

## РОЗДІЛ V. ЕНЕРГЕТИКА

УДК 621.313.322

Святослав Вишневецький, Сергій Бойко, Олексій Городній

### ФОРМУВАННЯ ІНТЕГРАЛЬНОГО ПОКАЗНИКА НЕОДНОРІДНОСТІ ЕЛЕКТРОМЕРЕЖ З ДОВГИМИ ЛІНІЯМИ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ

Святослав Вишневецький, Сергей Бойко, Алексей Городний

### ФОРМИРОВАНИЕ ИНТЕГРАЛЬНОГО ПОКАЗАТЕЛЯ НЕОДНОРОДНОСТИ ЭЛЕКТРОСЕТЕЙ С ДЛИННЫМИ ЛИНИЯМИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ

Sviatoslav Vishnevskiy, Sergey Boiko, Olexsiy Gorodny

### FORMATION THE INTEGRAL INDEX OF HETEROGENEITY OF ELECTRIC SYSTEMS WITH LONG-RANGE POWER TRANSMISSION

Неоднорідність як один з чинників зростання втрат потужності під час її транспортування вимагає постійного вдосконалення як шляхів її компенсації, так і оцінювання. Часті зміни топології схем 330–750 кВ та встановлення пристроїв поздовжньо-поперечної компенсації потребують оцінювання неоднорідності електричних мереж. З іншого боку, неврахування хвильових властивостей транспортування потужності довгими лініями електропередачі вносить похибку у процесі оцінювання неоднорідності. Тому з урахуванням розбудови електричних мереж 330–750 кВ розглянуто питання підвищення адекватності оцінювання неоднорідності електромереж (ЕМ) з довгими електропередачами. Запропоновано розділення оцінювання впливу впровадження проектних рішень та керувальних впливів для зменшення технологічних витрат і підвищення якості функціонування електричних систем (ЕС).

**Ключові слова:** електрична система, довгі лінії електропередачі, неоднорідність, інтегральний показник неоднорідності.

Рис.: 1. Табл.: 1. Бібл.: 15.

Неоднородность как один из факторов возрастания потерь мощности при её передаче требует постоянного усовершенствования как путей её компенсации, так её оценки. Частые изменения топологии схем 330–750 кВ и монтаж устройств продольно-поперечной компенсации требуют оценки неоднородности электрических сетей. С другой стороны, при не учёте волновых свойств передачи мощности длинными линиями электропередачи, вносит погрешность оценке неоднородности. Поэтому с учётом строительства новых электрических сетей 330–750 кВ рассмотрен вопрос повышения адекватности оценки неоднородности электросетей с длинными электропередачами. Предложено разделение оценки влияния внедрения проектных решений и управляющих воздействий для уменьшения технологических потерь и повышения качества функционирования электрических систем.

**Ключевые слова:** электрическая система, длинные линии электропередачи, неоднородность, интегральный показатель неоднородности

Рис.: 1. Табл.: 1. Библ.: 15.

Heterogeneity as one of factors of increase of losses of capacity by its transfer demands constant improvement as ways of its indemnification so its estimations. Frequent changes of topology of schemes 330-750 kV and installation of devices of longitudinal-cross-section indemnification demand an estimation of heterogeneity of electric networks. On the other hand, at not the account wave properties of transfer of capacity long transmission lines, brings an error to a heterogeneity estimation. Therefore, with the account of building of new electric networks 330-750 kV the question of increase of adequacy of an estimation of heterogeneity of electric systems with long electricity transmissions is considered. Division of an estimation of influence of introduction of design decisions and operating influences for reduction of technological losses and improvement of quality of functioning of electric systems is offered.

**Key words:** electric power system, long transmission lines, heterogeneity, a integral index measure of heterogeneity.

Fig.: 1. Tabl.: 1. Bibl.: 15.

**Постановка проблеми.** В умовах вимушеної диверсифікації енергоспоживання і як наслідок зростання електричного навантаження, забезпечення збалансованого виробництва та споживання електроенергії потребує нарощування пропускної спроможності системоутворювальних мереж 330 кВ і вище [1–3]. Крім того, з розвитком сучасних інформаційних технологій багато задач в електричних системах (ЕС) і методи їх розв'язання вимагають перегляду. Зокрема, до таких задач належить задача визначення інтегрального показника неоднорідності.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** За паралельної роботи лінії електропередач (ЛЕП) 330 кВ і вище з розподільними мережами часто мають місце негативні наслідки взаємовпливу їх режимів [4]. Першопричина тут полягає у появі неоднорідних замкнених контурів в електричних мережах (ЕМ), які за умов значних транзитів енергії призводять до неоптимальності поточкорозподілу, погіршення якості електроенергії і, відповідно, зниження техніко-економічних показників ЕС [5]. Наявні показники неоднорідності ЕМ дозволяють проводити

оцінювання, використовуючи математичні моделі розрахунку нормальних режимів. Вимоги до адекватності таких моделей постійно підвищуються через неврахування багатьох параметрів.

**Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми.** Зниження неоднорідності як конструктивного параметра ЕС та примусове коригування поточкорозподілу в процесі експлуатації з метою наближення його до поточкорозподілу в однорідній системі є взаємопов'язаними напрямками забезпечення умов оптимальності нормальних режимів електричної системи, які необхідно розглядати у комплексі [6; 7]. Впровадження примусового коригування поточкорозподілу в ЕС за рахунок незбалансованих коефіцієнтів трансформації регулювальних пристроїв за допомогою адаптивних систем автоматичного керування (САК) є недостатньо ефективним у разі застосування законів оптимального керування без урахування розосередженості параметрів довгих ліній електропередачі.

**Мета статті.** Головною метою цієї роботи є підвищення адекватності оцінювання проектних заходів та оптимального керування потоками потужності в неоднорідних електричних системах з урахуванням передачі електроенергії довгими лініями 330 кВ і вище.

**Виклад основного матеріалу.** На економічність процесу транспортування електричної енергії в ЕС великою мірою впливає неоднорідності системи, оцінювання якої залежить від проектних заходів та оперативного керування. Нині розроблено багато режимних заходів для компенсації негативного впливу неоднорідності ЕС, але їх ефективність обмежена через застосування спрощених математичних моделей об'єкта керування.

У відомих методах аналізу неоднорідності ЕС та формування законів оптимального керування, які ґрунтуються, в основному, на визначенні контурних зрівнювальних е.р.с., враховуються зміни значень коефіцієнтів трансформації трансформаторів з поздовжньо-поперечним регулюванням під час оперативного та автоматичного керування, наявність електричних станцій, опорних за частотою та міжсистемними перетіканнями (балансувальних вузлів) тощо. Однак для енергосистем з довгими лініями електропередач їх ефективність є недостатньою.

Для забезпечення належної адекватності відтворення поточного та оптимального режимів ЕС з довгими електропередачами необхідно використовувати узагальнені математичні моделі їх усталених режимів, які б враховували розосередженість параметрів таких ЛЕП та їх хвильові властивості.

Для оцінювання неоптимальності режимів та формування керувальних впливів в автоматизованих системах диспетчерського керування найчастіше використовують математичні моделі у вигляді систем нелінійних рівнянь, складених за методами вузлових напруг або контурних струмів [8].

Дальні електропередачі у практичних розрахунках подають як лінії з розподіленими параметрами, режими яких описуються співвідношеннями [5; 9]:

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = A\dot{U}_2 + \sqrt{3}B\dot{I}_2; \\ \dot{I}_1 = \frac{1}{\sqrt{3}}C\dot{U}_2 + D\dot{I}_2, \end{cases} \quad (1)$$

де  $\dot{U}_1$ ,  $\dot{U}_2$  – лінійні напруги, а  $\dot{I}_1$ ,  $\dot{I}_2$  – фазні струми по кінцях ЛЕП;  $A = \text{ch}(\gamma_0 l)$ ,  $B = \dot{Z}_c \text{sh}(\gamma_0 l)$ ,  $C = \dot{Z}_c^{-1} \text{sh}(\gamma_0 l)$ ,  $D = \text{ch}(\gamma_0 l)$  – постійні пасивного чотирьополосника;

$\dot{Z}_c = \sqrt{\frac{r_0 + jx_0}{g_0 + jb_0}}$  – хвильовий опір, а  $\gamma_0 = \sqrt{(r_0 + jx_0)(g_0 + jb_0)}$  – коефіцієнт розповсюдження хвилі ЛЕП;  $r_0, x_0$  – питомі поздовжні опори, а  $g_0, b_0$  – питомі поперечні провідності ЛЕП;  $l$  – довжина ЛЕП.

Для лінії довжиною, меншою за 200 км, враховуючи, що  $A \approx 1$ ,  $D \approx 1$ ,  $B \approx \dot{Z}_B$ ,  $C \approx \dot{Y}_B$  рівняння (1) набуває вигляду [10]:

$$\begin{cases} \dot{U}_1 \approx \dot{U}_2 + \sqrt{3}\dot{Z}_B \dot{I}_2; \\ \dot{I}_1 \approx \frac{1}{\sqrt{3}}\dot{Y}_B \dot{U}_2 + \dot{I}_2, \end{cases} \quad (2)$$

де  $\dot{Z}_B$ ,  $\dot{Y}_B$  – поздовжній опір та поперечна провідність заступної схеми ЛЕП з зосередженими параметрами.

Зіставляючи (1) та (2) видно подібність співвідношень параметрів для моделей довгих ЛЕП та заступних схем із зосередженими параметрами [8; 11; 12]. Це було використано для формування узагальнених моделей нормальних режимів ЕС у матричній формі за методом вузлових напруг [13]:

$$\left[ \dot{\mathbf{M}}_{Ak} \mathbf{Z}_B^{-1} \dot{\mathbf{M}}_{Ak}^T - \mathbf{C}_k \right] \dot{\mathbf{U}} = \dot{\mathbf{J}}, \quad (3)$$

та контурних струмів:

$$\sqrt{3}\dot{\mathbf{N}}_{Ak} \mathbf{Z}_B \dot{\mathbf{I}}_B = -\dot{\mathbf{E}}_k = -\dot{\mathbf{U}}_B \dot{\mathbf{E}}_{k*}, \quad (4)$$

де  $\dot{\mathbf{M}}_{Ak} = \mathbf{M}^+ + \mathbf{M}^- \mathbf{A}_d \widehat{\mathbf{K}}$  – матриця зв’язків віток електромережі у її вузлах з урахуванням ідеальних трансформаторів та довгих електропередач;  $\dot{\mathbf{M}}_{Ak}^T = \mathbf{M}^{T+} + \mathbf{K} \mathbf{A}_d \mathbf{M}^{T-}$  – транспонована матриця зв’язків віток ЕМ у її вузлах (символ « $T$ » тут і далі позначає операцію транспонування матриць);  $\mathbf{M}^+$ ,  $\mathbf{M}^-$  – матриці, які формуються заміною, відповідно, від’ємних або додатних елементів транспонованої матриці з’єднань  $\mathbf{M}$  нулями;  $\mathbf{K}$ ,  $\widehat{\mathbf{K}}$ ,  $\mathbf{A}_d$  – діагональні матриці, відповідно, прямих і комплексно-спряжених коефіцієнтів трансформації трансформаторних віток та постійних чотириполюсника  $A$  для інших віток заступної схеми ЕМ;  $\dot{\mathbf{Z}}_B$  – діагональна матриця опорів віток заступної схеми, у якій вітки довгих передач подані постійними чотириполюсника  $B$ ;  $\mathbf{C}_k = \mathbf{M}^+ \mathbf{C}_d \mathbf{M}^{T-}$  – матриця постійних чотириполюсника  $C$  у вітках заступної схеми;  $\dot{\mathbf{U}}$ ,  $\dot{\mathbf{J}}$  – відповідно, вектори напруг у вузлах та задаючих струмів заступної схеми ЕС;  $\mathbf{A}_d$ ,  $\mathbf{C}_d$  – діагональні матриці постійних чотириполюсника  $A$  та  $C$  для віток заступної схеми ЕМ;  $\dot{\mathbf{N}}_{Ak}$  – матриця зв’язків віток заступної схеми ЕС у контурах, в елементах якої враховано комплексні коефіцієнти трансформації трансформаторів та коефіцієнти чотириполюсника  $A$  довгих ЛЕП;  $\dot{\mathbf{I}}_B$  – вектор струмів по кінцях віток заступної схеми ЕС;  $\dot{\mathbf{E}}_k, \dot{\mathbf{E}}_{k*}$  – вектори контурних е.р.с., поданих у іменованих та відносних одиницях, відповідно. Вирази (3), (4) несуттєво відрізняються за формою від відомих, є більш адекватними, оскільки враховують якісно нові параметри та характеристики досліджуваного об’єкта.

Неоптимальність струморозподілу в неоднорідному контурі оцінюється додатковими фіктивними зрівнювальними струмами  $\dot{\mathbf{I}}_{зр} = \dot{\mathbf{I}} - \dot{\mathbf{I}}_{ек}$ , де  $\dot{\mathbf{I}}$  та  $\dot{\mathbf{I}}_{ек}$  – вектори струмів у вітках для природного та економічного струморозподілу.

Вирази для визначення векторів  $\dot{\mathbf{I}}$  та  $\dot{\mathbf{I}}_{ек}$  як функцій задаючих струмів  $\dot{\mathbf{J}}$  у вузлах заступної схеми ЕС [4], виходячи з (3), можна подати як:

$$\dot{\mathbf{I}} = \dot{\mathbf{Z}}_B^{-1} \dot{\mathbf{M}}_{Ak}^T (\dot{\mathbf{M}}_{Ak} \dot{\mathbf{Z}}_B^{-1} \dot{\mathbf{M}}_{Ak}^T)^{-1} (\dot{\mathbf{J}} - \dot{\mathbf{Y}}_B \dot{U}_B) + \dot{\mathbf{Z}}_B^{-1} \dot{\mathbf{M}}_{Ak}^T \dot{U}_B; \quad (5)$$

$$\dot{\mathbf{I}}_{ек} = \mathbf{R}_B^{-1} \dot{\mathbf{M}}_{Ak}^T (\dot{\mathbf{M}}_{Ak} \mathbf{R}_B^{-1} \dot{\mathbf{M}}_{Ak}^T)^{-1} (\dot{\mathbf{J}} - \mathbf{Y}'_{R0} \dot{U}_B) + \mathbf{R}_B^{-1} \dot{\mathbf{M}}_{Ak}^T \dot{U}_B, \quad (6)$$

де  $\dot{\mathbf{Y}}_B$  – стовпці матриці вузлових провідностей  $\dot{\mathbf{Y}} = \dot{\mathbf{M}}_{Ak} \mathbf{Z}_B^{-1} \dot{\mathbf{M}}_{Ak}^T$ , що відповідають базисному вузлу ЕМ, визначені за повною заступною схемою ЕС;  $\dot{U}_B$  – напруга базисного вузла ЕМ;  $\dot{\mathbf{M}}_{Ak}^T$  – стовпець матриці з’єднань  $\dot{\mathbf{M}}_{Ak}^T$ , що відповідає базисному вузлу ЕМ;  $\mathbf{R}_B$  – діаго-

нальна матриця опорів віток, що містить лише активні складові елементів матриці  $\dot{\mathbf{Z}}_B$ ;  $\dot{\mathbf{M}}_{Ak}^T$ ,  $\dot{\mathbf{M}}'_{Ak}$ ,  $\dot{\mathbf{M}}_6^T$ ,  $\mathbf{Y}'_{R6}$  – матриці зв'язків та пасивних параметрів заступної схеми ЕС, визначені з урахуванням умов розрахунку економічного режиму.

Для визначення економічного струмозподілу в ЕС з довгими електропередачами необхідно враховувати додаткові умови: у розрахунковій заступній  $r$ -схемі мають бути відсутні контурні е.р.с. небалансу ( $\dot{E}_{н6} = 0$ ), тобто коефіцієнти трансформації у контурах мають бути збалансовані, а постійні чотириполюсника для довгих ЛЕП  $\dot{A}_i = 1$ .

Фіктивні зрівнювальні е.р.с. у неоднорідних електромережах, що містять трансформаторні зв'язки та довгі електропередачі згідно (4) визначаються [11; 13]:

$$\dot{\mathbf{E}}_{зр} = \dot{\mathbf{N}}_{Ak} \dot{\mathbf{Z}}_B (\dot{\mathbf{I}} - \dot{\mathbf{I}}_{ек}) . \quad (7)$$

Підставивши у (7) вирази для  $\dot{\mathbf{I}}$  та  $\dot{\mathbf{I}}_{ек}$ , після перетворень та спрощень було отримано математичну модель зрівнювальних е.р.с., що може бути використана для оцінювання загально-системної неоднорідності та формування керувальних впливів для оптимізації потоків потужності в ЕС:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{E}}_{зр} &= -j(\dot{\mu}_{1*} + \dot{\mu}_{2*}) \dot{U}_6; \dot{\mu}_{1*} = \dot{\mathbf{N}}_{Ak} \mathbf{X}_B \mathbf{R}_B^{-1} \dot{\mathbf{M}}_6^T; \\ \dot{\mu}_{2*} &= \dot{\mathbf{N}}_{Ak} \mathbf{X}_B \mathbf{R}_B^{-1} \dot{\mathbf{M}}_{Ak}^T (\dot{\mathbf{M}}'_{Ak} \mathbf{R}_B^{-1} \dot{\mathbf{M}}_{Ak}^T)^{-1} \mathbf{Y}_H, \end{aligned} \quad (8)$$

де  $\mathbf{X}_B$  – діагональна матриця опорів віток, що містить лише реактивні складові опорів віток  $\dot{\mathbf{Z}}_B$ ;  $\mathbf{Y}_H$  – вектор провідностей навантажень з урахуванням взаємних провідностей базисного вузла.

З (8) видно, що вектори  $\dot{\mu}_{1*}$  та  $\dot{\mu}_{2*}$  визначаються співвідношенням реактивних та активних опорів віток заступної схеми ЕС, коефіцієнтами трансформації трансформаторів та постійними чотириполюсника довгих ЛЕП А, тобто є узагальненими показниками неоднорідності ЕС.

Для оцінювання доцільності оптимізаційних заходів в ЕС у проектних та експлуатаційних задачах на базі (8) було розроблено загальносистемний показник неоднорідності. Подавши  $\dot{\mu}_{1*}$  та  $\dot{\mu}_{2*}$ , як складові функціональної метричної множини  $\{\mu\}$  та виконавши її метризацію за допомогою евклідової норми [9; 14; 15]:

$$\mu = \sqrt{\sum_{i=1}^k (\mu_{1*_i} + \mu_{2*_i}) \cdot (\hat{\mu}_{1*_i} + \hat{\mu}_{2*_i})} \quad (9)$$

було отримано загальносистемний показник неоднорідності ЕС, який дає змогу однозначно оцінити вплив зміни топології та параметрів електромереж на оптимальність режимів ЕС. Для оцінювання потенційних можливостей оптимізаційних заходів з компенсації неоднорідності ЕС доцільно користуватися показником  $\mu$  у відносних одиницях:

$$\mu_* = \mu / \mu_{\max}, \quad \mu_{\max} = \sqrt{\sum_{i=1}^k (\mu_{1*_i} \cdot \hat{\mu}_{1*_i}) + \sum_{i=1}^k (\mu_{2*_i} \cdot \hat{\mu}_{2*_i})}, \quad (10)$$

який змінюється в діапазоні  $0 \leq \mu_* \leq 1$ .

Виходячи з (8) та (9) відсутність зрівнювальних е.р.с. у контурах характерна лише для ЕС, у яких всі вітки відповідають класичній умові однорідності:  $x_i/r_i = idem$  (необхідна умова  $\dot{\mu}_{2*} = 0$ ), а коефіцієнти трансформації в контурах збалансовані й параметри довгих ЛЕП узгоджені:  $\gamma_i = \sqrt{(r_i + jx_i)(g_i + jb_i)} = idem$  (достатня  $\dot{\mu}_{1*} = 0$ ). Таким чином показано, що однорідність електромереж з довгими ЛЕП забезпечити проектними заходами практично немож-

## TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

ливо, враховуючи істотну залежність їх поперечних провідностей  $g_i$ ,  $b_i$  від випадкового впливу навколишнього середовища (рис., табл.).

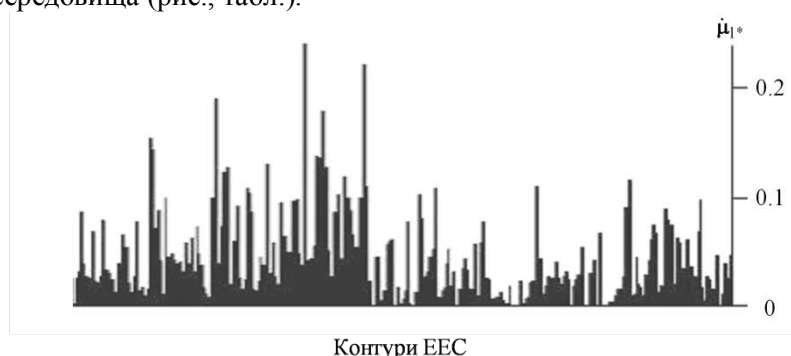


Рис. Графічне представлення вектора узагальнених показників неоднорідності  $\mu_1^*$  для електроенергетичної системи НЕК «Укренерго»

Для підтвердження розрахунків виконано аналіз неоднорідності ЕЕС при проведенні проектних оптимізаційних заходів. Виконавши аналіз неоднорідності ЕЕС Укренерго, отримані значення вектора  $\mu_1^*$  для всіх контурів. Промодельовавши встановлення ППК в найдовшій ЛЕП контуру з максимальним значенням  $\mu_1^*$  та отримано наступні результати.

Таблиця

Результати аналізу неоднорідності ЕЕС НЕК «Укренерго»

Стан схем ЕЕС	Загальносистемний показник неоднорідності $\mu$	Максимальне значення $\mu_{\max}$	Відносний показник $\mu_*, \%$
Вихідна схема ЕЕС	6,35	15,30	41,5
Після встановлення УПК у ЛЕП 518-404	6,24	15,28	40,8

Порівняно з вихідною схемою, зміна відносного загальносистемного показника неоднорідності  $\mu_*$  склала 0,8% при встановленні ППК лише на одній лінії.

**Висновки і пропозиції.** Поздовжньо-поперечна неоднорідність електромереж, що містять довгі ЛЕП, є однією з основних причин додаткових втрат електроенергії при її транспортуванні й розподілі. Заходи щодо реконструкції ЕС за інших рівних умов повинні супроводжуватися зменшенням системної неоднорідності. З аналізу результатів видно, що перевага розробленого інтегрального показника неоднорідності забезпечується врахуванням контурних е.р.с., які викликані незбалансованими коефіцієнтами трансформації та неузгодженими коефіцієнтами розповсюдження хвилі довгих ЛЕП.

Запропонований показник неоднорідності, яким можна оцінити вплив зміни топології електричної системи, введення нових ліній електропередач, установок поздовжньої компенсації та трансформаторів на оптимальність режимів ЕС, дозволяє формувати рішення з проведення цілеспрямованої реконструкції ЕС для зменшення ступеня її неоднорідності, тобто послідовного усунення першопричини неоптимальності поточкорозподілу в електричній системі.

## Список використаних джерел

1. *Прогнозирование* электрической нагрузки ОЭС Украины / Б. И. Макоклюев, А. В. Антонов, К. В. Ушаповский, Р. В. Грабчак // Электрические сети и системы. – 2010. – № 4. – С. 4–12.
2. *Інтелектуальні* електричні мережі: світовий досвід і перспективи України / Б. С. Стогній, О. В. Кириленко, А. В. Праховник, С. П. Денисюк // Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України. Спеціальний випуск. – 2011. – Ч. 1. – С. 5–20.
3. *Воротницкий В. Э.* Особенности формирования балансов электрической энергии и мощности в современных условиях / В. Э. Воротницкий, Б. И. Макоклюев, Ю. М. Кудряшов // Электрические станции. – 2010. – № 3. – С. 2–8.
4. *Лежнюк П. Д.* Оцінка взаємовпливу електричних мереж енергосистем з трансформаторними зв'язками / П. Д. Лежнюк, В. В. Кулик, О. Б. Бурикін // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск: проблеми сучасної електротехніки. – 2006. – Ч. 7. – С. 27–30.
5. *Холмский В. Г.* Расчет и оптимизация режимов электрических сетей / В. Г. Холмский. – М.: Высшая школа, 1975. – 280 с.
6. *Методика* по оценке эффективности применения трансформаторов с РПН и автоматического регулирования напряжения в замкнутых электрических сетях. РД 34.46.504-90 / В. С. Воротницкий, П. Д. Лежнюк, И. А. Серова, В. В. Стан. – М.: СПО Союзэнерго, 1990. – 36 с.
7. *Железко Ю. С.* Выбор мероприятий по снижению потерь электроэнергии в электрических сетях: Руководство для практических расчетов / Ю. С. Железко. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 176 с.

8. *Методы оптимизации режимов энергосистем* / В. М. Горнштейн, Б. П. Мирошниченко, А. В. Пономарев и др. – М. : Энергоиздат, 1981. – 336 с.
9. *Лежнюк П. Д.* Оптимальне керування потоками потужності і напругою у неоднорідних електричних мережах : монографія / П. Д. Лежнюк, В. В. Кулик. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2003. – 188 с.
10. *Электрические системы. Том 3. Передача энергии переменным и постоянным током высокого напряжения* / [под ред. Венникова В. А.]. – М. : Высш. школа, 1972. – 367 с.
11. *Кулик В. В.* Умови оптимальності нормальних режимів електричних системи з довгими лініями електропередачі / В. В. Кулик, С. Я. Вишневський // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2013. – № 4. – С. 62–67.
12. *Жуков Л. А.* Установившиеся режимы сложных электрических сетей и систем: Методы расчета / Л. А. Жуков, И. П. Стратан. – М. : Энергия, 1979. – 416 с.
13. *Кулик В. В.* Комбіновані моделі нормальних режимів електричних систем з урахуванням особливостей довгих ліній електропередачі [Електронний ресурс] / В. В. Кулик, С. Я. Вишневський // Наукові праці ВНТУ. – 2012. – № 1. – Режим доступу : [http://www.nbu.gov.ua/ejournals/VNTU/2012\\_1/2012-1.files/uk/12vvkltl\\_ua.pdf](http://www.nbu.gov.ua/ejournals/VNTU/2012_1/2012-1.files/uk/12vvkltl_ua.pdf).
14. *Кулик В. В.* Моделювання неоднорідності електричних систем з дальніми електропередачами в задачах оптимального керування їх режимами / В. В. Кулик, С. Я. Вишневський, В. Ф. Кириченко // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: «Електротехніка і енергетика». – 2013. – № 2 (15). – С. 133–136.
15. *Лежнюк П. Д.* Моделирование компенсации влияния неоднородности электрических сетей на экономичность их режимов / П. Д. Лежнюк, В. В. Кулик, Д. И. Оболонский // Электричество. – 2007. – № 11. – С. 2–8.

#### References

1. Makokliuev, B. I., Antonov, A. V., Ushchapovskii, K. V., Grabchak, R. V. (2010). Prognozirovanie elektricheskoi nagruzki OES Ukrainy [ Prediction of electrical load ECO Ukraine]. *Elektricheskie seti i sistemy - Electrical networks and systems*, no 4, pp. 4–12 (in Russian).
2. Stohni, B. S., Kyrylenko, O. V., Prakhovnyk, A. V., Denysiuk, S. P. (2011). Intelktualni elektrychni mrezhi: svitovyi dosvid i perspektivy Ukrainy [Smart electrical networks: international experience and prospects of Ukraine]. *Pratsi Instytutu elektrodynamiky Natsionalnoi akademii nauk Ukrainy. Spetsialnyi vypusk – Proceedings of the Institute of Electrodynamics of NAS of Ukraine. Special issue*, p. 1, pp. 5–20 (in Ukrainian).
3. Vorotnitskii, V. E., Makokliuev, B. I., Kudriashov, Iu. M. (2010). Osobennosti formirovaniia balansov elektricheskoi energii i moshchnosti v sovremennykh usloviakh [Peculiarities of electric energy and power balances in modern conditions]. *Elektricheskie stantsii - Power stations*, no. 3, pp. 2–8 (in Russian).
4. Lezhniuk, P. D., Kulyk, V. V., Burykin, O. B. (2006). Otsinka vzaiemovplyvu elektrychnykh mrezh enerhosystem z transformatornymy zviazkamy [Evaluation of interference of electric networks of power systems with transformer coupling]. *Tekhnichna elektrodynamika. Tematychnyi vypusk: problemy suchasnoi elektrotekhniki. – Technical electrodynamics. Special Issue: modern electrical problems*, part 7, pp. 27–30 (in Ukrainian).
5. Kyholmiskii, V. G. (1975). *Raschet i optimizatsiia rezhimov elektricheskikh setei [Calculation and optimization of electrical networks modes]*. Moscow: Vysshiaia shkola, 280 p. (in Russian).
6. Vorotnitskii, V. E., Lezhniuk, P. D., Serova, I. A., Stan, V. V. (1990 ). Metodika po otsenke effektivnosti primeneniia transformatorov s RPN i avtomaticheskogo regulirovaniia napriazheniia v zamknytykh elektricheskikh setiakh RD 34 46 504-90. Moscow: SPO Soiuzezhenergo (in Russian).
7. Zhelezko Iu. S. (1989). *Vybor meropriatii po snizheniiu poter elektroenergii v elektricheskikh setiakh. Rukovodstvo dlia prakticheskikh raschetov [Selection of measures to reduce energy losses in electric networks: a guide for practical calculations]*. Moscow: Energoatomizdat, 176 p. (in Russian).
8. Gornshstein, V. M., Miroshnichenko, B. P., Ponomarev, A. V. (1981). *Metody optimizatsii rezhimov energosistem [Methods of optimization modes of power systems]*. Moscow: Energoizdat, 336 p. (in Russian).
9. Lezhniuk, P. D., Kulyk, V. V. (2003). *Optymalne keruvannya potokamy potuzhnosti i napruhoiu u neodnorodnykh elektrychnykh mrezhakh [Optimal power flow control and voltage in nonuniform electric networks]*. Vinnytsia: UNIVERSUM-Vinnytsia [in Ukrainian].
10. Venikov, V. A. (ed.) (1972). *Elektricheskie sistemy. Peredacha energii peremennym i postoiannym tokom vysokogo napriazheniia. [Electrical Systems. Power transmission and variable high-voltage direct current]. (Vol.3)*. Moscow: Vyssh. Shkola, 367 p. (in Russian).
11. Kulyk, V. V., Vyshnevskiy, S. Ya. (2013). Umovy optymalnosti normalnykh rezhymiv elektrychnykh systemy z dovhymy liniiami elektroperedachi [Optimum conditions of normal modes of electric systems with long transmission lines]. *Visnyk Vinnytskoho politekhnichnogo instytutu – Bulletin of Vinnitsa Polytechnic Institute*, no. 4, pp. 62–67 (in Ukrainian).
12. Zhukov, L. A., Stratan, I. P. (1979). *Ustanovivshiesia rezhimy slozhnykh elektricheskikh setei i sistem: Metody rascheta [Set mode of complex electrical networks and systems: Methods of calculation]*. Moscow: Energy, 416 p. (in Russian).
13. Kulyk, V. V., Vyshnevskiy, S. Ya. (2012). Kombinovani modeli normalnykh rezhymiv elektrychnykh system z urakhuvanniam osoblyvosti dovhyykh liniy elektroperedachi [Combined models of normal modes of electric systems allowing for the long transmission lines]. *Naukovi pratsi VNTU – The scientific papers of Vinnytsia National Technical University*, no 1. Retrieved from [http://www.nbu.gov.ua/ejournals/VNTU/2012\\_1/2012-1.files/uk/12vvkltl\\_ua.pdf](http://www.nbu.gov.ua/ejournals/VNTU/2012_1/2012-1.files/uk/12vvkltl_ua.pdf). (in Ukrainian).
14. Kulyk, V. V., Vyshnevskiy, S. Ya., Kyrychenko, V. F. (2013). Modeliuvannya neodnorodnosti elektrychnykh system z dalnimy elektroperedachamy v zadachakh optymalnogo keruvannya yikh rezhymamy [Modeling heterogeneity of electrical systems with long-range power in tasks of optimal control of their regimes]. *Naukovi pratsi Donetskoho natsionalnogo tekhnichnogo universytetu. Seriya: «Elektrotekhnika i enerhetyka. – Scientific works of Donetsk National Technical University. "Electrical and Power Engineering" series*, no. 2 (15), pp. 133–136 (in Ukrainian).
15. Lezhniuk P. D., Kulik V. V., Oboloniskii D. I. (2007). *Modelirovanie kompensatsii vliianiia neodnorodnosti elektricheskikh setei na ekonomichnost ikh rezhimov [Simulation of influence compensation of electrical networks heterogeneity on their economy mode]*. Electricity, no. 11, pp. 2–8 (in Russian).

**Вишневський Святослав Янович** – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри електричних станцій та систем, Вінницький національний технічний університет (Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, 21021, Україна).

**Вишневский Святослав Янович** – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры электрических станций и систем, Винницкий национальный технический университет (Хмельницкое шоссе, 95, г. Винница, 21021, Украина).

**VishnevskiySviatoslav** – PhD in Technical Sciences, Senior lecturer of Power Station and System Department, Vinnytsia State National University (95 Khmelnytske shose, 21021 Vinnytsia, Ukraine).

**E-mail:** Slava\_vish@mail.ru

**Бойко Сергій Миколайович** – кандидат технічних наук, доцент кафедри систем електроживлення та енергетичного менеджменту, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського (вул. Першотравнева, 20, Кременчук, 39600, Україна).

**Бойко Сергей Николаевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры систем электропотребления и энергетического менеджмента, Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского (ул. Первомайская, 20, Кременчуг, 39600, Украина).

**Boiko Sergiy** – PhD in Technical Sciences, Associate Professor of Systems Electropower and Energy Management Department, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskiy National University (20 Pershotravneva Str., Kremenchuk, 39600, Ukraine).

**E-mail:** bsn1987@i.ua

**Городний Олексій Миколайович** – кандидат технічних наук, асистент кафедри промислової електроніки, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, Чернігів, 14027, Україна).

**Городний Алексей Николаевич** – кандидат технических наук, ассистент кафедры промышленной электроники, Черниговский национальный технологический университет (ул. Шевченко, 95, Чернигов, 14027, Украина).

**Gorodny Oleksiy** – PhD in Technical Sciences, assistant of the Industrial Electronics Department, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenka Str., 14027 Chernihiv, Ukraine).

**E-mail:** aleksey.gorodny@gmail.com

УДК 621.3.08

*Володимир Войтенко, Сергій Яценко*

## СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ БАЛАСТІВ СВІТЛОВИПРОМІНЮВАЛЬНИХ ДІОДІВ

*Владимир Войтенко, Сергей Яценко*

## СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ БАЛЛАСТОВ СВЕТОИЗЛУЧАЮЩИХ ДИОДОВ

*Volodymyr Voytenko, Serhii Yatsenko*

## CONTROL SYSTEM FOR THE RESEARCH OF INTELLIGENT BALLAST OF LIGHT-EMITTING DIODES

Сучасні системи штучного освітлення будуються переважно на основі світловипромінювальних діодів (СВД), струм протікання через які (а отже, і рівень освітлення об'єкта) стабілізується або регулюється відповідно до навколишніх умов за допомогою електронного баласту, що являє собою імпульсний перетворювач напруги, охопленний зворотним зв'язком за вихідним струмом. Зміна зовнішньої освітленості вимагає швидкої і точної реакції системи освітлення і формування такого струму СВД, який найкращим чином забезпечить відпрацювання помилки за освітленістю. Стаття присвячена розробленню структури, функціональної схеми та програмного забезпечення прототипу комплексу, який має використовуватися для досліджень алгоритмів керування інтелектуальними драйверами СВД та аналізу динамічних процесів у замкнутій системі автоматичного керування, що містить внутрішній контур струму і зовнішній контур, який відповідає за рівень освітленості об'єкта.

**Ключові слова:** світловипромінювальний діод (СВД), електронний баласт, імпульсний перетворювач, широтно-імпульсна модуляція (ШИМ), система автоматичного керування.

*Рис.: 10. Бібл.: 12.*

Современные системы искусственного освещения строятся преимущественно на основе светоизлучающих диодов (СИД), ток протекания через которые (а следовательно, и уровень освещения объекта) стабилизируется либо регулируется в соответствии с окружающими условиями с помощью электронного балласта, представляющего собой импульсный преобразователь напряжения, охваченный обратной связью по выходному току. Изменение внешней освещенности требует быстрой и точной реакции системы освещения и формирования такого тока СИД, который наилучшим образом обеспечит отработку ошибки по освещенности. Статья посвящена разработке структуры, функциональной схемы и программного обеспечения прототипа комплекса, который будет использоваться при исследовании алгоритмов управления интеллектуальными драйверами СИД и анализе динамических процессов в замкнутой системе автоматического управления, содержащей внутренний контур тока и внешний контур, отвечающий за уровень освещенности объекта.

**Ключевые слова:** светоизлучающий диод (СИД), электронный балласт, импульсный преобразователь, широтно-импульсная модуляция (ШИМ), система автоматического регулирования.

*Рис.: 10. Библ.: 12.*

Modern artificial lighting systems are based mainly on the basis of light-emitting diodes (LEDs), flowing current through which (and therefore - and the level of illumination of the object) is stabilized or regulated in accordance with the environment via an electronic ballast, which is a pulse voltage converter covered feedback output current. Changes in the ambient light requires quick and accurate illumination system and the formation reaction of the LED current, which will provide the best illumination for practicing errors. This article is devoted to development of the structure, functional circuitry and software prototype of the complex to be used for research of intelligent LED driver control algorithms and analysis of dynamic processes in the closed automatic control system containing the inner current and external illumination loop.

**Key words:** light emitting diode (LED), electronic ballast, pulse converter, pulse-width modulation (PWM), automatic control system.

*Fig.: 10. Bibl.: 12.*