

## **ENERGOSISTĒMAS REŽĪMA OPTIMIZĀCIJA, IEVĒROJOT IETEKMI UZ GAISA BASEINU**

### **POWER SYSTEM MODE OPTIMIZATION TAKING INTO ACCOUNT INFLUENCE ON THE AIR BASIN**

**Anatoly Mahnitko**, *Professor, Dr.Sc.Eng.*  
Riga Technical University, Power Engineering Institute  
Address: Kronvalda blv., 1, LV-1010, Riga, Latvia  
Phone: +371 7089938, fax: +371 7089931  
E-mail: [mahno@eef.rtu.lv](mailto:mahno@eef.rtu.lv)

**Alexander Gavrilov**, *M.Sc.Eng., PhD student*  
Riga Technical University, Power Engineering Institute  
Address: Kronvalda blv., 1, LV-1010, Riga, Latvia  
Phone: +371 26161738, fax: +371 7089931  
E-mail: [A.Gavrilovs@inbox.lv](mailto:A.Gavrilovs@inbox.lv)

*Atslēgas vārdi: elektroenerģētiskā sistēma, optimizācija, režīms, kurināmā patēriņš, kaitējums*

#### **Ievads**

Tā kā visas pasaules energosistēmas attīstās, tad rodas nepieciešamība optimāli vadīt tos normālos ekspluatācijas apstākļos – izdevīgi sadalīt patērētāju elektrisko slodzi starp sistēmas ģeneratoriem. Pie tam ir nepieciešams nodrošināt sistēmas enerģētisku, darba un naudas resursu izmantošanas augstu efektivitāti, drošu un bez pārtraukumu energoapgādi [1]. Jāņem vērā nosacījums, ka visas enerģētikas būves veic noteiktu iedarbību uz apkārtējo vidi un tāpēc tās jāoptimizē izejot no ekoloģiskiem nosacījumiem. Saskaņā ar [2, 3] ES pieprasa noteiktu prasību ievērošanu elektroenerģijas ražošanas un sadalījuma jomā. Šīs prasības izvirzās konkrētu ES direktīvu veidā. Šajās direktīvās ir uzradītas stingras prasības elektroenerģijas ražošanai, kas nes minimālu kaitējumu apkārtējai videi. Šis uzdevums ir ļoti sarežģīts, ko nosaka lieli elektroenerģētikas mērogi un tās intensīvās attīstības nosacījumi, energosistēmu atsevišķu elementu tehnisku, ekonomisku un režīma raksturojumu atšķirība.

Šādi, darbā tiek apskatīts modelis un parādīts tā pielietošanas piemērs tīkla režīma optimizācijai, ievērojot elektroenerģētiskās sistēmas tehnoloģiskos ierobežojumus un kaitējumu apkārtējai videi no elektrostaciju darbības. Piemērā ir izmantota elektriskā tīkla testshēma ar trim stacijām.

## 1. Tīkla režīma optimizācijas matemātiskais modelis

Energosistēmu režīmu vadības uzdevumu veido tāds risinājums, kas nodrošinās minimālus izdevumus elektroenerģijas ražošanai, pārvadei un sadalei. No teiktā izriet, ka uzdevums ir energoresursu izdevumu minimizācija. Tāpēc, neievērojot kaitīgos izmešus, optimizāciju veiksīm pēc noteikuma:

$$\sum c_i \cdot B_i \rightarrow \min, \quad (1)$$

kur  $B_i$  – nosacītā kurināma patēriņš, [t.n.k/st];

$c_i$  – nosacītā kurināma cena, [Ls/t];

pie tam optimālo režīmu meklēsim tādā pieļaujamā apvidū, ko veido tehnoloģiskie ierobežojumi ģenerētajai jaudai:

$$P_{\min} \leq P_i \leq P_{\max}. \quad (2)$$

No modeļu kopuma, kas apraksta energosistēmas stacionāro režīmu, pielietosim jaudas bilances modeli elektroenerģētiskās sistēmas mezglos [4]:

$$\begin{aligned} \sum_i P_{g_i} + \sum_i P_{ij}(U_i, U_j, \delta_i, \delta_j) - \sum_i P_{sl_i} &= 0, \quad i \in N, \\ \sum_i Q_{g_i} + \sum_i Q_{ij}(U_i, U_j, \delta_i, \delta_j) - \sum_i Q_{sl_i} &= 0, \quad i \in N, \end{aligned} \quad (3)$$

kur  $P_{g_i}, Q_{g_i}$  – aktīvā un reaktīvā jauda, ģenerēta mezglā  $i$ ;

$P_{sl_i}, Q_{sl_i}$  – aktīvā un reaktīvā slodžu jaudas mezglā  $i$ ;

$P_{ij}, Q_{ij}$  – aktīvā un reaktīvā jaudu plūsma no  $i$  mezgla uz  $j$ ;

$U_i, U_j$  – spriegumi mezglos  $i$  un  $j$ ;

$\delta_i, \delta_j$  – fāžu leņķi mezglos  $i$  un  $j$ ;

$N$  – mezglu skaits tīklā.

Tīkla režīmu optimizāciju, kas prasa minimālos izdevumus kurināmam un minimālos kaitīgo vielu izmešus atmosfērā, veiksīm pēc noteikuma:

$$\sum c_i \cdot B_i + \sum Y_i \rightarrow \min, \quad (4)$$

kur  $\sum Y_i$  – summārais kaitējums no izmešu nonākšanas atmosfērā, [Ls/t kaitīgās vielas].

Savukārt, summāro kaitējumu var izteikt šādi [5]:

$$Y_i = c_k \cdot M_{\Sigma i}, \quad (5)$$

kur  $M_{\Sigma i}$  – kaitīgo vielu izmeši atmosfērā [t kaitīgās vielas/st];

$c_k$  – īpatnējais kaitējums no pelnu, sēra oksīdu un slāpekļa oksīdu izmešu nonākšanas atmosfērā [Ls/ t kaitīgās vielas]. Var pieņemt, ka īpatnējais kaitējums no visiem trim parametriem ir apmēram vienāds un sastāda 3.33 no kurināma cenas:  $c_k = 3.33 \cdot c_i \text{ Ls/t}$ .

Tad optimizācijas noteikuma veids būs:

$$\sum c_i \cdot B_i + \sum c_k \cdot M_{\Sigma i} \rightarrow \min. \quad (6)$$

## 2. Elektroenerģētiskās sistēmas režīma optimizācija, neievērojot kaitējumu ekoloģijai

Apskatīsim optimizācijas modeli ar testa elektroenerģētiskās sistēmas piemēru, kas ir parādīts 1.att. No sākuma veiksīm tīkla režīma optimizāciju, neievērojot kaitīgus izmešus, tas ir, noteiksim energosistēmas summārās slodzes  $P_{sl}$  sadalījumu starp trim elektrostacijām, kas prasa minimālos izdevumus kurināmajam saskaņā ar optimizācijas noteikumu (1). Optimizācijas procesā neievērosim jaudas zudumus tīklā un reaktīvās jaudas. Summārā slodzes jauda ir  $P_{sl} = 975 MW$ .

Elektrostacijās kā kurināmais tiek izmantots mazuts. Kurināma cena (mazutam):  $c_m = 140 Ls/t$ .

Kurināma patēriņš stacijās ir uzdoti otrās pakāpes polinomu veidā:

$$\begin{aligned} B_1 &= 500 + 5.3 \cdot P_1 + 0.004 \cdot P_1^2 \text{ t.n.k/st}; \\ B_2 &= 400 + 5.5 \cdot P_2 + 0.006 \cdot P_2^2 \text{ t.n.k/st}; \\ B_3 &= 200 + 5.8 \cdot P_3 + 0.009 \cdot P_3^2 \text{ t.n.k/st}. \end{aligned} \quad (7)$$

Kurināma patēriņa līknes ir parādītas 2.att.

Matemātiski uzdevums formulējas kā mērķa funkcijas

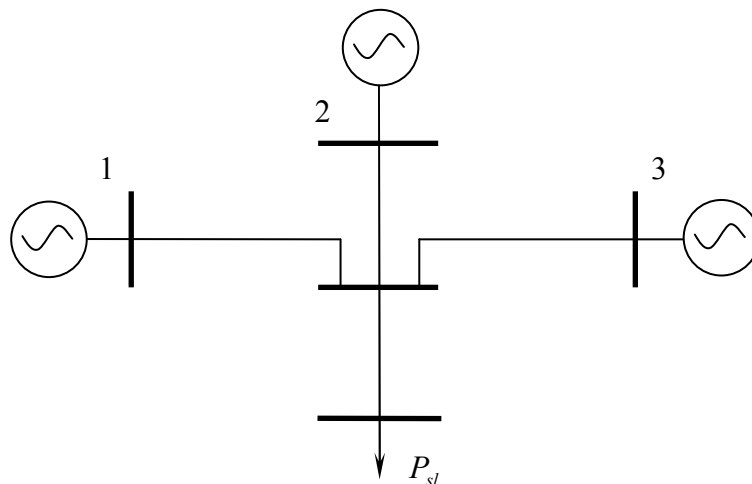
$$F(P) = 500 + 5.3 \cdot P_1 + 0.004 \cdot P_1^2 + 400 + 5.5 \cdot P_2 + 0.006 \cdot P_2^2 + 200 + 5.8 \cdot P_3 + 0.009 \cdot P_3^2 \quad (8)$$

minimizācija, ievērojot ierobežojumus (2):

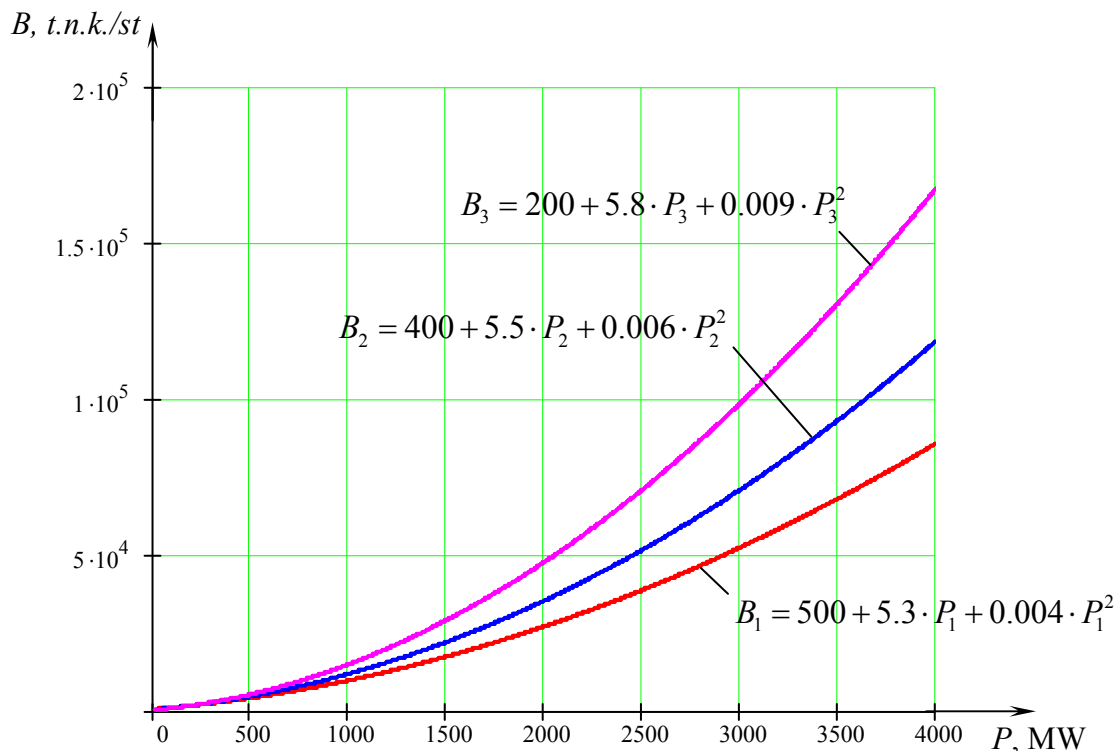
$$\begin{aligned} 200 &\leq P_1 \leq 450 MW; \\ 150 &\leq P_2 \leq 350 MW; \\ 100 &\leq P_3 \leq 225 MW, \end{aligned} \quad (9)$$

un stacionārā režīma raksturojošo vienādojumu – jaudu bilances vienādojumu (3), kura veids, neievērojot jaudas zudumus tīklā, būs:

$$\sum_{i=1}^3 P_i - P_{sl} = 0. \quad (10)$$



1.att. Energosistēmas shēma



2.att. Kurināma patēriņa līknes

Atrisinot optimizācijas uzdevumu, iegūstam mezglu jaudas:

$$P_1^* = 450 \text{ MW},$$

$$P_2^* = 325 \text{ MW},$$

$$P_3^* = 200 \text{ MW}.$$

Līdz ar to varam noteikt staciju optimālos izdevumus kurināmam, ja nav ievēroti kaitīgie izmeši stacijās:

$$C_k = \sum_i^3 c_m \cdot B_i = 1.15 \cdot 10^6 \text{ Ls / st.}$$

### 3. Elektroenerģētiskās sistēmas režīma optimizācija, ievērojot kaitējumu ekoloģijai

Izmantojot to pašu elektroenerģētiskās sistēmas testa shēmu (1.att.), veiksīm režīma optimizāciju, ievērojot kaitīgus izmešus no siltuma elektrostaciju darbības. Tas ir, noteiksim energosistēmas summārās slodzes  $P_{sl}$  sadalījumu starp trim elektrostacijām, kas prasa minimālus izdevumus kurināmam un minimālus kaitīgo vielu izmešus atmosfērā saskaņā ar optimizācijas noteikumu (6).

Kaitīgo vielu izmeši atmosfērā katrai stacijai, mazuta sadegšanas dēļ sastāv no [6, 7]:

- lidojošu pelnu un nesadedzināmā kurināma izmešiem atmosfērā [t/st]

$$M_p = B_i \cdot A^d \cdot f \cdot (1 - \eta_s), \quad (11)$$

kur  $A^d$  – kurināmā pelnainums uz darba masu, %. Mūsu piemērā mazutam  $A^p = 0.1\%$ .

$f$  – koeficients, kura vērtība kamerai, kuru apkurina ar mazutu, ir  $f = 0.01$ ;

$\eta_s$  – cieto daļiņu daļa, kas uztverta pelntverē. Praktiskajos aprēķinos to var pieņemt vienādu ar  $\eta_s = 0.4$  ;

- sēra dioksīda  $SO_2$  izmetumi atmosfērā [t/st]

$$M_{SO_2} = 0.02 \cdot B_i \cdot S^d \cdot (1 - \eta'_{SO_2}) \cdot (1 - \eta''_{SO_2}), \quad (12)$$

kur  $S^d$  – sēra daļa degvielā uz darba masu, %. Mazutam tas vērtība ir  $S^d = 1.9$  % ;

$\eta'_{SO_2}$  – sēra oksīdu daļa, ko sasaista lidojušie pelni. Mazutam  $\eta'_{SO_2} = 0.02$  ;

$\eta''_{SO_2}$  – sēra oksīdu daļa, kas uztverta pelntverē. Sausajiem pelntveriem tās vērtība ir  $\eta''_{SO_2} = 0$  ;

- slāpekļa dioksīda  $NO_2$  izmetumi atmosfērā [t/st]

$$M_{NO_2} = 0.001 \cdot K_{NO_2} \cdot Q_Z^d \cdot B_i \cdot (1 - \beta), \quad (13)$$

kur  $K_{NO_2}$  – koeficients, kas ievēro slāpekļa dioksīda veidošanas uz vienu siltuma vienību.

Mazutam šī vērtība ir  $K_{NO_2} = 0.03$  kg/GDz ;

$Q_Z^d$  – kurināmā zemākais sadegšanas siltums, MJ/kg. Mazutam  $Q_Z^d = 39.85$  MJ/kg ;

$\beta$  – koeficients, kas ievēro slāpekļa oksīda izmešanas samazinājumu ar tehnisko pasākumu palīdzību. Kamerai, kuru apkurina ar mazutu  $\beta = 0.8$  .

Tad izmetumu masa  $M_\Sigma$  atmosfērā no katras TEC mazuta sadegšanas dēļ būs:

$$\begin{aligned} M_\Sigma &= M_P + M_{SO_2} + M_{NO_2} = B_i \cdot A^P \cdot f \cdot (1 - \eta_s) + 0.02 \cdot B_i \cdot S^r \cdot (1 - \eta'_{SO_2}) \cdot (1 - \eta''_{SO_2}) + \\ &+ 0.001 \cdot K_{NO_2} \cdot Q_N^p \cdot B_i \cdot (1 - \beta) = B_i \cdot 0.1 \cdot 0.01 \cdot (1 - 0.4) + \\ &+ 0.02 \cdot B_i \cdot 1.9 \cdot (1 - 0.02) \cdot (1 - 0) + 0.001 \cdot 0.03 \cdot 39.85 \cdot B_i \cdot (1 - 0.8) = 0.0381 \cdot B_i. \end{aligned}$$

Tā kā aprēķinos pieņemam, ka kurināma cena un kvotu cena ir vienādas visām stacijām, tad mērķa funkcijas veids būs:

$$F(P) = \sum^n B_i + \sum^n M_{\Sigma i} \rightarrow \min .$$

Risinājums dod šādu optimālo jaudas sadalījumu starp stacijām:

$$P_1 = 450 \text{ MW},$$

$$P_2 = 324.98 \text{ MW},$$

$$P_3 = 200.02 \text{ MW}.$$

Izdevumi kurināmam  $C_k$ , ievērojot kaitīgo vielu izmešus atmosfērā:

$$C_\Sigma = \sum_i^3 c_m \cdot B_i + \sum_i^3 c_k \cdot M_{\Sigma i} = 1.298 \cdot 10^6 \text{ Ls / st.}$$

Iegūtais rezultāts rada, ka izmaksas palielinājās par 12.9%, ja ievērojam kaitējumu.

#### 4. Papildus kurināma patēriņa un kaitējuma novērtēšana

Īpatnējo kaitējumu, attiecinātu uz vienu tonnu sadedzināmā kurināmā, var noteikt pēc sekojošas formulas: [5]

$$\Delta c = \alpha_{mP} \cdot A_P \cdot Y_P + \alpha_{mS} \cdot A_{SO_2} \cdot Y_{SO_2} + \alpha_{mN} \cdot A_{NO_2} \cdot Y_{NO_2}, \quad (14)$$

kur  $\alpha_{mP}$ ,  $\alpha_{mS}$ ,  $\alpha_{mN}$  – koeficienti, kas ievēro vietējos faktorus pēc pelniem, sēra un slāpekļa oksīdu kaitējuma noteikšanai [5];

$A_P, A_{SO_2}, A_{NO_2}$  – īpatnējie pelnu, sēra un slāpekļa oksīdu izmeši [5];

$Y_P, Y_{SO_2}, Y_{NO_2}$  – īpatnējais kaitējums no pelnu, sēra oksīda un slāpekļa oksīda izmešu nonākšanas atmosfērā [5].

Tad kopējo kaitējumu var noteikt pēc izteiksmes: [5]

$$Y = \alpha_{mP} \cdot M_P \cdot Y_P + \alpha_{mS} \cdot M_{SO_2} \cdot Y_{SO_2} + \alpha_{mN} \cdot M_{NO_2} \cdot Y_{NO_2}. \quad (15)$$

Koeficienta  $\alpha_m$  jēga ir tāda: atsevišķos nelabvēlīgos laika apstākļos (bezvējš, zemi mākoņi, paaugstināts fona piesārņojums, smogs utt.) kaitējuma lielums kontrolējamā sistēmā palielinās  $\alpha_m$  reizēs.  $\alpha_m$  lielumu ietekmē apdzīvotības blīvums, rūpniecības esamība, lauksaimniecība un klimatiskie apstākļi elektrostacijas zonā.

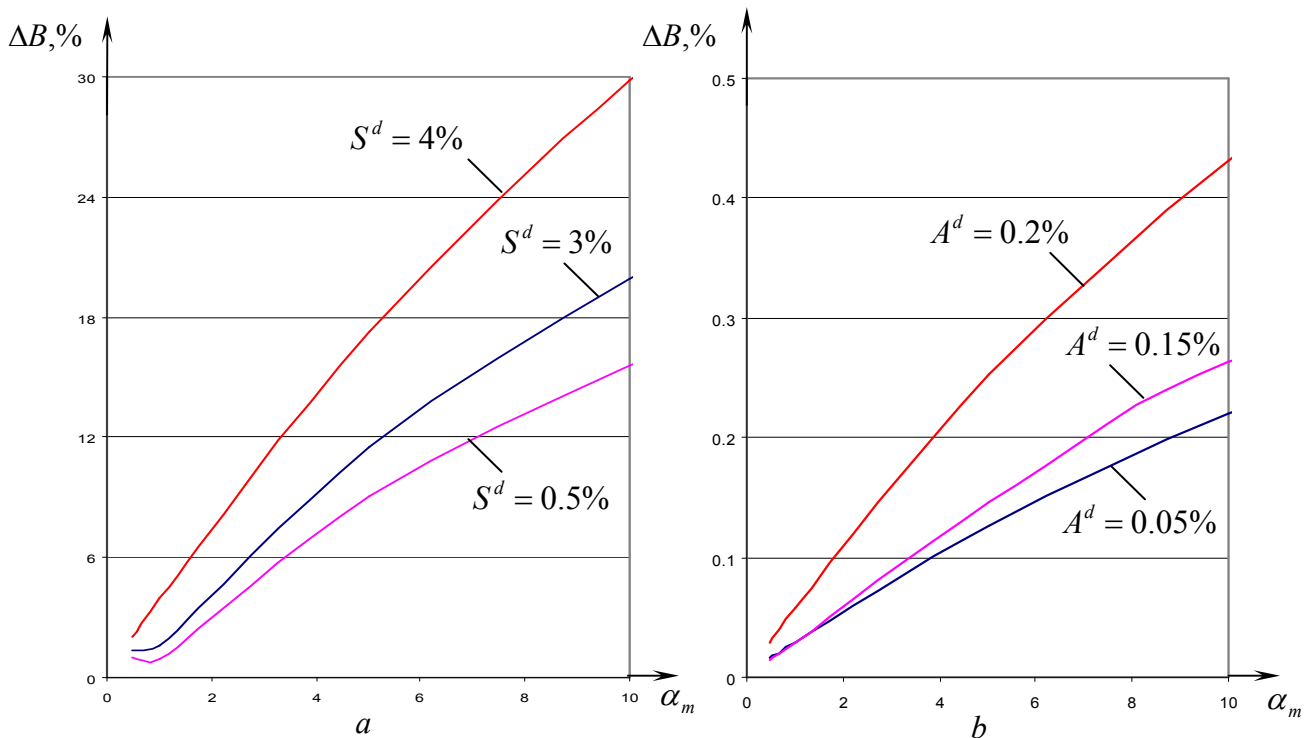
Par cik kaitējumu lielums ir atkarīgs no daudziem konkrētiem faktoriem, tāpēc kaut kāda pamatotu lielumu izmantošana ir apgrūtināta. Daudz svarīgāk ir noskaidrot parametru izmaiņas robežas. Tāpēc tika pieņemts, ka īpatnējie kaitējumi no visiem trim parametriem ir apmēram vienādi un sastāda 3.33 no kurināma cenas [5]:

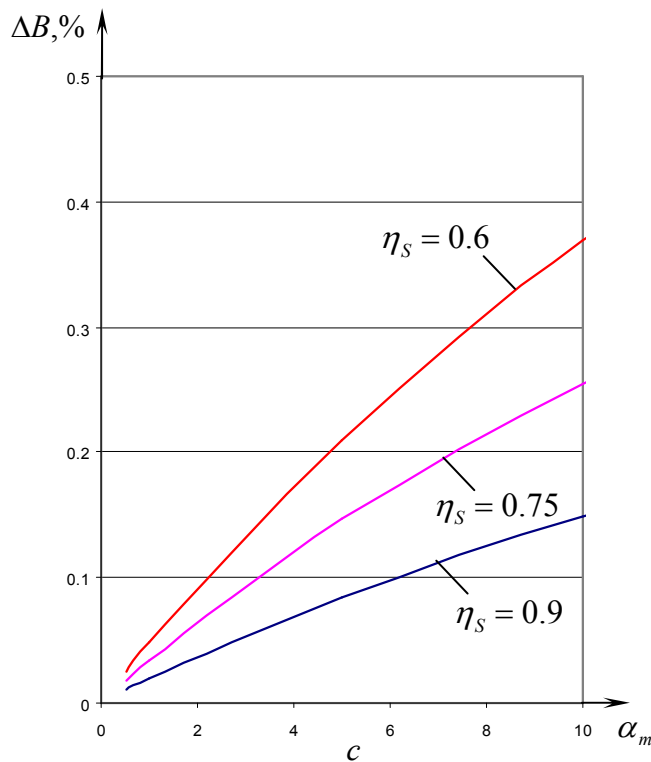
$$Y_P = Y_{SO_2} = Y_{NO_2} = 3.33 \cdot c_i. \quad (16)$$

Vietējos apstākļu aprēķina koeficientus arī pieņem par vienādiem:

$$\alpha_{mP} = \alpha_{mSO_2} = \alpha_{mNO_2} = \alpha_m. \quad (17)$$

Aprēķinos tika izmantota lielas apstākļu koeficienta  $\alpha_m$  variācijas (no 0 (kaitējuma nav) līdz 10). Šis diapazons ir ievērojami plašāks par reālo. Elektrostaciju kurināmā īpašības patvaļīgi mainās plašās robežās. Tā, aprēķinos tika izmantotas šādas degvielas īpašības: kurināmā pelnainums 0.05, 0.15 un 0.2%; sēra daļa kurināmā – 0.5, 3 un 4%. Tas ļāva izdalīt un novērtēt katra vērā ņemamā faktora ietekmi. Pieņēma, ka kurināmā īpašību izmaiņa nemaina agregātu enerģētisko raksturu.





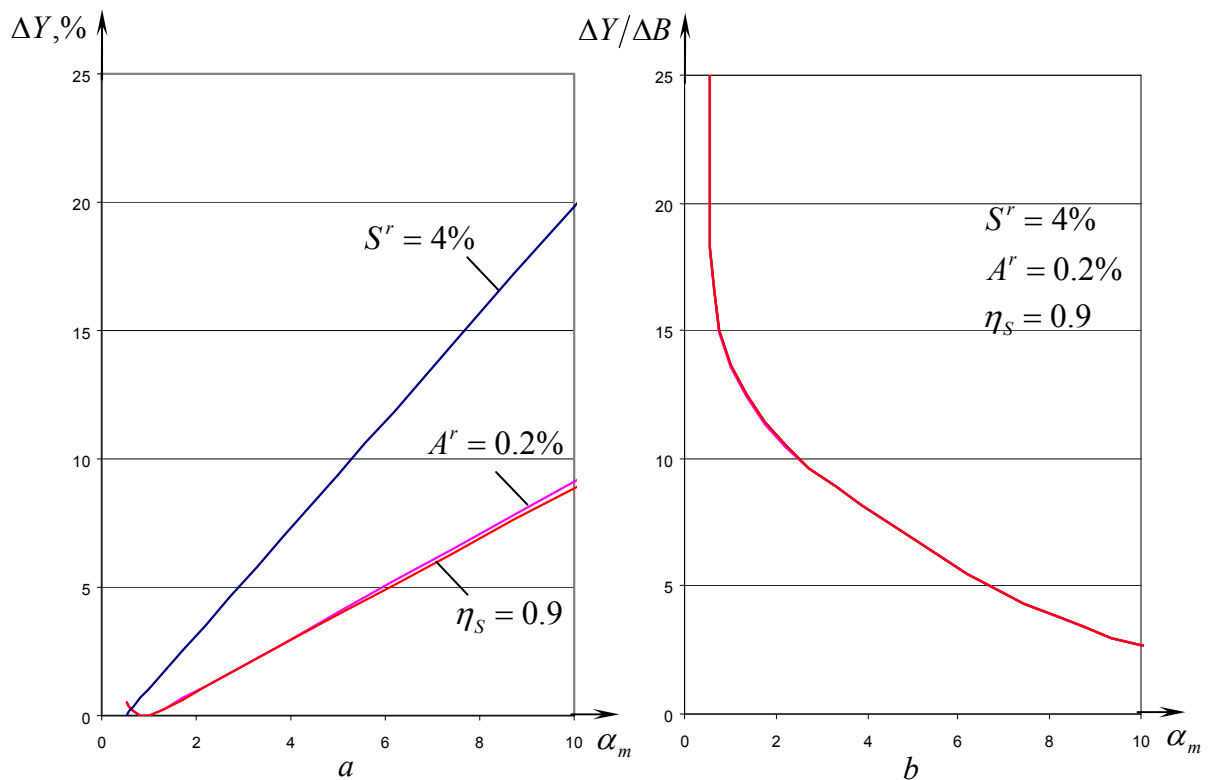
3.att. Energosistēmas papildus kurināmā patēriņa izmaiņa kaitīgo ekoloģisko seku kompensācijai, atkarībā no vietējā apstākļu koeficienta  $\alpha_m$ , mainot:  
 $a$  – degvielas sērainumu;  $b$  – degvielas pelnainumu;  $c$  – pelnu uztvērēja lietderības koeficientu

Lai varētu salīdzināt rezultātus, tika izvēlēti energosistēmas darbības bāzes noteikumi (aprēķinu parametri no 3. nodaļas): sēra daļa degvielā  $S^d = 1.9 \%$ ; pelnainums  $A^d = 0.1\%$ ; filtru lietderības koeficients  $\eta_s = 0.4$ . Visos gadījumos, kad viens parametrs mainījās, pārējiem parametriem tika piemēroti bāzes lielumi.

Aprēķinu rezultāti attēloti grafiku veidā, relatīvās vienībās. Koeficienta  $\alpha_m$  atkarība no degvielas patēriņa attēlota 3.att. ar  $U$ -veida līknēm. Šo līkņu minimums, kad nav degvielas pārtēriņa, realizējas dažādos punktos un sadalās starp pārtēriņa līkņu augošajām un dilstošajām līnijām. Krītošais līknes zars atbilst zonai, kuru var nosaukt par labvēlīgo energosistēmas ekoloģisko režīma zonu. Augošo līknes zaru var uzskatīt par nelabvēlīgo režīma zonu.

Kā var redzēt no grafikiem, dažādo faktoru ietekme – sēra saturs, pelnainums, pelnu uztvērēja lietderības koeficients – ir dažāda, bet kopējās likumsakarības un  $U$ -veida līkņu raksturs saglabājas.

4.att.  $b$  salīdzināta kaitējuma izmaiņa no izmešiem ar papildus degvielas patēriņu – izmešu samazināšanas procents uz 1% degvielas patēriņa palielinājumu, tas ir attēlota sakarība  $\Delta Y/\Delta B$  no vietējiem faktoriem (variējamā parametra).



4.att. Kaitējumu izmaiņa enerģosistēmā (a) un to salīdzinājums ar papildus kurināma patēriņu (b)

## Secinājumi

1. Tiek apskatīta elektroenerģētiskās sistēmas (EES) režīma optimizācijas algoritms, ievērojot kaitējumu apkārtējai videi.
2. Algoritms ir pārbaudīts uz EES testshēmas. Kā var redzēt no rezultātiem, ekoloģiskā efekta ievērošana palielināja sistēmas summārās izmaksas.
3. Tiek parādīta enerģosistēmas papildus kurināmā patēriņa izmaiņa kaitīgo ekoloģisko seku kompensācijai, mainoties kurināma raksturojumiem, kaitējumu izmaiņa enerģosistēmā un to salīdzinājums ar papildus kurināmā patēriņu atkarībā no vietējā apstākļu koeficienta.

## Pateicība

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

## Literatūra

1. Gerhards J., Mahnitko A. Enerģosistēmu režīmu optimizācija. – Rīga, RTU, 2005. – 249 lpp.

2. Directive 2001/80/EC of the European Parliament and of the Council on the limitation of emissions of certain pollutants into the air from large combustion plants // Official Journal of the European Communities, 2001. – 21 p.
3. Directive 2001/80/EC of the European Parliament and of the Council of 13 October 2003 establishing a scheme for greenhouse gas emission allowance trading within the Community and amending Council Directive 96/61/EC // Official Journal of the European Communities, 2003. – 15 p.
4. Васьковская Т.А. Показатели разницы узловых цен на оптовом рынке электроэнергии // Электричество, 2007, №2, с. 23 – 27
5. Барамысова Г.А., Бурлаку М.И., Журавлёв В.Г. Оценка экономического эффекта при распределении нагрузки с учётом экологических факторов // Электричество, 1982, №9, с. 62 – 65
6. Финягин А.П., Володарский Н.Х., Кондратенко А.П. и др. Методические указания по расчёту выбросов загрязняющих веществ при сжигании топлива в котлах. – М.: Стройиздат, 1985. – 20 с.
7. Дерзский В.Г., Каплин Н.И. Многоцелевая оптимизация режимов электрических сетей энергосистем. – Киев, 1990. с. 69 – 80

**Gavrilovs A., Mahņitko A. Energosistēmas režīma optimizācija, ievērojot ietekmi uz gaisa baseinu.** Elektroenerģētikas centralizētās pārvaldes apstākļos elektroenerģētiskās sistēmas (EES) režīma optimizācijas galvenais uzdevums bija minimizēt summārā kurināma patēriņu. Nekādi ierobežojumi uz patēriņa apjomiem nebija paredzami.

*Brīva tirgus apstākļos starp enerģētikas subjektiem EES režīma optimizācijas galvenais uzdevums ir minimizēt izmaksas naudas izteiksmē. Pie tam elektroenerģijas tirgus katrs dalībnieks cenšas iegūt maksimālo peļņu no savējās darbības. Norādītie mērķi ir jāsasniedz ievērojot dažādus ierobežojumus: tehnoloģiskus, resursu, ekoloģiskus un tamlīdzīgus.*

*Darbā ir apskatīts EES režīma optimizācijas algoritms ievērojot kaitējumu apkārtējai videi. EES testshēmas aprēķins parādīja tās darbību un praktiskā pielietojuma iespēju konkrēto EES apstākļos.*

**Gavrilovs A., Mahņitko A. Power system mode optimization taking into account influence on the air basin.** In the conditions of the power system centralized management the main task of electric power system (EPS) mode optimization was fuel consumption minimization. No limits on the fuel consumption amount were foreseen.

*In liberalized electricity market of relations between energy subjects the basic task of the EPS mode optimization is minimization of all expenses. Thus every electric power market participant tries to get maximal income from the activity. But indicated aims must be achieved taking into account different constraints like technological constraints, fuel constraints, emission constraints and other.*

*This paper introduces EPS mode optimization algorithm aimed at decreasing the negative effect on the environment. The calculations of test EPS show possibility of practical application in the conditions of concrete EPS.*

**Гаврилов А., Махнитко А. Оптимизация режима энергосистемы с учётом воздействия на воздушный бассейн.** В условиях планового централизованного управления электроэнергетикой главной задачей оптимизации режима электроэнергетической системы (ЭЭС) являлось минимизация суммарного расхода топлива. Никакие ограничения на объёмы его потребления не предусматривались.

*В условиях рыночных отношений между субъектами энергетики основной задачей оптимизации режима ЭЭС является минимизация затрат в денежном выражении. При этом каждый участник рынка электроэнергии старается к получению максимальной прибыли от своей деятельности. Указанные цели при этом должны быть достигнуты при соблюдении различного вида ограничений: режимных, ресурсных, экологических и т.п.*

*В работе рассмотрен алгоритм оптимизации режима ЭЭС с учётом ущерба на окружающую среду. Расчёты тестовой схемы ЭЭС показали его работоспособность и возможность практического применения в условиях конкретных ЭЭС.*