

Київський національний університет технологій та дизайну
Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

БОБРОВНИК ВОЛОДИМИР МИКОЛАЙОВИЧ

УДК [621.311:005]:378(043)

ДИСЕРТАЦІЯ

**УПРАВЛІННЯ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯМ ЗАКЛАДІВ ВИЩОЇ ОСВІТИ
ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЇХ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ**

05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи

Технічні науки

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ В.М. Бобровник

Науковий керівник:

Каплун Віктор Володимирович
доктор технічних наук, професор

Київ – 2020

АНОТАЦІЯ

Бобровник В. М. Управління електроспоживанням закладів вищої освіти для підвищення їх енергоефективності. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.03 «Електротехнічні комплекси та системи». – Київський національний університет технологій та дизайну, Київ. – Вінницький національний технічний університет, Вінниця, 2020.

Наукова новизна отриманих результатів і положень, що виносяться на захист, полягає у поглибленні існуючих, розвитку та обґрунтуванні нових підходів управління електроспоживанням та зменшенням втрат електроенергії в електротехнічних комплексах інфраструктури закладів вищої освіти для підвищення їх енергоефективності.

В роботі отримано такі наукові результати:

1. Вперше запропоновано метод аналізу рівнів електроспоживання з урахуванням особливих періодів освітнього процесу, сезонності та підвищення ефективності використання аудиторного фонду, що дозволило отримати математичний апарат для планування витрат на електрозабезпечення ЗВО;

2. Дістали подальшого розвитку математичні моделі прогнозування питомого споживання електроенергії об'єктами інфраструктури ЗВО з урахуванням класу енергоефективності будівель, що дозволило достовірно оцінювати рівні електроспоживання та здійснювати техніко-економічне обґрунтування впровадження паралельних активних фільтрів для зменшення втрат у електротехнічних комплексах інфраструктури ЗВО;

3. Отримані нові аналітичні вирази для складової повної потужності трифазної чотирипровідної системи електроживлення, яка зумовлена основною гармонікою струму нейтралі та потужністю спотворення за відомими значеннями активних та реактивних потужностей окремих фаз, які використані

для розрахунку додаткових витрат електричної енергії в електротехнічних комплексах інфраструктур ЗВО без зміни метрологічної бази;

4. Удосконалено спосіб керування паралельним активним фільтром трифазної чотирипровідної системи електропостачання, який відрізняється збільшенням інтервалу осереднення потужності навантаження та напруг живлення до тривалості періоду зміни навантаження, що дозволяє майже вдвічі зменшити втрати в залежності від форми зміни графіку активної потужності навантаження.

Практичне значення отриманих результатів роботи полягає у вдосконаленні методів та засобів управління режимами споживання електричної енергії для підвищення енергоефективності електротехнічних комплексів інфраструктури закладів вищої освіти.

На основі множинного регресійного аналізу у поєднанні зі статистичними методами розроблено та досліджено математичні моделі (базова та розширена) електроспоживання в будівлях університету. Одержано і досліджено лінійні регресійні моделі електроспоживання в гуртожитках та корпусах університету з урахуванням приведеної кількості проживаючих, температури навколишнього середовища та специфічних періодів освітнього процесу з урахуванням сезону та класу енергоефективності будівель, рівня завантаженості аудиторного фонду.

Одержані результати дали змогу шляхом моделювання виконати прогнозне оцінювання рівнів електроспоживання і перевірити їх достовірність, порівнюючи їх з даним служби енергоменеджменту університету за попередні роки.

На основі розширеного набору факторів, що впливають на процес електроспоживання, вперше одержані залежності, які можуть бути використані для дослідження майбутніх сценаріїв та прогнозного оцінювання функціонування системи електрозабезпечення у будівлях освітньої сфери.

Використання результатів моделювання дозволяє розробляти методичні рекомендації щодо впровадження комплексу енергоощадних заходів в освітньому закладі з урахуванням існуючої інженерної інфраструктури та підвищити ефективність управління електроспоживанням.

У якості значень залежної змінної обрано середньомісячні значення активної частини спожитої електроенергії, а для пояснення змінних (регресорів) обрано середню кількість проживаючих у гуртожитках за місяцями року (для обраних гуртожитків) і середньомісячну температуру зовнішнього середовища (модель першого типу).

Розроблені моделі перевірені на адекватність з використанням методів дослідження залишків, а також виконане порівняння розрахункових даних з даними спостережень за наступні роки (2016 – 2018 рр.).

Одержані результати дозволили шляхом реалізації моделі на прикладі Київського національного університету технологій та дизайну виконати прогнозне оцінювання рівнів електроспоживання та підтвердити їх достовірність на основі даних служби енергоменеджменту університету.

Моделі електроспоживання i , використовуючи лише по одній пояснювальній змінній, є простими і зручними в користуванні. При цьому модель i має суттєву перевагу перед моделлю ii за всіма вживаними вище статистичними показниками, і тому може вважатися більш надійною при більш-менш сталих показниках завантаженості навчальних аудиторій. Тим не менш в представлених вище прогнозних розрахунках модель i мало в чому поступалася моделі ii , до того ж маючи очевидну змістову інтерпретацію. Тому, маючи на увазі можливі суттєві зміни зазначених показників завантаженості аудиторій, доцільно використовувати обидві наведені моделі принаймні в якості попередніх орієнтовних розрахунків.

Змінні i і ii , що виявилися найбільш придатними для моделей простої лінійної регресії, за умови свого об'єднання для утворення регресійної моделі з

двома незалежними змінними, можуть не утворити достатньо адекватну модель, оскільки між зазначеними змінними існує значимо кореляція. Дійсно, розрахунки показують, що зазначений (вибірковий) коефіцієнт r , дорівнює 0,445, що в даному випадку є значимим на рівні 0,05. Відповідна регресійна модель має вигляд

$$e(z, \varphi_3) = 120,6036 + 0,0975z + 63,2978\varphi_3;$$

Коефіцієнт при z є незначущим (статистика Стьюдента дорівнює у даному випадку 0,74201, що значно менше 1,72 – квантиля розподілу Стьюдента t_{12}).

Як виявилось, серед інших можливих варіантів моделей з двома пояснювальними змінними, не містять незначущих коефіцієнтів лише $e(z, \varphi_3)$ і $e(z, \varphi_2)$. При цьому для останньої моделі маємо $t = 0,5821, F_{2,21} = 5,3835, S = 28,16$. Зокрема, для $e(z, \varphi_2)$ не виконується нерівність $F_{p-1, n-p} > t_{1-\alpha}^2$ основні статистичні показники поступають вище моделі $e(\varphi_3)$. Для моделі $e(z, \varphi_3)$ маємо: $e(z, \varphi_3) = 132,503 + 0,8208z + 63,2881\varphi_3; t = 0,8725, F_{2,21} = 33,503, S = 17,252$.

Зазначені показники є того ж порядку, що й у розглянутої вище моделі $e(\varphi_3)$. Всі моделі з числом пояснювальних змінних ≥ 3 виявилися або такими, що містять незначущі коефіцієнти, або маючими основні показники не вищими, ніж моделі порядку 1 і 2. Таким чином, для об'єкту ЗВО рекомендуються для застосування визначені вище моделі $e(z), e(\varphi_3)$ і $e(z, \varphi_3)$.

Застосування активних силових фільтрів в трифазних системах електропостачання забезпечує відновлення якості електроенергії на клемах потужних споживачів та є одним із перспективних технічних напрямів енергозбереження шляхом зниження теплових втрат в лінії передачі.

Найбільшого поширення набули паралельні активні фільтри з можливістю формування оптимальних вхідних струмів в умовах

нестабільності, нелінійності та несиметрії навантаження. Алгоритми керування ПАФ здебільшого ґрунтуються на сучасних теоріях миттєвої та інтегральної потужності. Перша використовує інформацію про миттєві значення струмів та напруг системи електропостачання для позбавлення від неактивної складової миттєвої потужності. В другій теорії складові потужності визначаються інтегруванням добутків струмів та напруг на періоді напруги електромережі. В результаті її застосування покращуються енергетичні показники системи електроспоживання, але погіршується швидкодія ПАФ. Недостатня увага приділена побудові алгоритмів керування засобами активної фільтрації у випадку, коли період зміни навантаження перевищує період напруги електромережі. Метою даної роботи є розробка закону керування ПАФ у зазначеному випадку та виведення розрахункових співвідношень для оцінювання енергозберігаючого ефекту від його застосування в трифазній чотирипровідній системі електропостачання.

Запропоновано вдосконалений закон керування струмами джерела трифазної чотирипровідної системи електропостачання паралельним активним фільтром, який відрізняється збільшенням інтервалу осереднення потужності навантаження та напруг живлення в значенні коефіцієнта пропорційності за

формулою $g_{\tau} = \int_0^{\tau} p(t)dt / \int_0^{\tau} \mathbf{u}^T(t)\mathbf{u}(t)dt$.

Запропоновано оцінювати енергозберігаючий ефект від застосування паралельних активних фільтрів в системах електропостачання величиною коефіцієнта виграшу за потужністю втрат, для якого виведена розрахункова

формула $k_{B\tau} = \frac{3 \left(\sum_{k=1}^N I_k^2 \right) \left(\sum_{k=1}^N U_{\phi k}^2 \right)}{\left(\sum_{k=1}^N P_k \right)^2}$, при зазначеному законі керування.

Вперше показано, що збільшення інтервалу усереднення до періоду зміни однорідного навантаження при стабільній фазній напрузі збільшує коефіцієнт

виграшу за потужністю втрат пропорційно величині у формулі

$$k_{B\tau} = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} p^2(t) dt \times \left[\frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} p(t) dt \right]^{-2} \times \frac{1}{k_p^2} = k_{k_{WB}}$$

яка названа коефіцієнтом нерівномірності споживання енергії. Отримані значення коефіцієнта нерівномірності споживання енергії для типових графіків зміни активної потужності. Найбільше його значення сягає двох при прямокутній формі зазначеного графіку.

Обґрунтовано концепцію побудови трифазної системи енергопостачання з ПАФ та НЕ для можливості перерозподілу добового графіку енергоспоживання на інтервал дії пільгового тарифу та продемонстровані перспективні показники економічної ефективності на прикладі трифазної чотирипровідної системи електропостачання гуртожитку №7 КНУТД.

Встановлені нові аналітичні залежності відносного добового платежу та підвищення теплового навантаження ліній електропередачі від величини ємності НЕ при перерозподілу добового графіку енергоспоживання на інтервал дії пільгового тарифу. Ці залежності можуть бути використані для оптимізації співвідношення між капітальними та експлуатаційними витратами при розробці бізнес-плану модернізації системи електроживлення гуртожитку чи будь-якого іншого навчально-господарського об'єкту.

Розроблена методика розрахунку енергозберігаючого ефекту від застосування паралельного активного фільтра в трифазній чотирипровідній системі електроживлення з урахуванням його власних втрат. Застосування методики проілюстровано розрахунком енергозберігаючого ефекту за результатами тижневого моніторингу споживання електроенергії гуртожитку №7 КНУТД. При використанні сучасних паралельних активних фільтрів втрати енергії в лінії електропередачі гуртожитку №7 КНУТД можуть бути зменшені на 10-20%.

Ключові слова: заклад вищої освіти, управління електроспоживанням, модель електроспоживання, потужність втрат, паралельний активний фільтр з накопичувачем енергії, енергоменеджмент.

ABSTRACT

Bobrovnyk V. M. The system of management of the electrical life of mortgages in education for the improvement of energy efficiency. – Qualifying scientific work on the rights of manuscripts.

Thesis for the degree of a candidate of technical sciences in specialty 05.09.03 "Electrotechnical complexes and systems". – Kyiv National University of Technologies and Design, Kyiv. – Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, 2020.

The scientific novelty of the obtained results and the provisions submitted for defense is the deepening of existing, development and substantiation of new approaches to power management and reduction of electricity losses in the electrical infrastructure of higher education institutions to improve their energy efficiency.

The findings of the research are as follows:

1. For the first time the method of the analysis of levels of power consumption taking into account special periods of educational process, seasonality and increase of efficiency of use of an auditory fund is offered that allowed to receive the mathematical device for planning of expenses for power supply of institution of higher education;

2. Mathematical models for forecasting specific electricity consumption by institution of higher education infrastructure objects were further developed taking into account the energy efficiency class of buildings, which allowed to reliably assess electricity consumption levels and provide feasibility study for the introduction of shunt active filter to reduce losses in institution of higher education infrastructure;

3. New analytical expressions are obtained for the component of full power of three-phase four-wire power supply system, which is due to the main harmonic of neutral current and distortion power according to known values of active and reactive powers of separate phases, which are used to calculate additional electricity bases;

4. The method of controlling a shunt active filter of a three-phase four-wire power supply system has been improved.

The practical significance of the obtained results of the work is to improve the methods and means of managing the modes of electricity consumption to increase the energy efficiency of electrical complexes of the infrastructure of higher education institutions.

Based on multiple regression analysis in combination with statistical methods, mathematical models (basic and extended) of electricity consumption in university buildings have been developed and studied. Linear regression models of electricity consumption in dormitories and university buildings were obtained and studied taking into account the number of residents, ambient temperature and specific periods of the educational process taking into account the season and energy efficiency class of buildings, the level of classroom occupancy.

The obtained results made it possible to perform a forecast assessment of electricity consumption levels by modeling and check their reliability, comparing them with the data of the University Energy Management Service for previous years.

Based on an expanded set of factors influencing the process of electricity consumption, for the first time, dependencies have been obtained that can be used to study future scenarios and forecast the functioning of the power supply system in educational buildings.

The use of simulation results allows to develop methodological recommendations for the implementation of a set of energy saving measures in the educational institution, taking into account the existing engineering infrastructure and increase the efficiency of electricity consumption management.

The values of the dependent variable were chosen as the average monthly values of the active part of the consumed electricity, and to explain the variables (regressors) the average number of people living in dormitories by months of the year (for selected dormitories) and average monthly ambient temperature (model of the first type).

The developed models were tested for adequacy using the methods of residue research, as well as a comparison of the calculated data with the observation data for the following years (2016 - 2018).

The obtained results allowed by implementing the model on the example of Kyiv National University of Technology and Design to perform a forecast assessment of electricity consumption levels and confirm their reliability on the basis of data from the energy management service of the university.

Power consumption models $e(z)$ and $e(\varphi_3)$, using only one explanatory variable, are simple and easy to use. In this case, the model $e(\varphi_3)$ has a significant advantage over the model $e(z)$ in all the above statistical indicators, and therefore can be considered more reliable with more or less constant indicators of classroom occupancy. Nevertheless, in the above forecast calculations, the model $e(t)$ was not much inferior to the model $e(t, \varphi_3)$, in addition, having an obvious semantic interpretation. Therefore, bearing in mind the possible significant changes in these indicators of audience load, it is advisable to use both of these models at least as a preliminary estimate.

The variables z and φ_3 , which proved to be the most suitable for simple linear regression models, if combined to form a regression model with two independent variables, may not form a sufficiently adequate model, because there is a significant correlation between these variables. Indeed, the calculations show that the specified (sample) coefficient r_{z,φ_3} is equal to 0,445, which in this case is significant at $p < 0,05$. The corresponding regression model has the form

$$e(z, \varphi_3) = 120,6036 + 0,0975z + 63,2978\varphi_3;$$

The coefficient at z is insignificant (Student's statistics are equal in this case to 0,74201, which is much less than 1,72 – the Student's distribution quantile t_{21}).

As it turned out, among other possible variants of models with two explanatory variables, only $e(t, \varphi_3)$ and $e(z, N)$ do not contain insignificant coefficients. Thus for the last model we have $R = 0,5821, F_{2,21} = 5,3835, S = 28,16$. In particular, for $e(z, N)$ the inequality $F_{p-1, n-p} > 4u_{1-\alpha}^{F_{p-1, n-p}}$ is not fulfilled, and the main statistical indicators are inferior to those discussed above. model $e(\varphi_3)$.

For the model $e(t, \varphi_3)$ we have: $e(t, \varphi_3) = 132,4503 - 0,8208t + 63,2881\varphi_3; R = 0,8725, F_{2,21} = 33,503, S = 17,252$.

These indicators are of the same order as in the above model $e(\varphi_3)$. All models with the number of explanatory variables ≥ 3 were either those that contain insignificant coefficients, or have basic indicators not higher than models of order 1 and 2. Thus, for the object institution of higher education recommended for use the above models $e(z), e(\varphi_3)$ and $e(t, \varphi_3)$.

The use of active power filters in three-phase power supply systems restores the quality of electricity at the terminals of powerful consumers and is one of the promising technical areas of energy saving by reducing heat loss in the transmission line.

The most common are shunt active filter with the possibility of forming optimal input currents in conditions of instability, nonlinearity and load asymmetry. Shunt active filter control algorithms are mostly based on modern theories of instantaneous and integrated power. The first uses information about the instantaneous values of currents and voltages of the power supply system to get rid of the inactive component of instantaneous power. In the second theory, the power components are determined by integrating the products of currents and voltages over the mains voltage period. As a result of its application, the energy performance of the power consumption system

improves, but the shunt active filter performance deteriorates. Insufficient attention is paid to the construction of control algorithms for active filtering in the case when the period of load change exceeds the period of mains voltage. The purpose of this work is to develop a control law for shunt active filter in this case and derive the calculated ratios to assess the energy saving effect of its use in a three-phase four-wire power supply system.

An improved law of current control of a three-phase four-wire power supply system with a shunt active filter is proposed, which differs by increasing the averaging interval of load power and supply voltages in the value of the

proportionality coefficient according to the formula $g_{\tau} = \frac{\int_0^{\tau} p(t)dt}{\int_0^{\tau} \mathbf{u}^T(t)\mathbf{u}(t)dt}$.

It is proposed to evaluate the energy saving effect from the use of shunt active filter in power supply systems by the value of the gain coefficient by power loss, for

which the calculation formula $k_{B\tau} = \frac{3 \left(\sum_{k=1}^N U_k^2 \right) \left(\sum_{k=1}^N U_{\phi k}^2 \right)}{\left(\sum_{k=1}^N P_k \right)^2}$, is derived for the specified

control law.

It is shown for the first time that increasing the averaging interval to the period of change of homogeneous load at stable phase voltage increases the gain factor for power losses in proportion to the value in the formula

$k_{B\tau} = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} p^2(t)dt \times \left[\frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} p(t)dt \right]^{-2} \times \frac{1}{k_p^2} = k_{B\tau}$, called the coefficient of uneven energy

consumption. The obtained values of the coefficient of non-uniformity of energy consumption for typical graphs of changes in active power. Its largest value reaches two in the rectangular shape of the specified graph.

The concept of construction of a three-phase power supply system with shunt active filter and energy storage for the possibility of redistribution of the daily

schedule of energy consumption for the interval of the preferential tariff is substantiated and perspective indicators of economic efficiency are demonstrated on the example of three-phase four-wire dormitory power supply system №7 Kyiv national university of technologies and design.

New analytical dependences of relative daily payment and increase of thermal load of power transmission lines on the value of capacity energy storage at redistribution of daily schedule of energy consumption on an interval of action of the preferential tariff are established. These dependencies can be used to optimize the ratio between capital and operating costs when developing a business plan for the modernization of the power supply system of a dormitory or any other training facility.

A method for calculating the energy-saving effect from the use of a shunt active filter in a three-phase four-wire power supply system taking into account its own losses has been developed. The application of the methodology is illustrated by the calculation of the energy saving effect based on the results of weekly monitoring of electricity consumption in the dormitory №7 Kyiv national university of technologies and design. When using modern shunt active filter, energy losses in the power line of the dormitory №7 Kyiv national university of technologies and design can be reduced by 10-20%.

Keywords: institution of higher education, power management, power consumption model, power losses, shunt active filter with energy storage, energy management.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

[1] В. В. Каплун, В. М. Бобровник, «Оцінювання енергоефективності електротехнічних комплексів вищих навчальних закладів на основі нормування питомих показників електроспоживання,» *Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. Технічні науки*, вип. 5(90), с. 59-70, 2015.

[2] В. В. Каплун, С. М. Красницький, В. М. Бобровник, Г. С. Жулай, «Математичне моделювання електроспоживання у будівлях вищих навчальних закладів,» *Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. Технічні науки*, вип. 4(112), с. 61-68, 2017.

[3] В. В. Каплун, В. М. Бобровник, М. Ю. Артеменко, С. Й. Поліщук, «Розрахунок енергозберігаючого ефекту від застосування паралельних активних фільтрів в трифазній чотири провідній системі електропостачання при збільшенні інтервалу осереднення вимірюваних величин,» *Електроніка та зв'язок*, вип. 4(99), с. 18-24, 2017.

[4] В. В. Каплун, В. М. Бобровник, М. Ю. Артеменко, С. Й. Поліщук, «Перспективи застосування паралельних активних фільтрів з накопичувачами енергії для підвищення енергоефективності трифазних чотирипровідних систем електропостачання,» *Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. Технічні науки*, вип. №5 (114), с. 24-31, 2017.

[5] В. М. Бобровник, В. В. Каплун, М. Ю. Артеменко, «Методика розрахунку енергозберігаючого ефекту від застосування паралельного активного фільтра в трифазній чотирипровідній системі електроживлення з урахуванням його власних втрат,» *Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. «Технічні науки»*, вип. 6 (128), с. 9-19, 2018.

[6] В. В. Каплун, С. М. Краснитський, В. М. Бобровник, «Математичне моделювання електроспоживання у будівлях закладів вищої освіти.

Повідомлення 2,» *Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. Технічні науки*, вип. №2(132), с. 9-23, 2019.

[7] М. Ю. Артеменко, В. В. Каплун, В. М. Бобровник, «Визначення складових повної потужності трифазної чотирипровідної системи електроживлення за відомими активними та реактивними потужностями окремих фаз,» *Вчені записки Таврійського національного університету ім. В. І. Вернадського, Технічні науки*, вип. №30(69) Том №4, с.17-22, 2019.

[8] М. Ю. Артеменко, В. В. Каплун, В. М. Бобровник, С. Й. Поліщук, «Застосування активних фільтрів для зменшення втрат енергії трифазних систем електропостачання,» *Технічна електродинаміка*, вип. №4, с. 53-56, 2018.

[9] В. В. Каплун, В. М. Бобровник, М. Ю. Артеменко, С. Й. Поліщук, «Спосіб керування паралельним активним фільтром чотирипровідної трифазної мережі», МПК (2018.01) H02P 9/00, №125021 UA, Квіт.25, 2018.

[10] В. В. Каплун, В. М. Бобровник, «Спосіб управління електроспоживанням у системі енергоменеджменту на основі ідентифікації навантажень комутаційних апаратів», МПК (2020.01) H02J13/00, № 141976 UA, опубліковано Трав.12, 2020.

[11] В. В. Каплун, М. Ю. Артеменко, С. Й. Поліщук, В. М. Бобровник, «Розрахунок енергозберігаючого ефекту від застосування засобів активної фільтрації в трифазній чотирипровідній системі електропостачання», *на VI міжн. наук.-практ. конф. Обробка сигналів і негаусівських процесів*, Черкаси, 2017, с. 82-84.

[12] В. М. Бобровник, В. В. Каплун, «Особливості методу визначення енергоспоживання в гуртожитках Київського національного університету технологій та дизайну», *на міжн. наук.-практ. конф. Мехатронні системи: інновації та інжиніринг*, Київ, 2017, с. 221-222.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	18
ВСТУП.....	19
1 ТЕОРЕТИКО-МЕТОДИЧНІ ЗАСАДИ ПОБУДОВИ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯМ ЗАКЛАДІВ ВИЩОЇ ОСВІТИ.....	27
1.1 Огляд досвіду побудови та використання систем управління електроспоживанням.....	27
1.2 Існуючі методи управління електроспоживанням для підвищення енергоефективності будівель.....	41
1.3 Силові перетворювачі у системах електроспоживання для підвищення їх енергоефективності	53
1.4 Висновки та основні задачі дослідження	56
2 РОЗРОБЛЕННЯ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ЕЛЕКТРО- СПОЖИВАННЯ У БУДІВЛЯХ ЗАКЛАДІВ ВИЩОЇ ОСВІТИ.....	58
2.1. Характеристика умов та визначення показників, які впливають на рівні електроспоживання закладів вищої освіти	58
2.2 Математичне моделювання електроспоживання у будівлях навчальних корпусів закладів вищої освіти.....	72
2.3 Математичне моделювання електроспоживання у будівлях гуртожитків закладів вищої освіти.....	88
2.4 Аналіз та інтерпретація результатів математичного моделювання електроспоживання у будівлях закладів вищої освіти.....	96
2.5 Застосування кореляційно-регресійного аналізу для прогнозування рівнів електроспоживання у будівлях закладів вищої освіти.....	99
2.6 Висновки до розділу 2.....	116
3. ОЦІНЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ УПРАВЛІННЯ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯМ ЗАКЛАДІВ ВИЩОЇ ОСВІТИ	118
3.1. Оцінювання ефективності внутрішніх електромереж шляхом компенсації струму нульової послідовності	118
3.2. Оцінювання ефективності застосування накопичувачів електричної	

	17
енергії у системах електроспоживання закладів вищої освіти.....	129
3.3. Висновки до розділу 3.....	135
4. ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ АКТИВНИХ СИЛОВИХ ФІЛЬТРІВ	137
4.1. Моніторинг проектів з енергозбереження для навчальних закладів.....	137
4.2. Розрахунок енергозберігаючого ефекту від застосування ПАФ в трифазній чотирипровідній системі електропостачання при збільшенні інтервалу осереднення вимірюваних величин.....	146
4.3. Нові алгоритми керування ПАФ для підвищення енергоефективності трифазних чотирипровідних систем електропостачання	154
4.4 Перспективи застосування ПАФ з накопичувачами енергії для вибору стратегії оптимізації розрахунків за спожиту електроенергію.....	164
4.5 Висновки до розділу 4.....	167
ВИСНОВКИ.....	169
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	172
ДОДАТКИ.....	185
Додаток А Результати впровадження дисертаційного дослідження.....	186
Додаток Б Акт проведення моніторингу енергоспоживання гуртожитку №7, КНУТД	189
Додаток В Список публікацій за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації.....	196

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ЗВО	–	Заклад вищої освіти
ГВП	–	Гаряче водопостачання
ДСТУ	–	Державний стандарт України
ЕО	–	Енергопостачальна організація
КНУТД	–	Київський національний університет технологій та дизайну
НТУУ «КПІ»	–	Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ОП	–	Опалювальний період
ПЕР	–	Паливно-енергетичні ресурси
ПЕЕ	–	Процеси енергоспоживання та енергозбереження
ПАФ	–	Паралельний активний фільтр
НЕ	–	Накопичувач енергії
АСУЕ	–	Автоматизована система управління енергоспоживання
АСУ ТП	–	Автоматизована система управління технологічних процесом
ПЕХ	–	Процесна енергетична характеристика
НОЕ	–	Науково обґрунтоване енергоспоживання
ККД	–	коефіцієнт корисної дії
ЗЛМ	–	загальна лінійна модель
ПТК «АСУЕУ»	–	програмно-технічний комплекс «Автоматизована система енергоспоживання в університеті»
МНК	–	метод найменших квадратів
ФНЧ	–	фільтри низьких частот
СК	–	системи керування
ІППН	–	імпульсний перетворювач постійної напруги

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження. На соціально-економічний розвиток як держави у значній мірі впливає зростання цін на енергоносії. Питання ефективного використання енергетичних ресурсів в бюджетній сфері все активніше ініціюється з боку держави. Освітня реформа в Україні передбачає децентралізацію управління та фінансову автономію закладів вищої освіти для підвищення рівня їх конкурентоспроможності та стійкого розвитку в довгостроковій перспективі, не може бути успішною без адекватної відповіді на виклики в енергетичній сфері. Неєфективність існуючих підходів до управління процесами енергозбереження в системі закладів вищої освіти потребує обґрунтування та реалізації нових шляхів управління енергоефективністю.

Сучасний ЗВО – це великий господарюючий комплекс зі значними обсягами споживання енергоносіїв. У зв'язку зі зростанням цін на енергоносії, в умовах постійного підвищення тарифів витрати бюджетних коштів закладів вищої освіти України складають 7-11 %. Саме тому завдання підвищення енергоефективності та ощадного споживання енергоносіїв є одним з ключових у сучасних економічних умовах. У нинішніх умовах вимоги до питань енергозбереження значно підвищились, що потребує розроблення і впровадження нових систем управління електроспоживанням у закладах бюджетної сфери, а особливо в закладах освіти України.

Однак, відсутність системного підходу до управління енергоефективністю та наявність великої кількості перешкод у визначенні норм витрат паливно-енергетичних ресурсів не дозволяють підвищити рівень енергоефективності об'єктів енергоспоживання. Зважаючи на низький рівень ефективності використання енергоносіїв у сфері освіти, відсутність структурованих та чітко визначених науково обґрунтованих управлінських методів досягнення енергетичної ефективності, недостатня інформація про енергетичні та експлуатаційні показники будівель, формують необхідність проведення

структурного аналізу використання електроенергії та розроблення моделей і засобів енергетичного моніторингу у ЗВО. Суттєвого вдосконалення потребують наявні методи оцінювання перспективних норм електроспоживання і їх застосування.

Встановлення потенціалу енергоефективності ЗВО на основі аналізу, прогнозування й планування витрат електроенергії стає особливо важливим з огляду на значні резерви управління електроспоживанням.

Актуальність теми дисертаційної дослідження полягає у створенні нових та вдосконаленні існуючих методів оцінювання енергоефективності електротехнічних комплексів в інфраструктурі ЗВО, побудови і впровадження нових управлінських моделей і засобів моніторингу електроспоживання для зменшення втрат електроенергії у внутрішніх мережах та підвищення енергоефективності закладу вищої освіти загалом.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

. Основний зміст роботи складають результати досліджень які проводились відповідно до наукового напрямку кафедри комп'ютерної інженерії та електромеханіки Київського національного університету технологій та дизайну (КНУТД) у відповідності до напрямку «Енергетика та енергоефективність», Закону України № 2519-VI від 09.09.2010 р. «Про пріоритетні напрямки розвитку науки і техніки» у рамках виконання НДР «Структурно-параметричний синтез комбінованих систем електроживлення енергоефективних будівель (пасивних будинків) на основі smart-технологій» (номер держреєстрації 0115U002487), «Підвищення енергоефективності системи електроспоживання з використанням активних силових фільтрів» (номер державної реєстрації 0117U000999), «Нормування витрат енергоносіїв як чинник сталого розвитку ВНЗ» (номер держреєстрації 0115U002487). Автор брав участь у виконанні науково-дослідних робіт як виконавець.

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційного дослідження є вдосконалення методів та засобів управління режимами споживання електричної енергії для підвищення енергоефективності електротехнічних комплексів інфраструктури закладів вищої освіти.

Досягнення мети обумовило розв'язання наступних наукових завдань:

1. Провести аналіз сучасної нормативної бази у сфері підвищення енергоефективності, стану електрозабезпечення ЗВО та нормування споживання енергоносіїв;

2. Розробити математичні моделі споживання електроенергії в інфраструктурі ЗВО на основі прогнозування питомих показників з урахуванням призначення будівель, особливих періодів освітнього процесу, сезонності та підвищення ефективності використання аудиторного фонду ЗВО;

3. Розробити структуру та принципи функціонування програмно-технічного комплексу управління електроспоживанням у системі енергоменеджменту ЗВО;

4. Розробити моделі визначення складових повної потужності трифазної чотирипровідної системи електроживлення для розрахунку додаткових втрат електроенергії внаслідок несиметрії та нелінійності електроспоживачів в електротехнічних комплексах інфраструктури ЗВО.

5. Дослідити режими трифазних мереж з несиметричним та нелінійним навантаженням та обґрунтувати алгоритми роботи паралельних активних фільтрів для підвищення енергоефективності внутрішніх мереж ЗВО;

Об'єкт дослідження. Процеси електроспоживання в електротехнічних системах інфраструктури закладу вищої освіти.

Предмет дослідження. Розроблення моделей управління електроспоживанням та зменшення втрат електроенергії шляхом використання паралельних активних фільтрів в електротехнічних комплексах інфраструктури ЗВО для підвищення їх енергоефективності.

Методи дослідження. В дисертації для аналізу і вирішення поставлених наукових завдань використані загальнонаукові та спеціальні методи дослідження, зокрема множинний регресійний аналіз з комп'ютерними реалізаціями статистичного аналізу електроспоживання, теорію електричних кіл.

Наукова новизна отриманих результатів і положень, що виносяться на захист, полягає у поглибленні існуючих, розвитку та обґрунтуванні нових підходів управління електроспоживанням та зменшенням втрат електроенергії в електротехнічних комплексах інфраструктури ЗВО для підвищення їх енергоефективності, зокрема:

1. Вперше запропоновано метод аналізу рівнів електроспоживання з урахуванням особливих періодів освітнього процесу, сезонності та підвищення ефективності використання аудиторного фонду, що дозволило отримати математичний апарат для планування витрат на електрозабезпечення ЗВО;

2. Дістали подальшого розвитку математичні моделі прогнозування питомого споживання електроенергії об'єктами інфраструктури ЗВО з урахуванням класу енергоефективності будівель, що дозволило достовірно оцінювати рівні електроспоживання та здійснювати техніко-економічне обґрунтування впровадження паралельних активних фільтрів для зменшення втрат у електротехнічних комплексах інфраструктури ЗВО;

3. Отримані нові аналітичні вирази для складової повної потужності трифазної чотирипровідної системи електроживлення, яка зумовлена основною гармонікою струму нейтралі та потужністю спотворення за відомими значеннями активних та реактивних потужностей окремих фаз, які використані для розрахунку додаткових витрат електричної енергії в електротехнічних комплексах інфраструктур ЗВО без зміни метрологічної бази;

4. Удосконалено спосіб керування паралельним активним фільтром трифазної чотирипровідної системи електропостачання, який відрізняється

збільшенням інтервалу осереднення потужності навантаження та напруг живлення до тривалості періоду зміни навантаження, що дозволяє майже вдвічі зменшити втрати в залежності від форми зміни графіку активної потужності навантаження.

Практичне значення отриманих результатів. Одержані результати дали змогу шляхом моделювання виконати прогнозне оцінювання рівнів електроспоживання і перевірити їх достовірність, порівнюючи їх з даним служби енергоменеджменту університету за попередні роки.

Використання результатів моделювання дозволяє розробляти методичні рекомендації щодо впровадження комплексу енергоощадних заходів в освітньому закладі з урахуванням існуючої інженерної інфраструктури та підвищити ефективність управління електроспоживанням.

Розроблена методика розрахунку енергозберігаючого ефекту від застосування паралельного активного фільтра в трифазній чотирипровідній системі електроживлення з урахуванням його власних втрат.

Результати, отримані в дисертаційній роботі, впроваджено в ТОВ НВП «Техносервіспривод» з метою підвищення енергетичної ефективності системи електроживлення та забезпечення задовільних показників розроблено систему керування паралельними активним фільтром трифазної чотирипровідної системи живлення встановленою потужністю 100 кВА, що підтверджено довідкою від 17 серпня 2020 р.

Також результати, отримані в дисертаційній роботі, використані Центром енергоменеджменту Навчально-наукового інституту енергетики, автоматики і енергозбереження при розробленні Методики визначення складових додаткових витрат електричної енергії в електротехнічних комплексах університету та впроваджені у базові дисципліни підготовки студентів за спеціальністю 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», що підтверджено довідкою від 20 листопада 2020 р.

Крім того, результати досліджень впроваджено у навчальному процесі Київського національного університету технологій та дизайну. У дисципліні «Енергоефективність та енергозбереження у системах енергоспоживання» відображені принципи дослідження силових активних фільтрів, при керуванні струмами джерела трифазної чотирипровідної системи електропостачання зі збільшенням інтервалу осереднення потужності навантаження та напруг живлення. Лекція 9 «Пасивні та активні фільтри вищих гармонік», що підтверджено довідкою від 7 вересня 2020 р.

Особистий внесок здобувача. Усі наукові положення та результати дисертаційної роботи, що виносяться на захист, отримані здобувачем самостійно. Особистий внесок здобувача в роботах, опублікованих в співавторстві такий: У роботах які були опубліковані у співавторстві, здобувачеві належать наступні результати: у [1] – визначено питомі показники електроспоживання у будівлях ЗВО з урахуванням впливу особливостей організації освітнього процесу, сезону та експлуатаційних чинників; у [2] – досліджено наявність мультиколінеарності лінійні регресійні моделі електроспоживання в будівлях університету з урахуванням кількості проживаючих у гуртожитках, температури навколишнього середовища та особливостей графіка освітнього процесу в опалювальний період; у [3] – запропоновано оцінювати енергозберігаючий ефект від застосування паралельних активних фільтрів в системах електроживлення величиною коефіцієнта виграшу за потужністю втрат; у [4] – досліджено можливість перерозподілу добового графіку електроспоживання на інтервал дії пільгового тарифу з використанням паралельних активних фільтрів з накопичувачами енергії; у [5] – запропоновано формули розрахунку електричних опорів фазних та нейтрального проводів трифазної чотирипровідної системи електроживлення на основі вимірів напруг еталонних навантажень; у [6] – запропоновано введення розширених регресійних моделей, які додатково включають в себе так

звані фіктивні змінні, додатні значення яких вказують на наявність періоду з підвищеними рівнями електроспоживання; у [7] – розроблено методику визначення складових повної потужності за значеннями активних та реактивних потужностей окремих фаз; у [8] – проілюстровано застосування методики оцінювання енергозберігаючого ефекту від застосування паралельних активних фільтрів при періодично змінюваному навантаженні коефіцієнтом виграшу з енергією втрат розрахунком енергозберігаючого ефекту за результатами тижневого моніторингу споживання електроенергії.

Апробація матеріалів дисертації. Базові положення, висновки та результати дослідження доповідались автором та отримали схвалення на міжнародних науково-практичних конференціях: «Енергоефективний університет» (Київ, Київський національний університет технологій та дизайну, 26 жовтня 2017 р.); «Енергоефективна школа» (Київ, Національний еколого-натуралістичний центр учнівської молоді МОН України, 21-22 вересня 2017 р.); «Обробка сигналів і негаусівських процесів», (Черкаси, Черкаський державний технологічний університет, 24 – 26 травня 2017 року); «Проблеми сучасної електротехніки-2018» (Київ, НТУ України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», 4-8 червня 2018 р.); «Мехатронні системи: інновації та інжиніринг» (Київ, Київський національний університет технологій та дизайну, 15 червня 2018 р.); «Проблеми та перспективи розвитку енергетики, електротехнологій та автоматики в АПК» (Київ, Національний університет біоресурсів та природокористування, 19 грудня 2019р.); та наукових семінарах кафедри комп'ютерної інженерії та електромеханіки КНУТД (2015 – 2020 рр.).

Публікації. Основний зміст дисертаційної роботи відображено у 12 публікаціях, у тому числі: 8 статей у наукових фахових виданнях України (з них одна – у SCOPUS), 2 – у збірниках наукових праць та тезах доповідей, 2 – патенти України на корисну модель.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається із вступу, 4 розділів, списку використаних джерел, додатків. Загальний обсяг дисертації становить 197 сторінок, з яких основний зміст викладений на 153 сторінках друкованого тексту, містить 47 рисунків, 23 таблиць. Список використаних джерел складається з 104 найменувань. Додатки містять акти впровадження результатів роботи, список публікацій за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

[1] В. В. Каплун, В. М. Бобровник, «Оцінювання енергоефективності електротехнічних комплексів вищих навчальних закладів на основі нормування питомих показників електроспоживання,» *Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. Технічні науки*, вип. 5(90), с. 59-70, 2015.

[2] В. В. Каплун, С. М. Красницький, В. М. Бобровник, Г. С. Жулай, «Математичне моделювання електроспоживання у будівлях вищих навчальних закладів,» *Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. Технічні науки*, вип. 4(112), с. 61-68, 2017.

[3] В. В. Каплун, В. М. Бобровник, М. Ю. Артеменко, С. Й. Поліщук, «Розрахунок енергозберігаючого ефекту від застосування паралельних активних фільтрів в трифазній чотири провідній системі електропостачання при збільшенні інтервалу осереднення вимірюваних величин,» *Електроніка та зв'язок*, вип. 4(99), с. 18-24, 2017.

[4] В. В. Каплун, В. М. Бобровник, М. Ю. Артеменко, С. Й. Поліщук, «Перспективи застосування паралельних активних фільтрів з накопичувачами енергії для підвищення енергоефективності трифазних чотирипровідних систем електропостачання,» *Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. Технічні науки*, вип. №5 (114), с. 24-31, 2017.

[5] В. М. Бобровник, В. В. Каплун, М. Ю. Артеменко, «Методика розрахунку енергозберігаючого ефекту від застосування паралельного активного фільтра в трифазній чотирипровідній системі електроживлення з урахуванням його власних втрат,» *Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. «Технічні науки»*, вип. 6 (128), с. 9-19, 2018.

[6] В. В. Каплун, С. М. Красницький, В. М. Бобровник, «Математичне моделювання електроспоживання у будівлях закладів вищої освіти.

Повідомлення 2,» *Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. Технічні науки*, вип. №2(132), с. 9-23, 2019.

[7] М. Ю. Артеменко, В. В. Каплун, В. М. Бобровник, «Визначення складових повної потужності трифазної чотирипровідної системи електроживлення за відомими активними та реактивними потужностями окремих фаз,» *Вчені записки Таврійського національного університету ім. В. І. Вернадського, Технічні науки*, вип. №30(69) Том №4, с.17-22, 2019.

[8] М. Ю. Артеменко, В. В. Каплун, В. М. Бобровник, С. Й. Поліщук, «Застосування активних фільтрів для зменшення втрат енергії трифазних систем електропостачання,» *Технічна електродинаміка*, вип. №4, с. 53-56, 2018.

[9] В. В. Каплун, В. М. Бобровник, М. Ю. Артеменко, С. Й. Поліщук, «Спосіб керування паралельним активним фільтром чотирипровідної трифазної мережі», МПК (2018.01) H02P 9/00, №125021 UA, Квіт.25, 2018.

[10] В. В. Каплун, В. М. Бобровник, «Спосіб управління електроспоживанням у системі енергоменеджменту на основі ідентифікації навантажень комутаційних апаратів», МПК (2020.01) H02J13/00, № 141976 UA, опубліковано Трав.12, 2020.

[11] В. В. Каплун, М. Ю. Артеменко, С. Й. Поліщук, В. М. Бобровник, «Розрахунок енергозберігаючого ефекту від застосування засобів активної фільтрації в трифазній чотирипровідній системі електропостачання», *на VI міжн. наук.-практ. конф. Обробка сигналів і негаусівських процесів*, Черкаси, 2017, с. 82-84.

[12] В. М. Бобровник, В. В. Каплун, «Особливості методу визначення енергоспоживання в гуртожитках Київського національного університету технологій та дизайну», *на міжн. наук.-практ. конф. Мехатронні системи: інновації та інжиніринг*, Київ, 2017, с. 221-222.

[13] А. Ф. Жаркин, В. А. Новский, С. А. Палачев, *Нормативно-правовоерегулирование качества электрической энергии. Анализ украинских и*

европейских законодательных актов и нормативно-технических документов. Киев, Украина: Ин-т электродинамики НАН Украины, 2010.

[14] М. І. Данилов та ін., *Стратегія енергозбереження в Україні: Аналітично-довідкові матеріали.* Київ, Україна: Академперіодика, 2006.

[15] В. А. Жовтянського, М. М. Кулик, Б. С. Стогній, *Стратегія енергозбереження в Україні: Аналітичні матеріали в 2-х т. Т.2: Механізми реалізації політики енергозбереження.* Київ, Україна: Академперіодика, 2006.

[16] Верховна Рада України. (1994, Черв. 01). Закон № 74/94-вр, Про енергозбереження. [Електронний ресурс]. Доступно: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/74/94-%D0%B2%D1%80#Text>

[17] О. М. Суходоля, «Розвиток регіональної політики енергозбереження», на міжнародній науково-технічній конференції «Енергоефективність 2002», Київ, 2002, С.15-16.

[18] В. В. Каплун, В. Г. Щербак, «Багатокритеріальний факторний аналіз енергетичної ефективності будівель вищого навчального закладу,» *Актуальні проблеми економіки*, № 12, с. 349-359, 2016.

[19] І. М. Грищенко, В. В. Каплун, М. В. Дяченко, О. В. Власенко, Р. В. Каплун, Г. С. Жулай, *Управління енергоспоживанням у вищих навчальних закладах.* Київ, Україна: КНУТД, 2013.

[20] Кабінет міністрів України. (1999, Лист. 30). Постанова № 2183, Про скорочення енергоспоживання бюджетними установами, організаціями та казенними підприємствами. [Електронний ресурс]. Доступно: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2183-99-%D0%BF#Text>

[21] Кабінет міністрів України. (2017, Серп. 18). *Розпорядження № 605-р, Про схвалення Енергетичної стратегії України на період до 2035 року “Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність.* Електронний ресурс]. Доступно: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/605-2017-%D1%80#n2>

[22] Ю. А. Веремійчук, «Комплексне оцінювання ефективності управління режимами електроспоживання,» дис. канд. техн. наук., Київ. Нац. техн. ун-т України "Київ. політехн. ін-т", 2015.

[23] О. А. Миколук, «Теоретичні підходи до трактування поняття «енергетична безпека»,» *Причорноморські економічні студії*, № 7, с. 129-133, 2016.

[24] С. Ф. Єрмілов, «Державна політика енергоефективності в українському та європейському контексті,» *на VII Міжнародному енергоекологічному конгресі «Енергетика. Екологія. Людина»*, Київ, 2007, с. 27-42.

[25] А. В. Гринев, «Методы управления энергопотреблением промышленного предприятия с использованием процессных энергетических характеристик,» дис. канд. экон. наук, Санкт-Петербургский полит. ун-т Петра Великого, Санкт-Петербург, 2015.

[26] И. В. Гофман, *Нормирование потребления энергии и энергетические балансы промышленных предприятий*. Москва, Россия: Энергия, 1966.

[27] А. В. Праховник, В. І. Дешко, О. М. Шевченко, «Аналіз енергетичних показників навчального корпусу,» *Енергетика та електрифікація*, № 4, с. 58-67, 2011.

[28] А. В. Бобряков, «Мониторинг энергопотребления объектов бюджетной сферы – основы управления энергосбережением отрасли,» *Изв. ТулГУ Сер. Электроснабжение, электрооборудование и энергосбережение*, с. 7-15, 2006.

[29] С. П. Денисюк, В. П. Опришко, «Локальні інтелектуальні енергетичні системи з розподіленими системами енергетичного менеджменту,» *Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI ст.*, с. 142-144, 2015.

[30] В. І. Дешко, О. М. Шевченко, «Структурний аналіз енергоспоживання й енергозбереження в галузі освіти,» *Наукові вісті*

Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут", № 6, С. 139-147, 2011.

[31] В. И. Гнатюк, «Оптимальное управление электропотреблением техноценоза методами рангового анализа,» *Электрика*, №1, с. 40-46, 2010.

[32] В. А. Кадієвський, Т. І. Бурцева, «Наукове та кадрове забезпечення реалізації програм енергозбереження в промисловості України та регіону,» *Збірник наукових праць Черкаського державного технологічного університету*, № 27(1), с. 19-23, 2011.

[33] А. В. Бобряков, А. В. Корнеев, «Подходы к прогнозированию объемов энергопотребления и средств на их оплату в бюджетной сфере экономики,» *Современные информационные технологии*, № 2 с. 14–16, 2005.

[34] А. В. Праховник, В. І. Дешко, О. М. Шевченко, «Енергетична сертифікація будівель,» *Наукові вісті Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут"*, № 1, с. 140–153, 2011.

[35] В. П. Розен, Ф. В. Ткаченко, «Підвищення якості проведення енергетичного моніторингу ВНЗ шляхом застосування методів кластерного ієрархічного аналізу та центрографічного методу визначення концентрації згущення об'єктів,» *Енергетика та електрифікація*, №3, с. 32–37, 2013.

[36] О. М. Шевченко, «Система енергетичного оцінювання об'єктів галузі освіти,» дис. канд. техн. наук, НТУУ «КПІ», Київ, 2012.

[37] Є. І. Крижанівський, В. О. Онищенко, М. Є. Скиба, Є. М. Суліма, *Енергоефективні технології у вищих навчальних закладах*, Івано-Франківськ: Видавництво ІФНТУНГ, 2011.

[38] С. В. Марценко, «Математичне моделювання та статистичні методи обробки даних вимірювань в задачах моніторингу електронавантаження,» дис. кан. техн. наук, Терноп. НТУ ім. Івана Пулюя, Тернопіль, 2011.

[39] А. В. Кузнецов, Л . Т . Магазинник, В. П. Шингаров, *Структура и тарифное стимулирование управления режимами потребления электрической энергии*. Ульяновск : УлГТУ, 2003.

[40] О. П. Лазуренко, Г.І. Черкашина, «Аналіз методів управління електричним навантаженням щодо можливості їх використання у побуті,» *Вісник НТУ «ХПІ»*, с. 220, 2010.

[41] К.Р. Сафіуліна, А.Г. Колієнко, Р.Ю. Тормосов, *Енергозбереження в університетських містечках*. Київ, Україна: Поліграф плюс, 2010.

[42] В. І. Дешко, О. М. Шевченко, І. Ю. Білоус, О. П. Красовський, «Енергетична сертифікація будівель закладів соціальної сфери,» *Наука та будівництво*, № 2, с. 14–20, 2016.

[43] Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України (2016, Лип. 08). Наказ №220, Про затвердження ДБН В.2.6-31:2016 "Теплова ізоляція будівель". [Електронний ресурс] Доступно: <https://www.minregion.gov.ua/wp-content/uploads/2016/01/DBN-V.2.6-31-2016-Teplova-izolyatsiya-budivel.pdf>

[44] В. М. Бабаєв, П. П. Говоров, В. П. Говоров, О. В. Король, «Енергозбереження в системах теплопостачання та освітлення будівель,» *Будівельні конструкції*, № 77, с. 169-173, 2013.

[45] В. Н. Бабаєв, Ф. П. Говоров, Т. В. Рапина, К. А. Рапина, «Возможности термомодернизации зданий городов,» *Проблеми, перспективи і нормативно-правове забезпечення енерго-, ресурсозберігання в житлово-комунальному господарстві*, Алушта, 2012, с. 14-15.

[46] О. І. Соловей, І. Ю. Білоус, О. М. Шевченко, «Оцінка рівня ефективності електроспоживання об'єктів житлового комплексу (на прикладі гуртожитків НТУУ"КПІ",» *Будівельні конструкції*, №77, с. 293-297, 2013.

[47] А. А. Анфилатов, А. А. Емельянов, А. А. Кукушкин, *Системный анализ в управлении*, Москва, Россия: ФиС, 2007.

[48] Державний комітет України з енергозбереження (1999, Жов. 25). Наказ №91, Про затвердження Міжгалузевих норм споживання електричної енергії та теплової енергії для установ і організацій бюджетної сфери України. [Електронний ресурс]. Доступно: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0175-00#Text>

[49] В. І. Дешко, О. Ю. Майстренко, В. Я. Євтухов, О. М. Шевченко, «Тепловий аудит будівель як обов'язкова складова системи енергетичного менеджменту,» *Новини енергетики*, № 9, с. 41-47, 2011.

[50] Технический комитет по стандартизации в области электромагнитной совместимости технических средств, ТК 30. (1997. Ноябрь. 21). ГОСТ 13109-97. Протокол №12, О введении Межгосударственного стандарта. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. [Електронний ресурс]. Доступно:http://odz.gov.ua/lean_pro/standardization/files/elektromagnitnaja_sovmestimost_2014_03_11_1.pdf

[51] Український науково-дослідний і навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості. (2017. Груд. 26). Наказ № 461, Про прийняття національних нормативних документів, гармонізованих з європейськими та міжнародними нормативними документами, скасування національних нормативних документів та поправки до національного нормативного документа. [Електронний ресурс]. Доступно: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0461774-17#Text>.

[52] Міністерства палива та енергетики України. (2017, Лип. 21). Наказ № 476, Про затвердження Правил улаштування електроустановок. [Електронний ресурс]. Доступно: http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/uk/publish/officialcategory?cat_id=222219.

[53] А. Ф. Жаркін, В. О. Новський, Д. О. Малахатка, «Комплексне покращення якості електроенергії та забезпечення електробезпеки в локальних системах електропостачання при застосуванні гібридних фільтрокомпенсуючих перетворювачів,» *Технічна електродинаміка*, №1, с. 69-77, 2018.

[54] А. Ф.Жаркін, В. О. Новський, Д. О. Малахатка, «Гібридні фільтрокомпенсуючі перетворювачі для трифазних систем з нелінійними та змінними навантаженнями,» *Технічна електродинаміка*, №4, с. 25-30, 2015.

[55] Державний комітет України з енергозбереження. (2002. Жов. 22), Наказ № 112, Про затвердження «Основних положень з нормування питомих витрат паливно-енергетичних ресурсів у суспільному виробництві». [Електронний ресурс]. Доступно: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0878-02#Text>.

[56] Б. С. Серебренніков, «Управління режимом електроспоживання промислових підприємств з використанням технологічного ресурсу,» *Електротехніка та електроенергетика*, №1, с. 70-76, 2013.

[57] В. В. Каплун та ін., *Звіт про виконання КНТП «Енергоефективність та енергозбереження» в Київського національного університету технологій та дизайну у 2014 році*, Київ, Україна: КНУТД, 2014.

[58] М. П. Денисенко, Г. С. Жулай, «Особливості управління результативністю діяльності у вищих навчальних закладах України в контексті ощадливого енергоспоживання,» *Вісник Київського національного університету технологій та дизайну*, №6, с. 99-107, 2013.

[59] Локальне устаткування збору та обробки даних обліку електроенергії Київського Національного Університету технологій та дизайну: робочий проект, Київ, Україна «КНУТД», 2011.

[60] Настанова користувача. Програмно - технічний комплекс автоматизованої системи контролю та обліку електроенергії NovaSyS Bussiness.

ТОВ «НІК», 2012. [Електронний ресурс]. Доступно:
<http://www.nik.net.ua/ru/product/PC-NovaSyS-for-AMR>.

[61] И. Вучков, Л. Бояджиева, Е. Солаков, *Прикладной линейный регрессионный анализ*. Москва, Россия: Финансы и статистика, 1987.

[62] Н. Р. Дрейпер, Г. Смит, *Прикладной регрессионный анализ*. Москва, Россия: Диалектика, 2017.

[63] Дж. Райс, *Матричные вычисления и математическое обеспечение*, Москва, Россия: Мир, 1984.

[64] А. А. Халафян, *Статистический анализ данных*, Москва, Россия: Бином, 2010.

[65] A. F. George Seber Alan J. Lee John, *Linear Regression Analysis, 2nd Edition*, New Jersey, USA: Wiley & Sons, Inc., Hoboken, 2003.

[66] И. Ликеш, Й. Ляга, *Основные таблицы математической статистики*. Москва, Россия: Финансы и статистика, 1985.

[67] К. Мардиа, П. Земроч, *Таблицы F-распределений*. Москва, Россия: Наука, 1984.

[68] В. П. Боровиков, И. П. Боровиков, *Statistica*. Москва, Россия: «Филинь», 1997.

[69] А. Я. Оленко, *Комп'ютерна статистика*. Київ, Україна: ВПЦ «Київський університет», 2007.

[70] Дж. Тьюки, *Анализ результатов наблюдений*. Москва, Россия: Мир, 1982.

[71] М. Я. Кельберт, Ю. М. Сухов, *Основные понятия теории вероятностей и математической статистики*. Москва, Россия: МЦНМО, 2007.

[72] И. И. Гихман, А. В. Скороход, М. И. Ядренко, *Теория вероятностей и математическая статистика*, Київ, Україна: Вища школа, 1979.

[73] С. М. Краснитський, Л. Ф. Хилюк, *Теорія ймовірностей та її застосування у задачах легкої промисловості*. Київ, Україна: НМК ВО, 1991.

[74] В. В. Каплун та ін., *Звіт про виконання КНТП «Енергоефективність та енергозбереження» Київського національного університету технологій та дизайну у 2016 році*. Київ, Україна: КНУТД, 2017.

[75] В. В. Каплун та ін., *Звіт про виконання КНТП «Енергоефективність та енергозбереження» Київського національного університету технологій та дизайну у 2015 році*. Київ, Україна: КНУТД, 2015.

[76] Ч. Лоусон, Р. Хенсон, *Численное решение задач метода наименьших квадратов*. Москва, Россия: Наука, 1986.

[77] В. В. Каплун та ін., *Звіт про виконання КНТП «Енергоефективність та енергозбереження» Київського національного університету технологій та дизайну у 2017 році*. Київ, Україна: КНУТД, 2018.

[78] L. S. Czarnecki, P. M. Haley, «Unbalanced Power in Four-Wire Systems and Its Reactive Compensation,» *IEEE Trans. Power Delivery*, №30, pp. 53–63, 2014.

[79] L. S. Czarnecki, «Currents' Physical Components (CPC) concept: a fundamental of Power Theory,» *Przeгляд Elektrotechniczny*, vol. 84, № 6, pp. 28-37, 2008.

[80] L. S. Czarnecki, «Effects of supply voltage asymmetry on IRP p-q theory based switching compensator control,» *IET on Power Electronics*, vol. 3, № 1. – pp. 11–17, 2010.

[81] Ю. А. Сиротин, О. Г. Гриб, Д. А. Гапон, Т. С. Иерусалимова, С. В. Швец, «Учет неактивных составляющих полной мощности,» *Вісник НТУ «ХПИ»*, №42(948), с. 71–76, 2017.

[82] Ю. А. Сиротин, «Векторная мгновенная мощность и энергетические режимы трехфазных цепей,» *Технічна електродинаміка*, №6, с. 57–65, 2013.

[83] Р. Дрехслер, *Измерение и оценка качества электроэнергии при несимметричной и нелинейной нагрузке*. Москва, Россия: Энергоатомиздат, 1985.

[84] S. Nuccio et al., *IEEE Standard 1459-2010. IEEE standard definitions for the measurement of electric power quantities undersinusoidal, nonsinusoidal, balanced, or unbalanced conditions*. New York, USA: IEEE Power & Energy Society, 2010.

[85] Г. Корн, Т. Корн, *Справочник по математике: для научных работников и инженеров*. Москва, Россия: Наука, 1978.

[86] Національна комісія, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг. (2015, Лют. 26). *Постанова №221, Про внесення змін до Порядку застосування тарифів на електроенергію*. [Електронний ресурс]. Доступно: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/z0236-15>.

[87] S. Fryze, «Moc czynna, bierna i pozorna układu 3-fazowego o odkształconych przebiegach napięć fazowych i prądów przewodowych,» *Wybrane zagadnienia teoretycznych podstaw elektrotechniki*, pp. 250–256, 1966.

[88] Fryze S. «Active, reactive and apparent power in circuits with nonsinusoidal voltage and current,» *Przegląd Elektrotechniczny*, № 7-8, pp.193-203, 1931.

[89] H. Akagi, E. H. Watanabe, M. Aredes, *Instantaneous power theory and applications to power conditioning*. Piscataway, New Jersey, USA: IEEE Press, 2003.

[90] H. Akagi, Y. Kanazawa, A. Nabai, «Generalized theory of the instantaneous reactive power in three-phase circuits,» *Proceeding of Int. Power Electronics Conf*, pp. 1375-1386, 1983.

[91] H. Akagi, «Active harmonic filters,» *Proceedings of the IEEE*, vol. 93, № 12, pp. 2128-2141, 2005.

[92] H. Akagi, «Modern Active Filters and Traditional Passive Filters,» *Bulletin of the Polish Academy of Science, Technical Sciences*, vol. 54, pp. 255-269, 2006.

[93] J. C. Montano, P. Salmeron and J. P. Thomas, «Analysis of Power Losses for Instantaneous Compensation of Three-Phase Four-Wire System,» *IEEE Trans. Power Electron*, vol. 20, №4, pp. 901-907, 2005.

[94] J. C. Montano, P. Salmeron, «Compensation in nonsinusoidal, unbalanced three-phase four-wire systems with active power-line conditioner,» *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 17, № 4, pp. 1079-1084, 2002.

[95] A. E. Emanuel, «Power definitions and the physical mechanism of power flow,» *Chichester: John Wiley & Sons, Ltd.*, pp. 259-264, 2010. ISBN 978-0-470-66074-4

[96] М. Ю. Артеменко, *Сучасна теорія потужності систем електроживлення та енергоефективність силових фільтрів*. Київ, Україна: КПІ, 2016.

[97] М. Ю. Артеменко, *Потужність систем електроживлення та енергоефективність силових фільтрів*, Київ, Україна: Аверс, 2016.

[98] М. Ю. Артеменко, Л. М. Батрак, В. М. Михальський, С. Й. Поліщук, «Оптимізація енергетичних характеристик трифазної чотирипровідної системи живлення з паралельним активним фільтром у несиметричному синусоїдному режимі,» *Технічна електродинаміка*, № 2, с. 30-37, 2015.

[99] М. Ю. Артеменко, В. В. Каплун, «Енергоефективність паралельних активних силових фільтрів трифазних систем електроживлення,» *Вісник Київського національного університету технологій та дизайну*, № 5(102), с. 11-19, 2016.

[100] С. Й. Поліщук, М. Ю. Артеменко, В. М. Михальський, Л. М. Батрак, «Спосіб керування паралельним активним фільтром чотирипровідної трифазної мережі», МПК H02P 9/00, № 84949, Бюл. № 21, Лис. 11, 2013.

[101] М. Ю. Артеменко, Л. М. Батрак, «Спосіб керування паралельним активним фільтром чотирипровідної трифазної мережі», МПК H02P 9/00, № 90730, Бюл. № 11, Чер. 10, 2014.

[102] K. Sowa, M. Baszyński, S. Piróg, «Jednofazowy energetyczny filtr aktywny z zasobnikiem energii do kompensacji wahań mocy czynnej w linii zasilającej - badania symulacyjne,» *Przegląd Elektrotechniczny*, №3, pp. 260-266, 2017.

[103] Powerpack utility and business energy storage, 2017. [Online]. Available: <https://www.tesla.com/powerpack>. Accessed on: May 12, 2017.

[104] C. A. Quinn, N. Mohan and H. Mehta, "A four-wire, current-controlled converter provides harmonic neutralization in three-phase, four-wire systems," Proceedings Eighth Annual Applied Power Electronics Conference and Exposition,, San Diego, CA, USA, 1993, pp. 841-846, doi: 10.1109/APEC.1993.290773.

