

# Pareto principa realizācija Latvijas elektrotīkla attīstības variantu salīdzinājumam

Alexander Gavrilov, Riga Technical University, Anatoly Mahnitko, Riga Technical University

**Kopsavilkums.** Šobrīd Latvijas enerģosistēma ir deficīta. Lai nodrošinātu Latvijas enerģētikas sektora neatkarību no ārējām elektroenerģijas piegādēm un diversificētu energoresursus, nepieciešams būvēt jaunas elektrostacijas un starpsavienojumus. Dotajā darbā tiek apskatīta Latvijas elektrotīkla attīstības variantu salīdzinājums, izmantojot Pareto principu. Analizējot alternatīvas kompromisu kopā, tika izmantota tāda alternatīvu salīdzināšanas metode, ka risinājumu rajonēšana kritēriju kopā. Rezultāti ir interpretēti ģeometriski.

**Atslēgas vārdi:** enerģosistēma, elektrostacija, augstsprieguma līnija, scenārijs, izmaksa, kaitējums

## I. IEVADS

Šobrīd Latvijas enerģosistēma darbojas vienotā enerģētiskā riņķī ar Baltkrievijas, Lietuvas, Krievijas un Igaunijas enerģosistēmām. Galvenā Latvijas enerģosistēmas īpatnība ir tās deficīts. Lai nosegtu maksimālo patēriņa slodzi ir nepieciešams no kaimiņvalstu enerģosistēmām importēt ap 40% no visas Latvijas enerģosistēmas uzstādītās jaudas.

Baltijas valstu enerģosistēmu attīstības plānu analīze rāda, ka bez esošo elektrostaciju rekonstrukcijas un bez jaunu elektrostaciju izbūves, pēc 2015. gada Baltijas reģionā būs novērojams elektriskās jaudas trūkums. Viens no iemesliem ir esošo iekārtu novecošanās elektrostacijās un to slēgšana. Tā, piemēram, saskaņā ar ES prasībām 2009. gada beigās apturēts Ignalinas AES otrais energobloks ar jaudu 1300 MW. Dažām citām elektrostacijām (piemēram, Narvas elektrostacijai) ir vajadzīga nopietna modernizācija, lai mazinātu negatīvo ietekmi uz apkārtējo vidi.

Valstij, kas nevar sevi nodrošināt ar jaudām, viens no drošuma paaugstināšanas variantiem ir maksimāli dažādot importētas enerģijas avotus. Baltijas valstīm nākotnē nepieciešami jauni starpsavienojumi ar aptuveni 1500 – 2000 MW jaudu. Baltijas reģiona mērogā ir apskatīti šādi projekti: starpsavienojums Baltija – Zviedrija „Swedlink” (līdz 1000 MW), starpsavienojums Igaunija – Somija „Estlink 2” (līdz 650 MW), kā arī energosavienojums Lietuva – Polija „PowerBridge” (līdz 1000 MW) [1].

Baltijas valstīm starpsavienojums ar Zviedriju ir ļoti nozīmīgs, lai veicinātu elektroenerģijas tirgus attīstību un nodrošinātu reģionu ar trūkstošajām jaudām. Kaut gan, pateicoties 350 MW kabelim starp Igauniju un Somiju, Baltijas valstis patlaban var pirkt elektroenerģiju Skandināvijas elektroenerģijas biržā „Nord Pool Spot”, kabeļa jauda ir pārāk maza, lai veidotos pilnvērtīgs tirgus ar Rietumeiropu.

No Latvijas viedokļa raugoties, starpsavienojums Latvija – Zviedrija ir būtiska alternatīva enerģētiskās drošības sekmēšanai. Jo pēc Ignalinas AES darbības apturēšanas 2010.

gadā tirgotāju interese par Krievijas piegādēm reģionā augs, vājās tīklu caurlaides spējas dēļ parādīsies ierobežojumi piegādēs. Līdz ar to drošuma dēļ visām Baltijas reģionam ir interese energosaitei ar Zviedriju.

Bez tam, Latvijas – Zviedrijas savienojuma attīstība ir svarīga arī Kurzemes reģiona attīstības kontekstā. Reģionā ir pietiekami liela interese par jaudīgām vēja stacijām, kas nākotnē varētu tikt būvētas jūrā, un tām vajadzēs jaudīgu pievienojumu pārvades tīklam. Kā zināms, Kurzemē Liepājā vai Ventspilī plānota arī ogļu elektrostacija, kuras darbībai tāpat vajadzēs savienojumu ar enerģosistēmu. Ostas pilsētās Liepājā, Ventspilī attīstās rūpniecība, aug elektrības patēriņš, tātad vajadzēs jaudīgāku elektroapgādi [2].

Tuvākā nākotnē nepieciešams uzbūvēt 330 kV elektropārvades līniju Liepāja – Ventspils – Imanta (Rīga) Kurzemē, lai nodrošinātu jau tagad pieprasīto jaudu Liepājas pilsētā bez īpašiem ierobežojumiem dažos enerģosistēmas darbības režīmos. 330 kV līnija Kurzemē arī ir nepieciešama, lai attīstītu vēja elektrostaciju parku Kurzemes reģionā un jaunas cietā kurināmā 400 MW elektrostācijas pieslēgšanu tīklā. Bez šī loka un jaunas starpsavienojumu saites izbūves nav iespējama ne elektroenerģijas pirkšana, ne pārdošana.

Svarīgs nākotnes projekts ir kabeļa izbūve uz Igauniju, ar ko Latviju patlaban savieno divas 330 kV līnijas. Ja patēriņa slodzes augs, tad 2020. gadā ar šīm līnijām būs par maz un vajadzēs trešo – vai nu pa sauszemi, vai kabeli pa jūru no Pērnavas uz Ventspili. Tas ļautu iegūt papildu enerģijas piegādes Kurzemes reģionam no ziemeļu kaimiņu enerģosistēmām.

Izveidojot jaunu starpsavienojumu no Kurzemes uz Igauniju un Latvijas savienojumu ar Zviedriju, veidosies noslēgts enerģētiskais loks, kas uzlabotu energoapgādi reģionā.

Šādi ir nepieciešams apskatīt uzdevumu kopu ar dažādu problēmu risinājumiem.

Elektroenerģētiskās sistēmas attīstības uzdevums parasti ir daudzkritēriju, tāpēc optimālā risinājuma meklēšana ir apgrūtināta. Optimizācijas sekmes ir atkarīgas no kritēriju salīdzināmības. Visgrūtākais gadījums, kad kritēriji ir skaitliski un kvalitatīvi nesalīdzināmi. Šajā situācijā kā pamatprincipu izmanto Pareto principu. Pareto principa būtība ir: alternatīvas (varianti) ir optimāli salīdzināmas, ja pārejot pie citas alternatīvas nevienu no tām nevar uzlabot pēc jebkura no kritērijiem, nepasliktinot to kaut pēc viena cita kritērija. Vienādi optimālo alternatīvu kopu, kas apmierina Pareto principu, sauc par Pareto kopu [3, 4].

Kaut arī teorētiski alternatīvas, kas apmierina Pareto principu, jāapskata kā vienādi optimālas, tomēr eksistē praktiskās alternatīvu salīdzināšanas un tālākas atsijāšanas

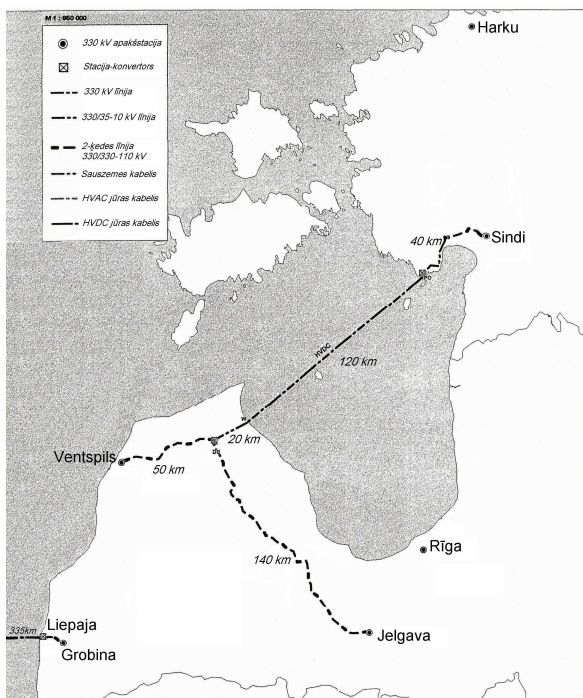
iespējas. Tādā veida alternatīvu analīzi kompromisu kopā sauc par ierakstānās kompromisu kopā. Zemāk ir apskatīta viena no šādas analīzes metodēm – risinājumu (alternatīvu) rajonēšana kritēriju kopā.

Apskatīsim piemēru, kurā salīdzina divas Latvijas enerģosistēmās iespējamās attīstības alternatīvas (1.att.):

- $\varphi_1$  – augstsprieguma līdzstrāvas jūras kabelīnijas (KL) Liepāja – Stokholma izbūve (335 km) ar pārvadāmo jaudu 750 MW;
- $\varphi_2$  – 330 kV GL Ventspils – Dundaga – Jelgava izbūve (190 km) un līdzstrāvas jūras KL Sindi (Igaunija) – Dundaga (180 km) ar pārvadāmo jaudu 300 MW.

Enerģosistēmas attīstības pamatmērķi ir nodrošināt kvalitatīvu un drošu elektroapgādi pie zemākām izmaksām, kā arī minimāli ietekmēt apkārtējo vidi. Tāpēc izvēlētam alternatīvām jāapmierina Pareto princips pēc 4 kritērijiem:

- $C_K$  – ikgadējās kapitālizmaksas;
- $C_E$  – ikgadējās ekspluatācijas izmaksas;
- $C_{ek}$  – izmaksas par kaitējumu apkārtējai videi;
- $C_R$  – tautsaimniecības zaudējumi, atslēdzoties līnijai avārijas dēļ.



1. att. Darbā apskatītās Latvijas enerģosistēmas attīstības alternatīvas

## II. IKGADĒJĀS KAPITĀLIZMAKSAS IZVĒLĒTĀM STRATĒGIJĀM

Apskatīsim elektropārvades līniju ikgadējās izmaksas. Īpatnējie kapitālieguldījumi 330 kV GL ir  $K_{0GL} = 2.5 \cdot 10^5$   $LS/km$ , bet jūras kabeļa izmaksas ir  $K_{0KL} = 7 \cdot 10^5$   $LS/km$  [5]. Tad kapitālieguldījumi līnijas izbūvei,  $L_s$ :

$$K_{\Sigma j} = K_0 \cdot l_j, \quad (1)$$

kur  $l_j$  – līnijas garums,  $km$ .

Kapitālizmaksas aprēķinam, pieņemot procentu likmes vērtību  $i = 10\%$ ,  $L_s$ :

$$C_{K_j} = \frac{i}{100} \cdot K_{\Sigma j}. \quad (2)$$

## III. IKGADĒJĀS EKSPLUATĀCIJAS IZMAKSAS IZVĒLĒTĀM STRATĒGIJĀM

Konstanto ekspluatācijas izmaksu aprēķinos pieņemam: GL ar  $U_{nom} \geq 35 kV$  uz metāla vai dzelzsbetona balstiem amortizācijas atskaitījumu procenti ir  $p_a = 2.5\%$  un apkalpošanas un uzturēšanas izmaksu procenti –  $p = 1.5\%$ ; KL ar  $U_{nom} = 110 \div 330 kV$ , kas novietoti ūdenī,  $p_a = 3\%$  un  $p = 2\%$  [5]. Tad konstantās ekspluatācijas izmaksas,  $L_s/g$ :

$$C_{Ek_j} = \frac{1}{100} \cdot (p_a + p) \cdot K_{\Sigma j}. \quad (3)$$

Lai noteiktu līnijas mainīgās ekspluatācijas izmaksas (no slodzes atkarīgās izmaksas par jaudas un elektroenerģijas zudumiem līnijās) vispirms jānosaka aizvietošanas shēmas parametri. 330 kV GL uz būvēta ar 2xAC-500/64 markas vadiem. Vadu īpatnēja pretestība ir  $R_0 = 0.06 \Omega/km$ . Kopējās aktīvās jaudas zudumus līnijās maksimālās slodzes režīmā nosaka šādi:

$$\Delta P_{L_j} = \left( \frac{P^2}{U_n^2 \cdot \cos^2 \varphi} \cdot R_0 + \frac{\Delta P_{k0max} + \Delta P_{k0min}}{2} \right) \cdot l_j,$$

kur  $\Delta P_{k0max}$  – aktīvās jaudas zudumi uz koronu sliktos laika apstākļos. Izvēlētai vadu markai tie ir  $1.6 kW/km$ ;

$\Delta P_{k0min}$  – aktīvās jaudas zudumi uz koronu labos laika apstākļos. Mūsu gadījumā tie ir  $0.5 kW/km$ .

KL Stokholma – Liepāja izbūvei ir izmantots  $\pm 320 kV$  līdzstrāvas kabelis ar šķērsriezumu  $1600 mm^2$  ar vara dzīslu un polietilēna plastmasas (XLPE) izolāciju. KL Sindi – Dundaga plānots izmantot  $\pm 150 kV$  līdzstrāvas kabeli ar šķērsriezumu  $1000 mm^2$  ar vara dzīslu un ar XLPE izolāciju. Kopējās aktīvās jaudas zudumi KL maksimālās slodzes režīmā [6]:

$$\Delta P_{KL_j} = 2 \cdot I^2 \cdot R_0 \cdot [1 + \alpha_{20} \cdot (v_p - 20)] \cdot l_j;$$

kur  $I$  – slodzes strāva,  $A$ ;

$R_0$  – vadītāja omiskā pretestība  $20^\circ C$  temperatūrā. Firmas „ABB” vara kabelim ar šķērsriezumu  $1000 mm^2$   $R_0 = 0.0176 \Omega/km$ , bet  $1600 mm^2$  –  $R_0 = 0.0113 \Omega/km$  [7];

$\alpha_{20} = 0.00393 1/^\circ C$  – pretestības temperatūras koeficients varam;

$v_p = 90^\circ C$  – maksimālā pieļaujamā temperatūra kabelim ar plastmasas izolāciju stacionārā režīmā.

Pārvades tīklā tehniski ekonomiskos radītājus var pieņemt pēc Latvenergo datiem:  $\beta' = 0.037 \cdot 10^3 LS/MW \cdot h$ ;  $\beta'' = 4.087 \cdot 10^3 LS/MW$ .

Maksimālo zudumu stundu skaits,  $h$ :

$$\tau = (0.124 + T_{max} \cdot 10^{-4})^2 \cdot 8760, \quad (4)$$

kur  $T_{max}$  – maksimuma izmantošanas laiks. Pieņemsim, ka  $T_{max} = 6000 \text{ h}$ .

Līniju mainīgās ekspluatācijas izmaksas,  $Ls$ , var noteikt pēc formulas:

$$C_{EmLj} = \Delta P_{Lj} \cdot (\tau \cdot \beta' + \beta^n). \quad (5)$$

Summārās ekspluatācijas izmaksas,  $Ls$ :

$$C_{Ej} = C_{Ekj} + C_{EmLj}. \quad (6)$$

#### IV. IZMAKSAS LAI NOVĒRSTU KAITĒJUMU APKĀRTĒJAI VIDEI

Kopējās ikgadējās izmaksas par kaitējumu apkārtējai videi un to atjaunošanu,  $Ls$ :

$$C_{ek\Sigma j} = C_{KYj} + C_{Yj}. \quad (7)$$

kur  $C_{KYj}$  – kapitālizmaksas par kaitējumu apkārtējai videi,  $Ls$ ;

$C_{Yj}$  – ikgadējās izmaksas bojāto dabas sistēmu atjaunošanai,  $Ls$ .

Atsavināto zemju platības var noteikt izmantojot izteiksmi [6],  $m^2$ :

$$S_j = a \cdot l_j, \quad (8)$$

kur  $l_j$  – elektropārvades līnijas sauszemes garums,  $m$ . KL Stokholma – Liepāja sauszemes posma garums pieņemts vienāds ar  $20 \text{ km}$ , bet KL Sindi – Dundaga sauszemes posmi ir  $60 \text{ km}$  (1. att.);

$a$  – līnijas trases platums,  $m$ . 330 kV GL trases platums ir  $a = 68 \text{ m}$ ; KL tuneļa platums  $a_k = 6 \text{ m}$ .

Kaitējums apkārtējai videi par atsavināto zemi,  $Ls$ :

$$Y_j = S_j \cdot c_Y, \quad (9)$$

kur  $c_Y$  – kaitējuma apkārtējai videi īpatnēja cena, pieņemtā  $c_Y = 5 \text{ Ls} / m^2$ .

Kapitālizmaksas par kaitējumu apkārtējai videi, pieņemot procentu likmes vērtību  $i = 10\%$ ,  $Ls$ :

$$C_{KYj} = \frac{i}{100} \cdot Y_j. \quad (10)$$

Ikgadējās izmaksas bojāto dabas sistēmu atjaunošanai,  $Ls$ :

$$C_{Yj} = S_j \cdot y, \quad (11)$$

kur  $y$  – ikgadējās īpatnējās izmaksas reģiona izdevumiem ekoloģijai. Pieņemsim, ka  $y = 0.2 \text{ Ls} / m^2$ .

#### V. TAUTSAIMNIECĪBAS ZAUDĒJUMI, ATSLĒDZOTIES LĪNIJAI

Jaudas plūsmas avārijas atslēgumu parametrs gadā vienķēdes 330 kV gaisvadu līnijai  $\lambda_{av,ip} = 0.005 \text{ atteik./g.} \cdot \text{gab}$ , bet kabeļlīnijai –  $\lambda_{av,ip kab} = 0.00072 \text{ atteik./g.} \cdot \text{gab}$  [5]. Tad katrai no aplūkotajām stratēģijām elektropārvades līnijas avārijas atslēgumu parametru gadā var noteikt pēc izteiksmes:

$$\lambda_{avj} = \lambda_{av,ip} \cdot l_j. \quad (12)$$

GL avārijas atslēgumu ilgums (pie vidējā 330 kV GL avārijas atslēguma ilguma  $1.3 \cdot 10^{-3} \text{ gadi/atteice}$  [6]),  $h$ :

$$T_{av,L} = 1.3 \cdot 10^{-3} \cdot 8760 = 11.4 \text{ h}. \quad (13)$$

KL avārijas atslēgumu ilgums (pie vidējā 150kV un 320 kV KL avārijas atslēguma ilguma  $1 \cdot 10^{-3} \text{ gadi/atteice}$  [6]),  $h$ :

$$T_{av,K} = 1 \cdot 10^{-3} \cdot 8760 = 8.8 \text{ h}. \quad (14)$$

Avārijas atslēguma dīkstāves varbūtība līnijai gadā:

$$\chi_{avj} = \frac{\lambda_{avj} \cdot T_{av,L}}{T}. \quad (15)$$

Gadā patērētājiem nepiegādātās elektroenerģijas daudzums ( $T_{max} = 6000 \text{ h}$ ),  $MW \cdot h$ :

$$A_{Rj} = \chi_{avj} \cdot A = \chi_{avj} \cdot P_{max} \cdot T_{max}. \quad (16)$$

Tautsaimniecības zaudējums, atslēdzoties līnijai,  $Ls$ :

$$C_{Rj} = A_{Rj} \cdot c_r, \quad (17)$$

kur  $c_r$  – maksa par nepiegādāto elektroenerģiju; pieņemtā  $c_r = 710 \text{ Ls} / MW \cdot h$ .

#### VI. ALTERNATĪVU RAJONĒŠANA KRITĒRIJU KOPĀ

Alternatīvu  $\varphi_1$  un  $\varphi_2$  parciālie kritēriji ir parādīti 1. tab.

1. TABULA

ALTERNATĪVU  $\varphi_1$  UN  $\varphi_2$  PARCIĀLIE KRITĒRIJI

Alternatīva	$C_K, Ls$	$C_E, Ls$	$C_{ek}, Ls$	$C_R, Ls$
$\varphi_1$	$23.45 \cdot 10^6$	$3.62 \cdot 10^6$	$0.024 \cdot 10^6$	$0.77 \cdot 10^6$
$\varphi_2$	$17.35 \cdot 10^6$	$2.24 \cdot 10^6$	$2.69 \cdot 10^6$	$1.74 \cdot 10^6$

Izveidosim skalāro kritēriju

$$F = p_1 C_K + p_2 C_E + p_3 C_{ek} + p_4 C_R, \quad (18)$$

$$p_1 + p_2 + p_3 + p_4 = 1. \quad (19)$$

Problēma ir saistītā ar to, ka nav zināmi svāra koeficienti  $p_j$ .

Pie tam, saskaņā ar Pareto principu, pie vienām svara koeficientu vērtībām vislabākais var būt viens variants, bet pie citām – cits. Ļoti svarīgs moments šeit ir noteikt katra kritērija svarīgumu [4, 8].

Noteiksim atbilstošo koeficientu kopu  $\{p\}$ . Kā var redzēt no 1. tab., svara koeficientiem  $p_1, p_2$  un  $p_3$  ir lielāka ietekme uz mērķa funkcijas (18) vērtību. Tāpēc izteiksim  $p_4$  no (19):

$$p_4 = 1 - p_1 - p_2 - p_3.$$

Tad (18) vietā var pierakstīt

$$F = p_1 C_K + p_2 C_E + p_3 C_{ek} + (1 - p_1 - p_2 - p_3) C_R. \quad (20)$$

Noteiksim kritiskās vērtības  $p_{1k}, p_{2k}$  un  $p_{3k}$ , pie kurām vērtējumi pēc skalārā kritērija  $F$  izlīdzināsies. Apskatīsim gadījumu, kad  $F_{B1} = F_{B2}$ , t.i.

$$\begin{aligned} p_{1k} C_{K \varphi 1} + p_{2k} C_{E \varphi 1} + p_{3k} C_{ek \varphi 1} + \\ + (1 - p_{1k} - p_{2k} - p_{3k}) C_{R \varphi 1} = \\ = p_{1k} C_{K \varphi 2} + p_{2k} C_{E \varphi 2} + p_{3k} C_{ek \varphi 2} + \\ + (1 - p_{1k} - p_{2k} - p_{3k}) C_{R \varphi 2}; \end{aligned}$$

Pārveidojot pēdējo izteiksmi, dabūsim vienādojumu:

$$\begin{aligned} p_{1k} (C_{\Sigma K \varphi 1} - C_{R \varphi 1} - C_{K \varphi 2} + C_{R \varphi 2}) + \\ + p_{2k} (C_{E \varphi 1} - C_{R \varphi 1} - C_{E \varphi 2} + C_{R \varphi 2}) + \\ + p_{3k} (C_{ek \varphi 1} - C_{R \varphi 1} - C_{ek \varphi 2} + C_{R \varphi 2}) = \\ = C_{R \varphi 2} - C_{R \varphi 1}. \end{aligned} \quad (21)$$

Izteiksmi (21) iespējams interpretēt ģeometriski. Visu iespējamo svara koeficientu kombinācijas kopu attēlo ar plakni  $P$  asīs  $p_1, p_2$  un  $p_3$  (2. att.), saskaņā ar izteiksmi (19). No izteiksmes (19) koordināšu sākumpunktam atbilst vērtība  $p_4 = 1$ , bet punktiem, kas atrodas uz plaknes  $P$  (gadījumam, kā tas parādīts 2. att.),  $p_4 = 0$ . Dažādas  $p_4$  vērtībās ir plaknes, kas ir paralēlas plaknei  $P$ . Figūras tilpums, kuru ierobežo plakne  $F_{B1} = F_{B2}$  un koordināšu asis, atbilst  $\varphi_1$  alternatīvas efektivitātes nosacījumam  $F_{B1} < F_{B2}$ , bet citas figūras tilpumam atbilst  $\varphi_2$  alternatīvas nosacījums  $F_{B2} < F_{B1}$ .

Plaknes, kas sadala zonas ( $F_{B1} = F_{B2}$ ), novietojumu var noteikt pēc punktiem, kuros tā šķērso koordināšu asis (punkti  $f, e, d$  2. att.). Šajos punktos visu kritēriju vērtības, izņemot vienu, ir vienādas ar nulli. Kā izriet no noteikuma (21), punktu  $f$  var noteikt pēc izteiksmes:

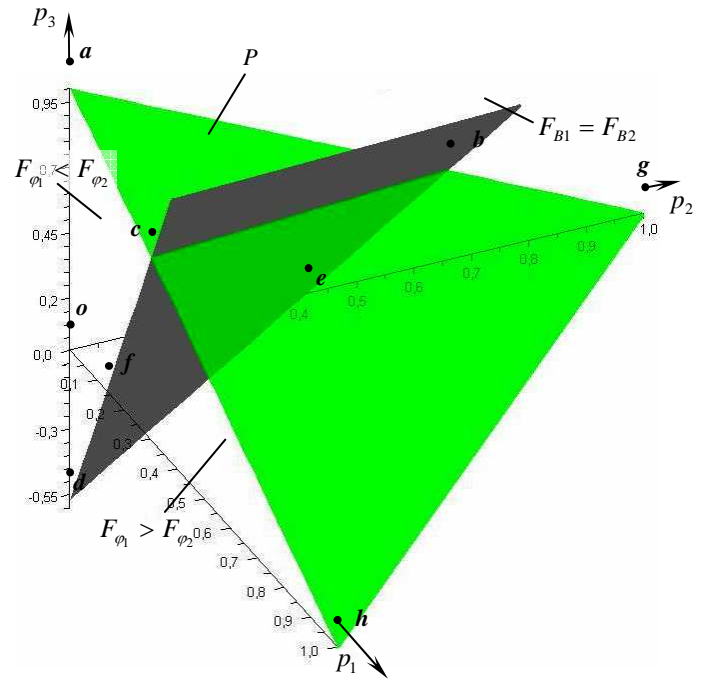
$$p_{1k} = \frac{C_{R \varphi 2} - C_{R \varphi 1}}{C_{\Sigma K \varphi 1} - C_{R \varphi 1} - C_{K \varphi 2} + C_{R \varphi 2}} = 0.14,$$

punktu  $e$ :

$$p_{2k} = \frac{C_{R \varphi 2} - C_{R \varphi 1}}{C_{E \varphi 1} - C_{R \varphi 1} - C_{E \varphi 2} + C_{R \varphi 2}} = 0.41,$$

bet punktu  $d$ :

$$p_{3k} = \frac{C_{R \varphi 2} - C_{R \varphi 1}}{C_{ek \varphi 1} - C_{R \varphi 1} - C_{ek \varphi 2} + C_{R \varphi 2}} = -0.57.$$



2. att. Risinājumu rajonēšana kritēriju telpā ( $p_4 = 0$ )

No 2. att. var redzēt, ka alternatīvas  $\varphi_1$  efektivitātes zona ir noteikta ar svara koeficientu kopu, kas ir ierobežota ar figūru  $aofebc$ , bet alternatīvas  $\varphi_2$  – ar figūru  $cbghfe$ . Salīdzinot zonu tilpumus, var secināt, kura ir labākā no alternatīvām. Zinot punktu koordinātes (2. att.), noteiksim abu zonu tilpumus.

Tetraedra  $agho$  tilpums ir:

$$V_{agho} = \frac{1}{6} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = 0.1667.$$

Punktu  $a, b, c, d$  (2. att.) koordinātes ir  $(0; 0; 1)$ ,  $(0; 0.66; 0.34)$ ,  $(0.3; 0; 0.7)$ ,  $(0; 0; -0.57)$  atbilstoši. Izmantojot programmas Maple iebūvētās funkcijas [9], noteiksim tetraedra  $abcd$  tilpumu:  $V_{abcd} = 0.0511$ .

Zinot punktu  $f$  un  $e$  (2. att.) koordinātes –  $(0.14; 0; 0)$  un  $(0; 0.41; 0)$  atbilstoši – nosakām tetraedra  $dfeo$  tilpumu:

$$V_{dfeo} = \frac{1}{6} \cdot 0.14 \cdot 0.41 \cdot 0.57 = 0.0054.$$

Figūras tilpums, kur izpildās  $\varphi_1$  alternatīvas efektivitātes nosacījums  $F_{B1} < F_{B2}$  ir:

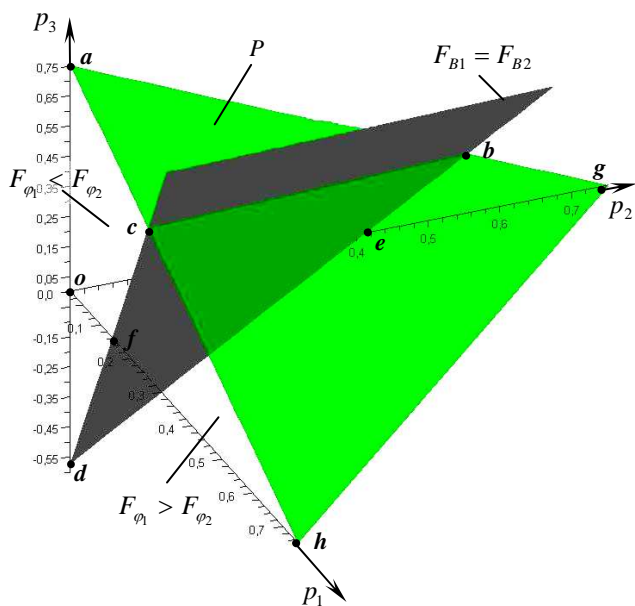
$$V_{aofebc} = V_{abcd} - V_{dfeo} = 0.0511 - 0.0054 = 0.0457,$$

bet figūras tilpums, kur izpildās  $\varphi_2$  alternatīvas efektivitātes nosacījums  $F_{B2} < F_{B1}$ :

$$V_{cbghfe} = V_{agho} - V_{aofebc} = 0.1667 - 0.0457 = 0.121.$$

Tā kā  $V_{cbghfe} > V_{aofebc}$ , tad gadījumā, kad  $p_4 = 0$  (2. att.) par labāko atzīstama alternatīva  $\varphi_2$  – KL Sindi (Igaunija) – Dundaga un 330 kV GL Ventspils – Dundaga – Jelgava izbūve, jo figūras  $cbghfe$  tilpums ir lielāks par figūras  $aofebc$  tilpumu.

Mainoties svāra koeficientam  $p_4$ , mainās arī zonu tilpumi. Apskatīsim gadījumu, kad  $p_4 = 0.25$  (3. att.).



3.att. Risinājumu rajonēšana kritēriju telpā ( $p_4 = 0.25$ )

Tetraedra  $agho$  tilpums ir:

$$V_{agho} = \frac{1}{6} \cdot 0.75 \cdot 0.75 \cdot 0.75 = 0.0703.$$

Punktu  $a, b, c, d$  (3. att.) koordinātes ir (0; 0; 0.75), (0; 0.55; 0.2), (0.26; 0; 0.49), (0; 0; -0.57) atbilstoši. Ar programmas Maple palīdzību noteicam tetraedra  $abcd$  tilpumu:  $V_{abcd} = 0.0303$ .

Kā jau bija noteikts augstāk, tetraedra  $dfeo$  tilpums ir  $V_{dfeo} = 0.0054$ .

Tad figūras tilpums, kur izpildās  $\varphi_1$  alternatīvas efektivitātes nosacījums  $F_{B1} < F_{B2}$  ir:

$$V_{aofebc} = V_{abcd} - V_{dfeo} = 0.0303 - 0.0054 = 0.0249,$$

bet figūras tilpums, kur izpildās  $\varphi_2$  alternatīvas efektivitātes nosacījums  $F_{B2} < F_{B1}$ :

$$V_{cbghfe} = V_{agho} - V_{aofebc} = 0.0703 - 0.0249 = 0.0455.$$

Tā kā  $V_{cbghfe} > V_{aofebc}$ , tad gadījumā, kad  $p_4 = 0.25$  (3. att.)

par labāko atzīstama arī alternatīva  $\varphi_2$ , jo figūras  $cbghfe$  tilpums ir lielāks par figūras  $aofebc$  tilpumu.

Apskatīsim gadījumus ar dažādiem tautsaimniecības zaudējumu kritērija variācijām, lai noteiktu tādu  $p_4$  svāra koeficienta vērtību, kad par labāko kļūst alternatīva  $\varphi_1$  ( $V_{cbghfe} < V_{aofebc}$ ). 2. un 3. tab. ir apkopoti rezultāti ar figūru tilpumiem analogiski, kā tas bija aprēķināts augstāk minētajiem gadījumiem pie  $p_4 = 0$  un  $p_4 = 0.25$ .

2. TABULA

PUNKTU KOORDINĀTES PIE DAŽĀDĀM SVĀRA KOEFICIENTA  $p_4$  VĒRTĪBĀM

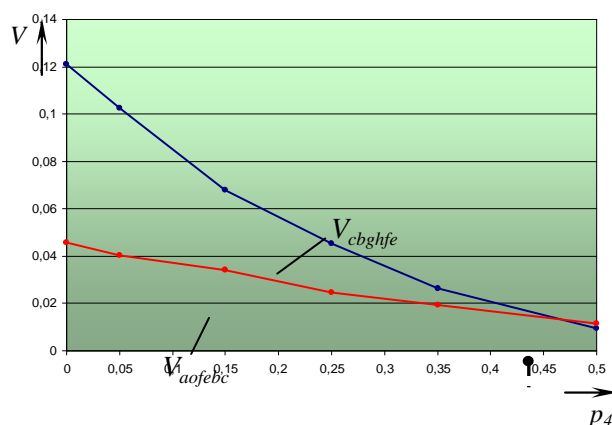
$p_4$	Koordinātes		
	punkts a	punkts b	punkts c
0	(0; 0; 1)	(0; 0.66; 0.34)	(0.3; 0; 0.7)
0.05	(0; 0; 0.95)	(0; 0.64; 0.31)	(0.29; 0; 0.66)
0.15	(0; 0; 0.85)	(0; 0.6; 0.25)	(0.28; 0; 0.57)
0.25	(0; 0; 0.75)	(0; 0.55; 0.2)	(0.26; 0; 0.49)
0.35	(0; 0; 0.65)	(0; 0.51; 0.14)	(0.24; 0; 0.41)
0.5	(0; 0; 0.5)	(0; 0.45; 0.05)	(0.21; 0; 0.29)

3. TABULA

FIGŪRU TILPUMI PIE DAŽĀDĀM SVĀRA KOEFICIENTA  $p_4$  VĒRTĪBĀM

$p_4$	$V_{agho}$	$V_{abcd}$	$V_{aofebc}$	$V_{cbghfe}$
0	0.1667	0.0511	0.0457	0.1210
0.05	0.1429	0.0457	0.0403	0.1026
0.15	0.1024	0.0398	0.0344	0.0680
0.25	0.0703	0.0303	0.0249	0.0455
0.35	0.0458	0.0249	0.0195	0.0263
0.5	0.0208	0.0169	0.0115	0.0094

Grafikā 4. att. ir parādīti figūru  $V_{aofebc}$  (kur izpildās nosacījums  $F_{B1} < F_{B2}$ ) un  $V_{cbghfe}$  ( $F_{B2} < F_{B1}$ ) tilpumi pie dažādām svāra koeficienta  $p_4$  vērtībām: no  $p_4 = 0$  līdz  $p_4 = 0.5$ . Kā var redzēt no 4. att., abas stratēģijas sasniedz vienādu nozīmi ( $F_{B1} = F_{B2}$ ) gadījumā, kad tautsaimniecības zaudējumu kritērija vērtība ir  $p_4 = 0.47$ . Šajā punktā abu figūru tilpumi ir vienādi  $V_{aofebc} = V_{cbghfe}$ . Palielinoties tautsaimniecības zaudējumu kritērija svarīgumam par labāko atzīstama alternatīva  $\varphi_1$  – KL Liepāja – Stokholma izbūve, jo figūras  $aofebc$  tilpums ir lielāks par figūras  $cbghfe$  tilpumu ( $V_{aofebc} > V_{cbghfe}$ ).



4. att. Figūru  $aofebc$  ( $F_{B1} < F_{B2}$ ) un  $cbghfe$  ( $F_{B2} < F_{B1}$ ) tilpumi pie dažādām svāra koeficienta  $p_4$  variācijām

## VII. SECINĀJUMI

Kā var redzēt no iegūtajiem rezultātiem, gadījumā, kad eksperts par galvenajiem kritērijiem izvēlas minimālās izbūves un ekspluatācijas izmaksas, bet mazākā mērā ekoloģijas aspektus un tautsaimniecības zaudējumus, atslēdzoties līnijai ( $p_4 = 0$ ), priekšroku atdod alternatīvai  $\varphi_2$  – jūras KL Sindi (Igaunija) – Dundaga un 330 kV GL Dundaga – Jelgava izbūve.

Mainoties ekspertu uzskatiem par kritēriju prioritāti, samazinās izbūves un ekspluatācijas izmaksu kritēriju svāra koeficienti, bet palielinās ekoloģijas un elektroapgādes drošuma ( $p_4 > 0.45$ ) kritēriju svārigums – par labāko atzīstama stratēģija  $\varphi_1$  – KL Liepāja – Stokholma izbūve.

Tomēr, ievērojot KL Liepāja – Stokholma (energosistēmas attīstības alternatīva  $\varphi_1$ ) lielāko maksimāli pārvadāmo jaudu (750 MW), ekspertu vērtējumi par prioritātes stratēģiju var mainīties no alternatīvas  $\varphi_2$  uz  $\varphi_1$  pat pie lielākām  $\varphi_1$  izbūves un ekspluatācijas izmaksām, jo, izbūvējot starpsavienojumu ar Zviedriju, palielināsies visas Baltijas reģiona elektroapgādes drošums un parādīsies iespēja pārvadīt trūkstošās jaudas no Ziemeļeiropas. Pie tam, šāds risinājums dotu iespēju izveidot plašāku elektroenerģijas tirgu ar Skandināvijas elektroenerģijas biržu, jo esošās KL „Estlink” jauda ir nepietiekoša.

## PATEICĪBA



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

### Alexander Gvarilov, Anatoly Mahnitko. Realization of Pareto principle to compare Latvian power system development variants.

Researches in Latvian power supply independence increase from external power and power sources' supply are especially pending matter. It follows from the condition that only Latvian power system is deficit in Baltic States. Latvia must import up to 40% from total installed power.

Unfortunately, in the given time power market in Baltic States is not ideal in accordance with its capacity. That's why the price of electricity does not always satisfy players of the market. Due to the existing cable “Estlink” Baltic countries can also take place into Scandinavian power exchange “Nord Pool Spot”. But cable capacity 350 MW is too small to form the wholesome power market with the Western Europe. Latvia together with other Baltic countries looks out different projects of its power safety increase. One of such projects is power connection between Baltic and Sweden power systems.

To increase Latvian western part's power supply safety, power connection between Kurzeme region in Latvia and Estonian power system via the gulf of Riga is held out. Without transmission network development in western part of Latvia is not possible to develop wind power generation in the region and connect to network coal power plant in Liepaja.

In the given work there are compared two strategies of transmission network's development in the Kurzeme region that satisfy the Pareto principle by four criteria. Technical-economical analysis of alternatives in the set of compromises is made using the method of solutions' zoning in the set of criteria. Results of analyses are demonstrated graphically.

### Александр Гвариллов, Анатолий Махнитко. Реализация принципа Парето для сравнения вариантов развития энергосистемы Латвии.

Исследования по вопросам повышения энергетической независимости Латвии от внешних поставок электроэнергии и энергоресурсов являются чрезвычайно актуальными. Это следует из того обстоятельства, что из всех стран Балтии только энергосистема Латвии является дефицитной. Латвии приходится импортировать около 40% от всей установленной мощности из соседних государств.

К сожалению, рынок электроэнергии в странах Балтии в настоящее время далек от совершенства, прежде всего по объёму. Следовательно, цена электроэнергии не всегда устраивает его участников. Благодаря функционирующей кабельной связи “Estlink”, страны Балтии могут также участвовать на Скандинавской бирже “Nord Pool Spot”. Однако мощность кабеля 350 MW слишком мала, чтобы создавать полноценный рынок с Западной Европой. Латвия вместе с другими странами Балтии рассматривает различные проекты по развитию своей энергетической безопасности. Одним из таких проектов является электрическое соединение энергосистемы Балтии с энергосистемой Швеции.

Для повышения надёжности энергоснабжения западного региона Латвии, предполагается соединение энергосистемы Эстонии через Рижский залив с энергосистемой Латвии в регионе Курземе, где имеется значительный потенциал ветроэнергетики. Без развития передающих сетей в данном регионе

## LITERATŪRAS SARAKSTS

- [1] Махнитко А.Е., Гаврилов А.Л., Герхард Я.Х. Проблемы развития электроэнергетики Латвии // Энергохозяйство за рубежом. 2009, № 2
- [2] Plato D. Latvijas enerģētiskā drošība: jāanalizē visi scenāriji // Energoforums. 2008, № 5 (15). – 7. – 8. lpp.
- [3] Лещинская Т.Б. Применение методов многокритериального выбора при оптимизации систем электроснабжения сельских районов // Электричество. – 2003. – №3 – 14 – 22 стр.
- [4] Ананичева С.С., Мызин А.Л. Модели развития электроэнергетических систем. – Екатеринбург, 2005. – 75 с.
- [5] Krišāns Z., Oļeinikova I. Elektroenerģētisko uzņēmumu vadības pamati. – R.: RTU izdevniecība, 2007. – 160 lpp.
- [6] Справочник по проектированию электрических сетей / Под ред. Д.А.Файбисовича. – М.: НИЦ ЭМАС, 2005. – 320 с.
- [7] ABB Product Guide. Cables and Cable Accessories: <http://www.abb.com/cables/>
- [8] Мжельский Б.И., Мжельская Е.Б. Введение в теорию оптимизации. – М.: Издательство МЭИ, 2001. – 88 с.
- [9] MapleSoft Online Help: <http://www.maplesoft.com/support/help/>

Anatoly Mahnitko was born in Dnepropetrovsk, Ukraine on February 15<sup>th</sup> in 1942. He graduated from Mechanics and Mathematics Faculty of Kiev State University. In 1972 he received Ph.D. in electrical engineering and Dr.Sc.Eng. in 1992 at Riga Technical University (RTU). He has been working in RTU since 1972 as a senior lecturer, Assistant, Associate Professor and Professor of the Institute of Power Engineering.



His research interests include electric power system mathematical simulation and optimization. Phone: +371 7089938, fax: +371 7089931. E-mail: [mahno@cef.rtu.lv](mailto:mahno@cef.rtu.lv)

Alexander Gvarilov was born in Daugavpils, Latvia, on July 24<sup>th</sup> 1984. He received M.Sc.Eng. in Electrical Engineering from Faculty of Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTU) in 2007. He is currently a doctoral student of RTU.



His research field is power system optimization, planning and simulation. Phone: +37126161738. E-mail: [a.gavrilovs@inbox.lv](mailto:a.gavrilovs@inbox.lv)

---

затруднено также включение в сеть планируемой угольной электростанции в г.Лиепая.

В данной работе сопоставлены две стратегии развития передающих сетей в регионе Курземе, удовлетворяющих принципу Парето, при четырёх выбранных критериях. Техничко-экономический анализ альтернатив во множестве компромиссов произведён методом районирования решений в пространстве критериев. Результаты анализа представлены графически.