroapgādes shēma

Divstaru shēmas priekšrocības risinot 20 kV sprieguma ieviešanas problēmas:

- shēma ir ļoti droša no elektroapgādes viedokļa, jo eksistē vidēja sprieguma līniju rezervēšana no 110/20 kV TA, TP transformatoru, ka arī zemsprieguma 0.4 kV tīkla rezervēšana. Tas nozīmē, ka pie viena transformatora vai viena barojošā kabeļa bojājuma patērētājs nepaliks bez sprieguma, jo turpinās barošanu pa otru ķēdi.
- gan 20 kV gan 0.4 kV pusēs ir izveidoti, tā saucamie, sekciju slēdži: 20 kV pusē ar slodzes slēdžu palīdzību, 0.4 kV pusē ar drošinātājslēdžu palīdzību bez jebkādas automatikas (ARI) palīdzības;
- shēma ļauj bez īpašām problēmām pieslēgt tranzītā arī mazjaudīgus patērētājus (vientransformatoru 20/0.4 kV TP ar transformatoru līdz $S=630$ kVA), iegriežot 20/0.4 kV TP vienā no barojošiem kabeļiem;

- 110/20 kV rezerves TA paradīšanās gadījumā (blakus rajonos) var sadalīt 20 kV barošanas līnijas sateces punktus, lai samazinātu līniju garumu un, līdz ar to, - sprieguma, jaudas un enerģijas zudumus.

Divstaru shēmas trūkumi:

- shēma ir diezgan dārga un sarežģīta pēc izpildījuma, jo divstaru shēmā ir divi barojošie kabeļi no vienas vai no diviem 110/20 kV TA un divi 0.4 kV līnijas no 20/0.4 kV TP;
- lai paaugstinātu divstaru shēmas drošumu 20 kV kabeļus starp 110/20 kV TA un 20/0.4 kV TP ir nevēlams guldīt vienā tranšejā 0.2 m attālumā vienu no otrā; bet vismaz 1.0 m attālumā, lai izvairītos no kabeļu mehāniskā bojājuma, kas praksē nerealizējas rakšanas un seguma atjaunošanas darbu dārdzības dēļ.

5.2.2. 110/20 kV divtinumu transformatoru iegādes iespējas

Jaunai 110-2-0.4 kV elektroapgādes sistēmai jāizmanto 110/20 kV divtinumu transformatori. Pašlaik Latvijas energosistēmā strādā dažādu izgatavājrūpnīcu trīstinumu 110/20-10 kV vai 110/20-6 kV transformatori, bet 110/20 kV divtinumu transformatoru skaits ļoti niecīgs. Darbā minēti 110/20 kV dažādas jaudas transformatoru orientējošie tehniskie parametri no ražotāju katalogiem un interneta. Ievērojot, ka pašreiz lieljaudīgos transformatorus ražo pēc speciālā pasūtījuma, to tehniskie parametri var atšķirties [6,8].

5.2.3. Vidēja sprieguma pārslēdzamo transformatoru izmantošana

20 kV sprieguma ieviešanas pārējas periodā vietās, kur eksistē 10 kV barošanas spriegums un tas jā saglabā, var izmantot 20-10/0.4 kV pārslēdzamus transformatorus, kuri var strādāt gan pie 10 kV, gan pie 20 kV tīkla sprieguma. Šajā gadījumā tiek būtiski atvieglota pārēja no 10 uz 20 kV un samazinās atslēgumu skaits patērētājiem. Salīdzinājumā ar standarta 10/0.4 kV transformatoriem tie ir par 30% dārgāki, bet gandrīz neatšķiras pēc izmēriem, kas būtiski atvieglo to pielietošanu gan kompaktās, gan masta tipa, gan iebūvētās transformatoru apakšstacijās.

5.2.4. 20 kV sprieguma slēgiekārtu lietošanas tīklos pieredze

Ļoti svarīgs un nozīmīgs solis 20 kV sprieguma ieviešanai ir 20 kV slēgiekārtu (RMU-ring main unit) izmantošana jau patlaban visās kompaktās, iebūvētās vai masta tipa 10/0.4 kV transformatoru apakšstacijās pie 10 kV darba sprieguma. Promocijas darba detalizētāk apskatīti izmantojamo Latvijā slēgiekārtu veidi, to priekšrocības un trūkumi [29].

5.2.5. Vidēja sprieguma kabeļi ar plastmasas izolāciju

Promocijas darbā plaši apskatīti vidējā sprieguma kabeļi ar plastmasas izolāciju, kurus var pielietot 110-20-0.4 kV PES. Detalizētāk aprakstīti kabeļu konstruktīvais izpildījums, pieļaujamās strāvas un pielietošanas loks. Eksploatācijas pieredze un kabeļu tehniskie parametri ļauj secināt, ka 20 kV kabeļus var droši pielietot jau pie 10 kV sprieguma, lai atvieglotu tālāku pāreju uz 20 kV sprieguma pakāpi.

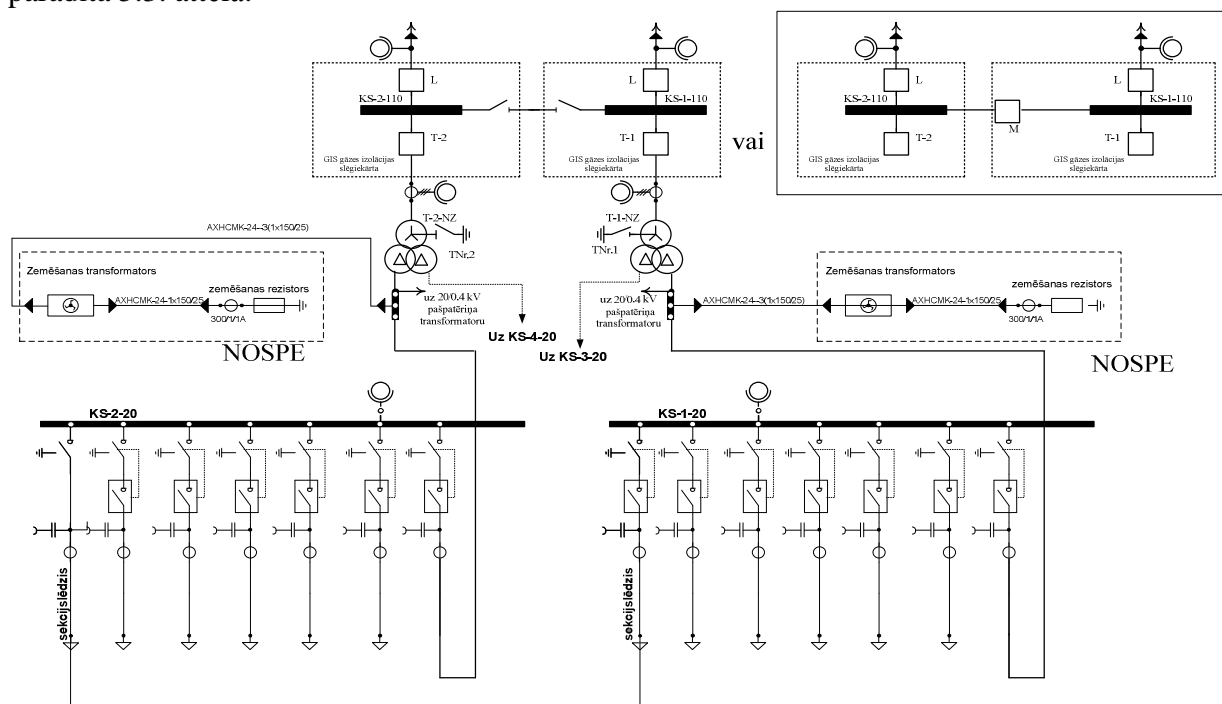
5.3. Piedāvātās 110/20 kV TA tehniski-ekonomiskais pamatojums

Ļoti svarīgi jau attīstības projektu sākumstadijās pareizi izvēlēties 110/20 kV TA konstruktīvo izpildījumu, tās atrāšanas un izbūves vietu, kas ir diezgan problemātisks pasākums Rīgas pilsētā liela apbūves blīvuma un privātu īpašumu teritoriju dēļ.

Kopš 1991.gada Rīgas pilsētā tika izbūvētas piecas 110/20-10 kV TA: 110/10 kV TA „Bastejkalns”, 110/10 kV TA „Hanza”, 110/10 kV TA „Zunda”, 110/20-10 kV TA „Zolitūde”, 110/10 kV TA „Matīss”. Visas augstākminētās TA ir slēgta tipa apakšstacijas ar 110 kV KL pievadiem, 110 kV GIS (gāzes izolācijas slēgiekārtā) slēgiekārtām, 110/20-10 kV transformatoriem. 20-10 kV un visas releju aizsardzības (AR) un līdzstrāvas (DC) iekārtas ir

aizsargātas no ārēja gaisa iedarbības. Tika analizēts visu no 1991.gada izbūvēto TA konstruktīvais izpildījums un darba shēmas. Analīzes rezultātā promocijas darbā ir izvēlēts 110/20 kV TA konstruktīvais izpildījums, piedāvātas darba shēmas, perspektīvo apakšstaciju pieslēgšanas/pārslēgšanas shēmas varianti.

Darbā ir piedāvāta slēgta tipa 110/20 kV TA ar diviem 110/20 kV transformatoriem ar šķeltiem tinumiem un divām 20 kV sekcijām. Nepieciešamības gadījumā (ar slodzes pieaugumu) TA vidējā sprieguma sekciju skaitu var paplašināt līdz četrām sekcijām. 110/20 kV TA neutrāles zemēšanas režīms - NOSPE. Piedāvātās 110/20 kV TA shēma ir parādīta 5.3. attēlā.



5.3. att. Piedāvātās 110/20 kV TA principiālā shēma

110/20 kV TA izbūves izmaksas ir atkarīgas no iekārtu sastāva, it īpaši 110 kV pusē. Izmantojot tā saucamo GIS slēgiekārtu, 110 kV slēgiekārtas cena automātiski paaugstināsies aptuveni divas reizes. Analogiski vidēja sprieguma pusē: gāzes izolētas slēgiekārtas ir pusotru reizi dārgākas nekā gaisa izolētas slēgiekārtas.

Sīkāk noteiktās 110/20 kV TA ar 2x32 un 2x63 MVA transformatoriem izbūves izmaksas saskaņā ar shēmu 5.3 attēlā ir atspoguļotas 5.1. tabulā.

5.1. tabula

110/20 kV TA izbūves orientējošas izmaksas

Nr.	Iekārtas nosaukums	Izmaksas, Ls
110 kV daļa		
1.	Spēka transformators ar jaudu $S_{TA}=2 \times 32$ MVA, $S_{TA}=2 \times 63$ MVA	$2 \times (700 \cdot 10^3)$, $2 \times (850 \cdot 10^3)$
2.	GIS slēgiekārtā	$2 \times (800 \cdot 10^3)$
3.	RA iekārtas un konfigurācija	$1 \times (10 \cdot 10^3)$
4.	Spēka transformatoru uzstādīšana $S_{TA}=2 \times 32$ MVA $S_{TA}=2 \times 63$ MVA	$2 \times (100 \cdot 10^3)$ $2 \times (150 \cdot 10^3)$

5.1. tabulas turpinājums

20 kV daļa		
20 kV slēgiekārtu aizejošo līniju ligzdas		12x(1.5·10 ³)
20 kV slēgiekārtu transformatoru un sekcijslēdžu ligzdas		4x(2.0·10 ³)
Mazrezistīvas netrāles veidotāji		2x(2.0·10 ³)
Pašpatēriņa transformatori		2x(1.0·10 ³)
20 kV DC iekārtas (taisngrieži, akumulatoru baterijas utt.)		1x(2.0·10 ³)
RA iekārtas un konfigurācija		1x(10·10 ³)
110/20 kV TA ēka un labiekārtošana		2500·10 ³
Kopā:	ar $S_{TA} = 2 \times 32$ MVA	5754·10³,
	ar $S_{TA} = 2 \times 63$ MVA	6154·10³

Saskaņā ar AS “Sadales tīkls” RPR (ST RPR) informāciju vienas no pēdējām izbūvētajām Rīgas pilsētā slēgta tipa 110/10 kV TA „Matīss” izbūves izmaksas „zem atslēgas” kopā ar 110 kV un 10 kV slēgiekārtām sastādīja 5600·10³ Ls. Pie kam jāņem vērā, ka šai 110/10 kV TA ir ļoti grūts un nestandarts konstruktīvais izpildījums: KS-1-10 un KS-2-10 sekcijas atrodas 1.stāvā, KS-3-10 un KS-4-10 otrajā stāvā. Minētajā sumā nav iekļautas izmaksas 110/10 kV TA „Matīss” ieslēgšanai vidēja sprieguma tīklā, kas sastādīja ap 400·10³ Ls.

5.4. 20 kV sprieguma ieviešanas sākuma etapa piemēri Rīgas pilsētā un tās apkaimēs

20 kV barošanas sprieguma ieviešanas lielpilsētu tīklos koncepcija, kas aprakstīta 3. un 4. promocijas darba nodaļās, izmantota perspektīvo 110/20 kV apakšstaciju izpildījuma un 20-0.4 kV tīklu shēmu izstrādei kā iespējamie varianti Rīgas pilsētas elektroapgādes sistēmas attīstībai. Pie liela apbūves blīvuma Rīgas pilsētas centrā un 110/20 kV apakšstaciju trūkuma dēļ, 20 kV barošanas sprieguma pakāpenisku ieviešanu var sākt no pilsētas robežām un apkaimēm, kur jau dažviet eksistē 20 kV sprieguma tīkls. Darbā apskatīti iespējamie risinājumi 110/20 kV apakšstacijām, to pieslēgšanai 110 kV tīklam, jauno TA jaudas izvēle un citi jautājumi, kas saistīti ar elektroapgādes sistēmas attīstību un pāreju perspektīvā uz 110-20-0.4 kV sistēmu. Starp rajoniem, kur tuvākajā laikā var izmantot darba teorētiskās izstrādes izvēlēti Mārupes novads (atrodas netālu no Rīgas pilsētas robežām), plānotais jauns dzīvojamais rajons „Rumbula” un esošais rajons “Dreiliņi” [7,24].

Promocijas darbā tiek aprakstīti trīju Rīgas pilsētas un to apkaimju rajonu: „Mārupe”, „Dreiliņi” un „Rumbula” elektroapgādes risinājumi, kur tuvākajā perspektīvā plānots ievest 20 kV barošanas spriegumu Rīgas pilsētā.

KOPĒJIE SECINĀJUMI

1. Jebkurai lielas pilsētas, tādas kā Rīga, elektroapgādes sistēmai jābūt ekonomiskai, drošai, elastīgai, un jābūt gatavai jebkurā brīdī nodrošināt papildu jaudīgus klientus ar drošu un kvalitatīvu elektroapgādi.
2. Izstrādāta un pamatota 20 kV sprieguma ieviešanas procesa vadības koncepcija Rīgas pilsētas elektroapgādes sistēmā.
3. Izveidoti trīs sprieguma pakāpju (110-20-0.4kV un 110-10-0.4kV) pilsētas elektroapgādes sistēmas vispārinātie tehniski ekonomiskie modeļi un atbilstošas mērķa funkcijas.
4. PES mērķu funkciju (3.4) un (3.5) optimizācija veikta ar nelineārās diskretās programmēšanas metodi ar speciāli izstrādāto programmu Microsoft Excel vidē.
5. Noteiktas 110/20 kV TA un 20/0.4 kV TP vai 110/10 kV TA un 10/0.4 kV TP optimālās uzstādītās jaudas un optimālie PES tehniski ekonomiskie rādītāji slodzes blīvuma diapazonā $\sigma = 3-24$ MVA/km² pie pieņemtajām iekārtu cenām (4.1. un 4.2. tabulas).

6. Apskatīts 20 kV sprieguma ieviešanas ekonomiskais lietderīgums Rīgas pilsētas elektroapgādes sistēmā un noteiktas slodzes blīvuma robežas, kuras sasniedzot jāizmanto 110-20-0.4 kV PES.
7. Izstrādāti priekšlikumi un aprakstīti tehniskie pasākumi 110-20-0.4 kV PES ieviešanai.
8. Pamatots 110/20 kV TA konstruktīvais izpildījums un veikts tehniski ekonomiskais novērtējums, sintezētas shēmas, izvēlēts neitrāles darba režīms un analizētas sprieguma regulēšanas iespējas.
9. Izstrādāto 20 kV barošanas sprieguma ieviešanas koncepciju un optimālo parametru izvēles metodiku var lietot arī citās lielpilsētās, veicot nepieciešamo korekciju konkrētiem apstākļiem.

BIBLIOGRĀFISKAIS SARAKSTS

1. Budahs M., Rozenkrons J. Neitrāles darba režīmi vidējā sprieguma elektrotīklos. – Rīga: Latvijas elektroenerģētiķu biedrība. – 1998. – 38 lpp.
2. Dirba J., Ketnere E., Ketners K. Enerģētisko sistēmu transformatori. – RTU tipogrāfija, 2004. – 296 lpp.
3. Krišāns Z., Oļeinikova I. Elektroenerģētisko uzņēmumu vadības pamati. – Rīga.: Pētergailis, 2007. – 425 lpp.
4. Vanags A. Elektriskie tīkli un sistēmas. I daļa. – RTU izdevniecība, 2002. – 479 lpp.
5. Breners N., Guseva S., Skobeleva N., Borscevskis O. Directions to increase reliability of maintained transformer equipment's functioning//The 6th International Conference on Electrical and Control Technologies ECT 2011, Kaunas, Lithuania, 2011,–p.175-178.
6. Borscevskis O., Gavrilovs G. Useful lifetime and rational replacement of power transformers//IEEE the 7th International conference-workshop: Compatibility and power Electronics 2011. Tallin, Estonia, 2011,– p.40-43.
7. Borscevskis O., Gavrilovs G. 20kV voltage adaptation problems in urban electrical networks//Compatibility and power Electronics 2011, Student Forum. Tallin, Estonia, 2011,–p.68-71.
8. Gavrilovs G., Borscevskis O. Power transformer diagnostic//Proceedings of the 10th International Symposium „Topical problems in the field of electrical and power engineering”, Doctoral school of energy and geotechnology II, 10 - 15 January, Parnu, Estonia, 2011,– p.224-228.
9. Guseva S., Borscevskis O. Mathematical model for 110/10 kV transformer substations` optimum power choice//The 7th International Conference on Electrical and Control Technologies ECT 2012, Kaunas, Lietuva, 2012,– p.202-205.
10. Guseva S., Borscevskis O., Skobeleva N., Kozireva L. Load determination and selection of transformer substations` optimal power for tasks of urban networks' development // Proceedings of the 51st International Scientific Conference of Riga Technical University on Power and Electrical Engineering, Vol. 27, Riga, Latvia, 2010,– p.31-36.
11. Guseva S., Borscevskis O., Skobeleva N. Forecast and load determination of 110/20-10 kV transformer substations for Riga city till 2025// Proceedings of the 10th International Scientific Conference "Control of Power Systems 2012", Tatranske Matliare, Slovakia, 14 –18 May, 2012, – p.159-160.
12. Guseva S., Borscevskis O., Skobeleva N., Petrichenko L. Perspective loads of transformer substations at development of urban power supply systems//The XV

- International Scientific Conference “Present-day problems of power engineering APE’11”, Vol. III , Gdansk-Jurata, Polija, 2011, – p.51-59.
13. Guseva S., O.Borscevskis O., Skobeleva N., Petrichenko L. Urban Power supply system’s development in conditions of uncertain information//Proceedings of the 10th IASTED European Conference “Power and Energy Systems”, Crete, Greece, 2011, CD, – p.27-31.
 14. Guseva S., Borscevskis O., Skobeleva N., Breners N.. The system approach to placement of transformer substations in the power supply system of the city// Electrical and Control Technologies. Proceedings of the 5th International conference on electrical and control technologies ECT-2010, 6-7 May, Kaunas, Lithuania, 2010, – p. 211-214.
 15. Guseva S., Skobeleva N., Borscevskis O., Breners N. Geometrical modeling of service areas and distribution of urban transformer substations in the city territory// Proceedings of the XI International Conference "Problems of Present-day Electrotechnics-2010", 1-3 June, Kyiv, Ukraine, 2010, (digitālā formātā uz CD).
 16. Guseva S., Skobeleva N., Borscevskis O., Breners N. Rational approach to the formation of urban power supply system in solving of development problems// Proceedings of the scientific and Technical Union of the Power Engineers, ENERGY FORUM 2010 Varna, Bulgaria 2010, –p. 211-214.
 17. Guseva S., Breners N., Skobeleva N., Borscevskis O. Choice and efficiency of measures for increase reliability functioning of power transformers// Scientific and Technical Union of the Power Engineers, ENERGY FORUM 2010, Varna, Bulgaria 2010, – p. 280-289.
 18. Guseva S., Borscevskis O. The system approach to the transformer substations` in the territory of small cities//The 52nd International Scientific Conference of Riga Technical University on Power and Electrical Engineering (digitālā formātā uz CD).
 19. Guseva S., Skobeleva N., Breners N., Borscevskis O. Load forecasting till 2020 of existing and perspective transformer substations in Riga// Power and Engineering, 4.ser., Vol.25. – Riga, RTU, Latvia, 2009. – p.77-80.
 20. Guseva S., Skobeleva N., Breners N., Borscevskis O.. Determination and distribution of service areas of urban transformer substations with geometrical templates// Latv. Journal of Physics and Technical Sciences, Nr.6 (Vol.46), Latvia, 2009. – p. 16-26.
 21. Guseva S. Borscevskis O. The system approach to transformer substations` placement in the territory of small cities// Proceedings of the the 52nd International Scientific Conference of Riga Technical university, Power and electrical engineering, 14-15 October, RTU, Riga, Latvia,2011 (digitālā formātā uz CD).
 22. LEK 136. Latvijas energostandarts. „Vidsprieguma tīklu neitrāles darba režīmi (izolēta, kompensēta un mazrezistīva neitrāle)”, 2012. – standarta projekts.
 23. Līgums ar AS „Latvenergo” Nr. L7310 (Nr.010000/08-16) „Rīgas augstsprieguma tīkla shēma līdz 2020. gadam” – Rīga, RTU, 2007.–125 lpp.
 24. Līgums Nr.5-21/-2012 no 23.04.2012. ar Mārupes novada Domi. „Jaunas 110 kV transformatoru apakšstacijas Mārupes novadā tehniski ekonomiskais pamatojums” (vadītājs– profesors J.Rozenkrons), 2012, – 48 lpp.
 25. RDPAD atskaite: Vadlīniju izstrāde Rīgas pilsētas inženierinfrastruktūras turpmākai attīstībai. Iepirkuma ID Nr. RD PAD 2008/111. SIA „Kārlis”, Rīga, 2009.–74 lpp.
 26. Skobeleva N., Borscevskis O., Guseva S., Petrichenko L. An integrated approach to the formation of service areas for urban substations of different voltage//Proceedings of the 6th International Conference on Electrical and Control Technologies ECT 2011, Kaunas, Lithuania, 2011, – p.202-205.

27. Skobeleva N., Borscevskis O., Guseva S., Petrichenko L. An integrated approach to the formation of service areas for urban substations of different voltage// Journal of Energy and Power Engineering 6 (2012) 1358-1362 (JEPE ISSN1934-8975), David Publishing Company, Inc. USA, 2012.
28. Skobeļeva N. Promocijas darbs. Pilsētas elektrotīkla optimālo parametru izvēle attīstības projektu sākumstadijās, RTU, 2012.
29. Braun D., Hellmann. Application criteria for SF6 and vacuum circuit-breakers. ABB Review 4/89.
30. Electric Power supply of Berlin. Translation of a reprint (no.4612) from "Electrization of the economy" (Zeitschrift der Vereinigung Deutscher Elektrizitätswerke- VDEW Jg. 94 (1995), N. 8, S. 403-487).
31. Далё В.А., Кришан З.П., Паэгле О.Г.. Оптимизация электрических сетей при росте нагрузок. –Рига: Издательство Академии наук ЛССР, 1964.-362 с.
32. Далё В.А. Определение технико-экономических показателей сетей с учетом динамики электрических нагрузок. – Параметры воздушных электрических сетей. –Рига: Издательство АН Латв. ССР, 1960.
33. Козлов. В.А. Электроснабжение городов. – Ленинград: Энергоатомиздат, 1988. –264 с.
34. Гусева С.А., Бренер Н.З., Скобелева Н.Н, Борщевский О.И. Применение мониторинга силовых трансформаторов для повышения эффективности функционирования систем электроснабжения // Proceedings of the XI International Conference "Problems of Present-day Electrotechnics-2010", 1-4 June, Kyiv, Ukraine, 2010 (digitālā formātā uz CD).
35. Козлов В.А. К внедрению напряжения 20 кВ // Электричество, Москва, № 12, 1996, -с. 73-77.
36. Масальский С. Проблемы электроснабжения г. Риги //Сборник технической информации, Энергетика, Рига, Латвия, 1962,- 5-7 с.