

Лежнюк П.Д.

д.т.н., професор,
Вінницький національний технічний університет,
завідувач кафедри електричних станцій і систем
Вінниця, Україна
lpd@inbox.ru

Комар В.О.

к.т.н., доцент,
Вінницький національний технічний університет,
доцент кафедри електричних станцій і систем
Вінниця, Україна
kvo76@mail.ru

Кравчук С.В.

Вінницький національний технічний університет,
аспірант кафедри електричних станцій і систем
Вінниця, Україна
w1_1992@mail.ru

УЗГОДЖЕННЯ ГРАФІКІВ ГЕНЕРУВАННЯ ВІДНОВЛЮВАЛЬНИХ ДЖЕРЕЛ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ТА НАВАНТАЖЕННЯ ЗАСОБАМИ МОРФОМЕТРИЧНОГО АНАЛІЗУ

Анотація. У статті розглянуто можливість узгодження графіків навантаження та генерування відновлювальних джерел електроенергії засобами морфометричного аналізу. Показано, що неузгоджене з графіком навантаження генерування відновлювальних джерел електроенергії збільшує нерівномірність графіка електричних навантажень.

Оскільки відновлювальні джерела електроенергії відносяться до умовно-керованих джерел енергії, то узгодження їх роботи з навантаженням буде відбуватися за рахунок зміщення графіка електричних навантажень до максимумів добового генерування відновлювальних джерел електроенергії, зокрема сонячних електростанцій. Для узгодження графіків електричних навантажень та генерування відновлюваних джерел енергії запропоновано використання засобів морфометричного аналізу.

Проведений аналіз основних морфометричних показників графіків навантаження та генерування відновлювальних джерел електроенергії, а саме округлості, компактності, видовження та випуклості. З урахуванням інтегральних характеристик цих показників можна більш точно обґрунтувати доцільність вирівнювання графіка електричних навантажень та узгодження з графіком генерування відновлювальних джерел електроенергії.

Для цього розроблено програмний комплекс, що дозволяє отримати основні морфометричні показники для графіків навантаження та генерування.

Ключові слова: відновлювальні джерела електроенергії, нерівномірність графіка навантаження, морфометричний аналіз, узгодження графіків генерування та навантаження

Формул: 7, рис.: 7, табл.: 2, бібл.: 11

Petro Lezhniuk

Doctor of Science (Engineering), Professor,
Vinnitsa National Technical University,
Head of Electric Stations and Systems
Vinnitsa, Ukraine
lpd@inbox.ru

Vyacheslav Komar

PhD (Engineering), Associate Professor,
Vinnitsa National Technical University,
Associate Professor of electrical plants and systems
Vinnitsa, Ukraine
kvo76@mail.ru

Sergiy Kravchuk

Vinnitsa National Technical University,
PhD Student at Department of power plants and systems
Vinnitsa, Ukraine
w1_1992@mail.ru

RECONCILIATION OF GENERATION GRAPHICS OF RENEWABLE ENERGY SOURCES AND LOAD WITH HELP OF MORPHOMETRIC ANALYSIS

Abstract. The article considers the possibility of reconciliation graphics of the load and generation of renewable source of energy with the help of morphometric analysis. It is shown that inconciliation between the graphics of the load and generating of renewable sources of energy increases the irregularity of the graphics of the electrical loads.

As renewable energy sources belong to conventionally driven energy sources the reconciliation of their work with the load will be organized by the moving of the graphics of the electrical loads to a maximum daily generation of renewable energy sources particularly solar power plants. As the matter of reconciliation graphics of the electrical loads and generation of renewable sources of energy morphometric analysis has been proposed.

The main morphometric parameters of the graphics of the load and generation of renewable source of energy such as roundness, compactness, convexity and elongation have been analysed. According to the integral characteristics of these indicators we were able to prove the appropriateness of levelling of the graphic of electrical loads and reconciliation of the graphics of generating of the renewable sources of energy.

A special software package has been created for that purpose. The software provides main morphometric parameters for the graphics of the load and generation.

Keywords: renewable electricity uneven load demand, morphometric analysis, coordination of schedules generation and load

Formulas: 7, fig.: 7, tabl.: 2, bibl.: 11

Вступ. На сьогоднішній день у багатьох розвинених країнах світу гостро стоїть питання дефіциту генерувальних потужностей [Agarwal, Weng, Kurta 2011]. Таку нестачу частково можна компенсувати за допомогою

приєднання до електричних мереж (ЕМ) відновлювальних джерел електроенергії (ВДЕ) – джерел електричної енергії, з'єднаних безпосередньо з розподільною електричною мережею або підключених до неї з боку споживачів електричної енергії [Лежнюк, Гунько, Рубаненко 2016].

Аналіз досліджень та постановка задачі. Отримати максимально корисний ефект від функціонування ВДЕ можна за рахунок узгодження графіків генерування та навантаження. Таке узгодження дозволить підвищити енергозабезпеченість споживача [Лежнюк, Комар, Собчук 2014] та зменшити добову нерівномірність графіка електричних навантажень (ГЕН).

Добова нерівномірність навантаження негативно впливає на процес виробництва, передачі та розподілу електричної енергії [Коменда, Коменда 2011]. Вирівнювання графіка навантаження є складним процесом, що потребує змін у технологічному процесі споживачів електричної енергії. Тому, вирівнювання ГЕН повинно бути детально обґрунтовано. В [Коменда 2012] показано, що використання морфометричного апарату для аналізу нерівномірності має ряд переваг і дозволяє здійснити комплексну і детальну оцінку форми ГЕН. В роботах [Коменда 2010, Коменда 2011] для аналізу нерівномірності графіка навантаження пропонується ввести морфометричні показники, що характеризують форму та нерівномірність ГЕН.

В основі застосування морфометричного аналізу лежить перехід від декартової (рис.1 а) до полярної системи координат (рис. 1 б) [Santiago, Costley, Ainsworth 2011]. Таким чином, метою дослідження є формалізація нерівномірності ГЕН із застосуванням морфометричного аналізу, що дає можливість більш ґрунтовно охарактеризувати нерівномірність ГЕН, на відміну від класичних показників, що описують характер нерівномірності ГЕН (дисперсія, коефіцієнт форми, коефіцієнт заповнення, коефіцієнт нерівномірності ГЕН). Детальний аналіз ГЕН дає можливість покращити роботу ВДЕ в задачі покриття заданого графіка навантаження в межах балансової належності споживача [Lezhniuk, Komar, Sobchuk 2014] та, як наслідок, зменшити нерівномірність ГЕН мережі. В результаті матимемо зниження втрат електроенергії та покращання її якості.

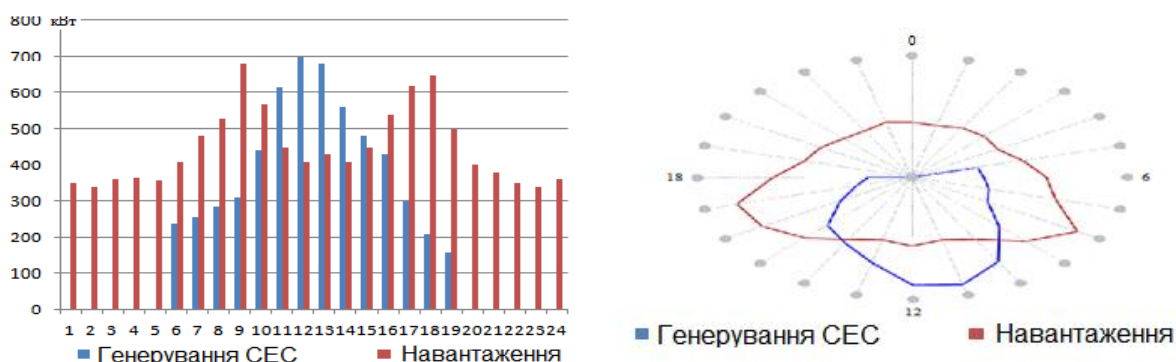


Рисунок 1 – Графік електричних навантажень та генерування СЕС, а) в декартовій системі координат, б) в полярній системі координат
Джерело: побудовано за власними дослідженнями

Результати дослідження. Так як графік навантаження нерівномірний (рис. 1 а), тобто наявні піки/напівпіки навантаження, відповідно центри ваги фігур на діаграмі (рис. 1 б) не співпадають. Для визначення центру ваги фігур скористаємося формулами:

$$\left\{ \begin{array}{l} x_{\text{ц}} = \frac{\sum_{i=1}^{24} \frac{x_{i+1} + x_i}{2} \sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2}}{\sum_{i=1}^{24} \sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2}}; \\ y_{\text{ц}} = \frac{\sum_{i=1}^{24} \frac{y_{i+1} + y_i}{2} \sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2}}{\sum_{i=1}^{24} \sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2}}. \end{array} \right. \quad (1)$$

Відстань від початку координат x_0, y_0 до центру ваги фігури $x_{\text{ц}}, y_{\text{ц}}$ (рис.2 а), буде характеризувати нерівномірність графіка навантаження d :

$$d = \sqrt{(x_0 - x_{\text{ц}})^2 + (y_0 - y_{\text{ц}})^2}, \quad (2)$$

де x_0, y_0 – центр координат, $x_{\text{ц}}, y_{\text{ц}}$ – координати зміщення центру ваги ГЕН відносно центру координат .

А нерівномірність графіків генерування ВДЕ та навантаженням (рис. 2 б) , буде характеризуватись відстанню між центрами ваги двох фігур $d_{\text{н}}$:

$$d_{\text{н}} = \sqrt{(x_{\text{ц}} - x_{\text{цВДЕ}})^2 + (y_{\text{ц}} - y_{\text{цВДЕ}})^2}, \quad (3)$$

де $x_{\text{цВДЕ}}, y_{\text{цВДЕ}}$ – координати зміщення центру ваги фігури, що описує генерування ВДЕ відносно $x_{\text{ц}}, y_{\text{ц}}$

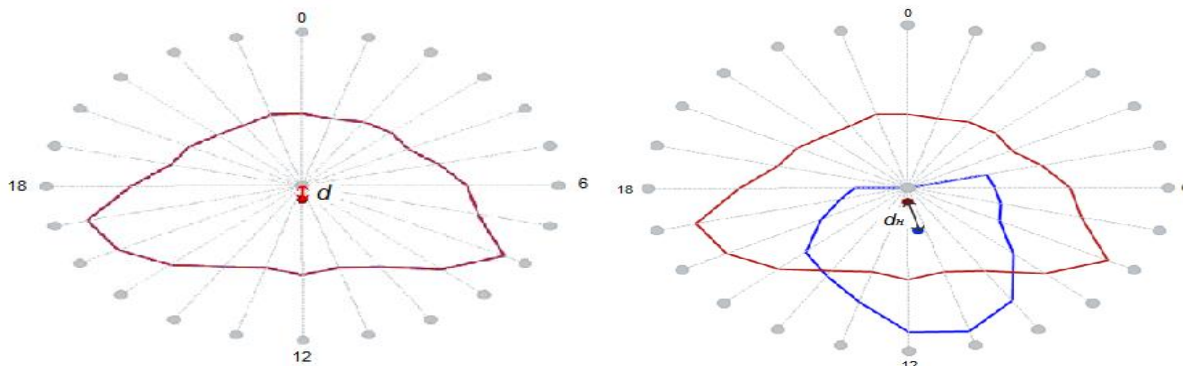


Рисунок 2 – а) нерівномірність ГЕН, б) нерівномірність ГЕН та графіка генерування ВДЕ

Джерело: побудовано за власними дослідженнями

Для узгодження графіків генерування та навантаження, скористаємося класичними морфометричними параметрами.

У відповідності з визначеннями [Коменда, Коменда, Давиденко 2016] округлість (M_1) – оцінює співвідношення між мінімальним та максимальним навантаженням (рис. 3), характеризуючи екстремуми процесу добового споживання електричної енергії та динаміку зміни навантаження. Визначається як відношення між радіусами вписаного та описаного кіл:

$$M_1 = \frac{R_{\text{min}}}{R_{\text{max}}}, \quad (4)$$

де R_{min} – радіус вписаного кола, R_{max} – радіус описаного кола.

Компактність (M_2) – оцінює співвідношення величини споживання електричної енергії, яке було б, якби споживач працював тільки з заданими максимальними навантаженнями, до реальної величини споживання електроенергії, тобто характеризує недозавантаженість електропередавального обладнання.

Визначається як відношення між площею фігури (рис.2 а) і квадратом її периметра:

$$M_2 = \frac{4 \cdot \pi \cdot S}{\Pi^2}, \quad (5)$$

де $S = \frac{1}{2} \left| \sum_{i=1}^{23} (x_i + x_{i+1}) \cdot (y_i - y_{i+1}) \right|$ - площа фігури графіка навантаження в полярній системі координат, $\Pi = \sum_i d_i = \sum_i \sqrt{(x_i - x_{i+1})^2 + (y_i - y_{i+1})^2}$ - периметр фігури графіка навантаження, визначається як сума довжин відрізків фігури ГЕН.

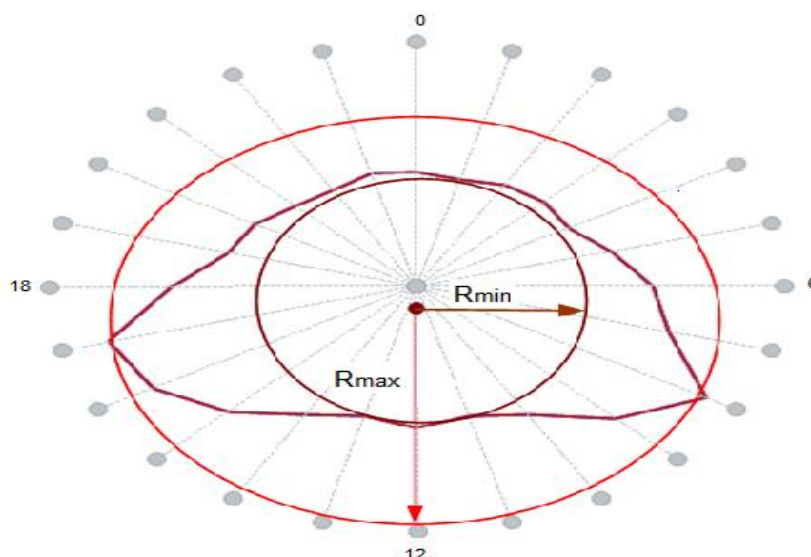


Рисунок 3 – Графічне зображення визначення M_1

Джерело: побудовано за власними дослідженнями

Видовження (M_3) – оцінює співвідношення між навантаженням у нічний провал/напівпік та піковим навантаженням (рис.4), характеризуючи співвідношення дешевої та дорогої спожитої електроенергії (відповідно до диференційованого тарифу). Визначається як відношення між значенням довжини перпендикуляра до головної осі діаграми (L_2) та значенням довжини головної осі діаграми (L_1):

$$M_3 = \frac{L_2}{L_1}, \quad (6)$$

Випуклість (M_4) – характеризує загальну добову нерівномірність графіка навантаження, динаміку і величину зміни значень навантажень. Визначається як відношення площі фігури (рис. 2 а) до площі кола, яке б описувало рівномірний ГЕН.

$$M_4 = \frac{S_B}{S}, \quad (7)$$

де S – площа фігури ГЕН, а $S_B = \pi R^2$ – площа кола, радіус якого дорівнює середньому значенню навантаження.

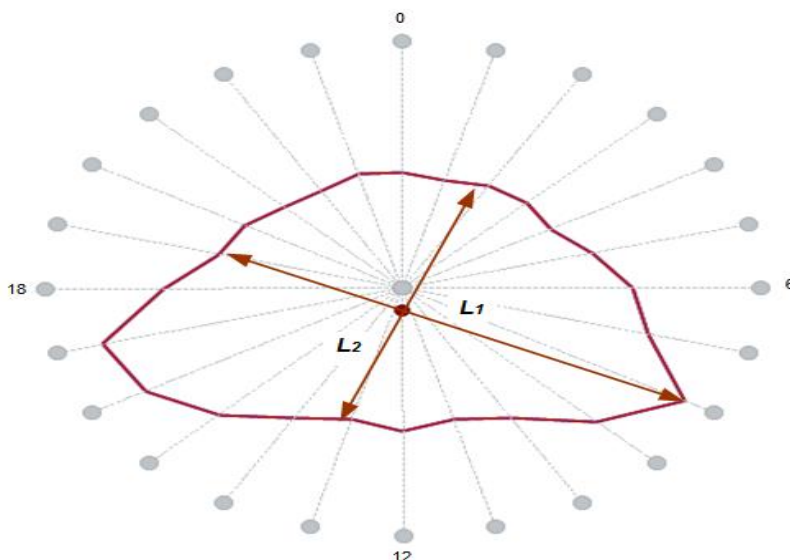


Рисунок 4 – Графічне зображення видовження ГЕН

Джерело: побудовано за власними дослідженнями

Таким чином морфометричні параметри M_1, M_2, M_3, M_4 , доцільно використовувати для аналізу нерівномірності ГЕН, враховуючи що їх значення лежить в межах від 0 до 1. Якщо вони прямують до нуля, тоді нерівномірність ГЕН є значного, з наближенням їх до одиниці ГЕН є рівномірним.

В якості прикладу розглянемо схему електричної мережі з двохстороннім живленням (рис.5). Живлення здійснюється централізовано від енергосистеми (ЦЖ) та від сонячної електростанції (СЕС) [Chowdhury 2003]. Встановлена потужність СЕС співрозмірна з сумарним навантаженням ЕМ.

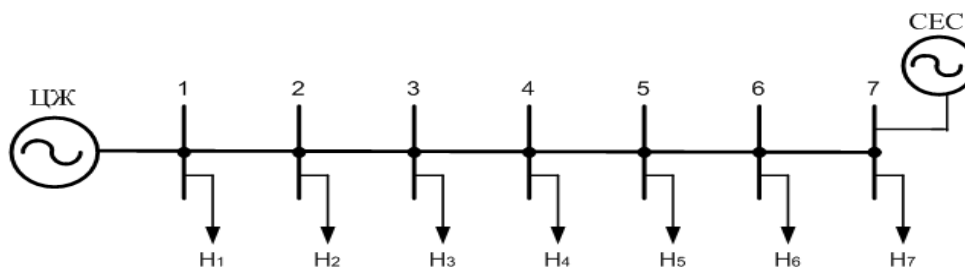


Рисунок 5 – Схема мережі з двохстороннім живленням

Джерело: побудовано за власними дослідженнями

Для визначення та оцінки морфометричних параметрів було розроблено програмний комплекс, що дозволяє проаналізувати сумарний добовий графік споживачів в межах балансової належності ЕМ та джерел генерування, зокрема ВДЕ.

Сумарний добовий графік навантаження ЕМ (рис. 5) – нерівномірний (рис. 6 а), неузгоджене з ГЕН генерування СЕС таку нерівномірність тільки збільшує (рис. 6 б).

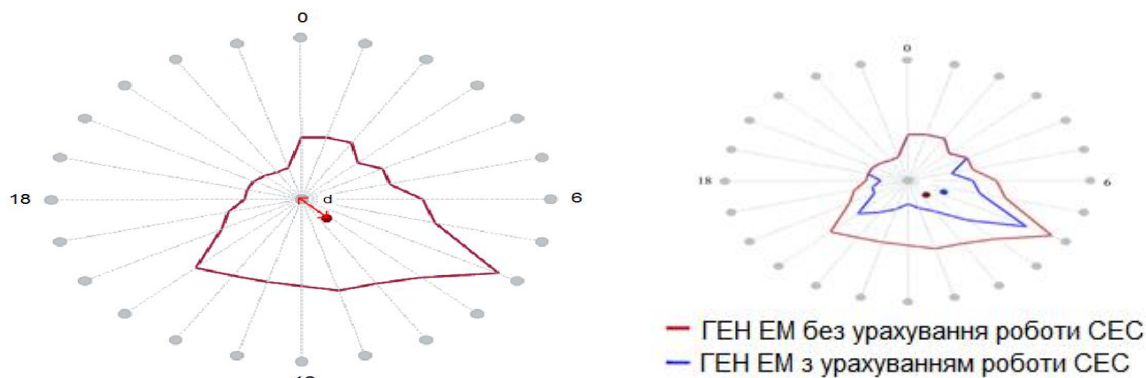


Рисунок 6 – а) Нерівномірність ГЕН ЕМ, б) нерівномірність ГЕН ЕМ з урахуванням роботи СЕС

Джерело: побудовано за власними дослідженнями

Результат проведення морфометричного аналізу ГЕН приведений до таблиці 1.

Таблиця 1 – Морфометричні показники нерівномірності ГЕН ЕМ

Наявність генерування СЕС	M_1	M_2	M_3	M_4
Без урахування генерування СЕС	0,4328	0,657	0,694	0,585
З урахуванням генерування СЕС	0,2637	0,448	0,551	0,421

Джерело: побудовано за власними дослідженнями

Таким чином, загальний вплив генерування СЕС на нерівномірність ГЕН – негативний, тому виникає питання узгодження графіків генерування ВДЕ та навантаження. В ідеальних умовах, бажано отримати повністю рівномірний графік навантаження, який буде описуватись колом, центр ваги якого буде співпадати з центром початку координат, тобто повністю узгодити генерування СЕС з навантаженням [Kondo, Jumpei, Akihiko 2008]. Але через складність технологічного процесу та обмежену можливість щодо маневрування власним споживанням мову доцільно вести лише про наближення графіка навантаження до рівномірного.

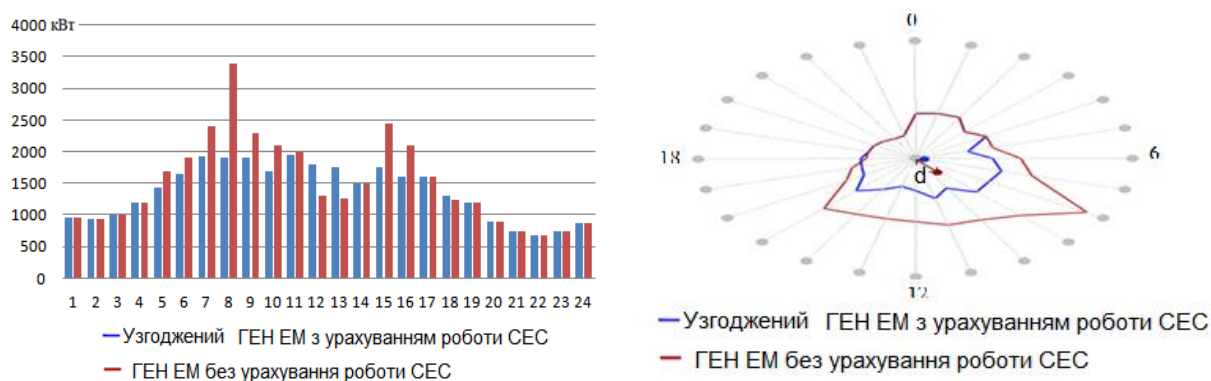


Рисунок 7 – а) Графічне зображення ГЕН до та після регулювання в декартовій системі координат б) Графічне зображення нерівномірності ГЕН ЕМ до та після регулювання навантаженням в полярній системі координат.

Джерело: побудовано за власними дослідженнями

Задіявши споживача-регулятора(СР), на основні морфометричних показників ГЕН виконуємо зміщення максимумів його навантаження та вирівнюємо ГЕН електричної мережі з урахуванням генерування ВДЕ (рис. 7). Центр ваги фігури, що описує вирівняний ГЕН з урахуванням функціонування ВДЕ (рис. 7), майже співпадає з центром початку координат x_0, y_0 , це означає нерівномірність такого графіку досить не велика, про що свідчать морфометричні показники (табл.2).

Таблиця 2 – Морфометричні показники ГЕН з урахуванням узгодження ГЕН з графіком генерування ВДЕ.

Наявність генерування СЕС	M_1	M_2	M_3	M_4
Без урахування генерування СЕС	0,4328	0,657	0,694	0,585
З урахуванням генерування СЕС	0,2637	0,448	0,551	0,421
Узгоджений ГЕН з генеруванням ВДЕ	0,574	0,71	0,85	0,89

Джерело: побудовано за власними дослідженнями

Висновки. Для аналізу та оцінювання впливу відновлюваних джерел енергії на сумарний графік навантаження електричної мережі можливо і доцільно використовувати морфометричні показники нерівномірності ГЕН. Перевага таких показників під час аналізу нерівномірності графіків навантаження полягає в їх інтегральності. З урахуванням інтегральних характеристик морфометричних показників можна більш точно обґрунтувати вирівнювання ГЕН та узгодження з графіком генерування ВДЕ.

Розроблено програмний комплекс, що дозволяє визначити морфометричні показники для аналізу нерівномірності ГЕН. На основі цих показників пропонується проводити узгодження графіків генерування ВДЕ та навантаження.

Література

- Коменда, Н. В. (2010). Морфометрична оцінка та критерій рівномірності графіка електричних навантажень / Н. В. Коменда // *Вісник національного університету «Львівська політехніка»*, №666. – С. 42–46.
- Коменда, Т. І. (2016). Округлість, компактність та видовженість графіків електричного навантаження / Т. І. Коменда, Н. В. Коменда, Л. В. Давиденко // *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, №2. – С. 98–105.
- Коменда, Н. В. (2010). Пошук споживачів-регуляторів на основі морфометричного підходу при управлінні добовим навантаженням промислового підприємства / Н.В. Коменда, Т.І. Коменда, О.Д. Демов // *Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України*, №27. – С. 22–26.
- Лежнюк, П. Д. (2014). Определение оптимальной установленной мощности возобновляемых источников энергии в распределительной сети по критерию минимума потерь активной мощности [Текст] / П. Д. Лежнюк, В. О. Комар, Д. С. Собчук // *Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Електротехніка та енергетика*, № 1(16). – С. 130 –136. – ISSN 2074-2630.
- Лежнюк, П. Д. (2016). Оптимізація секціонування в локальних електричних системах за критерієм втрат електричної потужності з урахуванням

- відмов [Текст] / П.Д. Лежнюк, І.О. Гунько, О.Є. Рубаненко // *Техніка, енергетика, транспорт АПК, №2 (94)*. – С. 74-81.
- Agarwal, Y. (2011). Understanding the role of buildings in a smart microgrid / Y. Agarwal, T. Weng, R. Kupta // *2011 Design, Automation & Test in Europe*. P. 1-6. – doi:10.1109/DATE.2011.5763195.
- Chowdhury, A. (2003). Reliability Modeling of Distributed Generation in Conventional Distribution Systems Planning and Analysis / A. Chowdhury // *IEEE Transactions on Industry Application, Vol.39, No.5*. – P. 1493-1498. – doi:10.1109/TIA.2003.816554.
- Komenda, T. (2012). Morphometrical analysis of daily load graphs/ T. Komenda, N. Komenda // *International Journal of Electrical Power and Energy Systems. Volume 42, Issue 1, November 2012*. – P.721-727. <http://dx.doi.org/10.1016/j.bbr.2011.03.031>.
- Kondo, T. (2008). Voltage control of distribution network with a large penetration of photovoltaic generations using facts devices / Kondo T., Jumpei B., Akihiko Y. // *Electrical Engineering in Japan, Vol. 165, № 3*. – P. 16-28. – doi:10.1002/eej.20499.
- Lezhniuk, P. D. (2014). Method for determination of optimal installed capacity of renewable sources of energy by the criterion of minimum losses of active power in distribution system / P. D. Lezhniuk, V. A. Komar, D. S. Sobchuk // *Energy and Power Engineering, Vol. 6, No.3*. – P. 37-46. – doi:10.4236/epe.2014.63005.
- Santiago, G. (2011). Prosumer-based control architecture for the future electricity grid / G. Santiago, M. Costley, N. Ainsworth // *IEEE International Conference on Control Applications (CCA) No. 1*. – P. 43-48. – doi:10.1109/CCA.2011.6044467.

References

- Agarwal, Y. (2011). Understanding the role of buildings in a smart microgrid / Y. Agarwal, T. Weng, R. Kupta // *2011 Design, Automation & Test in Europe*. P. 1-6. – doi:10.1109/DATE.2011.5763195.
- Chowdhury, A. (2003). Reliability Modeling of Distributed Generation in Conventional Distribution Systems Planning and Analysis / A. Chowdhury // *IEEE Transactions on Industry Application, Vol.39, No.5*. – P. 1493-1498. – doi:10.1109/TIA.2003.816554.
- Komenda, T. (2012). Morphometrical analysis of daily load graphs/ T. Komenda, N. Komenda // *International Journal of Electrical Power and Energy Systems. Volume 42, Issue 1, November 2012*. – P.721-727. <http://dx.doi.org/10.1016/j.bbr.2011.03.031>.
- Komenda, N. V. (2010). Morfometrichna otsinka that kriteriy rivnomirnosti grafika elektrichnih navantazhen / N.V. Komenda // *Visn. nat. the University "Lviv politehnika", №666*. – S. 42-46.
- Kondo, T. (2008). Voltage control of distribution network with a large penetration of photovoltaic generations using facts devices / Kondo T., Jumpei B., Akihiko Y. // *Electrical Engineering in Japan, Vol. 165, № 3*. – P. 16-28. – doi:10.1002/eej.20499.
- Komenda, N. V. (2010). Poshuk spozhivachiv-regulyatoriv on osnovi morfometrichnogo pidhodu at upravlinni Dobova navantazhennyam Promyslova pidpriemstva / N.V. Komenda, T.I. Komenda, O.D Demov //

- Pratsi Institutu elektrodinamiki Natsionalnoy Akademii Nauk Ukraine, №27.*
- S. 22-26.
- Kondo, T. (2008). Voltage control of distribution network with a large penetration of photovoltaic generations using facts devices / Jumpei Baba, Akihiko Yokoyama // *Electrical Engineering in Japan, Vol. 165, № 3.* – P. 16-28. – doi:10.1002/eej.20499
- Lezhniuk, P. D. (2014). Determining the optimal installed capacity of renewable energy sources in the distribution network on the criterion of minimum active power losses [Text] / P.D. Lezhniuk, V.O. Komar, D.S. Sobchuk // *Naukovi pratsi of Donetsk natsionalnogo tehnicnogo universitetu. Seriya: Elektrotehnika she Energetics, № 1 (16).* S. 130 -136. - ISSN 2074-2630.
- Lezhniuk, P. D. (2016). Optimizatsiya sektsionuvannya in the local systems for elektrichnih kriteriem vtrat elektrichnoï potuzhnosti s urahuvannyam vidmov [Text] / P.D. Lezhniuk, I.O. Gunko, O.E. Rubanenko // *Tehnika, Energy, Agribusiness transport, №2 (94).* P. 74-81.
- Lezhniuk, P. D. (2014). Method for determination of optimal installed capacity of renewable sources of energy by the criterion of minimum losses of active power in distribution system / P. D. Lezhniuk, V. A. Komar, D. S. Sobchuk // *Energy and Power Engineering, Vol. 6, No.3.* – P. 37-46. – doi:10.4236/epe.2014.63005.
- Santiago, G. (2011). Prosumer-based control architecture for the future electricity grid / G. Santiago, M. Costley, N. Ainsworth // *IEEE International Conference on Control Applications (CCA) No. 1.* – P. 43-48. – doi:10.1109/CCA.2011.6044467.

Data przesłania artykułu do Redakcji: 03.08.2016
Data akceptacji artykułu przez Redakcję: 11.08.2016