ЕНЕРГЕТИКА ТА ЕЛЕКТРОТЕХНІКА

УДК 621.316.13

Л. Б. Терешкевич[1]
О. О. Хоменко[1]
І. О. Бандура[2]

ВНУТРІШНЄ СИМЕТРУВАННЯ ОДНОФАЗНИХ ЕЛЕКТРОПРИЙМАЧІВ ТА ВИРІВНЮВАННЯ ЇХ ГРУПОВОГО ГРАФІКА НАВАНТАЖЕНЬ

[1]Вінницький національний технічний університет
[2]Луцький національний технічний університет

Досліджено впливи рішень із зсуву індивідуальних графіків однофазних навантажень на формування групового графіка навантажень і на несиметрію електричного режиму і розроблені рекомендації, які враховують взаємозв'язки між зазначеними задачами.

Ключові слова: внутрішнє симетрування, вирівнювання графіка навантажень, несиметрія напруги.

Вступ

Серед задач оптимізації режимів електроспоживання актуальними є задачі вирівнювання групового графіка навантажень (ГГН) та їх симетрування.

Вирівнювання ГГН можна здійснювати способом зміни порядку вмикання окремих електроприймачів (в тому числі і несиметричного виконання), що працюють в групі, яка живиться від одного вузла мережі (взаємним зсувом в часі). Якщо це не супроводжується зміною форми індивідуальних графіків навантажень (ІГН), які визначаються технологією виробництва, та кількості технологічних циклів на певному інтервалі часу (наприклад, доба), то зазначений спосіб не позначається на якості продукції і не впливає на обсяги її виробництва. Кінцевим наслідком такого заходу є зменшення максимуму потужності та втрат електроенергії в мережі.

Оскільки зазначений спосіб не пов'язаний зі збитками та не потребує додаткових капітальних вкладень, то отриманий внаслідок його реалізації ГГН може бути взятим за основу для розробок подальших заходів із зниження максимуму навантажень [1]. Отриманий в результаті графік буде характеризуватись мінімальними втратами активної енергії на її передачу.

Шляхом зсуву ІГН однофазних електроприймачів (ОЕ) можна здійснювати також і симетрування струмів. Зсуви ІГН, які здійснюються з метою симетрування електричних навантажень, та оптимальний розподіл ОЕ між фазами електричної мережі можна віднести до групи способів, що об'єднані спільною назвою — внутрішнє симетрування навантажень.

Методи вирівнювання циклічних ГГН розроблені в [1]. За критерій ефективності використана дисперсія потужності ГГН. Питання зменшення нерівномірності ГГН, що формується групою нециклічних графіків за умови забезпечення планового завдання, вирішені в [2]. Знайдені розв'язки забезпечують мінімум середньої активної потужності ГГН на інтервалах часу контрольованого системного максимуму. Вирівнювання ГГН методами імітаційного моделювання запропоновано в [3].

Зсуви графіків навантажень окремих ОЕ, які здійснюються з метою симетрування електричних режимів, можна розрахувати за методом, запропонованим в [4].

Залишаються не вивченими взаємозв'язки між задачами вирівнювання ГГН та симетрування електричного режиму шляхом зсуву ІГН ОЕ, що не дозволяє приймати ефективні рішення з оптимізації режимів електроспоживання.

© Л. Б. Терешкевич, О. О. Хоменко, І. О. Бандура, 2018

Мета роботи — розробка рекомендацій щодо вирівнювання ГГН та симетрування електричного режиму шляхом зсуву ІГН ОЕ.

Для формулювання рекомендацій необхідно дослідити:

– впливи рішень зі зсуву ІГН, які розраховані з метою вирівнювання ГГН, на несиметрію електричного режиму (випадок 1).

– те саме, які виконані з метою симетрування електричного режиму, на формування ГГН (випадок 2);

В обох випадках отриманий результат можна поліпшити шляхом оптимального розподілу однофазних електроприймачів між фазами за їх під'єднання до мережі.

Оптимізація електроспоживання шляхом вирівнювання ГГН (випадок 1)

Вирівнювання ГГН групи однофазних електроприймачів з однаковими циклічними графіками навантажень, що апроксимовані ступінчастою ламаною лінією з однаковою тривалістю ступенів, можна виконати, реалізуючи їх зсуви, знайдені за методом динамічного програмування. Критерієм оптимальності для цієї задачі є сумарний взаємокореляційний момент між *i*-м та *s*-м ІГН — $\sum_{i<s}\Omega_{is}$ [5]. Оптимальний зсув ступенів всіх ІГН відносно першого ступеня першого ІГН можна розрахувати за рекурентними співвідношеннями Р. Белмана, які мають такий вигляд:

$$\begin{cases} f_1 = \min\limits_{\text{по всіх } \omega_{1\text{г}}} \Omega_{12}; \\ - \\ f_z = \min\limits_{\text{по всіх } \omega_{1k},\omega_{\nu_1 k},\omega_{\nu_2 k},\ldots,\omega_{\nu_{(z-1)}k}} \left(\Omega_{1(z+1)} + \Omega_{2(z+1)} + \ldots + \Omega_{z(z+1)}\right) + f_{z-1}, \quad z = 2,3,\ldots,(N-1), \end{cases} \tag{1}$$

де N — загальна кількість ОЕ; $\omega_{\nu k,}$ — взаємокореляційний момент між двома ІГН за умови, що ступінь ν одного суміщається зі ступенем k іншого; $\nu_1, \nu_2, \ldots, \nu_{(z-1)}$ — номери ступенів, відповідно. 2, 3, …, z, ІГН, що суміщаються з першим ступенем першого графіка, та які розраховані відповідно на 1, 2, …, (z – 1) етапах розв'язання задачі; k — номер ступеня (z + 1) ІГН, оптимальна орієнтація якого розраховується на етапі z, $k = 1, 2, \ldots, K$.

Оптимальне під'єднання до мережі ОЕ необхідно виконувати з урахуванням їх графіків активних та реактивних навантажень і реалізованих зсувів в часі цих графіків. Розрахунок оптимального варіанта під'єднання ОЕ до лінійних напруг передбачає попереднє складання матриці можливих впливів на параметри несиметрії режиму в лінії живлення — **I** та матриці можливих рішень з під'єднання ОЕ до мережі — **X**. Компонентами матриці **I** є струми зворотної послідовності, що створюються окремими ОЕ в *k*-ті моменти часу за умови їх під'єднання до різних напруг для оптимального зсуву ІГН вимірністю ($K \times 3N$).

Матриця **X** охоплює описи усіх можливих варіантів під'єднання ОЕ до мережі. Якщо зафіксувати під'єднання одного з них до будь-якої напруги, то кількість можливих комбінацій зменшиться втричі і її вимірність буде $\left(3N \times \frac{1}{3}3^N\right)$. Інформація про *i*-й варіант під'єднання електроприймачів до мережі міститься в *i*-му стовпчику матриці **X**, $\mathbf{X} = \left(\mathbf{X}_1\ \mathbf{X}_2\ \ldots \mathbf{X}_i\ \ldots \mathbf{X}_{\frac{1}{3}3^N}\right)$.

Для опису під'єднання *n*-го електроприймача, $n = 1, 2, \ldots N$, за *i*-м варіантом використовуються булеві змінні $x_{(3n)i}$; $x_{(3n-1)i}$; $x_{(3n-2)i}$. Якщо *n*-й електроприймач під'єднується до напруги U_{CA}, то $x_{(3n-2)i} = 1$, а $x_{(3n-1)i} = 0$ та $x_{(3n)i} = 0$; якщо до U_{BC}, то $x_{(3n-1)i} = 1$, а $x_{(3n-2)i} = 0$ та $x_{(3n)i} = 0$ і якщо до U_{AB}, то $x_{(3n)i} = 1$, а $x_{(3n-1)i} = 0$ та $x_{(3n-2)i} = 0$.

Значення струмів зворотної послідовності в лінії живлення вузла з ОЕ для різних моментів часу та усіх можливих комбінацій під'єднання електроприймачів до мережі, що відповідають різним моментам часу, можна отримати шляхом:

$$\mathbf{I}_{II} = \mathbf{I} \cdot \mathbf{X}.$$

Елементи *i*-го стовпчика матриці $\mathbf{I}_{II} — \underline{I}_{IIki}$ — це комплекси струмів зворотної послідовності в лінії живлення на інтервалах часу *k*, за умови їх під'єднання до мережі за *i*-м варіантом.

Відбір оптимального варіанта з урахуванням зміни параметрів ОЕ можна виконати за критерієм [6], числове значення якого для *i*-го варіанта під'єднання електроприймачів може бути розраховано за комплексами струмів зворотної послідовності *i*-го стовпчика матриці $\mathbf{I}_{II} — I_{IIki}$:

$$J_i = \sum_{k=1}^{K} I_{IIki}^2 . \qquad (2)$$

Критерій ефективності (2) пропорційний додатковим втратам активної енергії, зумовленими струмами зворотної послідовності в лінії живлення на всіх інтервалах часу у разі під'єднання ОЕ до мережі за *i*-м варіантом.

Якщо прорахувати для всіх варіантів під'єднання значення $J_i \left(i = 1, 2 \ldots \frac{1}{3} 3^N \right)$, то критерій ефективності, що відповідає оптимальному варіанту, можна визначити таким чином:

$$J_{opt} = \min \left\{ J_1\ J_2\ J_3 \ldots J_i \ldots J_{\frac{1}{3}3^N} \right\} = J_i \ .$$

Відповідно до цього опис оптимального під'єднання знаходиться в *i*-му стовпчику матриці **X**.

Приклад 1. Група з чотирьох ОЕ, що мають однакові циклічні ІГН, показані на рис. 1, під'єднані до трипровідної електричної мережі 10 кВ. Кожний наступний технологічний цикл починається відразу після завершення попереднього. Розрахувати оптимальні зсуви ІГН з метою вирівнювання ГГН та варіант їх під'єднання до мережі.

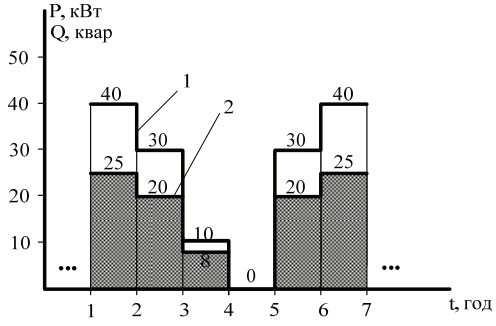
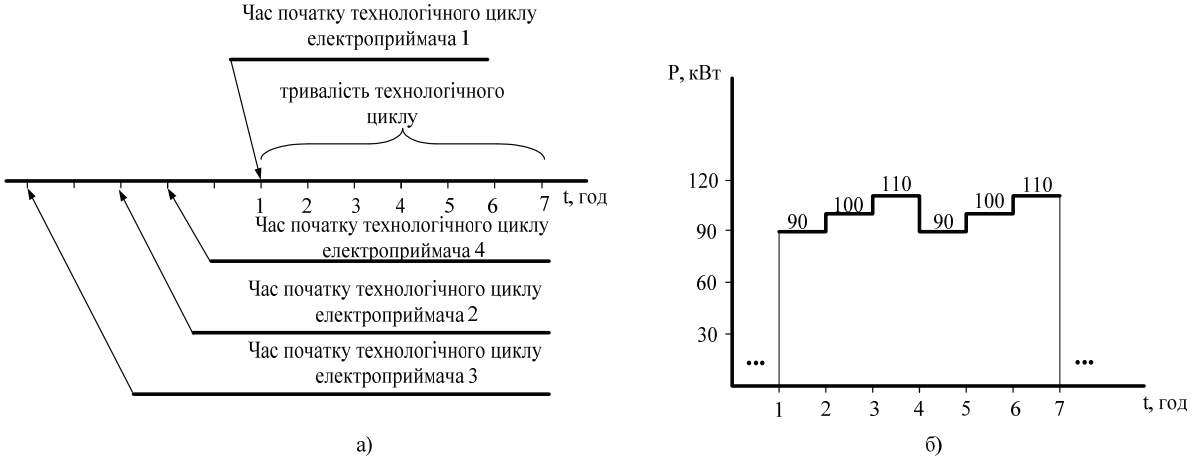


Рис. 1. ІГН електроприймачів, які утворюють ГГН:
1 — графік активної потужності, *P*;
2 — графік реактивної потужності, *Q*

Розв'язання. 1. Оптимальні зсуви ІГН, отримані за рекурентними співвідношеннями (1), зображені на осі часу, рис. 2а. ГГН, що забезпечується такими зсувами, на інтервалі часу технологічного циклу показано на рис. 2б.



а) б)

Рис. 2. Результати розрахунку оптимальних зсувів ІГН: а — початки технологічних циклів ОЕ;
б — оптимальний ГГН

2. За результатами розрахунку визначено, що оптимальний варіант під'єднання групи ОЕ до вузла мережі є такий:

$$\mathbf{X}^T_{\text{опт}} = (1\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 1).$$

Процес зміни струму I_{IIk}^2, що відповідає реалізації $\mathbf{X}_{\text{опт}}$, показано на рис. 3.

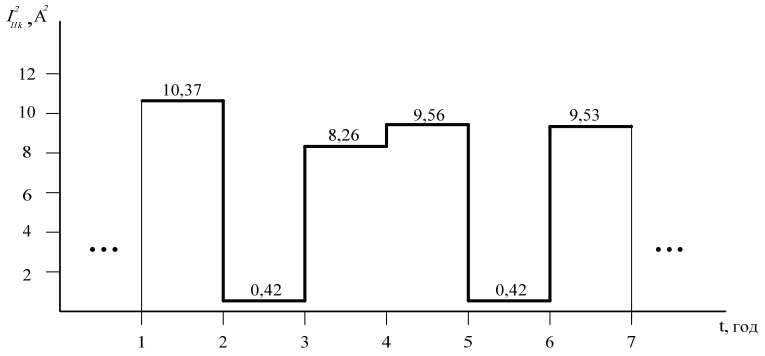


Рис. 3. Графік зміни $I_{II}^2(t)$ на інтервалі часу технологічного циклу

Симетрування електричного режиму шляхом зсувів ІГН ОЕ (випадок 2)

Зазначену задачу потрібно розв'язувати одночасно, визначаючи такий варіант зсувів ІГН і таке під'єднання ОЕ до мережі, яким відповідає мінімальне значення J_i. Розроблений метод передбачає попереднє формування множини матриць можливих впливів на параметри несиметрії режиму $\left\{ I_1\ I_2\ I_3\ \ldots I_{\frac{1}{K}K^N} \right\}$ для $\frac{1}{K}K^N$ варіантів зсувів ІГН. (Для знаходження оптимального варіанта достатньо розглянути всі зсуви ІГН відносно, наприклад, першого ступеня одного з графіків, що дозволяє зменшити кількість варіантів для розгляду в K разів). Оптимальний варіант зсуву ІГН в поєднанні з варіантом під'єднання ОЕ до мережі знаходиться шляхом розрахунку числового значення критерію ефективності (1) по всіх зсувах ІГН — ε, $\varepsilon = 1, 2, \ldots \psi, \ldots \frac{1}{K}K^N$ та по всіх варіантах під'єднання ОЕ до мережі — i, $i = 1, 2, \ldots \tau, \ldots \frac{1}{3}3^N$ з подальшим пошуком $\min\{J_{\varepsilon i}\} = J_{\psi\tau}$. Розв'язком цієї підзадачі, який забезпечує мінімальні додаткові втрати електроенергії від несиметрії режиму, буде варіант ψ зсуву ІГН та τ -під'єднання ОЕ до мережі.

Приклад 2. Для умов прикладу 1 визначити оптимальні зсуви ІГН з метою симетрування електричного режиму та варіант під'єднання ОЕ до електричної мережі.

Розв'язання. Оптимальні зсуви ІГН показані на числовій осі рис. 4а. ГГН, що відповідає оптимальному зсуву, показаний на рис 4б.

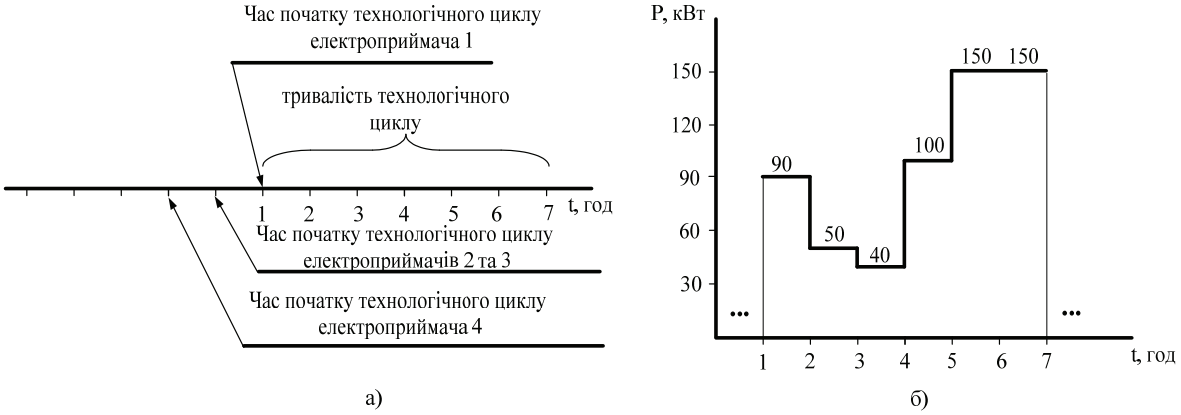


Рис. 4. Результати розрахунку оптимальних зсуві ІГН:
а — початки технологічних циклів однофазних електроприймачів; б — оптимальний ГГН

Залежність $I_{II}^2(t)$ в лінії живлення, що відповідає розрахованим зсувам ІГН та оптимальному під'єднанню ОЕ до мережі показана на рис. 5.

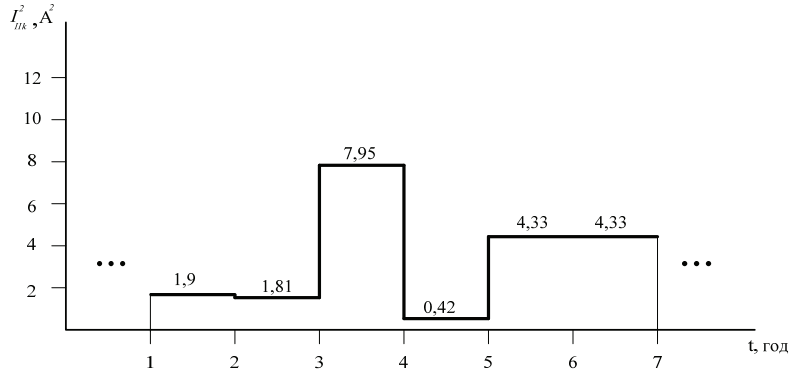


Рис. 5. Графік зміни $I_{II}^2(t)$ на інтервалі часу технологічного циклу

Висновки

1. Критерії, за якими розв'язуються задачі вирівнювання ГГН та симетрування електричного режиму шляхом зсуву ІГН ОЕ, суперечливі. Рішення зі зсувів ІГН з метою вирівнювання ГГН супроводжується зростанням несиметрії режиму і навпаки.

2. У випадках, коли пріоритетною є задача симетрування електричного режиму (наприклад, якщо не забезпечуються вимоги стандарту за показниками, що нормують несиметрію напруг) в першу чергу мають бути використані безвитратні способи симетрування в тому числі і оптимальні зсуви ІГН ОЕ.

3. Якщо пріоритетною є задача вирівнювання ГГН, то це доцільно здійснювати шляхом зсувів ІГН в тому числі і ОЕ. Прикладами таких ситуацій можуть бути випадки коли ОЕ працюють лише в години нічного провалу графіка навантаження енергосистеми (наприклад, однофазні електроопалювальні установки).

В зазначених та подібних ситуаціях буде забезпечено мінімум втрат електроенергії на її передачу.

4. Як в одному так і другому випадках кінцевий ефект може бути поліпшеним шляхом оптимального під'єднання ОЕ до вузла мережі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

[1] В. И. Гордеев, *Регулирование максимума нагрузки промышленных электрических сетей*. М., Россия: Энергоатомиздат, 1986.

[2] В. Г. Аввакумов, *Методы нескалярной оптимизации и их приложения.* Київ, Україна: Вища школа, 1990.

[3] В. Г. Аввакумов, *Математическая логистика в примерах и иллюстрациях*. Омск, Россия: ГОУ ВПО, 2008.

[4] Л. Б. Терешкевич, та О. О. Хоменко, «Симетрування електричного режиму шляхом зсуву в часі графіків навантаження електроприймачів однофазного виконання,» *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: технічні науки*. № 34, с. 132-139, 2017.

[5] Л. Б. Терешкевич, *АСУ в електроспоживанні*. Вінниця,Україна: ВНТУ, 2016, 131 с.

[6] Л. Б. Терешкевич, та О. О. Хоменко, «Оптимальне під'єднання однофазних навантажень, параметри яких змінюються в часі, до вузла трипровідної електричної мережі,» *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 1, с. 57-61, 2017.

Рекомендована кафедрою електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту

Стаття надійшла до редакції 26.09.2017

Терешкевич Леонід Борисович — канд. техн. наук, доцент кафедри електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту, e-mail: lbter@meta.ua ;

Хоменко Олександр Олексійович — аспірант кафедри електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту, e-mail: o.o.khomenko.vntu@gmailcom .

Вінницький національний технічний університет, Вінниця;

Бандура Ірина Олександрівна — канд. техн. наук, доцент кафедри електропостачання.

Луцький національний технічний університет, Луцьк

L. B. Tereshkevych[1]
O. O. Khomenko[1]
I. O. Bandura[2]

Internal Symmetrization of One-phase Electric Power Supplies and Determining Their Group Loading Schedule

[1]Vinnytsia National Technical University;
[2]Lutsk National Technical University

There has been studied the influence of tasks of internal symmetry of single-phase electric devices on formation of their group load schedule and the asymmetry of the electric mode. The recommendations for the consideration of these interconnections in practice have been developed.

It is established that the criteria for solving both problems are contradictory. The decision to shift the individual load schedules to align the group graphics is accompanied by an increase in asymmetry of the regime and vice versa.

In case of prioritization of the task of aligning the group load of loads, the decision to shift the individual load graphs of single-phase electronics should be taken, guided by the criterion that evaluates the unevenness of the group graph. The obtained results can be improved by optimal distribution of single-phase electric devices between the voltages of the electrical network, without affecting the effect obtained from the alignment of the group load schedule.

If the priority is the task of the simulation of the electric mode, then, in order to equalize the loads in phases, it is necessary to use as shifts in the time of technological cycles of single-phase electric collectors, so their distribution between phases of the network. In such a case, there might be a case where the standards of the standard for the quality of electric power according to the asymmetry of the electric mode are not provided in the network. By criterion for decision making, one of the parameters should be selected, which is a measure of the asymmetry of the electric mode. In this case, in order to obtain the maximum effect of the decision must be taken, solving the problem as a whole.

The correctness of the conclusion regarding the contradictory nature of the criteria and the formulated recommendations was checked on control samples, in which, according to the same initial data, tasks were solved using known methods.

Keywords: internal symmetry, alignment of load graphs, voltage asymmetry.

Tereshkevych Leonid B. — Cand. Sc. (Eng.), Assistant Professor of the Chair of Electrical Systems of Power Consumption and Power Management, e-mail: lbter@meta.ua ;

Khomenko Oleksandr O. — Post-Graduate Student of the Chair of Electrical Systems of Power Consumption and Power Management, e-mail: o.o.khomenko.vntu@gmailcom ;

Bandura Iryna O. — Cand. Sc. (Eng.), Assistant Professor of the Chair of Electrical Supply

Л. Б. Терешкевич[1]
А. А. Хоменко[1]
И. А. Бандура[2]

Внутренние симметрирование однофазных электроприемников и выравнивание их группового графика нагрузок

[1]Винницкий национальный технический университет;
[2]Луцкий национальный технический университет

Исследованы воздействия решений по сдвигам индивидуальных графиков однофазных электроприемников на формирование группового графика нагрузок и на несимметрию электрического режима, а также разработаны рекомендации, учитывающие взаимосвязь этих задач.

Ключевые слова: внутреннее симметрирование, выравнивание графика нагрузок, несимметрия напряжения.

Терешкевич Леонид Борисович — канд. техн. наук, доцент кафедры электротехнических систем электропотребления и энергетического менеджмента, e-mail: lbter@meta.ua ;

Хоменко Александр Алексеевич — аспирант кафедры электротехнических систем электропотребления и энергетического менеджмента, o.o.khomenko.vntu@gmailcom ;

Бандура Ирина Александровна — канд. техн. наук, доцент кафедры электроснабжения