



Денисюк С. П.,
Опришко В. П.

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОГРАМ З КЕРУВАННЯ ПОПИТУ НА ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЮ ТА АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ЇХ ВИКОРИСТАННЯ

Досліджено основні системи керування, необхідні для повноцінного функціонування Smart Grid мереж. Проаналізовано особливості та інструментарій програм з керування попитом. Досліджено механізм оцінки ефективності регулювання режимами електроспоживання. Представлено спосіб кількісної оцінки різниці поточного рівня електроспоживання відносно оптимального з врахуванням контрольованого рівня неоптимального споживання.

Ключові слова: Smart Grid, керування попитом, пікове навантаження, електропостачання, енергоефективність, потужність Фризе.

1. Вступ

Однією з ключових тенденцій розвитку світової техніки є перехід до інноваційного перетворення галузі на основі нової концепції Smart Grid [1]. У сучасному розумінні Smart Grid — це мережа, яка може інтегрувати дії всіх користувачів, підключених до неї, використовує інноваційні засоби інтелектуального моніторингу, контролю, зв'язку і технології самовідновлення, тобто мережа яка вирішує питання підвищення надійності електропостачання та безвідмовності роботи систем, підвищення енергетичної ефективності та збереження навколишнього середовища [2].

Попит споживачів на електричну потужність та енергію в об'єднаній енергетичній системі України має нерівномірний характер та в результаті домінуючої тенденції з залучення значної кількості джерел розосередженої генерації, що особливо негативно впливає на формування та покриття добових графіків електричного навантаження, питання з ефективного керування режимами, попитом в контексті підтримання оптимального рівня графіку електропостачання та зменшенням втрат загострюється. Виникає необхідність в чіткому керуванні режимами електропостачання та аналізі показників, що характеризують ефективність керування даних режимів в контексті зменшення втрат та підвищенні рівня ефективності їх використання.

2. Об'єкт дослідження та його технологічний аудит

Об'єктом дослідження є енергетичне обстеження, що представляє собою одну із форм проведення державної політики у сфері енергозбереження, яка полягає в наданні допомоги підприємствам, організаціям та установам (далі — підприємствам) в підвищенні ефективності використання ними паливно-енергетичних ресурсів шляхом технічних обстежень та розробки рекомендацій по впровадженню організаційних, правових, технічних і технологічних заходів з енергозбереження, а також надання допомоги у розробці науково-обґрунтованих норм та нормативів питомих витрат паливно-енергетичних ресурсів. Енергетичне обстеження проводиться

спеціалізованими організаціями на договірних засадах за згодою керівників підприємств або за дорученням державної інспекції з енергозбереження.

Енергетичне обстеження включає [3]:

- первинне обстеження підприємства, як споживача паливно-енергетичних ресурсів (ПЕР), його основних підрозділів та технологічних процесів з використанням енергії, що передбачає проведення розрахунків енергоспоживання для кожного виду енергії та видачу рекомендацій щодо використання тих чи інших видів тарифів, аналіз витрат коштів, долі енерговитрат в собівартості продукції;
- створення карти використання ПЕР, аналіз енергоспоживання в окремих технологічних процесах, підрозділах та обладнанні;
- оцінці ефективності використання ПЕР, аналіз їх фактичних витрат і порівняння з діючими нормами та нормативами, підготовка пропозицій щодо їх зменшення;
- формування переліку шляхів та засобів економії витрат ПЕР на підприємстві;
- розробка пріоритетних заходів щодо енергозбереження (з техніко-економічним обґрунтуванням);
- оформлення технічного звіту.

Електротехнічна експертиза проводиться з метою дослідження роботи електромережі та електрообладнання, причин виникнення в них аварійних режимів тощо.

Об'єктами електротехнічної експертизи є: електрообладнання, електроприлади та їх фрагменти, електропровід, кабелі, пристрої електрозахисту (плавкі запобіжники, автоматичні вимикачі), електрокомунікуючі пристрої тощо.

Експертиза — це комплексна система заходів щодо встановлення відповідності чинному законодавству з питань енергозбереження, стандартам, нормам і нормативам енергозбереження виробничої діяльності підприємств, установ і організацій територіальних схем енергозабезпечення, інструктивно-методичних і нормативно-технічних актів, будівельних норм і правил, документації на створення та придбання нової енергоємної техніки, технологій та матеріалів, енерготехнологічної частини техніко-економічних обґрунтувань і проєктів будівництва нових та розширення діючих об'єктів і підприємств, іншої передпланової та передпроектної документації,

документів і матеріалів, що регламентують всі види діяльності у сфері енергозбереження, з метою досягнення якомога більшої ефективності використання паливно-енергетичних ресурсів, раціонального та ефективного використання усіх видів енергії за рахунок упровадження сучасних досягнень техніки і технологій у галузях суспільного виробництва [4].

Однією з ключових функціональних характеристик Smart Grid є створення наступних систем керування: організації розподілення електроенергії (DMS), керування енергоспоживання (EMS), керування даними вимірювання (MDMS), керування релейним захистом (PRC), автоматизованої системи контролю та збору даних (SCADA) та інші [5]. Для забезпечення оптимального рівня покриття та формування графіків електричного навантаження з подальшим ефективним регулюванням режимів споживання необхідно створити комплексну інтелектуальну розподільну систему керування (DEMS). Така система має включати в себе як систему енергетичного менеджменту (EMS), що стає розподіленою (D-EMS), так і систему, яка використовує дієві програми з керування попиту на електроенергію, що за кордоном отримала назву Demand Side Management (DSM).

Управління попиту (DSM) — це набір методів і стратегій, які діють, щоб вирівняти добовий графік енергоспоживання. DSM дає змогу контролювати споживачів в контексті ефективного управління системою [6].

3. Мета та задачі дослідження

Мета статті — аналіз програм DSM, формування узагальненого алгоритму функціонування програм DSM з використанням реактивної потужності Фризе як міри оцінки ефективності регулювання режимів електропостачання.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі задачі:

1. Проаналізувати сучасні тенденції використання DSM програм.
2. Виділити основні фактори впливу при побудові системи енергетичного менеджменту з використанням основного інструментарію програм DSM.
3. Поширити поняття реактивної потужності Фризе як показника неоптимальності передачі енергії.

4. Аналіз літературних даних

У мережах Smart Grid, DSM програми представлено не лише алгоритмами дій нормативно-правового характеру при регулюванні «поведінки» навантаження, а й механізмами прямого доступу до керування навантаженнями на рівні технологічних процесів [7]. Це визначає необхідність точного регулювання енергопроцесів у мережі з врахуванням вимог до якості електроенергії, надійності та стабільності електропостачання. В результаті виникає необхідність в оцінці ефективності роботи системи та врахуванні відповідних чинників, що впливають на якість електричної енергії, а саме: спотворення сигналу, пульсації струму на напруги, тощо. Для отримання бажаного рівня ефективності передачі та споживання електричної енергії та зменшення втрат, необхідно виявити чинники, які безпосередньо впливають та процеси, якими ці чинники можна ідентифікувати.

Проведений аналіз показав: сучасні DSM ґрунтуються на інтегральному підході до їх реалізації і охоплюють організаційні та технічні заходи для вирішення поставлених завдань [8–10]. При регулюванні необхідно враховувати чотири фактори «базової моделі» енергетичного менеджменту, що дозволяє включити велику кількість відновлювальних джерел енергії в локальній системі та керовані навантаження (табл. 1) [11–15].

Таблиця 1

Фактори впливу енергетичного менеджменту

№ з/п	Фактор	Особливості моделі енергетичного менеджменту
1	Пропозиція	Традиційні види генерації та відновлювальні джерела енергії
2	Попит	Домогосподарства, підприємства та офіси, та зарядні станції для електромобілів, зростання кількості яких очікується в найближчому майбутньому
3	Зберігання	Для зменшення відхилень від прогнозованого рівня попиту на електроенергію та отримання електроенергії від об'єктів акумулювання електро- та теплової енергії
4	Контроль	Функції оптимізації шляхом координації трьох факторів через підвищення надійності мережі, якості генерації, керування попиту і надійності постачання

Основний інструментарій програм DSM:

1. Зменшення пікового навантаження. Це програми спрямовані на вирівнювання графіку споживання, шляхом безпосереднього контролю навантаження, відключення обладнання споживачів або введення розосередженої генерації (РГ).
2. Заповнення провалів. Це програми, які заохочують позапікове споживання. Вони спрямована на збільшення власного споживання в зонах загального спаду споживання енергосистеми. Стимулювання споживачів зазвичай здійснюється значно нижчими тарифами.
3. Стратегії енергозбереження. Це програми для сезонного зниження споживання енергії, головним чином, за рахунок ефективного споживання енергії та зменшення втрат.
4. Побудова навантаження. Це програми для управління сезонним збільшенням споживання енергії. В їх основу покладено введення інтелектуальних системи та процесів, більш ефективного обладнання і сучасних джерел енергії для досягнення більшого рівня енергетичної ефективності.
5. Перенесення навантаження. Це програми, з переміщення навантаження з періоду найбільшого споживання в період низького споживання, не змінюючи загальне споживання. Це також можливо з включенням РГ.
6. Гнучке моделювання. Це набір дій і комплексного планування між генеруючими компаніями і споживачами, з врахуванням потреб в даний момент часу. Це партнерство з метою створення моделі обмеження потужності та об'ємів енергоспоживання, що індивідуальний споживач може використовувати в певний час, через установку пристроїв обмеження навантаження.

Для ефективного впровадження програми DSM, необхідно виконати наступні кроки [6]:

- аналіз сучасного стану ринку і перспективи його зростання в короткостроковій і довгостроковій перспективі;

- аналіз різних форм енергопостачання;
- аналіз характеристик навантаження;
- розробка та реалізація системних моделей навантаження;
- інформування споживачів та заохочення їх до участі;
- аналіз загальних витрат для участі та розвитку програми.

Для оцінки ефективності регулювання варто застосувати потужність Фризе тому, що навіть при відсутності реактивних елементів, на інтервалі регулювання T_m матиме місце співвідношення $Q_\Phi > 0$ при наявності нерівномірності протікання процесів [16].

Програми DSM дозволяють вирішити наступне коло проблем:

- 1) часткове зменшення піків;
- 2) оптимізація режимів роботи великих електростанцій;
- 3) підвищення енергоефективності.

Важливою стороною функціонування DSM є кількісна оцінка різниці поточного рівня електроспоживання відносно оптимального з врахуванням контрольованого рівня неоптимального споживання. Як один із способів такої оцінки доцільно використати потужність Фризе Q_Φ .

5. Матеріали та методи дослідження

Для досягнення поставлених цілей використовувались методи гармонічного аналізу на основі рядів Фур'є, а аналіз процесів енергообміну на основі інтегральних енергетичних характеристик.

Моделювання поведінки графіку електроспоживання під впливом факторів неоптимальності будувались за допомогою пакету програм Matlab.

6. Результати досліджень та їх обговорення

При оцінці поточного рівня електроспоживання вираз для потужності Фризе $Q_\Phi^2 = S^2 - P^2$ є фактично квадратичною мірою нев'язки між повною S та активною потужністю P . Застосування Q_Φ для оцінки нерівномірності процесів покажемо на прикладі режиму, що характеризується, діючими значеннями напруги U_i та струму I_i , $i=1, \dots, n$, T_i — тривалість i -го інтервалу, та $P=U_0 I_0$, де U_0 , I_0 — усереднені значення напруги та струму. При умові $\cos \varphi = 1$ для інтервалу $T > T_i$, де T — період електромережі, можна записати вираз для потужності Фризе Q_Φ у вигляді [17]:

$$Q_\Phi = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^n U_i^2 \frac{T_i}{T} \right) \left(\sum_{j=1}^n I_j^2 \frac{T_j}{T} \right) - U_0^2 I_0^2}. \quad (2)$$

Якщо ввести позначення $\delta_i = T_i/T$; $\sum_{i=1}^n \delta_i = 1$, то величина Q_Φ визначається із співвідношення:

$$Q_\Phi = \sqrt{\sum_{i=1}^n U_i^2 \delta_i \cdot \sum_{i=1}^n I_i^2 \delta_i - \sum_{i=1}^n (U_i I_i \delta_i)^2}. \quad (3)$$

Прийнявши значення:

$$U_2^2 = U_{1r}^2 (1 + \Delta_u)^2 (1 + k_{nu}^2), \quad (4)$$

$$U_1^2 = U_{1r}^2 (1 + k_{nu}^2), \quad (5)$$

$$I_1^2 = I_1^2 (1 + k_{ni}^2), \quad (6)$$

$$I_2^2 = I_1^2 (1 + \Delta_i)^2 (1 + k_{ni}^2), \quad (7)$$

де Δ_u , Δ_i — відхилення напруги та струму відповідно; k_{nu} , k_{ni} — коефіцієнти пульсації, отримаємо:

$$\begin{aligned} Q_\Phi = & U_1^2 (1 + \Delta_u)^2 (1 + k_{nu}^2) \cdot I_1^2 (1 + k_{ni}^2) (1 + \Delta_i)^2 \delta_2^2 \sin^2 \varphi_2 + \\ & + \delta_1 \delta_2 (U_1^2 (1 + k_{nu}^2) \cdot I_1^2 (1 + \Delta_i)^2 (1 + k_{ni}^2) + \\ & + U_1^2 (1 + \Delta_u)^2 (1 + k_{nu}^2) \cdot I_1^2 (1 + k_{ni}^2)) - \\ & - 2U_1 (1 + k_{nu}^2)^{1/2} (1 + \Delta_u) \cdot U_1 (1 + k_{ni}^2)^{1/2} \times \\ & \times I_1 (1 + \Delta_i) (1 + k_{ni}^2)^{1/2} \cdot I_1 (1 + k_{ni}^2)^{1/2} \delta_1 \delta_2 \cos \varphi_1 \cos \varphi_2. \quad (8) \end{aligned}$$

Спростивши рівняння до вигляду:

$$\begin{aligned} Q_\Phi = & U_1^2 (1 + \Delta_u)^2 (1 + k_{nu}^2) \cdot I_1^2 (1 + k_{ni}^2) (1 + \Delta_i)^2 \times \\ & \times \delta_2^2 \sin^2 \varphi_2 + 2\delta_1 \delta_2 U_1^2 I_1^2 (1 + k_{nu}^2) (1 + k_{ni}^2) \times \\ & \times (1 + \Delta_u) (1 + \Delta_i) (1 - \cos \varphi_1 \cos \varphi_2), \quad (9) \end{aligned}$$

варто виділити величину:

$$\begin{aligned} \frac{Q_\Phi}{U_1^2 I_1^2} = & (1 + \Delta_u)^2 (1 + k_{nu}^2) \cdot (1 + k_{ni}^2) (1 + \Delta_i)^2 \times \\ & \times \delta_2^2 \sin^2 \varphi_2 + 2\delta_1 \delta_2 (1 + k_{nu}^2) (1 + k_{ni}^2) (1 + \Delta_u) \times \\ & \times (1 + \Delta_i) (1 - \cos \varphi_1 \cos \varphi_2). \quad (10) \end{aligned}$$

Отримані характеристики, зображені на рис. 1, ілюструють наявність локальних екстремумів, що свідчать про наявність оптимального режиму роботи системи електропостачання.

Величина $\frac{Q_\Phi}{U_1^2 I_1^2}$ характеризує ефективність регулювання та визначає рівень неоптимальності передачі енергії з точки зору усунення її втрат.

Аналіз ефективності застосування програм DSM при проведенні моніторингу, прогнозуванні та ретроспективного аналізу вимагає створення методичного та алгоритмічного програмного забезпечення, вимагає створення програмного комплексу типу порадник диспетчера, для енергопостачальних компаній [18]. Базою нормативно-методичного забезпечення є розширення сфери застосування модифікованої реактивної потужності Фризе, процесів енергетичного обміну та сучасних програм DSM для місцевих енергопостачальних компаній (локальних, районних, обласних).

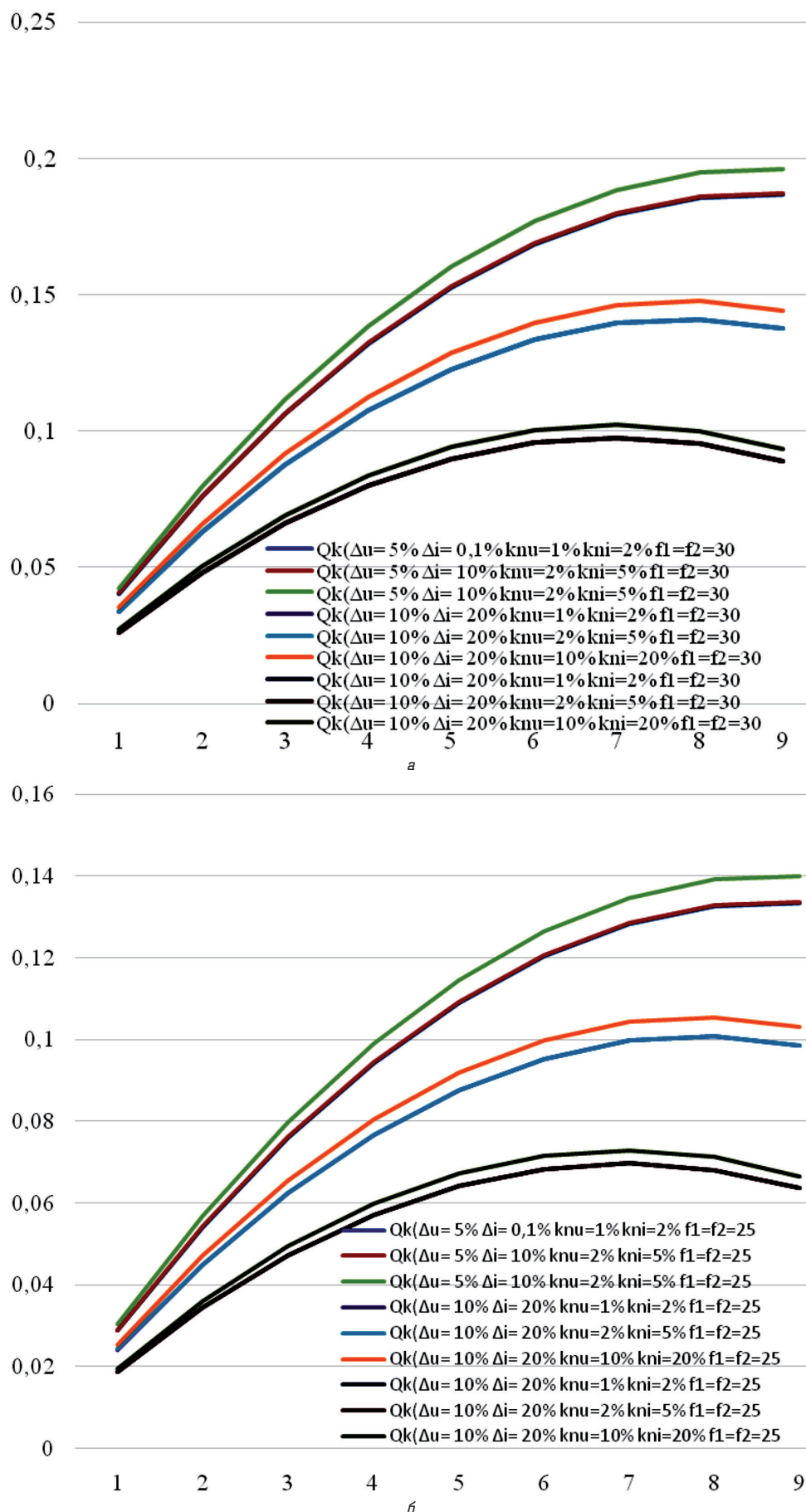


Рис. 1. Вплив показників неоптимальності Δ_i , Δ_u , k_{nu} , k_{ni} на загальну форму графіку електропостачання: а — $f_1 = f_2 = 30$; б — $f_1 = f_2 = 25$

7. Висновки

У результаті проведених досліджень:

1. Проаналізовано основний інструментарій програм DSM у вигляді шести основних положень: зменшення пікового навантаження, заповнення провалів, стратегії енергозбереження та енергоефективності, побудова навантаження, перенесення навантаження та гнучке моделювання.

2. Виділено основні чотири фактори впливу при побудові системи енергетичного менеджменту, а саме: попит, пропозиція, контроль та зберігання. Наведено особливості побудови системи DSM відповідно до рівня інтеграції системи енергетичного менеджменту.

3. Поширено поняття реактивної потужності Фризе Q_F на довільний технологічний інтервал електропостачальної компанії. Отримано співвідношення для оцінки оптимальності процесів з врахуванням відхилень напруги та струму, та коефіцієнтів їх пульсації для прогнозування та проведення ретроспективного аналізу.

Література

- Wade, H. Introduction to Demand Side Management [Text]: Workshop Republic of Palau / H. Wade. — Republic of Palau, 2010. — P. 381–388.
- Smart Power Grids – Talking about a Revolution [Electronic resource] // IEEE Emerging Technology Portal. — 2009. — Available at: \www/URL: https://www.ieee.org/about/technologies/emerging/emerging_tech_smart_grids.pdf
- Ming Zhou. Study on improvement of available transfer capability by Demand Side Management [Text] / Ming Zhou, Yajing Gao, Gengyin Li // 2008 Third International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies. — Institute of Electrical & Electronics Engineers (IEEE), 2008. — P. 545–550. doi:10.1109/drpt.2008.4523466
- Про затвердження Інструкції про порядок передачі документації та здійснення державної експертизи з енергозбереження на виконання п.4 постанови Кабінету Міністрів від 15 липня 1998 р. N 1094 [Електронний ресурс]: Наказ Держком-енергозбереження від 09.03.1999 № 15. — Режим доступу: \www/URL: <http://zakon0.rada.gov.ua/laws/show/z0292-99>
- Gellings, C. W. Demand-Side Management: Concepts and Methods [Text] / C. W. Gellings, J. H. Chamberling. — PennWell, 1993. — 451 p.
- Palensky, P. Demand Side Management: Demand Response, Intelligent Energy Systems, and Smart Loads [Text] / P. Palensky, D. Dietrich // IEEE Transactions on Industrial Informatics. — 2011. — Vol. 7, № 3. — P. 381–388. doi:10.1109/tii.2011.2158841
- Лір, В. Економічні механізми управління попитом на ринку електроенергії [Текст] / В. Лір, О. Биконя // Економіст. — 2015. — № 2. — С. 9–13.
- Rahman, S. An efficient load model for analyzing demand side management impacts [Text] / S. Rahman, Rinaldy // IEEE Transactions on Power Systems. — 1993. — Vol. 8, № 3. — P. 1219–1226. doi:10.1109/59.260874
- Yang, H. System dynamics model for demand side management [Text] / H. Yang, Y. Zhang, X. Tong // 2006 3rd International Conference on Electrical and Electronics Engineering. — Institute of Electrical & Electronics Engineers (IEEE), 2006. — P. 1–4. doi:10.1109/icsee.2006.251854
- Gabalton, A. Assessment and simulation of demand-side management potential in urban power distribution networks [Electronic resource] / A. Gabalton, A. Molina, C. Roldan, J. Fuentes, E. Gomez, I. Ramirez-Rosado, P. Lara, J. Dominguez, E. Garcia-Garrido, E. Tarancon // IEEE Bologna Power Tech Conference Proceedings. — Institute of Electrical & Electronics Engineers (IEEE), 2003. — Available at: \www/URL: <http://dx.doi.org/10.1109/ptc.2003.1304784>
- Mohsenian-Rad, A. Autonomous demand-side management based on game-theoretic energy consumption scheduling for the future smart grid [Text] / A. Mohsenian-Rad, V. Wong, J. Jatskevich, R. Schober, A. Leon-Garcia // IEEE Transactions on Smart Grid. — Vol. 1, № 3. — P. 320–331. doi:10.1109/tsg.2010.2089069
- Boshell, F. Review of developed demand side management programs including different concepts and their results [Text] / F. Boshell, O. Veloza // 2008 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America. — Institute of Electrical & Electronics Engineers (IEEE), 2008. — P. 1–7. doi:10.1109/tde-la.2008.4641792
- De Ridder, F. Four potential business cases for demand side integration [Text] / F. De Ridder, M. Hommelberg, E. Peeters // 2009 6th International Conference on the European Energy Market. — Institute of Electrical & Electronics Engineers (IEEE), 2009. — P. 1–6. doi:10.1109/eem.2009.5207197
- Stadler, M. Integral resource optimization networks and their techno-economic constraints [Text] / M. Stadler, P. Palensky, B. Lorenz, M. Weihs, C. Roesener // International Journal of Distributed Energy Resources. — 2005. — Vol. 1, № 4. — P. 299–319.
- Saffre, F. Demand-Side Management for the Smart Grid [Text] / F. Saffre, R. Gedge // 2010 IEEE/IFIP Network Operations and Management Symposium Workshops. — Institute of Electrical & Electronics Engineers (IEEE), 2010. — P. 300–303. doi:10.1109/nomsw.2010.5486558
- Жуйков, В. Я. Энергетичні процеси в електричних колах з ключовими елементами [Текст] / В. Я. Жуйков, С. П. Денисюк. — К.: ТЕКСТ, 2010. — 264 с.
- Тонкаль, В. Е. Баланс енергій в електричних цепях [Текст] / В. Е. Тонкаль, А. В. Новосельцев, С. П. Денисюк. — К.: Наукова думка, 1992. — 312 с.
- Опришко, В. П. Особливості інтеграції основних програм і методів з керування попитом споживання електроенергії [Текст]: зб. тез. / В. П. Опришко // Міжнародна науково-технічна та навчально-методична конференція «Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку – PEMS'16», 30 травня – 01 червня 2016 р. — Київ: НТУУ «КПІ», 2016. — С. 88–90.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОГРАММ С УПРАВЛЕНИЯ СПРОСА НА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЮ И АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

Исследованы основные системы управления, которые необходимы для полноценного функционирования Smart Grid сетей. Проанализированы особенности и инструментарий программ по управлению спросом. Исследован механизм оценки эффективности регулирования режимов электропотребления. Представлен способ количественной оценки разницы текущего уровня электропотребления относительно оптимального с учетом контролируемого уровня неоптимального потребления.

Ключевые слова: Smart Grid, управления спросом, пиковая нагрузка, электроснабжения, энергоэффективность, мощность Фризе.

Денисюк Сергій Петрович, доктор технічних наук, професор, кафедра електропостачання, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Україна.
Опришко Віталій Павлович, аспірант, кафедра електропостачання, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Україна, e-mail: livestrongtm@gmail.com.

Денисюк Сергей Петрович, доктор технических наук, профессор, кафедра электроснабжения, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», Украина.

Опришко Виталий Павлович, аспирант, кафедра электроснабжения, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», Украина.

Denysiuk Sergii, National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Ukraine.

Opryshko Vitalii, National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Ukraine, e-mail: livestrongtm@gmail.com.