

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 чотиририпровідної 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 урахування 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 $e(z)$ і $e(\varphi_3)$, використовуючи лише по одній пояснювальній змінній, є простими і зручними в користуванні. При цьому модель $e(\varphi_3)$ має суттєву перевагу перед моделлю $e(z)$ 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 $e(t)$ мало в чому поступалася моделі $e(t, \varphi_3)$, 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 z і φ_3 , 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_{z,φ_3} дорівнює 0,445, що в даному випадку є значимим на рівні $p < 0,05$. 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_{21}).

Як виявилось, серед інших можливих варіантів моделей з двома пояснювальними змінними, не містять незначущих коефіцієнтів лише $e(t, \varphi_3)$ і $e(z, N)$. При цьому для останньої моделі маємо $R = 0,5821, F_{2,21} = 5,3835, S = 28,16$. Зокрема, для $e(z, N)$ не виконується нерівність $F_{p-1, n-p} > 4u_{1-\alpha}^{F_{p-1, n-p}}$, а основні статистичні показники поступаються розглянутій вище моделі $e(\varphi_3)$. Для моделі $e(t, \varphi_3)$ маємо: $e(t, \varphi_3) = 132,4503 - 0,8208t + 63,2881\varphi_3; R = 0,8725, F_{2,21} = 33,503, S = 17,252$.

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 $e(t, \varphi_3)$.

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

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

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

$$k_{B\tau} = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} p^2(t) dt \times \left[\frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} p(t) dt \right]^{-2} \times \frac{1}{k_p^2} = k_w k_B, \text{ яка названа коефіцієнтом}$$

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

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 $k_{Br} = \frac{3\left(\sum_{k=1}^N I_k^2\right)\left(\sum_{k=1}^N U_{\phi k}^2\right)}{\left(\sum_{k=1}^N P_k\right)^2}$, 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

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

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. Неефективність 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 чотиририпровідної 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 вирашу 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.

РОЗДІЛ 1

ТЕОРЕТИКО-МЕТОДИЧНІ ЗАСАДИ ПОБУДОВИ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯМ ЗАКЛАДІВ ВИЩОЇ ОСВІТИ

1.1 Огляд досвіду побудови та використання систем управління електроспоживанням

Проблема зростання вартості енергетичних ресурсів та їх заощадливого використання з кожним роком набуває все більшої ваги [13], [14], [15]. Світове товариство вживає активних заходів для зменшення негативного впливу людини на навколишнє середовище, підвищення ефективності використання існуючих ресурсів та пошуку нових, ефективних джерел енергії. Проте, незважаючи на зусилля світової спільноти з популяризації нетрадиційних джерел енергії та енергоефективності, переважна частина економік країн світу досі працює на викопних енергоносіях, що в кінцевому результаті призводить до катастрофічних змін клімату і порушення екологічного балансу. У зв'язку з цим особливої ваги набуває питання ефективного використання енергоресурсів.

Україна має дуже високу енергоємність валового внутрішнього продукту і економіка країни є надзвичайно енергозатратною. Тому одним із основних пріоритетів модернізації і технологічного розвитку економіки країни є підвищення її енергоефективності [16]. Цей напрям є системоутворюючим і взаємопов'язаним з усіма сферами діяльності та значною мірою впливає на розвиток країни [17]. Питомі енерговитрати української економіки зросли за останні 20 років більше ніж 1,3 рази і хоча за останні 10 років спостерігається позитивна динаміка знаження енергоемності валового внутрішнього продукту, вона продовжує залишатися достатньо високою і в 2,1-3,7 рази перевищує енергоємність економічно розвинутих країн [18], [19]. Високі енерговитрати призводять до зниження конкурентоспроможності більшості видів української

продукції як на міжнародних, так і на внутрішніх ринках, що додатково погіршує економічну і соціальну ситуацію в країні [20].

Посилена орієнтація на енергозбереження є чи не єдиним логічним шляхом розвитку енергетичного комплексу. Україна має значний потенціал енергозбереження: зменшення енерговитрат може забезпечити результат, співставний за масштабами з додатковим видобутком (закупівлею) природних енергоносіїв. Зниження споживання енергоресурсів шляхом впровадження енергоощадних заходів вдвічі дасть змогу в 3 рази зменшити капіталовкладення, необхідні для їх реалізації в порівнянні з капіталовкладеннями для нарощування виробництва такої самої кількості енергії [18]. Енергоефективність повинна стати ключовим чинником забезпечення конкурентоспроможності в усіх сферах економічної діяльності.

За останні роки питання управління енергоспоживанням, створення й удосконалення енергоринку та підвищення ефективності функціонування енергетики в цілому набули особливої актуальності і у зв'язку з реформуванням ринкових відносин в галузі. Пропонується велика кількість технічних рішень, законодавчих ініціатив, економічних та соціальних перетворень [21].

Ефективність функціонування енергетики в сучасних умовах залежить від багатьох факторів, серед яких визначальними є [22]: структура та якісний склад генеруючих потужностей, збалансованість попиту та пропозицій щодо потужності на енергії у будь-який час (як у розрізі доби так і року), якість палива, стан електричних мереж, впровадження та використання методів управління електроспоживанням тощо. Слід відмітити загальнодержавні та організаційно-правові питання: належності основних фондів до державної чи до недержавної форми власності та їх співвідношень, ступеня державного регулювання, від конкретних «правил гри» на фондовому енергетичному ринку, від обраних правил функціонування енергоринку та взаємовідносин між його учасниками.

На основі аналізу стану основних концептуальних положень управління енергоспоживанням виявлено, що існують дві концепції управління енергоспоживанням: «радянська» модель і «західна» модель енергоменеджменту.

Сильною стороною радянської моделі енергоменеджменту є добре розроблена теорія і методика складання та аналізу енергетичних балансів технологічних операцій, агрегатів, цехів і підприємства (організації) в цілому. Слабкою стороною є те, що радянська модель управління енергоспоживанням була розроблена для планової економіки і централізованої системи управління економікою. У зв'язку з цим вона не в повній мірі відповідає вимогам сучасного етапу розвитку економіки.

Головною перевагою західної моделі енергетичного менеджменту є регулярність і періодичність проведення заходів по енергозбереженню, наявність чітко формалізованої процедури обстеження підприємства, інтегрування управління енергоспоживанням в загальну структуру управління підприємством з виділенням у кожному виробничому підрозділі центрів відповідальності за раціональне використання ПЕР.

Одним із сучасних підходів, який використовується в Європі, Америці та Східних країнах є DSM (demand-side management – управління попитом) програми якого зосереджені на чотирьох наступних напрямках [22], баранн, [24]:

- Load management – регулювання навантаженням, включає в себе застосування тарифного меню, використання енергозберігаючих методів, що призводить до зниження пікового навантаження;
- Energy efficiency – енергоефективність, екологічні вигоди, адміністративні реформи, заходи та економічне заохочення споживачам, що використовують нетрадиційні та відновлювані джерела енергії;

- Energy conservation – енергозбереження, заходи які проваджують на промислових підприємствах, щодо скорочення годин роботи, регулювання електричної потужності шляхом збільшення продуктивності виробництва;

- Fuel substitution – заміна палива або використання інших видів палива, формування політики щодо заміни генеруючих об'єктів на більш ефективні і з меншим впливом на екологію з використанням інших видів палива.

Основними причинами використання в Європейських країнах та країнах Америки такої політики щодо управління енергоспоживанням стали [22]: енергетична криза, дорожчання енергетичних ресурсів, необхідність зменшення негативного екологічного впливу підприємств енергетичної галузі на довкілля. Але, що саме головне, споживач електричної енергії усвідомлював необхідність проведення такої політики, був підготовлений до можливих варіантів розвитку подій, крім того мав можливість отримати економічний ефект від впровадження методів управління енергоспоживанням.

Враховуючи прийняття закону України «Про засади функціонування ринку електричної енергії України», виникає можливість впровадження провідних механізмів функціонування ринку електричної енергії, які використовуються у міжнародній практиці, що у свою чергу забезпечить підвищення ефективності управління, вдосконалення організаційно-правових та економічних засад ринку електричної енергії, підвищення ефективності виробництва, передачі, розподілу та постачання електричної енергії, надійності постачання, перехід та готовність ринку електроенергії в Україні до більш конкурентоздатного ринкового середовища.

Закон забезпечує досягнення дієвого та конкурентного внутрішнього ринку шляхом врегулювання питань функціонування ринку електричної енергії України, а саме:

- на засадах вільного вибору ЕО споживачем;

- рівності прав на продаж та купівлю електричної енергії; рівної можливості доступу до магістральних і міждержавних та/або місцевих (локальних) електричних мереж, рівної можливості доступу до ринку електричної енергії);

- функціонування конкурентних ринків електричної енергії: ринку двосторонніх договорів, ринку «на добу наперед», балансуючого ринку, ринку допоміжних послуг, ринку доступу до пропускної спроможності міждержавних електричних мереж, роздрібного ринку електричної енергії;

- забезпечення безперебійності електропостачання споживачам шляхом врегулювання діяльності гарантованих постачальників електроенергії;

- гарантування повноти та своєчасності фінансування розрахунків за електроенергію з гарантованими ЕО;

- врегулювання принципів розрахунків між учасниками ринку електричної енергії, впровадження рахунків із спеціальним режимом використання та механізму розподілу коштів на засадах алгоритму.

Незважаючи, що прийнятий закон формалізує ряд питань в період реформування, але нова модель ринку електричної енергії має враховувати діючі вимоги законодавства, правил, стандартів, нормативів, а також технічні, соціальні, економічні та політичні особливості певної країни або регіону. Слід виділити, що виникає необхідність розроблення нормативних документів щодо правової та регуляторної структури ринку, бізнес правил, технічних правил ринку (доступ до мережі, зведення балансів, керування графіками, керування перенавантаженням), схем ідентифікації учасників ринку і об'єктів електронного бізнесу, кодексу вимірювань (надання послуг вимірювань та доступ до результатів вимірювань), кодексу магістральних і розподільчих мереж (управління та функціонування) [22].

На основі проведеного дослідження Ю.А. Веремійчуком запропонована загальна структура комплексного управління електроспоживанням (рис. 1. 1), де

відображено основні взаємодії суб'єктів електроенергетики, методів управління і використання математичного апарату для проведення подальшого моделювання та роботи з даними [22].

Важливими кроками на шляху до впровадження комплексного управління електроспоживанням є:

- формування структурної моделі реалізації комплексного управління електроспоживанням та забезпечення дієвого впливу кожної із складових моделі на процес управління;
- визначення відповідних індикаторів управління електроспоживанням заснованих на використанні методів кластеризації та математичної статистики для аналізу показників в розрізі регіонів;
- формування методів, що дозволяють вирішувати задачі пошуку оптимальних рішень при використанні комплексного управління електроспоживанням в умовах невизначеності вихідної інформації та багатокритеріальності системи, яка володіє великою кількістю альтернатив.

Як видно з наведеної структурної схеми (рис. 1.1), до основних методів управління електроспоживанням Ю.А. Веремійчук відносить економічні, структурно-технологічні, адміністративно-правові та комунікативні. Коротко охарактеризуємо їх за матеріалами автора.

Економічні методи управління попитом в електроенергетиці, до яких можна віднести використання можливостей тарифних систем для надання споживачу відповідних ринкових (цінових) сингалів з метою вплинути на режими його споживання електричної енергії протягом різних періодів часу.

Методи структурно-технологічного управління, під якими розуміється забезпечення управління електроспоживанням, застосовуються їх під час аварійних ситуацій або дефіциті потужності, де в обов'язковому порядку повинно бути виконане розвантаження енергосистеми.



Рисунок 1.1 – Структурна схема управління електроспоживанням

Адміністративно-правові методи управління – комплекс системних заходів адміністративного та правового впливу на споживачів електричної енергії, спрямованих на встановлення певних обмежень або послідовностей дій споживачів у разі виникнення проблемних питань в енергетичній системі щодо покриття попиту на електричну енергію.

Комунікативні методи управління – це інформаційні потоки, які переважно повинні виходити від компанії. Адресатами комунікативної політики, крім споживачів, виступають різні контактні аудиторії, зокрема

власний персонал компанії, маркетингові посередники, акціонери, вищі органи державної влади (законодавчої і виконавчої) тощо.

Методам управління енергоспоживанням промислового підприємства з використанням процесних енергетичних характеристик (ПЕХ) присвячене дисертаційне дослідження А.В. Гриньова [25].

Управління енергоспоживанням на промисловому підприємстві здійснюється з використанням економічних, адміністративних (організаційно-розпорядчих) і соціально-психологічних методів з використанням інструментів управління (бюджетування, автоматизовані системи, контроль). Бюджетування дозволяє визначити найбільш ефективні умови (в т.ч. тарифи) споживання ПЕР. Автоматизовані системи надають необхідну інформацію для аналізу енергоспоживання. Під контролем розуміється процес спостереження, виявлення, аналізу, оцінювання та інформування про відхилення дійсних значень енергоспоживання від заданих або їх співпадання. Контроль забезпечує ефективність споживання ПЕР, зокрема і за рахунок організації нормування.

Норма енергоспоживання є фактором, що впливає на прийняття управлінських рішень на промисловому підприємстві при управлінні споживанням ПЕР.

На сьогодні основними методами розрахунку норм витрат ПЕР є: експериментальний, звітно-статистичний і розрахунково-аналітичний (нормативний). В основу цих методів покладено енергетичну характеристику (ЕХ) об'єкта енергоспоживання, необхідність використання якої сформульовано в у працях вчених І.В. Гофмана і А.А. Тайц. Розрізняють експериментальний (дослідний), розрахунковий і змішаний методи побудови ЕХ. [26].

Існуючі методи і організація нормування не дозволяють оперативно виконувати управління енергоспоживанням промислового підприємства, так як швидкість зміни об'єктивної норми енергоспоживання не відповідає швидкості зміни об'єкта енергоспоживання.

Промислові підприємства, як об'єкт енергоспоживання, характеризуються великим набором складних технологічних процесів, зміна стану яких у часі відбувається постійно. Це обумовлено як зміною технологічних факторів (зміна технічного стану обладнання), так і соціально-економічних та кліматичних факторів (зміна параметрів навколишнього середовища, кваліфікації персоналу тощо). В той же час існуючі методи нормування енергоспоживання не повною мірою використовують можливості систем комерційного і технічного обліку споживання ПЕР (АСУЕ), управління технологічних процесом (АСУ ТП), контролю якості сировини і готової продукції (LIMS), технічного обслуговування і ремонту обладнання (ТОіР) тощо.

У зв'язку з цим актуальним стає питання підвищення оперативності і точності одержання ПЕХ промислового підприємства для прийняття управлінських рішень.

Гриньов А.В. сформулював основні напрямки удосконалення управління енергоспоживанням промислового підприємства:

- підвищення оперативності і точності отримання ПЕХ;
- автоматизація систем збору даних обліку енергоспоживання;
- впровадження АСУ ТП; ТОіР; АС контролю сировини і готової продукції.

Сучасний розвиток систем АСУ ТП і АСУЕ, дозволило автору розробити метод одержання ПЕХ, що враховує зв'язок енергоспоживання з структурою і режимом роботи виробництва – комбінований метод отримання ПЕХ.

Комбінований метод відрізняється від існуючих тим, що для його визначення застосовуються як дані обліку енергії, так і дані систем автоматичного управління і контролю.

Комбінований метод, поєднуючи в собі переваги експериментального і розрахункового методів, дозволяє отримувати ПЕХ, використовуючи статистичні дані, що збирають системи обліку підприємства, з меншою

трудомісткістю, ніж експериментальний і більшою точністю, ніж розрахунковий метод. Це досягається за рахунок розподілення всього енергоспоживаючого обладнання на групи – енергетичні профілі і обробки статистичних даних про споживання ПЕР підприємством з врахуванням роботи того або іншого енергетичного профілю, що дозволяє виконувати побудову ПЕХ і розрахунок енергоспоживання з деталізацією вище, ніж існуюча на підприємстві система обліку споживання ПЕР.

Комбінований метод забезпечує отримання ПЕХ в оперативному режимі (режимі реального часу), з використанням якої може проводитись обґрунтоване визначення величини енергоспоживання промислового підприємства.

ПЕХ – це залежність енергоспоживання від впливаючих на нього факторів (технологічних, соціально-економічних, кліматичних), що враховує їх зміну в оперативному режимі.

З використанням ПЕХ для конкретного набору факторів (конкретних умов виробництва) може бути отримана технічно і економічно обґрунтована величина енергоспоживання.

НОЕ – технічно і економічно обґрунтована величина енергоспоживання, що враховує в оперативному режимі зміну факторів, які впливають на споживання ПЕР (технологічних, соціально-економічних, кліматичних).

НОЕ задовольняє вимоги, що висуваються до показників енергоефективності: достовірність оцінювання енергоспоживання, висока точність і оперативність визначення. Необхідність встановлення показників енергоефективності визначено також міжнародним стандартом ISO 50001.

Порівняння фактичного енергоспоживання з НОЕ забезпечує в режимі реального часу аналіз ефективності роботи підприємства, зокрема і дій оперативного персоналу, мотивуючи його на підвищення особистої відповідальності за енергозбереження і досягнення максимальних результатів енергоефективності на робочому місці.

Можливість оперативного (в режимі реального часу) отримання ПЕХ і визначення НОЕ дозволяє впливати на технологічні, організаційні і соціально-економічні аспекти функціонування підприємства – «активного» споживача і дозволяє отримати економічний ефект від своєчасності і підвищення якості прийняття управлінських рішень у питаннях:

- управління енергоспоживанням;
- ранжувати інвестиційну привабливість проектів модернізації енергоспоживаючого обладнання;
- підвищувати ефективність планування бізнес-процесів;
- мотивувати персонал на енергозбереження.

Розробленню алгоритмів і методів підвищення енергетичної ефективності, оптимізації та раціоналізації управління у сфері енергоспоживання присвячено багато праць вітчизняних і зарубіжних вчених: А.В. Праховника [27], А.В. Бобрякова [28], С.П. Денисюка [29], В.І. Дешка [30], В.І. Гнатюка [31], В.А. Кадієвського [32] та інших. Деякими авторами (А.В. Бобряков [33], В.І. Дешко, А.В. Праховник [34], В.П. Розен, Ф.В. Ткаченко [35]) пропонується удосконалена система моніторингу енергоспоживання закладів вищої освіти.

І.М. Грищенко, В.В. Каплун, М.В. Дяченко [19], О.М. Шевченко [36] провели структурний аналіз енергоспоживання й енергозбереження в галузі освіти. Зокрема у монографії «Управління енергоспоживанням у вищих навчальних закладах» зазначено, що заклади освіти мають в основному 5 груп споживачів електричної енергії: освітлення (50-70%), споживачі електродвигунів (10-30%), різноманітні нагрівальні установки (електрочайники, електроплити тощо) споживають від 10 до 20 % електроенергії, комп'ютерна техніка до 10 %, різноманітні лабораторні стенди.

Автори звертають увагу на основні причини високих показників витрат енергоресурсів у закладах вищої освіти:

- відсутність контролю керівництва за витратами енергоресурсів;

- відсутність лімітів споживання енергоресурсів;
- відсутність енергетичних паспортів;
- у багатьох установках відсутні прилади обліку енергоносіїв та води;
- відсутність автоматичного регулювання систем освітлення, а також неправильний вибір освітлювальних приладів та джерел світла;
- відсутність автоматизації регулювання систем опалення;
- значні витрати тепла через огорожувальні конструкції і вікна.

До організаційних заходів з енергозбереження та підвищення енергоефективності у закладах вищої освіти можна віднести [19]:

- розроблення техніко-економічних обґрунтувань і виготовлення проектно-кошторисної документації щодо реконструкції та модернізації інженерних мереж, які знаходяться на балансі ЗВО;
- формування уніфікованого комплексу приладового та методичного забезпечення для енергоаудиту, систем обліку, контролю і регулювання витрат енергоносіїв;
- виготовлення проектно-кошторисної документації щодо реконструкції інженерних систем будівель, облаштування їх пристроями локального обліку і обладнання для індивідуального регулювання енергоспоживання та обліку витрат енергоносіїв;
- впровадження автоматизованої системи комерційного та технологічного обліку енергоносіїв;
- створення служби диспетчеризації та енергоменеджменту ЗВО.

Розрахунок лімітів, ведення баз даних споживання енергоносіїв, доведення структурним підрозділам лімітів з енергоспоживання тощо;

- запровадження механізмів матеріального стимулювання посадових осіб за досягнуті результати при впровадженні енергозберігаючих заходів і технологій.

Особливу увагу автори вказаної монографії приділяють техніко-технологічним заходам з енергозбереження та підвищення енергоефективності у системах електроспоживання закладів вищої освіти [19]:

- планова централізована заміна ламп розжарювання на енергозберігаючі; заміна ламп в показниках та черговому освітленні на LED-лампи;
- планова заміна люмінесцентних ламп на енергозберігаючі (розрядні лампи підвищеного ККД, LED-лампи і т.п.);
- автономне і залежне від часу доби і погоди управління джерелами світла у приміщеннях шляхом використання сенсорів руху та освітленості;
- автоматичне управління електричним освітленням шляхом використання сенсорів присутності людей у приміщеннях загального користування (особливо на сходових клітинах, в допоміжних, складських приміщеннях і т.п.);
- запровадження систем частотного регулювання електроприводом, насамперед асинхронних двигунів великої потужності;
- впровадження заходів компенсації реактивної потужності та систем забезпечення якості електроенергії;
- запровадження диференційованого (багато тарифного) обліку електроенергії;
- впровадження комбінованих систем електроживлення з використанням поновлюваних джерел енергії. Застосування сонячних фотоелектричних перетворювачів для генерації електричної енергії.

Перераховані організаційні та техніко-технологічні заходи дадуть віддачу за умови впровадження системи контролю, яка є основою енергоменеджменту і рушійною силою вдосконалення. Система контролю регулярно фіксує споживання і вартість енергії, коливання енергії можуть бути локалізовані, а аналіз енергоефективності показує, які енергетичні аспекти і процеси повинні бути покращені. Система контролю також оцінює управління енергією, оцінює енергоефективність і виявляє помилки і сфери, які потребують вдосконалення.

Перевірку і контроль за енергоефективністю ведуть до підвищення ефективності реалізації енергоощадних заходів. Регулярні аудити і оцінки показують, наскільки реалізація заходів узгоджена з визначеним та встановленим часом, вартістю і завдяки цьому можна оптимізувати роботу [37].

Заклади вищої освіти, як і все суспільство, мають бути зацікавлені в ощадливому споживанні енергоносіїв та ефективному використанні природних ресурсів і вихованні нового енергосвідомого покоління. Розвинути енергосвідомість у людей та молоді можна лише на реальних прикладах збереження та заощадження енергоресурсів навколо себе. Важливою складовою при цьому може бути програма з підвищення мотивації та свідомості співробітників ЗВО, яка має включати [19], [35]:

- розробку у ЗВО положення про матеріальне стимулювання співробітників та структурних підрозділів за економію і збереження енергоресурсів;
- створення робочої енергогрупи та локальних підгруп у кожному структурному підрозділі з питань підвищення енергоефективності;
- створення навчально-методичних матеріалів щодо способів енергоощадливого використання енергоносіїв;
- оголошення конкурсу серед співробітників та студентів на кращий проект з підвищення енергоефективності;
- проведення регулярних зборів, нарад, де розглядатимуться результати енергомоніторингу;
- проведення щотижневих, щомісячних локальних енергоаудитів власними силами;
- регулярне визначення підрозділів та працівників, що досягли найкращих показників і підвищення енергоефективності;
- аналіз в енергогрупі пропозицій, що надійшли на конкурс проектів підвищення енергоефективності;

- розповсюдження та популяризація досвіду підвищення енергоефективності і кращих пропозицій, що надійшли на конкурс;
- преміювання кращих працівників.

1.2 Існуючі методи управління електроспоживанням для підвищення енергоефективності будівель

Зважаючи на складні умови перехідної економіки та стан енергетичних галузей, керівництву підприємств і організацій необхідно вирішувати задачі, пов'язані з використанням електроресурсів. Постійне здорожчання електроенергії вимагає ефективного впровадження енергозберігаючих технологій, а функціонування складних енергоємних і дорогих в фінансовому відношенні апаратно-програмних комплексів – забезпечення безперебійного живлення. Ефективне управління інтенсивністю електроспоживання і адаптація споживання електричної енергії до сучасних умов тарифікації енергії, проведення енергетичного аудиту для розробки енергетичного паспорту організації є питаннями, що потребують дослідження для розробки концепції функціонування організації та розвитку країни в цілому [38].

Для вчасного виявлення та подальшого вирішення проблем, пов'язаних з використанням електроресурсів, необхідно здійснювати постійний моніторинг процесу електронавантаження організації. Останнім часом гостро постала необхідність запровадження в організаціях автоматизованих систем контролю та обліку електроенергії. Запорукою їх успішного функціонування є наявність адекватних методів аналізу електронавантаження організації.

Велика нерівномірність графіків навантаження окремих енергопостачальних підприємств та енергосистеми загалом і перш за все їх максимуми виникають при накладенні максимумів навантаження міських, промислових, сільськогосподарських, залізничних електричних мереж.

Причому за останній час на характер цих графіків все більший вплив має побутовий сектор, унаслідок чого електроспоживання побутових споживачів стає цікавим об'єктом з погляду управління.

Методи управління електроспоживанням можна розділити на прямі і непрямі [39].

До прямих відносять методи, при яких об'єктом управління є не графік активного навантаження, а безпосередньо потоки енергії, які керуються, наприклад, за допомогою буферних накопичувачів.

До непрямих відносять методи, що ведуть до зміни форми графіка навантаження.

В даний час використовується більш деталізована класифікація, по якій непрямі способи управління електроспоживанням зводяться до наступних:

- примусове регулювання електроспоживання заповнення провалу активного навантаження;
- зміщення навантаження в часі;
- політика енергозбереження;
- регулювання електроспоживання за домовленістю між енергосистемою і споживачами електроенергії;
- формування вимушених графіків навантаження за принципом зустрічного регулювання електроспоживання для плавно регульованих споживачів-регуляторів;
- маневрування електроспоживанням;
- тарифне стимулювання регулювання графіка навантаження [40].

На розвиток ЗВО у значній мірі впливає зростання цін на енергоносії, а їх подальше нераціональне використання стає ще більш актуальним і проблемним з точки зору суттєвого зростання витрат в умовах постійного підвищення тарифів. Шляхами вирішення питань управління енергоспоживанням у освітній сфері, уникнення нераціонального енерговикористання є розробка нових й

удосконалення існуючих методів оцінювання енергоефективності, проведення енергетичних обстежень будівель, створення нових управлінських моделей для оптимального споживання енергоносіїв та прогнозування видатків з метою забезпечення конкурентоспроможності освітніх закладів.

Більшість ЗВО України, як правило, займають досить великі території, на яких розташовуються кілька навчальних корпусів, гуртожитків, спортивних об'єктів та адміністративних і допоміжних будівель. Колектив студентів, науково-педагогічних працівників і співробітників – це особливе співтовариство, яке живе в умовах існуючої інфраструктури і використовує енергоносії і комунальні послуги, потребує покращення умов роботи і проживання, забезпечення соціально-культурною сферою, тощо. Гострота проблеми енергозабезпечення освітніх закладів пов'язана з двома обставинами: недостатнім фінансуванням освітніх закладів (насамперед витрат на комунальні послуги, серед яких найбільш вагомими є витрати на енергопостачання) та низькою енергоефективністю їх діяльності.

Передумовою ефективного впровадження політики енергоощадності у ЗВО є розроблення нормативного забезпечення для ефективного функціонування системи управління інформаційного забезпечення заходів з підвищення ефективності енергоспоживання [41].

Проведені дослідження свідчать про залежність рівнів енергоспоживання певного об'єкта на заданому часовому проміжку від факторів, що впливають на формування базового споживання енергоносіїв. До таких факторів відносяться, насамперед, кількість проживаючих у гуртожитках, сезонність та погодні умови, графік освітнього процесу. Крім того, є цілком очевидним, що на зазначені чинники впливають певні події, що мають стохастичну природу (наприклад, постійна зміна кількості проживаючих, використання додаткового догріву приміщень, використання не облікованих побутових електроприладів, тощо) [1].

В цьому аспекті слід відзначити, що темпи підвищення енергетичної ефективності будівель (навчальних корпусів, гуртожитків ЗВО) у світі та Україні суттєво відрізняються. Зважаючи на особливості роботи навчальних закладів, що пов'язані з постійним перебуванням людей у приміщеннях, питання виникнення дискомфортних умов експлуатації будівель – наявності низьких температур повітря, підвищеної вологості, що пов'язані з адміністративними заходами енергозбереження, набувають актуальності та потребують негайного вирішення. При прагненні досягти збереження енергетичних ресурсів на потреби функціонування будівель закладів освіти, потрібно враховувати необхідність задоволення двох умов: енергоефективності та дотримання комфортності в приміщеннях. Оскільки нехтування хоча б однією з них призводить до погіршення якості надання освітніх послуг.

Одним з інструментів оцінки енергетичної ефективності будівель, що широко використовується у світовій практиці та набуває розповсюдження й в Україні, є енергетична сертифікація будівель, яка є першим кроком відображення змін в енергоспоживанні при проведенні заходів з підвищення енергоефективності. Основою проведення енергетичної сертифікації є енергетичний рейтинг будівлі, що визначає вимоги для оцінки загального енергоспоживання будівлі (опалення, охолодження, ГВП, вентиляція, освітлення) з урахуванням власної генерації, доставленої та експортованої енергії й впливу енергоспоживання будівлі на навколишнє середовище.

У європейських стандартах, що визначають процедуру та порядок проведення енергетичної сертифікації будівель визначено необхідність розробки методу оцінки енергоефективності як нових, так і існуючих будівель. У зв'язку з цим у EN 15603 [42], [36] запропоновано два типи енергетичних рейтингів будівель: перший – розрахунковий, що базується на розрахунках очікуваного енергоспоживання будівлею для потреб систем опалення,

вентиляції, охолодження, ГВП та освітлення і другий – інструментальний рейтинг, що базується на фактичних вимірних даних.

Розрахунковий рейтинг поділяється на стандартний та пристосований рейтинги. Стандартний рейтинг використовує процедуру розрахунку в межах використання стандартних моделей та кліматичних умов не залежно від поведінки мешканців, фактичних погодних та внутрішніх умов клімату. Даний рейтинг може бути сформований для будівель протягом процесу проектування, нових чи існуючих будівель. В останньому випадку у розрахунку використовуються реальні умови і рейтинг стає пристосованим.

У світовій практиці частіше за все інструментальний рейтинг використовується для існуючих громадських та комерційних будівель, а розрахунковий – для малих, індивідуальних будівель та всіх нових будівель [36]. Такий вибір спричинений надто високими витратами на проведення сертифікації з використанням розрахункового рейтингу порівняно з потенційним ефектом. При цьому розрахунковий рейтинг доцільно використовувати для нових будівель на передпроектній та кінцевих стадіях будівництва через наявність необхідної проектної документації та відсутність фактичних даних про енергоспоживання та режим експлуатації будівлі.

Експлуатація громадських будівель здійснюється протягом багатьох десятиліть і найважливішою є проблема надійності теплоізоляційної оболонки, її спроможності забезпечувати прийнятний при проектуванні будинку рівень теплоізоляції та, відповідно, показники тепловтрат на забезпечення необхідних тепловологісних параметрів приміщень [36]. Тому показники теплової ефективності будівель необхідно розглядати, як основну впливову складову на енергетичні витрати для забезпечення навчального процесу, а значить регламентованих нормативними документами комфортних умов приміщень.

З набуттям чинності ДБН В.2.6-31:2016. «Конструкції будинків і споруд. Теплова ізоляція будівель» [36], [43], введено поняття «енергоефективність

будинку» та «класифікація будинків за показником енергоефективності». Нововведенням стандарту стало поняття „теплоізоляційна оболонка будівлі”, яка розглядається як єдина система, що дозволяє вже на стадії проектування здійснювати оптимізацію конструктивних рішень по енергозбереженню.

У статті [44] зазначено, що основними споживачами енергії в Україні, як і в більшості європейських країн, являються житлові будинки і об'єкти соціально-культурного призначення. Ними споживається більше 30% кінцевої енергії [45]. Проте, практично 90% будівель нині не відповідають сучасним вимогам енергозбереження. При цьому величезний потенціал енергозбереження закладений в техніці і технологіях теплопостачання і освітлення. Тому важливим напрямом енергозбереження в будівлях є модернізація існуючих систем теплопостачання і освітлення з метою підвищення їх енергоефективності і доведення до діючих у світі норм. Це дозволить економити, на думку авторів статті, приблизно 11,8 млрд. € щорічно.

Заходи щодо реновації систем опалювання в будівлях можуть бути зведені до наступних [44]:

1. Установка приладів обліку теплової енергії, що забезпечує контроль за поточним споживанням тепла, і стимулювання його зниження. Досвід роботи свідчить про те, що резерв енергозбереження по цьому заходу складає 10...15%.

2. Балансировка системи опалювання, що забезпечує компенсацію неврахованих збурюючих дій і приведення системи до розрахункового режиму. Вона здійснюється за допомогою управління теплопостачанням на добовому, тижневому і річному інтервалах. Застосування балансування забезпечує економію до 30...40% енергії, залежно від типу і режиму роботи будівлі.

3. Зонування системи опалювання. Забезпечує підтримку різних теплових режимів приміщень залежно від їх цільового призначення. Зонування систем реалізується шляхом застосування додаткової запорно-регулюючої арматури, за допомогою якої будівля ділиться на теплові зони і реалізується можливість

зонного регулювання опалення. Енергоефективність заходу може складати від 40% до 60% економії енергоресурсів.

4. Погодозалежна корекція. Здійснюється шляхом прив'язки споживання тепла до погодних умов і температури теплоносія в системі опалювання. Реалізується шляхом автоматичного регулювання відпустки тепла за даними датчиків зовнішньої і внутрішньої температури. Крім того, система може бути забезпечена таймером, який при настанні певної години доби і/або дня тижня автоматично перемикає опалювання з нормального режиму в економний і навпаки. Досвід установки подібних систем показує, що економія тепла, від роботи подібної системи, складає близько 15%, взимку, і 30...40%, восени і весною, за рахунок відключення системи опалювання в моменти періодичних потеплінь.

5. Хронометричне управління теплопостачанням. Дозволяє управляти температурою опалювання залежно від часу. Наприклад, в робочий час з 9:00 до 18:00 система управління підтримує робочий режим (комфортний тепловий режим, близько 22...24°C), а з 18:00 до 8:00 підтримується пілотне значення близько 6 - 13°C. Це дає значний економічний ефект, що доходить до 50%. Ця опція може включатися спільно з погодозалежною корекцією.

Важливим напрямом електробереження в будівлях є регулювання та управління освітленням в приміщеннях. Заходи щодо реновації систем освітлення існуючих будівель включаються в себе [44]:

1. Використання високоефективних світлодіодних джерел світла, яке забезпечує зниження електроспоживання до 10 разів, в порівнянні з лампами розжарювання, і до 1,5...2 разу, в порівнянні з розрядними (люмінесцентними) лампами. Крім того, термін окупності світлодіодних ламп в 50 разів вище за ламп розжарювання і в 5 разів – за люмінесцентних, чим забезпечується значне зниження витрат на обслуговування. Окрім цього, різноманіття кольорів і простота управління робить можливим автоматичне управління ними не лише

по інтенсивності, але і по спектру випромінювання, наближаючи його до сонячного і зберігаючи позитивну терапевтичну дію світла. Сюди слід додати відсутність шумів і вібрації ПРА ламп, пульсації і нерівномірності освітлення. З цього очевидним стає ще і величезний соціальний ефект від використання світлодіодних джерел світла.

2. Автоматизація управління освітленням забезпечує зниження витрати електричної енергії на 40...50% за рахунок включення тільки необхідної потужності освітлення і в строго задані моменти часу. Реалізація вказаної функції здійснюється за допомогою управління освітленням по освітленості, часу і присутності.

Рекомендований енергоплан реновації системи освітлення включає:

- а) заміну ламп розжарювання на люмінесцентні або світлодіодні;
- б) впровадження систем автоматичного управління освітленням.

Отже, виконаний аналіз дозволив виявити склад і виконати ранжування заходів щодо енергозбереження на об'єктах соціально-культурного і побутового призначення, дати їм кількісну оцінку, а також встановити терміни їх окупності.

Цікаві результати щодо нашої роботи подані в статті «Оцінка рівня ефективності електроспоживання об'єктів житлового комплексу (на прикладі гуртожитків НТУУ«КПІ»)» [46]. Проаналізуємо вказану роботу більш детально. На думку авторів статті, об'єкти житлового фонду України є значними споживачами енергетичних ресурсів, ефективність використання яких в 1,5...2 рази нижча від аналогічних об'єктів у країнах Європи. Особливої уваги, потребує частина житлового фонду представлена гуртожитками навчальних закладів, що характеризуються високою щільністю заселення та використанням неефективного електрообладнання, зниженими якість теплозахисних властивостей будівель, спричиненими значним їх віком.

Електроспоживання об'єктів житлового фонду навчальних закладів складає значну частку в загальних витратах, при цьому реалізувати існуючий

потенціал збереження електроенергії можна за рахунок реалізації організаційних, мало- та середньовитратних заходів з енергозбереження.

В указаній роботі досліджується рівень електроспоживання гуртожитків НТУУ «КПІ» за етапами:

- збір та аналіз інформації про електроспоживання гуртожитків;
- визначення факторів впливу на електроспоживання гуртожитків з використанням методу експертних оцінок;
- оцінювання ефективності електроспоживання гуртожитків.

Аналізувалися дані про споживання електричної енергії гуртожитками за останні п'ять років з урахуванням корисної площі (m^2), об'єму (m^3) та кількості проживаючих. Основними споживачами електроенергії в гуртожитках є електричні плити, ліфтові установки, пральні, освітлювальне а також додаткове обладнання, що заходиться безпосередньо в житлових приміщеннях. В аналізі враховано відмінності витрат для гуртожитків з газовими та електричними плитами, а також наявністю ліфтових установок.

З метою виявлення та оцінки факторів впливу на споживання електроенергії гуртожитками використано метод експертних оцінок [47]. В якості досліджуваних факторів обрані: кількість житлових приміщень у гуртожитку; площа на одного проживаючого; теплозахисні властивості огорожувальних конструкцій; погодні умови; тип джерел світла та їх кількість; наявність ліфтів, електроплит, додаткового електричного обладнання, пралень; кількість проживаючих.

За результатами експертних оцінок була визначена значущість кожного з факторів (рис. 1.2), що враховано при подальшому дослідженні рівня електроспоживання гуртожитків.

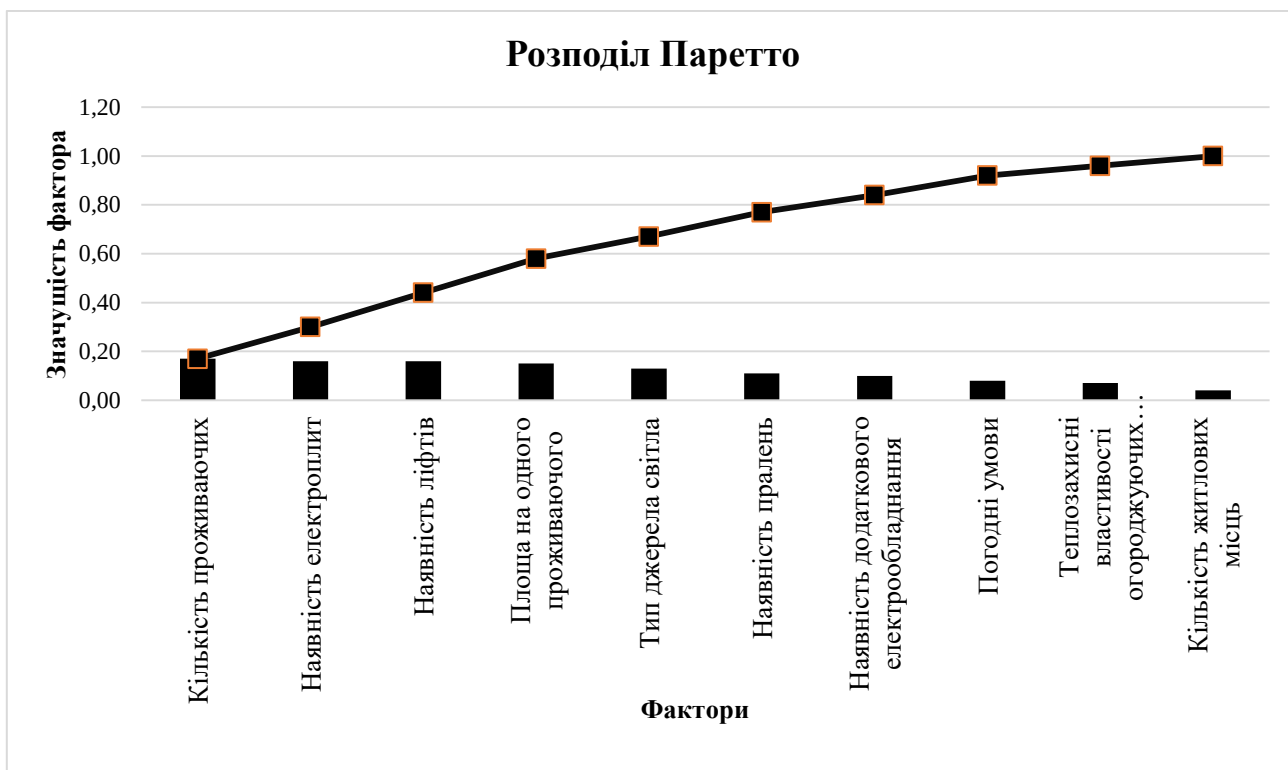


Рисунок 1.2 – Розподіл Паретто значущості факторів впливу на електроспоживання [47]

Враховуючи результати експертного оцінювання проведено групування гуртожитків та визначено гуртожиток з найменшими питомими витратами електроенергії в кожній з них, приведених до одного проживаючого, корисної площі та об'єму будівлі:

- гуртожитки з ліфтовими установками та електричними плитами;
- гуртожитки без ліфтових установок з електричними плитами.
- гуртожитки з ліфтовими установками та газовими плитами;
- гуртожитки без ліфтових установок з газовими плитами;

На рис. 1.3 наведено питоме електроспоживання гуртожитків в межах виділених груп, приведені до одного проживаючого. При цьому діючі норми споживання електричної енергії на одного мешканця в м. Києві згідно [48] становлять для:

- гуртожитків з електричними плитами – 945 кВт·год/особу в рік;
- гуртожитків з газовими плитами – 210 кВт·год/особу в рік.

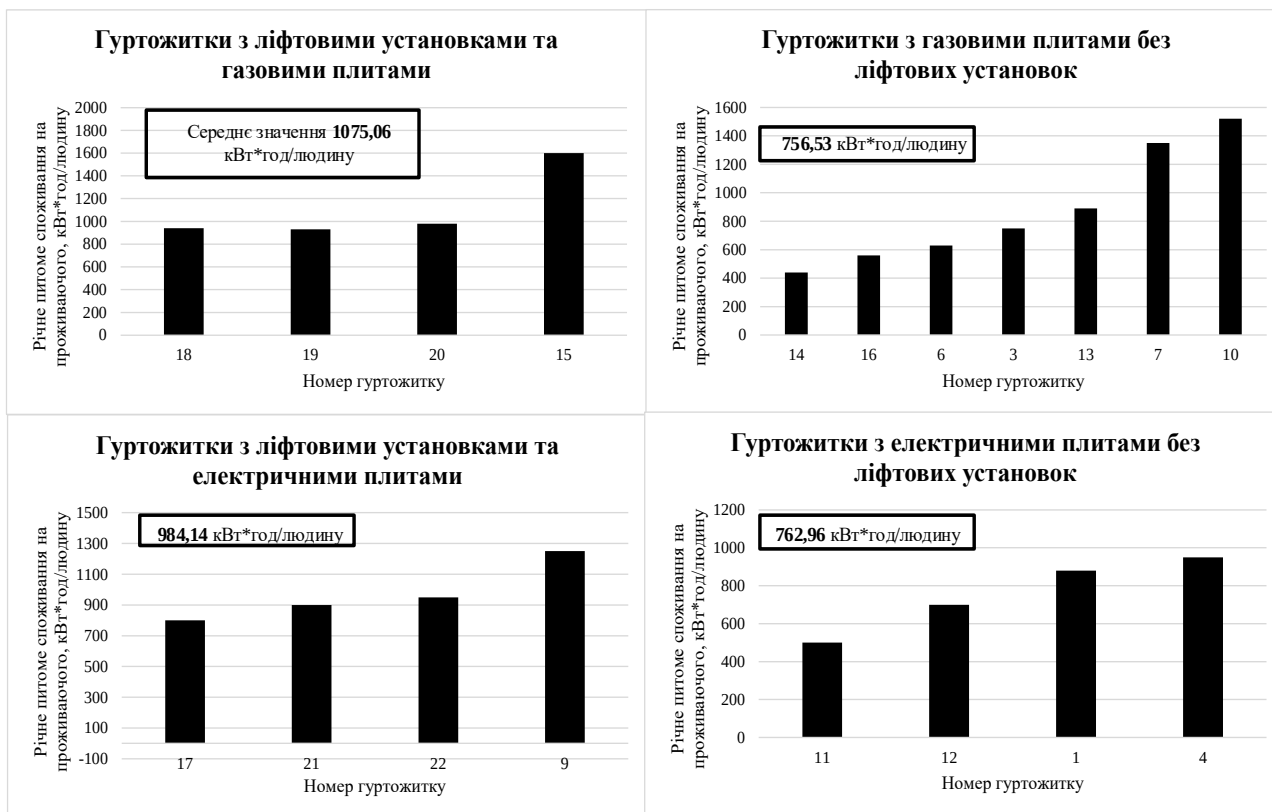


Рисунок 1.3 – Рейтинг гуртожитків в межах груп за річним питомим споживанням електроенергії приведеного до одного проживаючого

Отже, як видно, для груп з електричними плитами середні величини електроспоживання в групі гуртожитків відповідають нормам, на відміну від гуртожитків з газовими плитами. Саме в цих групах потрібно звернути увагу на ефективність використання електроенергії.

За результатами досліджень, наведених у [49] встановлено недотримання комфортних умов в будівлях навчальних закладів та використання електричних приладів для догрівання приміщень, що підтвердилося залежністю електроспоживання від температури навколишнього повітря.

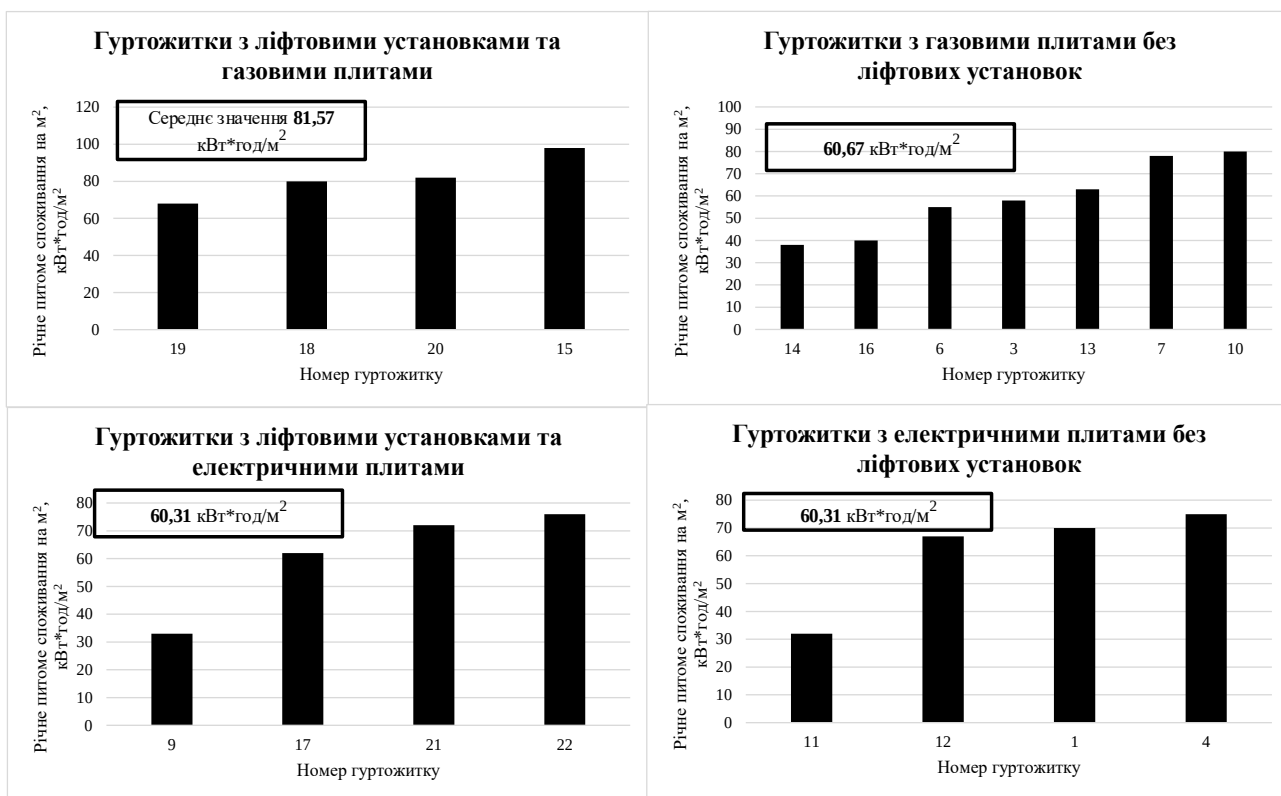


Рисунок 1.4 – Рейтинг гуртожитку в межах групи за річним питомим споживанням електроенергії приведеним до корисної площі гуртожитку

У зв'язку з цим, при аналізі рівня електроспоживання також розглядається його приведення до одиниці корисної площі (рис. 1.4) та об'єму (рис. 1.5) гуртожитку.

За результатами експертного оцінювання факторів впливу на електроспоживання проведено групування гуртожитків навчального закладу за ознаками: тип обладнання для приготування їжі (газова або електроплита); наявність працюючих ліфтових установок у будівлі.

Проведений аналіз показників електроспоживання гуртожитків засвідчив існування необґрунтовано високих витрат електричної енергії у гуртожитках з електроплитами, що потребує проведення додаткових досліджень.

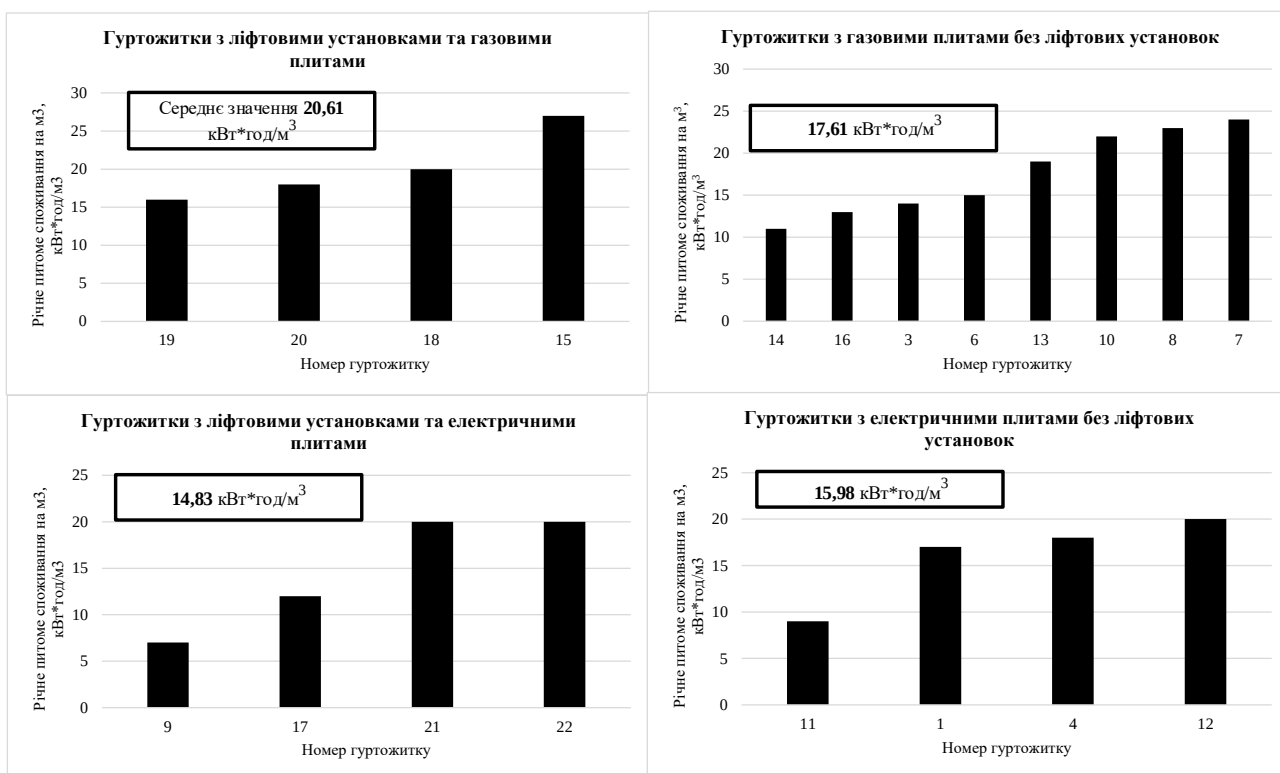


Рисунок 1.5 – Рейтинг гуртожитку в межах групи за річним питомим споживанням електроенергії приведеним до одиниці об’єму будівлі

При цьому для задачі оцінювання ефективності електроспоживання гуртожитків доцільним є його приведення до одного проживаючого та/або корисної площі будівлі.

1.3 Силві перетворювачі у системах електроспоживання для підвищення їх енергоефективності

В трифазних чотирипровідних мережах з несиметричним навантаженням трикратний струм нульової послідовності навантажує PEN-провідник мережі, що створює додаткові втрати потужності та знижує якість напруги. Крім того, струми з частотами непарних гармонік, що кратні трьом, є струмами нульової послідовності (НП), які підсумовуються в PEN-провіднику мережі, в результаті

чого значення струму в нейтральному проводі може значно перевищувати величини фазних струмів, що спричиняє збільшення додаткових втрат електроенергії та значне перегрівання PEN-провідника [50]. Зазначені струми призводять до спотворень форми кривих напруг, обумовлюючи підвищення рівнів кондуктивних електромагнітних завад і, тим самим, сприяють порушенню умов забезпечення ЕМС відповідальних навантажень у мережі [51].

В нормальних режимах роботи системи заземлення «TN-C-S» струми по РЕ-провіднику не протікають, тобто при цьому небезпечні потенціали на металевих корпусах електроустаткування відсутні, а при виникненні різного роду витоків необхідний рівень електробезпеки забезпечують пристрої захисного відключення. Однак у аварійних режимах, пов'язаних з порушенням конфігурації мережі, наприклад, у випадку обриву PEN-провідника на магістральній лінії або відгалуженні, чи КЗ між фазним і нульовим провідниками система «TN-C-S» втрачає свою роботоздатність і стає навіть небезпечною для життя людей. Особливо гостро це виявляється у протяжних і розгалужених розподільних мережах напругою 0,4 кВ, наприклад, при обриві PEN-провідника і КЗ на корпус. В таких мережах на всіх металевих корпусах ЕП, приєднаних до РЕ-провідника за допомогою триполюсних розеток, з'являється смертельно небезпечний потенціал фази. Наявність у цьому місці повторного заземлення, що має відносно більшу величину опору (згідно з [52] не більше 10 Ом), дає змогу зменшити цей потенціал, але не усуває його повністю.

Створення СЕП з високою якістю напруги при забезпеченні електробезпеки може бути здійснене шляхом:

- застосування індивідуального трифазного трансформатора для підключення відгалужень;

- використання регульованих і нерегульованих фільтрів струму нульової послідовності при реалізації притаманних ним фільтруючих властивостей стосовно струмів нульової послідовності;

- створення на основі зазначених фільтрів струму нульової послідовності локальних ділянок мережі зі штучною нейтральною точкою.

В ІЕД НАН України [53], [54] створено гібридні фільтрокомпенсувальні перетворювачі (ГФКП), які призначені для компенсації навантажувальних струмів у нульовому проводі трифазної мережі, регулювання (стабілізації) напруги навантаження та фільтрації струмів вищих гармонік у мережі. Вони виконані на основі «розподільчих» D-СТАТКОМ та фільтросиметрувальних пристроїв.

На рис. 1.6. наведено схему одного з варіантів фільтрокомпенсувального перетворювача, що призначений для компенсації струмів в нульовому проводі трифазної чотирипровідної системи та виконаний на основі розподільного D-СТАТКОМ та параметричного фільтросиметрувального пристрою.

Фільтросиметрувальний пристрій виконує симетрування напруг за нульовою послідовністю у вузлі навантаження системи та покращення їх гармонічного складу за рахунок фільтрації гармонік струму, що кратні трьом. Додаткову компенсацію вищих гармонік струму в нейтралі здійснює DСТАТКОМ, на стороні постійного струму якого підключено ємнісний накопичувач, що виконаний на двох конденсаторах C1 і C2, загальна точка яких підключена до нейтралі чотирипровідної системи.

Це дозволяє знизити значення струму в нейтралі, який компенсується практично до нульового значення і, тим самим, забезпечити зрівноважування системи напруг і поліпшення їх гармонічного складу, а також зниження додаткових втрат активної потужності в системі.

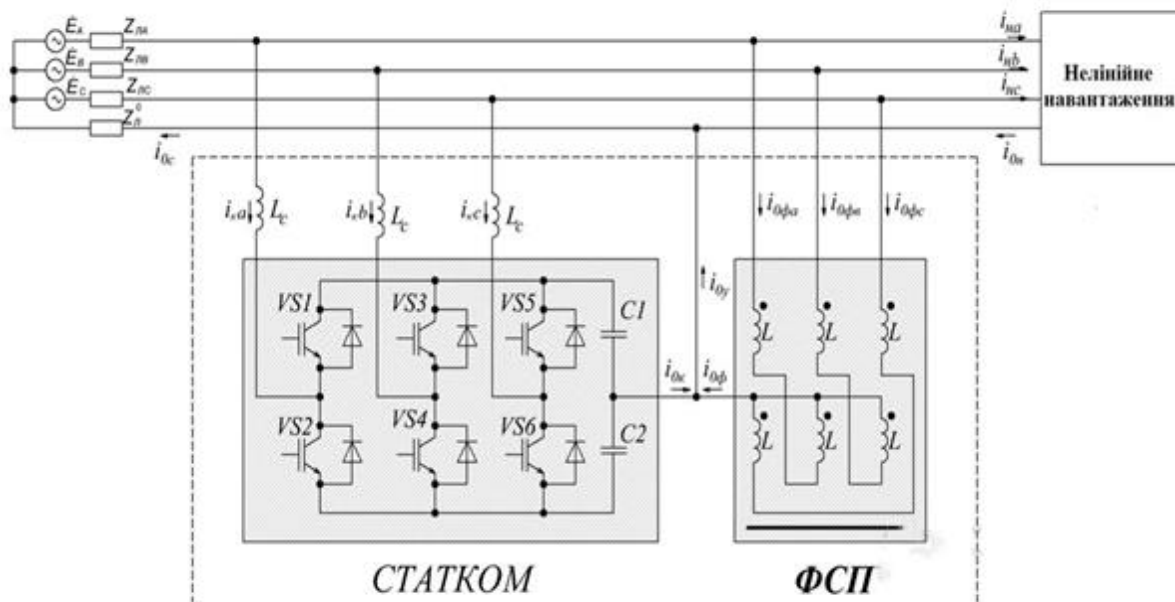


Рисунок 1.6 – Гібридний фільтро-компенсувальний пристрій

Використання такої схеми дозволяє зменшити встановлену потужність D-СТАТКОМ, оскільки вимоги до силових елементів D-СТАТКОМ визначаються в залежності від рівнів гармонік струму нульової послідовності, що замикаються в обмотках трансформатора типу «зигзаг».

1.4 Висновки та основні задачі дослідження

1. Аналіз сучасних технічних засобів поліпшення якості електроенергії показав, що паралельні активні фільтри - це перспективні багатофункціональні пристрої корекції, що дозволяють найефективніше покращувати якість електроенергії трифазної чотирипровідної системи живлення за декількома показниками, основними з яких є коефіцієнт потужності та коефіцієнт загальних гармонічних спотворень струму.

2. Аналіз методів дослідження енергетичних процесів в трифазних системах живлення показав, що в формулі повної потужності чотирипровідної

системи F. Buchholz у вигляді добутку середньоквадратичних норм векторів фазних напруг та лінійних струмів не враховується потужність втрат в нульовому проводі, внаслідок чого існуючі інтегральні алгоритми активної фільтрації не забезпечують одиничного коефіцієнта потужності. З цього випливає постановка деяких екстремальних задач для параметрів, що визначають енергетичні характеристики трифазної системи живлення: визначення повної потужності та її квадратичних складових з урахуванням співвідношення активних опорів силового чотирипровідного кабелю; мінімізація потужності втрат та середньоквадратичного значення споживаного струму; максимізація коефіцієнта потужності тощо.

3. Оскільки коефіцієнт потужності є інтегральним показником енергоефективності процесу передачі енергії в навантаження, постає задача аналізу можливості збільшення коефіцієнта корисної дії трифазної чотирипровідної системи живлення засобами паралельної активної фільтрації шляхом підвищення коефіцієнта потужності навантаження з урахуванням власних втрат потужності та пошук засобів її зменшення.

4. Аналіз алгоритмів управління паралельними активними фільтрами показав, що компенсація небажаних складових миттєвої потужності здійснюється за ускладненими процедурами з неодноразовим матричним перетвореннями координат. Звідси випливає задача уніфікації й спрощення алгоритмів управління паралельними активними фільтрами та побудови системи багатоваріантного управління ПАФ трифазної чотирипровідної системи живлення, в якій в залежності від конкретних умов застосування обирається алгоритм управління, оптимальний за певним показником якості.

РОЗДІЛ 2

РОЗРОБЛЕННЯ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ЕЛЕКТРО-СПОЖИВАННЯ У БУДІВЛЯХ ЗАКЛАДІВ ВИЩОЇ ОСВІТИ

2.1 Характеристика умов та визначення показників, які впливають на рівні електроспоживання закладів вищої освіти

Існуюче законодавство та нормативні документи щодо енергозбереження та підвищення енергоефективності регулює відносини між господарськими суб'єктами і державою у сфері використання ПЕР [48], [55]. Створення умов для впровадження нових енергоощадних технологій, управління режимами енергоспоживання на основі достовірних і оперативних даних є сьогодні пріоритетним завданням.

Серед основних нормативно-правових документів України у сфері енергозбереження - Закони України «Про Основні засади (стратегію) державної екологічної політики України на період до 2020 року», «Про основні засади державного нагляду (контролю) у сфері господарської діяльності», «Про електроенергетику», «Про енергозбереження», які забезпечують проведення цілеспрямованої політики держави з організації та координації дій у сфері енергозбереження, розроблення цільових, регіональних, місцевих та інших програм.

Законом України «Про енергозбереження» визначено поняття стандартизації у сфері енергозбереження, яка проводиться для встановлення комплексу обов'язкових норм, правил, вимог щодо раціонального використання та економії паливно-енергетичних ресурсів.

Дослідження комплексу науково-технічних засобів підвищення енергоефективності необхідне для розроблення принципів створення систем автоматизованого моніторингу, збору і обробки первинних даних з метою

впровадження організаційного забезпечення ефективного управління процесами споживання енергоносіїв у відповідності до діючих Стандартів та технічних регламентів. Стандарти у сфері енергозбереження є основою для застосування економічних санкцій за нераціональне використання паливно-енергетичних ресурсів, використання енергетично неефективного обладнання та матеріалів.

Діючі законодавчі та нормативні документи визначають організаційно-методичні основи енергозбереження, раціональні питомі витрати паливно-енергетичних ресурсів, методи визначення потреб в енергії, сертифікації об'єктів відповідно до вимог енергозбереження, методи збирання та обробки інформації про витрати ПЕР, вимоги до енергозберігаючих технологій і енергозберігаючого обладнання, вимоги до вторинних енергетичних ресурсів, нетрадиційних і поновлюваних джерел енергії.

Однак головним механізмом стимулювання до зниження енергоспоживання є розроблення і обґрунтування норм і нормативів витрат ПЕР, які в обов'язковому порядку включаються в енергетичні паспорти обладнання, режимні карти, технологічні інструкції та інструкції з експлуатації, а також у технічні умови та паспорти на всі види машин і механізмів, що споживають ПЕР і дають змогу оцінювати ефективність енергоощадних заходів за визначений календарний період.

Нормування витрат ПЕР встановлюється з урахуванням особливостей конкретного виробництва, як правило, на рівні підприємства, установи, організації. Диференціація норм за конкретними технологіями чи видами споживання здійснюється підприємством, установою, організацією самостійно на основі міжгалузевих та галузевих методик. Ці норми не повинні перевищувати встановлених показників міжгалузевих та галузевих типових норм питомих витрат ПЕР для певних видів споживання [48].

Норми витрат встановлюються на всі види ПЕР незалежно від джерел їх постачання та характеру споживання. У загальному випадку, для розроблення

норм і нормативів та аналізу енергоспоживання використовуються енергобаланси – система взаємопов'язаних показників, які відображають кількісну відповідність між надходженням та використанням усіх видів ПЕР певним об'єктом (виробничою дільницею, цехом, підприємством, галуззю, регіоном тощо). Норми витрат ПЕР підлягають систематичному перегляду з урахуванням змін у технології виробництва. Якщо обсяги виробництва товарної продукції продовжують змінюватися, перегляду підлягає також організація виробництва з метою зменшення умовно-постійної складової питомих витрат ПЕР. Норми відповідно до даного документу класифікуються за ступенем агрегації на індивідуальні й групові; за періодом дії на річні та квартальні [55].

До об'єктів нормування ПЕР належить і дитячі дошкільні заклади, школи, професійно-технічні та середні спеціальні навчальні заклади, ЗВО [48].

Сучасні вимоги до проблеми енергозбереження та підвищення енергоефективності значно зросли, що вимагає проведення розробки та істотного аналізу методів оцінювання параметрів питомих норм витрат електроенергії.

Основним методичним принципом формування норм для різних рівнів управління є їх послідовна агрегація (укрупнення) знизу догори. Норми питомих витрат ПЕР визначаються прямим розрахунком з урахуванням рівня фактично досягнутих норм і можуть бути визначені шляхом застосування наступних методів: розрахунково-аналітичного, експериментального, розрахунково-статистичного та комбінованого. Розрахунково-аналітичний метод передбачає визначення норм питомих витрат ПЕР шляхом визначення реального споживання у відповідності до технологічної структури споживання на основі прогресивних показників та прогнозу їх зменшення з урахуванням оціненого потенціалу енергозбереження та підвищення енергоефективності. Експериментальний метод базується полягає у визначенні норм на підставі даних, одержаних в результаті експериментальних вимірювань та прогнозу

зменшення їх споживання з урахуванням оціненого потенціалу енергозбереження та підвищення енергоефективності. Наявність автоматизованої системи моніторингу, збору і обробки даних є базовою умовою для використання цього методу, а режими роботи технологічного обладнання повинні відповідати нормативним, технологічний процес повинен проводитись у відповідності до регламентів та режимних карт. Розрахунково-статистичний метод полягає у визначенні питомих норм на основі використання статистичних даних про фактичні витрати ПЕР та про значення чинників, що впливають на величину їх питомих витрат. Комбінований метод поєднує у собі експериментальний та розрахунково-аналітичний методи визначення норм питомих витрат ПЕР і дає можливість одержати обґрунтовані індивідуальні норми витрат з урахуванням особливостей технологічних процесів.

Групові норми питомих витрат ПЕР визначаються, як правило, розрахунково-аналітичним методом як середньозважені групові показники на підставі індивідуальних норм та розрахунково-статистичним методом.

Разом з тим, групові норми витрат ПЕР можуть встановлюватись як планові на обраний календарний період (тиждень, місяць, квартал, рік та ін.), виходячи з відповідних фактичних витрат базисного періоду з урахуванням досягнутих прогресивних показників питомих витрат ПЕР та запланованих заходів з енергозбереження і підвищення енергоефективності.

Однак, вирішення питання не є простим і ускладнене наявністю різноманітних факторів [56], що не дають змоги оптимально нормувати показники електроспоживання. Завищення або заниження визначених питомих норм призводить до необґрунтованих перевитрат електроенергії та неможливості здійснювати прогнозоване оцінювання рівнів електроспоживання на найближчу перспективу. У світлі зазначених завдань великого значення набуває розробка і подальше вдосконалення науково обґрунтованих методів

нормування та планування потреби освітніх закладів у електричній енергії, що свідчить про актуальність даного дослідження.

ЗВО, як автономні господарюючі суб'єкти є значними споживачами енергоресурсів. Матеріали дослідження, викладені в даній статті, стосуються ЗВО інженерно-технологічної групи з середнім штатом науково-педагогічного персоналу не більше 600 осіб. Як відомо, на електроспоживання електротехнічними комплексами університетів припадає понад 30% від загальної кількості витрат коштів на енергозабезпечення. Постійне зростання цін на електроенергію викликає підвищення собівартості освітніх послуг, що знижує конкурентоспроможність ЗВО [57].

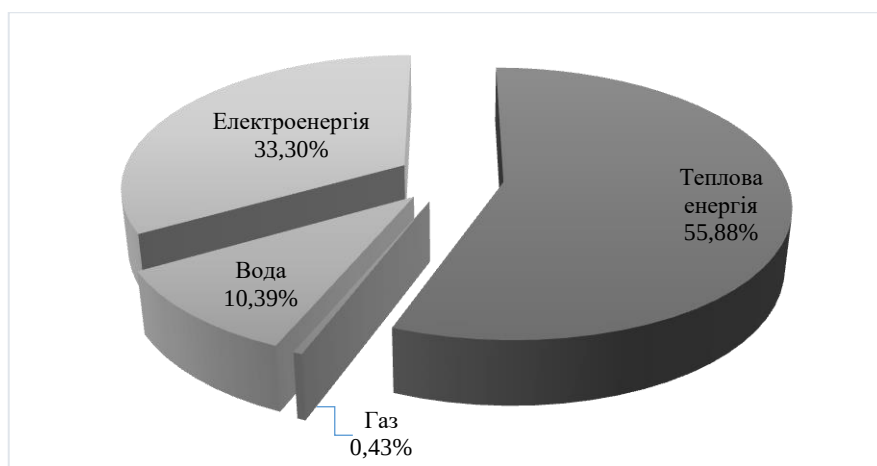


Рисунок 2.1 – Структура витрат на енергозабезпечення та воду в університеті інженерно-технологічної групи з середнім штатом науково-педагогічного персоналу не більше 600 осіб (усереднені дані служби енергоменеджменту Київського національного університету технологій та дизайну за п'ятирічний період спостережень)

Контроль ефективності використання енергоносіїв у ЗВО [58] запропоновано здійснювати на основі розроблених регресійних моделей. Далі

наведені особливості формування таких моделей, а також обґрунтовані принципи контролю енергоефективності.

Функціонування систем контролю енергоефективності передбачає зіставлення фактичних енерговитрат з плановими або нормованими. Якщо перші можуть бути одержані безпосередньо шляхом вимірювання [59], то плановані одержують на основі використання математичної моделі, побудованої за результатами раніше проведених спостережень (вимірювань).

Перш за все, необхідно обґрунтувати періодичність синхронних вимірювань споживання електроенергії (за даними, одержаних з лічильників), а також значень відповідних технологічних параметрів інженерних мереж. Така періодичність може визначатися: графіками навчального процесу; сезонністю, днями тижня та годинами доби.

Результати дослідження. Попередній аналіз даних про електроспоживання у ЗВО показав, що існуючі норми питомих витрат електроенергії в багатьох випадках не стимулюють економії електроенергії, а встановлення нормативних значень від базового показника з урахуванням 3-5% економії не може застосовуватися в сучасних умовах роботи при значній варіації чинників, що впливають на процес електроспоживання.

Планування лімітів потребує детального вивчення та аналізу динаміки електроспоживання у будівлях протягом декількох років, врахувавши зміни, які плануються, і ті, які вже відбулись (технічне переоснащення, автоматизація, ремонти, зміна площ і обладнання, тощо).

Обґрунтованість висновків і рекомендацій забезпечується коректним використанням методів дослідження і підтверджується збігом теоретичних розрахунків з експлуатаційними розрахунковими значеннями. В якості експериментальної бази використовувалися дані програмно-технічного комплексу «Автоматизована система управління електроспоживанням», який створений і введений у промислову експлуатацію у Київському національному

університеті технологій та дизайну. Теоретичні дослідження супроводжувалися розробкою алгоритмів і програм, що використовувались для статичної обробки результатів і прогнозування з наступною співставною перевіркою в експлуатаційних умовах на відтворюваність за періоди, що передували розрахунковим.

Використовуючи програмно-технічний комплекс «Автоматизована система управління електроспоживанням» [60] одержані дані про річні обсяги споживання електроенергії за період з 2008 по 2014 роки (рис. 2.2) [19].

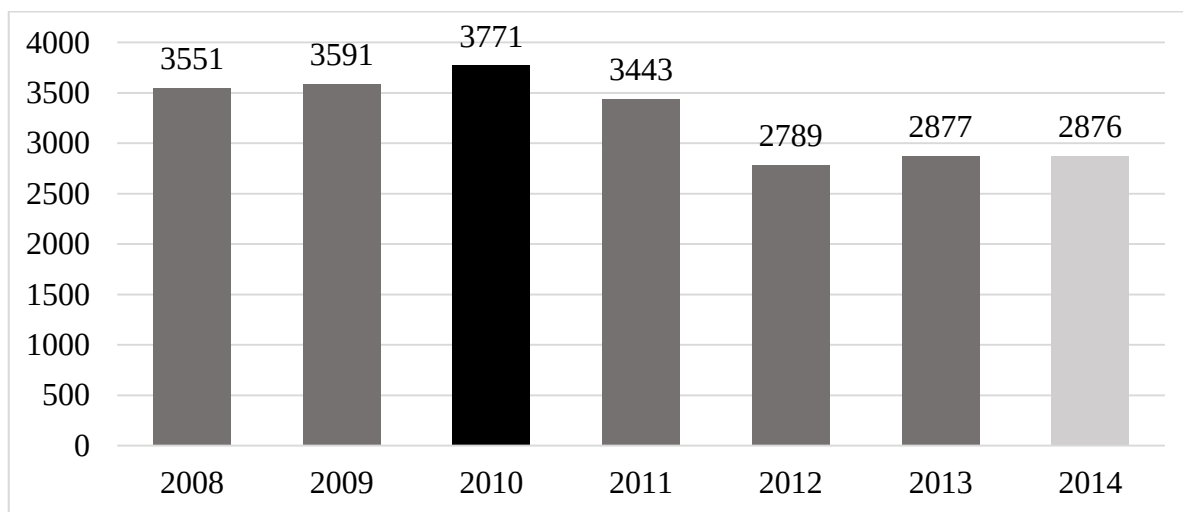


Рисунок 2.2 – Фактичні дані річного електроспоживання у ЗВО інженерно-технологічної групи з кількістю науково-педагогічних працівників до 600 осіб за період з 2008 по 2014 роки.

Заклади освіти мають в основному 5 груп споживачів електроенергії: освітлення (30-50%), споживання електродвигунами (10-30%), установки електронагріву (10%-25%), комп'ютери та оргтехніка - до 10%, лабораторне обладнання – 5-7% [57].

Основним критерієм оцінювання енергоефективності систем енергоспоживання обрані питомі показники, одержані на основі статистичного аналізу функціонування інженерних мереж та умов експлуатації навчальних

корпусів і гуртожитків. Питомі показники електроспоживання, віднесені до приведених площ навчальних корпусів і приведенного контингенту студентів чи до середньомісячної кількості студентів, проживаючих у гуртожитках, є базовими для оцінювання потенціалу енергозбереження університету і прогнозування рівнів енергоспоживання на найближчу перспективу.

Нормування і контроль за споживанням електричної енергії при сформованих режимах роботи електротехнічного устаткування повинні здійснюватися за підсумковими показниками роботи, що дасть можливість організувати адекватне прогнозування питомої витрати електроенергії у ЗВО і дозволить ефективно впроваджувати заходи з енергозбереження.

На рис. 2.3 і 2.4 приведені порівняльні показники електроспоживання - фактичні і планові, одержані на основі прогнозного оцінювання електроспоживання та кумулятивної суми відхилень, відповідно. Аналіз аналогічних звітів окремих структурних підрозділів ЗВО дає можливість робити висновки щодо ефективності споживання енергії кожним із них [57].

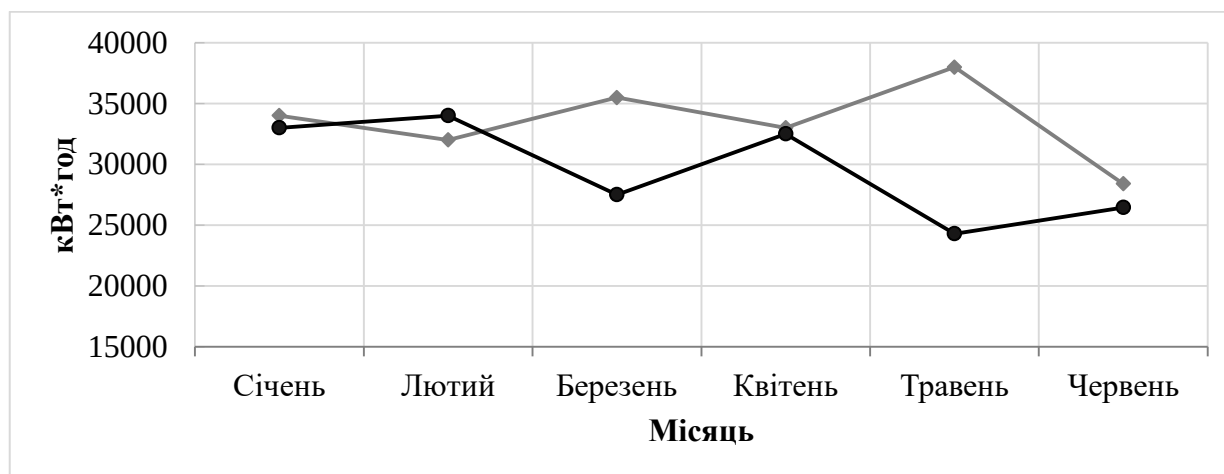


Рисунок 2.3 – Порівняння фактичних та планових показників електроспоживання

Такі звіти формуються у системі енергоменеджменту і є основою для складання зведених звітів ЗВО.

Зведені звіти, як правило, стосуються більших проміжків часу (квартальні, за півріччя, за опалювальний сезон, річні). Вони характеризують загальну ситуацію в ЗВО щодо визначення стратегічних завдань у сфері енергозбереження і підвищення енергоефективності.

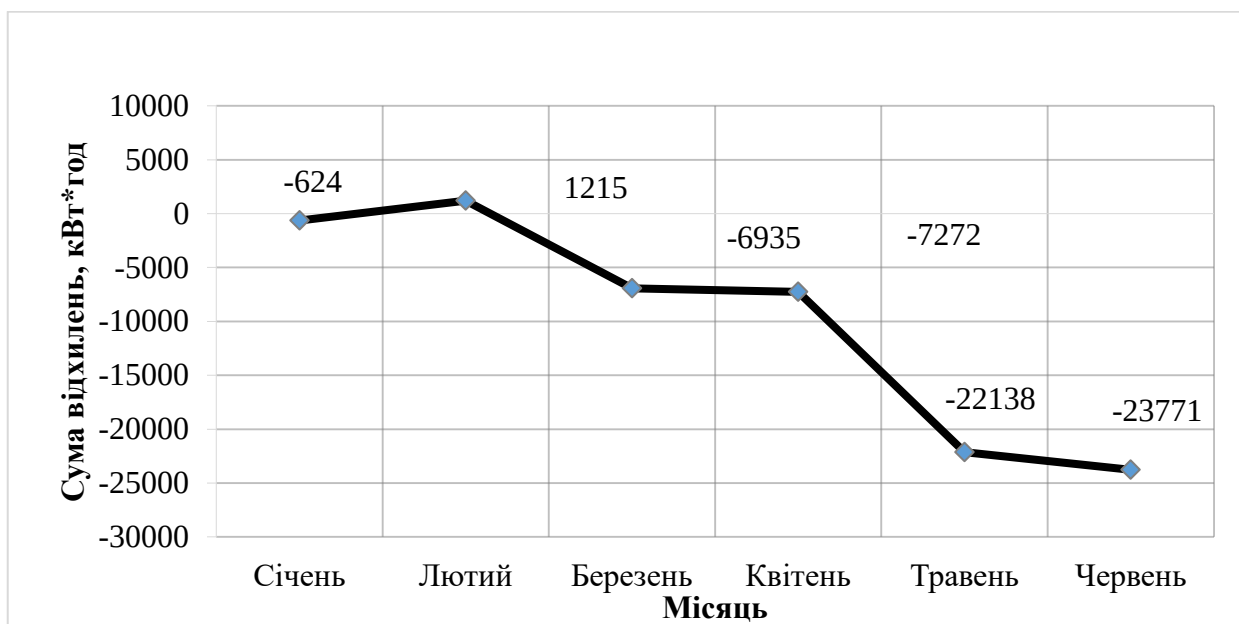


Рисунок 2.4 – Відхилення між плановими та фактичними показниками електроспоживання

На основі використання принципів контролю енергоспоживання, що полягає у зіставленні фактичних енерговитрат з плановими (прогнозованими), виконане оцінювання ефективності роботи електротехнічних комплексів ЗВО. Таким чином був одержаний кількісний критерій оцінювання ефективності функціонування системи електрозабезпечення. Наступні міркування були пов'язані з дослідженням взаємозв'язку між зміною навчального процесу та флуктуаціями питомих витрат електроенергії і розробкою принципів прогнозованого оцінювання споживання для обґрунтування лімітів за обраний

календарний період. Удосконалення освітнього процесу, що призвело до зменшення питомого споживання свідчить про ефективне управління і є кроком до запровадження індивідуальних лімітів електроспоживання у навчальних корпусах та гуртожитках.

Одним із чинників, який використовується для розрахунків питомого споживання енергоносіїв є приведений контингент студентів. Динаміка відносної зміни приведенного контингенту студентів у 2008-2014 рр. [57].

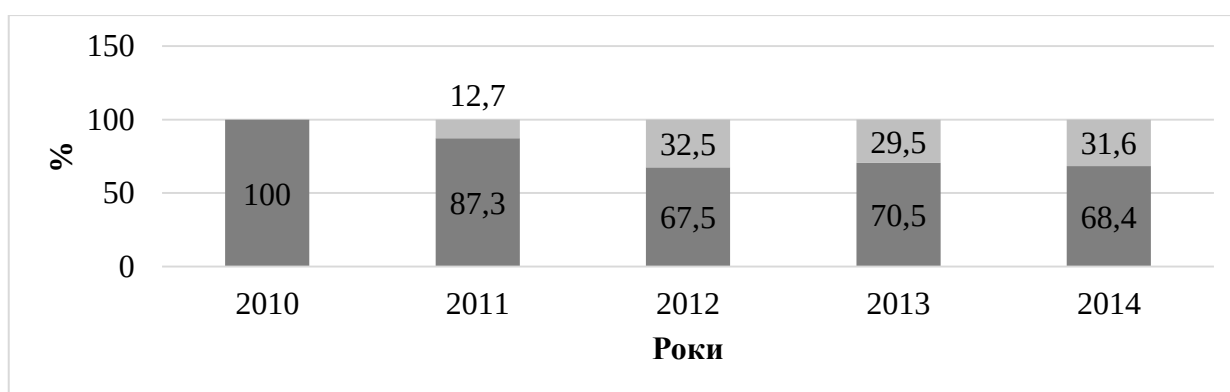


Рисунок 2.5 – Динаміка відносної зміни приведенного контингенту студентів у 2008-2014рр.

Використовуючи дані з [57], визначене приведенне фактичне споживання електроенергії у гуртожитках. Одержані результати наведені на рис. 2.6, 2.7.

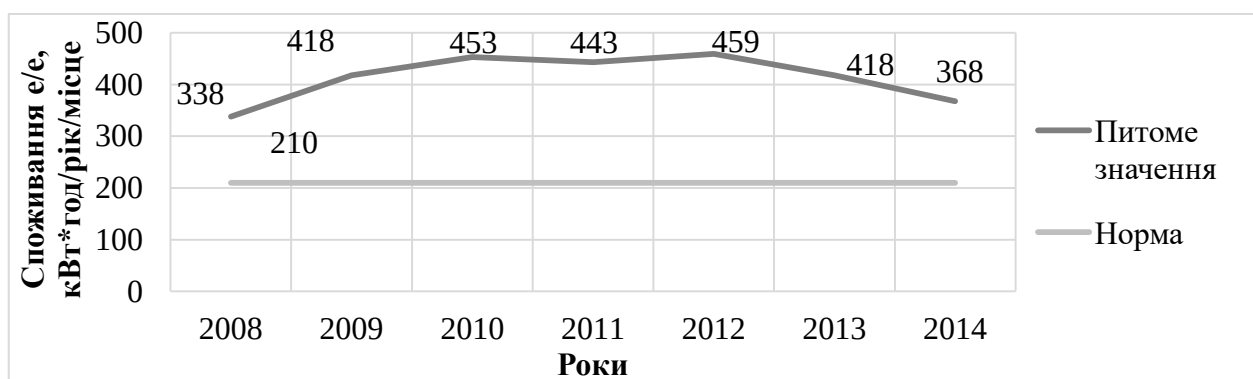


Рисунок 2.6 – Нормоване та приведенне до кількості проживаючих фактичне споживання електроенергії в гуртожитках без електроплит, кВт·год./рік/місце

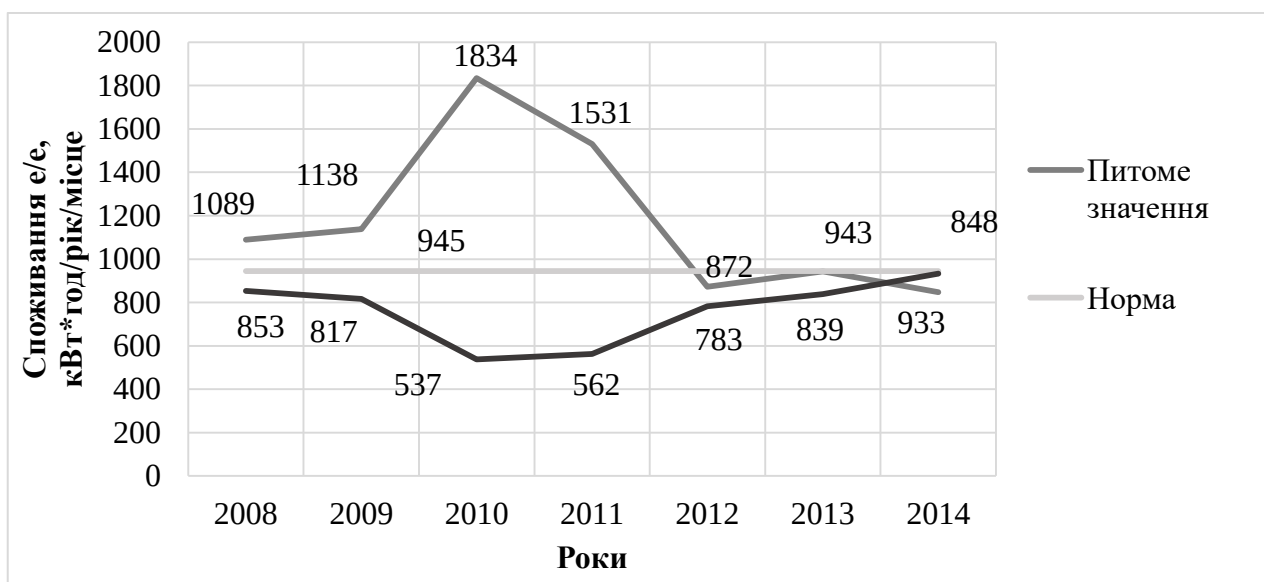


Рисунок 2.7 – Нормоване та приведенне до кількості проживаючих фактичне споживання електроенергії у гуртожитках з електроплитами, кВт·год./рік/місце

Аналізуючи наведені дані, можна зробити висновок про певну кореляцію між рівнем питомого електроспоживання у гуртожитках і навчальних корпусах та кількістю студентів, що навчаються, сезоном та графіком освітнього процесу.

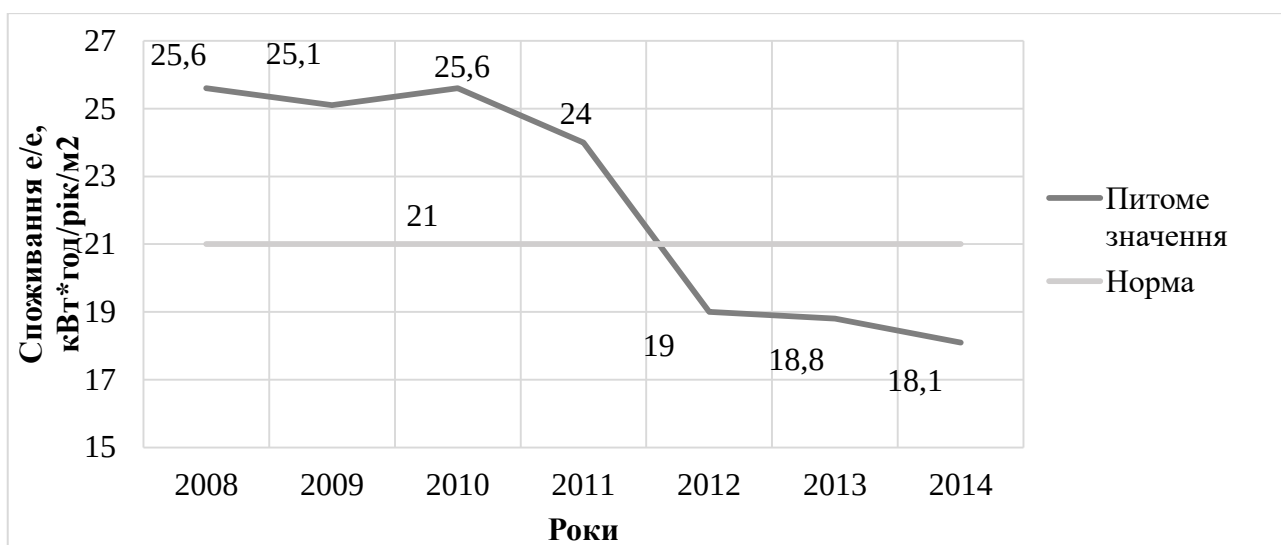


Рисунок 2.8 – Приведене до загальної площі фактичне споживання електроенергії у навчальних корпусах, кВт·год./рік/м².

Оскільки чисельність студентів є на сьогодні основною бюджетоутворюючою складовою університету, вищенаведені показники досить цікаві для поглибленого вивчення та врахування при складанні загального балансу енергоспоживання в університеті.

У період стрімкого зростання цін на енергоносії чи не єдиною можливістю стабілізації енергетичного ринку через управлінські рішення стає введення обмежень на споживання енергії (лімітування).

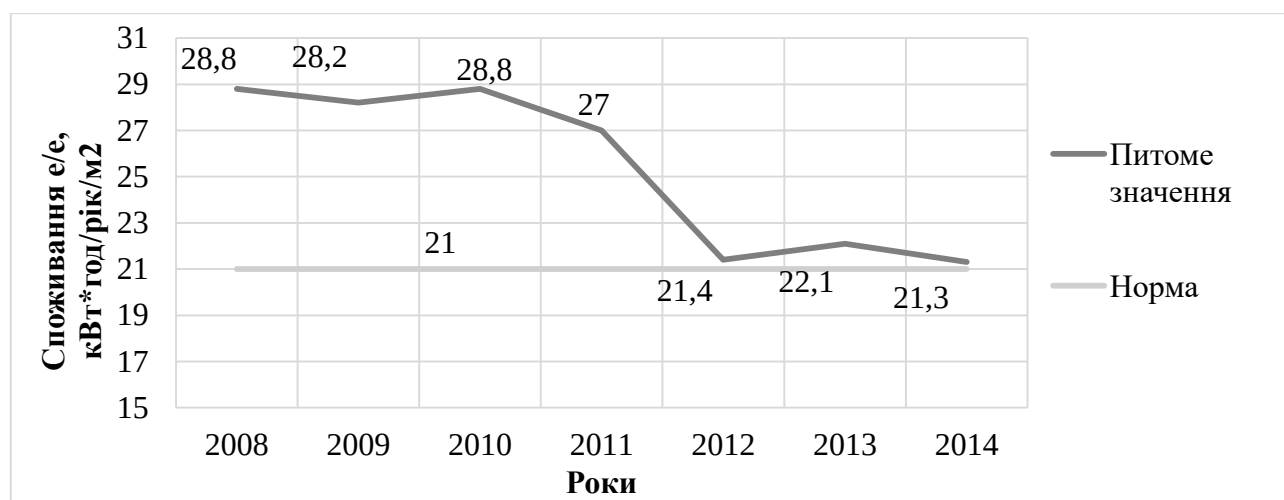


Рисунок 2.9 – Приведене до корисної площі фактичне споживання електроенергії у навчальних корпусах, кВт·год./рік/м².

Цей підхід дозволяє зменшити споживання енергії, у тому числі за рахунок усунення марнотратства. Тож лімітування споживання енергії можна розглядати лише як тимчасовий захід на шляху до вирішення проблеми управління енергоспоживанням, але одночасно і як необхідний захід щодо формування ощадливої поведінки споживачів енергетичних послуг.

Лімітування обсягів спожитих енергоресурсів необхідно проводити у розрізі кожної окремої будівлі. Це складний процес, однак є ефективним з огляду забезпечення зменшення споживання енергоресурсів будівлями за умов дотримання санітарно-гігієнічних норм.

На основі даних ПТК «Автоматизована система управління енергоспоживанням» [57] проведено дослідження витрат енергоносіїв у періоди обмеженого теплозабезпечення, які характеризуються суттєвою нерівномірністю завантаження аудиторних приміщень у семестрі (рис.2.10 і 2.11).

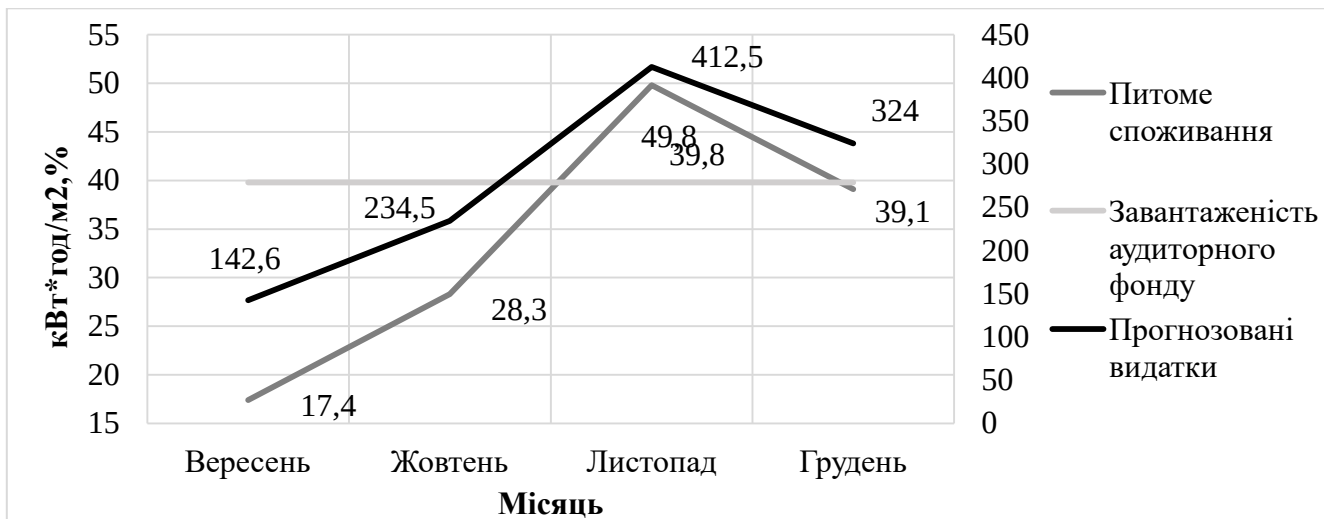


Рисунок 2.10 – Прогнозоване оцінювання споживання електроенергії в залежності від завантаженості аудиторного фонду без урахування зміни освітнього процесу

Удосконалення планування графіків освітнього процесу в університеті з метою підвищення ефективності використання аудиторного фонду полягає у визначенні складу загальноуніверситетського аудиторного фонду у кожному з навчальних корпусів (створення реєстру аудиторій та введення технічних паспортів приміщень), який використовується у освітньому процесі, визначення переліку навчальних корпусів (аудиторій), які споживають найбільше електроенергії.

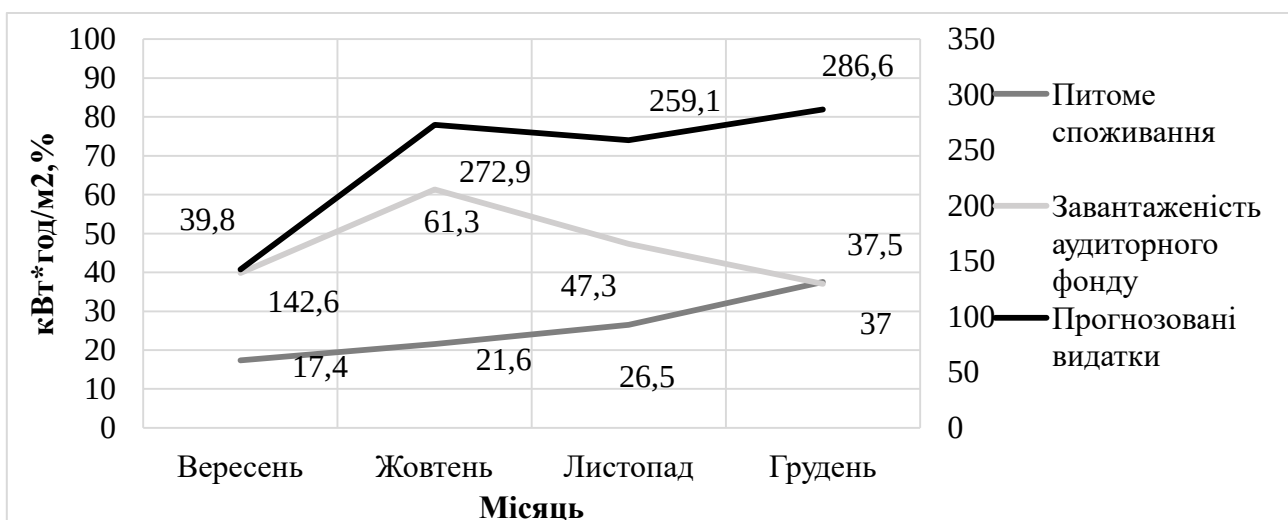


Рисунок 2.11 – Прогнозоване оцінювання споживання електроенергії в залежності від завантаженості аудиторного фонду з урахування зміни освітнього процесу

Проведений аналіз дозволив встановити певні кореляції між завантаженістю аудиторного фонду та питомим приведеним споживанням електроенергії у навчальних корпусах та гуртожитках. Як видно з аналізу, завантаженість аудиторного фонду залежить від графіку освітнього процесу.

Узгодження управлінських рішень повинні бути спрямовані на оптимальне планування освітнього процесу на основі підвищення ефективності використання аудиторного фонду університету та контролю витрат на електрозабезпечення, особливо у ОП. З цією метою необхідно запроваджувати моніторинг ефективності використання аудиторного фонду університету для оптимального планування функціонування систем електрозабезпечення та управління видатками на енергоносії в умовах значного зростання тарифів і дасть змогу забезпечити координацію дій у сфері енергозбереження та підвищення енергоефективності.

2.2 Математичне моделювання електроспоживання у будівлях навчальних корпусів закладів вищої освіти

В основу розроблення математичної моделі покладені залежності рівнів енергоспоживання певного об'єкта на заданому часовому проміжку від факторів, що впливають на формування базового споживання енергоносіїв [2], [61]. До таких факторів відносяться, насамперед, графік освітнього процесу, рівні завантаженості аудиторного фонду, клас енергоефективності будівлі, сезонність та погодні умови. Крім того, є цілком очевидним, що на показники електроспоживання впливають чинники, які мають стохастичну природу (наприклад, зміна кількості проживаючих, використання додаткових засобів догріву температури приміщень, використання необлікованих струмоприймачів тощо).

Для зручності виконання розрахунків була розроблена комп'ютерна програма, що функціонує у середовищі Delphi і виконує наступні функції:

- автоматизація побудови матриці експерименту в форматі Delphi на основі статистичних спостережень ПТК «АСУЕУ» у форматі MS Excel;
- дослідження регресійних даних на наявність достатньої зумовленості матриці плану [62] з використанням алгоритму Грама – Шмідта [63] для відсіювання (за необхідністю) зайвих змінних;
- визначення коефіцієнтів регресії та побудова графіків залишків для одержаної моделі.

Нагадаємо, що залишками регресійної моделі

$$Y = X\beta + \varepsilon, \quad (2.1)$$

де: $Y = \begin{pmatrix} y_1 \\ \dots \\ y_n \end{pmatrix}$ – n -вектор спостережень залежної змінної,

$X = \begin{pmatrix} x_{10} & \dots & x_{1,p-1} \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ x_{n0} & \dots & x_{n,p-1} \end{pmatrix}$ – матриця спостережень незалежних змінних

(регресійна матриця або матриця експерименту чи плану); $\beta = \begin{pmatrix} \beta_0 \\ \dots \\ \beta_{p-1} \end{pmatrix}$ – вектор

(невідомих) коефіцієнтів, $\varepsilon = \begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \dots \\ \varepsilon_n \end{pmatrix}$ – вектор помилок,

називаються різниці виду $\hat{y}_i - y_i, i = 1, \dots, n$, де $\hat{y}_i$ – компоненти вектору $\hat{Y}$ оцінок

$$\hat{Y} = Xb. \quad (2.2)$$

В даній роботі $b = (X'X)^{-1}X'\hat{Y}$ є оцінка параметрів у лінійній регресії методом найменших квадратів (тут ' – знак спряження, $^{-1}$ – знак обернення матриці).

У відповідності з роботою [2] вектор коефіцієнтів β має розмірність 3 або 4 в залежності від типу моделі, що застосовується. Модель першого типу (інколи вона зветься скороченою) використовує змінні x_0, x_1, x_2 , де x_0 – фіктивна змінна (за термінологією [36], [38]), завжди рівна 1 (або 0, якщо ми хочемо отримати модель без вільного члену). При цьому час спостережень за змінними y, x_1, x_2 розбивається на певні проміжки, і в якості значень вказаних змінних беруться середні значення реальних спостережень на цих часових проміжках. У даній роботі в якості зазначених проміжків беруться календарні місяці. За значення показників електроспоживання y для фіксованого місяця приймається відповідна місячна сумарна величина спожитої електроенергії (кВт*год), поділена на кількість облікованих діб у даному місяці. Аналогічно, x_1 – середня кількість мешканців гуртожитку у фіксованому місяці, x_2 – середньоарифметичне значень середньодобової температури зовнішнього середовища у тому ж місяці.

У моделі другого типу (розширеної) до певної міри враховується вплив факторів, що сприяють більш високому споживанню електроенергії мешканцями гуртожитків, ніж це має місце зазвичай при даних умовах. Таке

явище інколи (не завжди) спостерігається в зимовий період. Точне визначення і передбачення впливу таких факторів є завданням, яке важко піддається повній формалізації. У зв'язку з цим, зазначене більш високе споживання електроенергії може бути пов'язане з необхідністю економії теплової енергії, при цьому локальне управління теплоспоживанням (у окремо взятих приміщеннях на добовому інтервалі часу) є, з урахуванням існуючої інженерної інфраструктури, практично неможливим. Очевидно, що це у свою чергу, сприятиме посиленню попиту на використання обігрівальних пристроїв для забезпечення належного мікроклімату у визначених згідно графіку освітнього процесу аудиторіях навчальних корпусів та приміщеннях гуртожитків. Для врахування даної ситуації (незалежно від її причини) в регресійну модель вводиться додаткова фіктивна змінна x_3 , яка дорівнює 1 або 0 в залежності від того, чи очікується зазначений період підвищеного споживання електроенергії або, відповідно, не очікується. В роботі [2] були представлені конкретні регресійні вирази зазначеного типу. В роботі досліджуються властивості одержаних моделей на прикладі двох гуртожитків (об'єкт 1 і об'єкт 2).

Важливим інструментом дослідження якості регресійної моделі є аналіз залишків [62], [64]. Їх графічне зображення може бути різним, і у даному випадку таке зображення являє собою сукупність точок декартової площини, що мають координати $(i, \hat{y}_i - y_i)$, $i = 1, \dots, n$, де i – порядковий номер місяця від початку спостережень. (для більшої наочності зазначені точки на малюнку з'єднуються прямолінійними відрізками). Приклад такого графіка наводиться нижче (рис. 2.12).

Графік на рис. 2.12 відповідає регресійній моделі першого типу конкретного гуртожитку (об'єкт 1). Згадана модель має вигляд

$$\hat{y} = 584,3330 + 0,8223x_1 - 19,6922x_2. \quad (2.3)$$

При побудові моделі використовувалися помісячні дані за 2013-2015 роки. Дослідження на погану зумовленість матриці плану показало недоцільність

видалення будь-якого регресору з початкової моделі, за винятком, звичайно, змінної x_3 , яка у даному випадку приймає тільки нульові значення (надання змінній x_3 лише нульових значень автоматично призводить до вибору програмою моделі першого типу).

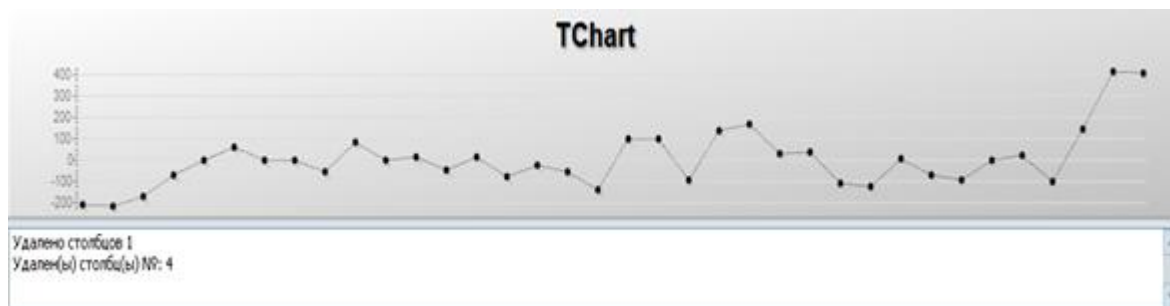


Рисунок 2.12 – Графік залишків регресійної моделі першого типу для об'єкту №1

Наведемо деякі характеристики якості даної моделі, враховуючи ту обставину, що повторні спостереження, принаймні у явному вигляді, в нашій ситуації практично відсутні, так що ми вимушені тут і надалі відмовитися від тих засобів перевірки адекватності, що вимагають наявності таких спостережень [62] (під повторними спостереженнями ми розуміємо наявність значень залежної змінної у при двох або більше співпадаючих «двійках» (x_1, x_2) для моделі першого типу і «трійок» (x_1, x_2, x_3) для моделі другого типу). Замість цього звернемося до таких методів як перевірка значущості моделі в цілому і її окремих коефіцієнтів, а також аналіз залишків, перевірка нормальності випадкової складової моделі і співставлення реальних значень залежної змінної із значеннями, що дає наша модель.

Для з'ясування доцільності використання лінійної моделі при описі досліджуваної залежності на першому етапі обчислювалася оцінка S середньоквадратичного відхилення випадкової складової ε і оцінка R множинного коефіцієнту кореляції між показником енергоспоживання у і

незалежними змінними x_0, x_1, x_2 , тобто максимуму значень парних (звичайних) коефіцієнтів кореляції між y і всілякими лінійними комбінаціями x_0, x_1, x_2 . Для ЗЛМ (2.1) маємо

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n-p}}, R = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})(\hat{y}_i - \bar{y})}{(\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 (\hat{y}_i - \bar{y})^2)^{1/2}}, \quad (2.4)$$

де y_i та $\hat{y}_i$ – відповідно, реальне значення спостережуваної та оціночної (згідно з рівністю 2.3) величини спожитої електроенергії при i -му значенні «трійки» (x_0, x_1, x_2) , $\bar{y}$ – середнє значення величин y_i , $i = 1, \dots, n$. Оцінка R використовувалася при підрахунку F - статистики для перевірки гіпотези H_0 про незначущість моделі (2.3), оскільки вказана F - статистика у випадку загальної лінійної моделі (2.1, 2.2) може бути представлена згідно [62], [65] у вигляді

$$F = \frac{R^2}{1-R^2} \cdot \frac{n-p}{p-1}. \quad (2.5)$$

Безпосередні обчислення при $n = 36, p = 3$ дають у даному випадку:

$$S=140,9036; R=0,8535; F=44,2466. \quad (2.6)$$

За справедливості вищезазначеної гіпотези H_0 F - статистика (2.5) має розподіл Фішера $F(p-1, n-p)$ [62], [65]. Отже, критичною точкою при перевірці гіпотези H_0 з альтернативою $H_1 = \{\text{модель є значущою}\}$ на рівні значущості α є квантиль рівня $1-\alpha$ вказаного розподілу, який ми позначатимемо надалі як $u_{1-\alpha}^{F(p-1, n-p)}$. Надалі вважається, що за замовчуванням рівень значущості α при перевірці статистичних гіпотез дорівнює 0,05. При даних значеннях n, p і α маємо [66], [67]:

$$u_{1-\alpha}^{F(p-1, n-p)} = u_{0,95}^{F(2,33)} = 3,2849.$$

Таким чином, регресійна модель є значимою. (оскільки у даному випадку має місце нерівність $F > 4 \cdot u_{0,95}^{F(2,33)}$, то отриману модель згідно з термінологією [62] можна називати високо значущою, що дає підстави вважати її придатною для прогнозного оцінювання. Кожен окремий коефіцієнт $b_i, i = 0, 1, 2$, також є суттєво значимим: t - статистики для перевірки гіпотез $H_0^i: \{b_i = 0\}$ дорівнюють 9,17580; 4,29048; -7,26476 з p - значеннями 0,000000; 0,000146; 0,000000 відповідно (множина прийняття кожної такої гіпотези є проміжок $[-2,0345 \ 2,0345]$)).

Проте графік залишків на рис. 2.12 вказує на необхідність подальшого дослідження і, можливо, перетворення моделі (2.3) (мається на увазі помітна різниця у відхиленнях від нульового значення у лівій і правій частинах зазначеного графіка). Оскільки саме у сукупності залишків міститься вся інформація про якість збіжності реальних даних з регресійною моделлю, розглянемо вказану сукупність більш детально. Для роботи з масивами статистичних даних у подальшому використовувався також пакет комп'ютерних програм STATISTICA [68], [69].

Загальна структура будь-якої сукупності одновимірних даних наочно ілюструється діаграмою типу Box Plot (box-and-whisker plot) [70]. Така діаграма для аналізованої сукупності даних наведена на рис. 2.13.

Два значення залишків діаграма Box Plot кваліфікує як викиди (це ті самі значення, що відповідають вершинам ламаних у кінцевих точках графіка залишків на рис. 2.12: останні досить очевидним чином порушують майже горизонтальний характер розташування вершин у центральній частині графіка; значення інших елементів діаграми зрозумілі із наведених коментарів у її правій частині).

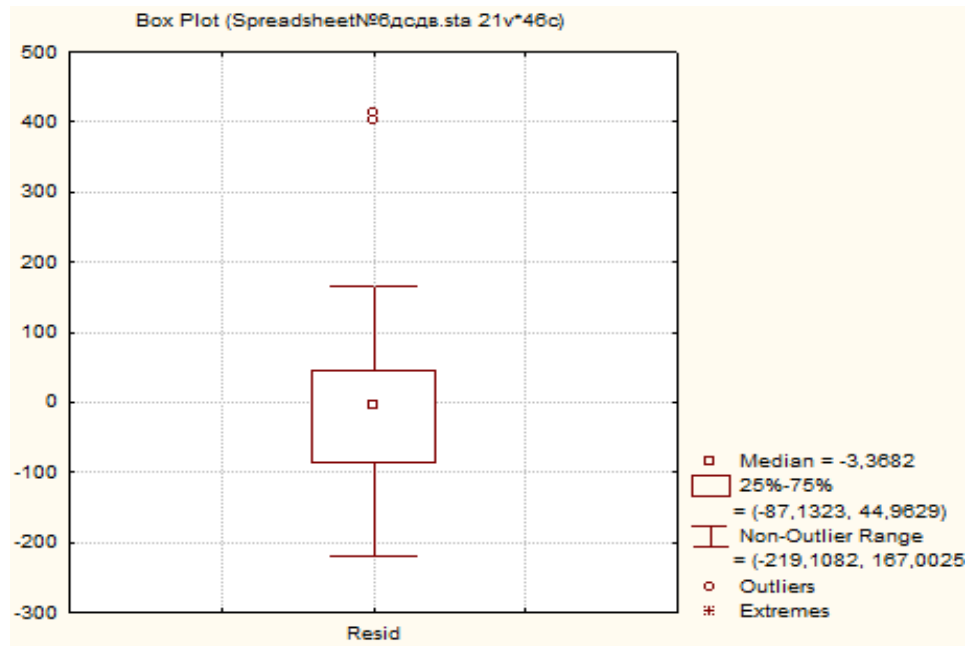


Рисунок 2.13 – Діаграма Box Plot для сукупності залишків регресійної моделі першого типу

Звертаючись до точних значень вказаних залишків, маємо наступну інформацію (табл. 2.1).

Таблиця 2.1 – Екстремальні залишки регресійної моделі першого типу для об'єкту № 1

Standard Residuals								Standart Residual: Var1, кВт*год		
								Observed Value	Predicted Value	Residual
Case name	-5.	-4	-3.	-2.	3.	4.	5.			
Лист 15 35	.	.	.	.	*	.	.	1190,13	778,05	412,07
С : 36	.	.	.	.	*	.	.	1236,44	833,37	403,06

Як видно з табл. 2.1, два значення залишків 412,07 і 403,06 (вони відповідають 35-му і 36-му спостереженням – листопаду і грудню 2015 року) лежать майже на правій межі інтервалу $(-3S, 3S)$, що також відповідає їх віднесенню до викидів на рис. 2.2.

Проаналізуємо вихідні дані, що відповідають вказаним великим значенням залишків, а також ті, для яких реалізується нижня межа $-219,1$ їх основної групи (рис. 2) (оскільки останнє є найбільш близьким до лівої межі інтервалу $(-2S, 2S)$).

Спершу розглянемо залишки нижньої межі і дані, що їх утворюють (табл. 2.2).

Таблиця 2.2 – Залишки регресійної моделі першого типу для об'єкту № 1 (початкові дані за січень – березень)

Дата	Рівень електроспоживання, кВт×год	Кількість проживаючих, чол.	Середньомісячна температура зовнішнього середовища, °C	Розрахунок значення електроспоживання, кВт×год	Залишки
Січень–13	702,3	299	-4,34	915,75	-213,45
Лютий–13	625,42	299	-0,73	844,53	-219,11
Березень–13	691,89	299	-2,09	863,16	-171,27
Січень–14	673,67	50	-4,84	720,73	-47,06
Лютий–14	701,56	120	-0,47	692,36	9,19
Березень–14	640,07	325	6,82	717,35	-77,28
Січень -15	675,92	50	-0,76	640,44	35,48
Лютий–15	589,88	120	-0,71	696,93	-107,05
Березень–15	640,91	340	5,07	764,12	-123,21

Зауваження 1. Надто великі абсолютні значення регресійних залишків можуть пояснюватися: недостатнім рівнем адекватності моделі або недостатньою достовірністю даних, за якими побудовано модель. Надалі, за можливістю, наслідки таких недоліків будуть нівелюватися шляхом належної модифікації моделі або корекцією вхідних даних на етапі їхньої попередньої обробки.

Для оцінювання коректності вихідних даних важливо врахувати, що кількість проживаючих у гуртожитках під час зимових канікул, котрі припадають на січень і частково на лютий, суттєво зменшується у порівнянні з основним періодом осіннього і весняного семестрів. Дана обставина відображена у табл. 2.2 в даних за 2014-2015 роки, а на січень – лютий 2013 року саме і припадають граничні значення залишків. Очевидно, коректність статистичних даних є сумнівною, або кількість проживаючих була завищена за рахунок поселення інших категорій людей (використання гуртожитку у якості хостелу, тимчасове заселення тощо). При подальшій побудові розширеної моделі енергоспоживання цю обставину буде враховано.

Аналіз табл. 2.1. показав що розрахункові величини, яким відповідають великі значення залишків (листопад і грудень 2015 року), в даному разі є значно нижчими, ніж реальні величини. Розглянемо вихідні дані за вказані проміжки часу, для порівняння включивши сюди 2013 і 2014 роки (табл. 2.3).

Звернемо увагу на те, що рівні електроспоживання у 2015 році є помітно вищими, ніж відповідні величини енергоспоживання у 2013 і 2014 роках. Враховуючи наведені результати, показані на діаграмі Box Plot та в табл. 2.1, бачимо, що є сенс для уточнення моделі до вищеописаного набору предикторних змінних x_0, x_1, x_2 ввести додаткову «фіктивну» змінну x_3 .

Сутність цієї змінної полягає у наступному.

Розділимо реально можливі рівні споживання електроенергії на 2 класи: звичайного рівня і підвищеного.

Таблиця 2.3 – Рівні електроспоживання у грудні та листопаді 2013–2015 років

Період	Рівень електроспоживання, кВт*год	Кількість проживаючих, чол.	Середньомісячна температура зовнішнього середовища, °C
Листопад-13	719,1	318	6,38
Грудень-13	866,69	325	-0,22
Листопад-14	1004,51	347	1,63
Грудень-14	911,78	311	-2,1
Листопад-15	1190,13	348	4,69
Грудень-15	1236,44	348	1,88

Домовимось, що змінна x_3 прийматиме значення 0, якщо показник електроспоживання відноситься до першого класу і 1 – до другого. Оцінку коефіцієнта регресії для введеної таким чином змінної одержимо шляхом віднесення вищевказаних показників 2015 року до другого класу. Тобто покладемо $x_3 = 1$ для листопаду і грудня 2015 року і 0 для інших місяців. При цьому одержимо розширення попередньої регресійної матриці стовпцем, що складається з нулів і одиниць на зазначених місцях. В подальшому при підрахунках модельних значень, наприклад, для прогнозування електроспоживання при заданих значеннях змінних x_0, x_1, x_2 , покладемо $x_3 = 1$, якщо в даному місяці мав місце або прогнозується зазначений режим підвищеного рівня. Якщо такий режим не передбачається, то приймаємо або модель типу 2.1, або модель типу 2.2 (розширену) при $x_3 = 0$. У двох останніх випадках очікуються близькі результати. Запропонована модель і є моделлю другого типу (розширеною), введення якої анонсувалося у початковій частині

статті. Модель другого типу може також застосовуватися для прогнозування максимальних значень електроспоживання при заданих прогнозних значеннях кількості проживаючих і температури зовнішнього середовища (тривалості ОП).

Приведемо приклад використання розширеної моделі для пояснення вищенаведених даних по об'єкту 1. При цьому виконаємо корекцію даних щодо усередненої місячної кількості проживаючих, скорегувавши значення, наведені в табл. 2.2 (за січень і лютий 2013 року). Для корегування даних шляхом екстраполяції обчислені відношення кількості проживаючих до паспортної ємності гуртожитку у березні 2014 і 2015 років: січень – 46, лютий – 109. Надалі аналогічні дії виконувались у випадках, коли необхідність корекції даних була очевидною.

Оцінювання функції регресії у розширеній моделі (з введеною додатковою фіктивною змінною x_3) є наступною

$$\hat{y} = 590,8128 + 0,7251x_1 - 19,4339x_2 + 434,0474x_3. \quad (2.7)$$

Деяка відмінність від моделі у наведеному список [2] пояснюється зазначеною корекцією даних за кількістю проживаючих. Оцінки S , R середньоквадратичного відхилення випадкової складової ε і множинного коефіцієнту кореляції та F - статистики для перевірки гіпотези про незначущість розширеної моделі є наступними

$$S=83, 2108; R = 0, 9530; F = 105, 4557. \quad (2.8)$$

Порівняння із рівностями (2.5, 2.6) вказує на помітне підвищення якості розширеної моделі над спрощеною з точки зору значень S і R , оскільки критичне значення для перевірки гіпотези про незначущість моделі $u_{1-\alpha}^{F(p-1, n-p)}$ при $\alpha = 0,05$, $p = 3$, $N = 36$ (тобто $u_{1-\alpha}^{F(3,32)}$) дорівнює 6,281 [66], [67], то значення F вказує на ще більш високий рівень значущості, ніж у моделі (2.3). Графік залишків для розширеної моделі має наступний вигляд (рис.2.14).

Розглянемо діаграму Box Plot, що відповідає графіку залишків розширеної регресійної моделі на рис 2.14 (рис. 2.15).

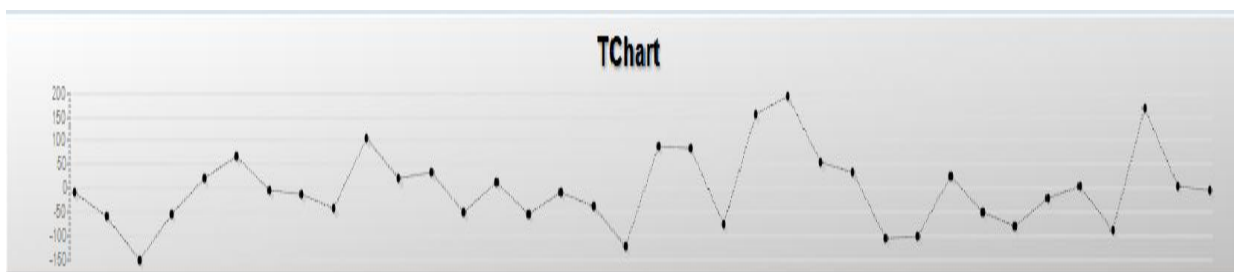


Рисунок. 2.14 – Графік залишків розширеної регресійної моделі (з введеною додатковою фіктивною змінною x_3)

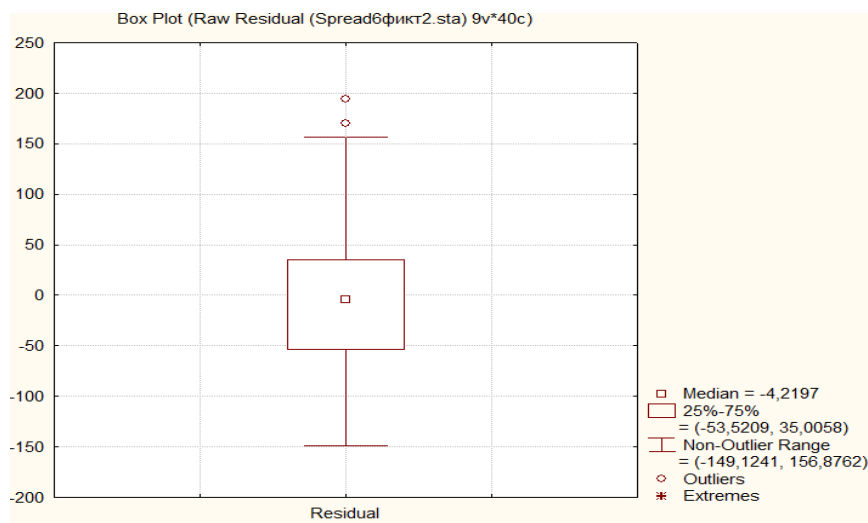


Рисунок 2.15 – Діаграма Box Plot для залишків розширеної регресійної моделі (з введеною додатковою фіктивною змінною x_3)

Візуально діаграми на рис. 2.13 і 2.15 мало відрізняються, але у останній до викидів відносяться значення залишків в діапазоні від 150 до 200, в той час як такі ж значення у першій діаграмі були віднесені до основного масиву значень. Екстремальні залишки розширеної регресійної моделі (з введеною додатковою фіктивною змінною x_3) наведені у табл. 2.4.

Як видно з таблиці 2.4, найбільші залишки відносяться до спостережень з номерами 23 і 34, тобто у листопаді 2014 року і жовтні 2015 року.

Таблиця 2.4 – Екстремальні залишки розширеної регресійної моделі (з введеною додатковою фіктивною змінною x_3)

Standard Residuals								Standart Residual: Var1, кВт*год		
Case name	–5.	–4	–3.	–2.	3.	4.	5.	Observed Value	Predicted Value	Residual
C : 23	.	.	.	*	.	.	.	1004,51	810,68	193,83
C : 34	.	.	.	*	.	.	.	871,72	701,47	170,26

Будь-яких причин організаційного плану, що мали б впливати на підвищення енергоспоживання саме у зазначений період, не виявлено. Наявність даних відхилень можна пояснити і чисто стохастичним чином, використовуючи модель (2.7). Дійсно, сформуємо уявлення про імовірнісний розподіл множини залишків, одержавши для них графік Normal Plot з комплексу програм STATISTICA:

Відхилення від прямої групи точок, що відповідають даним залишкам, не є критичним (рис. 2.16).

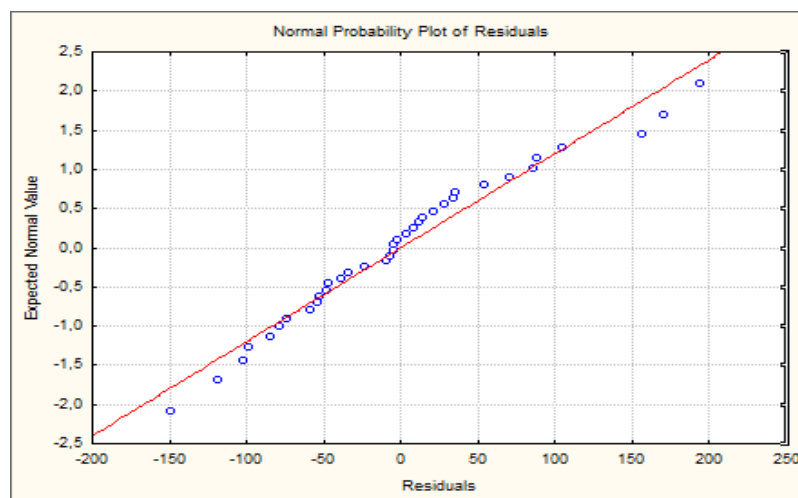


Рисунок 2.16 – Нормальний імовірнісний графік залишків розширеної регресійної моделі (з введеною додатковою фіктивною змінною x_3)

Воно має такий самий порядок, що й відхилення, обчислені з використанням значень нормально розподілених випадкових величин [62]. Принаймні у першому наближенні розподіл множини залишків можна вважати нормальним $N(\mu, \sigma)$.

Параметри розподілу оцінені вище ($\mu \cong 0, \sigma \cong S = 83,2108$). З іншого боку, обчислення статистики d Дарбіна – Уотсона для перевірки гіпотези H_0 про незалежність залишків показує: $d = 1,7016$, що більше критичного рівня $d_U = 1,56$, так що (при рівні значущості 0,05) гіпотеза H_0 не відхиляється [65]. Такий стан речей дає можливість обчислити ймовірність появи не менше двох значень залишків за модулем, більшим ніж $2S$. Імовірність такої події в окремому випробуванні за відомим правилом 2σ [71], [72] дорівнює $1 - 0,9545 \dots \cong 0,0455 \dots$.

Позначивши $P_{\geq k}, P_{< j}, P_{=i}$ імовірність того, що кількість «успіхів» у схемі незалежних випробувань Бернуллі більше або дорівнює k , менше j і дорівнює i , відповідно, знайдемо імовірність $P_{\geq 2}$ появи двох або більше залишків визначеної вище величини.

Отже, маємо:

$$P_{\geq 2} = 1 - P_{< 2} = 1 - P_{=0} - P_{=1} \cong 1 - 0,954^{36} - 36 \cdot 0,046 \cdot 0,954^{35} \cong 0,497.$$

Таким чином, при утворенні серій зазначених випробувань приблизно в половині випадків можна чекати наявності принаймні двох залишків вказаної величини. Аналогічні розрахунки для залишків, що відображені на рис. 2.13, призводять до результату $P_{\geq 2} \cong 0,05$, що дає додаткові підстави для корегування моделі 1 і (або) вхідних даних.

З метою з'ясування можливостей побудованих моделей для прогнозування величин порівняємо розрахункові дані з величинами

споживання електроенергії у наступні три роки з 2016 по 2018 рр. (дані за цей період не були використані при побудові вищезазначених моделей).

Об'єкт 1.

Таблиця 2.5 – Дані спостережень і розрахункові значення рівнів електроспоживання для об'єкту № 1 за опалювальні періоди 2016 - 2018 років

Період	Січень 2016 р.	Лютий 2016 р.	Березень 2016р.
Фактично	781,94	731,65	754,04
За моделлю 1	760,1628; [649,15-871,17]	685,99; [619,66-752,32]	802,56; [743,06-862, 07]
За моделлю 2, $x_3 = 0$	735,89; [664,1-807,7]	660,7102 [617,37-704,04]	754,82 [714,03-795,62]
Період	Жовтень 2016 р.	Листопад 2016 р.	Грудень 2016р.
Фактично	769,3858	883,78	828,52
За моделлю 1	725,722; [674,17-777,28]	838,3357; [774,29-902,38]	919,2804; [843,14-995,43]
За моделлю 2, $x_3 = 0$	685,648 [650,43-720,86]	788,6482 [744,91-832,38]	860,6976 [808,75-912,65]
Період	Січень 2017р.	Лютий 2017	Березень 2017
Фактично	677,09	933,7	786,88
За моделлю 1	745,29; [636,29-853,81]	952,636; [871,11 – 1034,16]	849,046; [783,5-914,6]
За моделлю 2, $x_3 = 0$	722,2942 [652,13-792,46]	890,54 [834,99-946,10]	806,2632 [759,98-852,53]
Період	Січень 2018р.	Лютий 2018	Березень 2018
Фактично	784,626	912,611	1077,806
За моделлю 1	753,29; [667,18-839,4]	937,968; [856,19-1019,75]	932,64; [854,43-1010,85]
За моделлю 2, $x_3 = 0$	724,4665; [668,39-780,53]	880,5103 [825,23-935,79]	883,989 [829,23-938,75]
Період	Жовтень 2018р.	Листопад 2018	Грудень 2018
Фактично	665,8969	1039,662	1339,94
За моделлю 1	667,042 [610,61-713,47]	837,754; [772,41-903,1]	939,014; [859,76-1018,27]
За моделлю 2, $x_3 = 0$	629,404; [629,4-667,4]	789,9546; [745,61-834,3]	878,1588; [824,09-932,22]
За моделлю 2, $x_3 = 1$	1063,45; [941,2-1185,7]	1224,002; [stat02,75-1345,25]	1312,206; [1191,07-1433,34]

Використано дані за 2016 - 2018 роки. Період підвищеного споживання електроенергії, про який мова йшла вище, спостерігався у листопаді і грудні 2018 року (як і в 2015 році). Тому наведено результати розрахунків за моделлю 2 при $x_3 = 1$ лише для останніх трьох місяців 2018 року, а за моделями 1 і 2 при $x_3 = 0$ – у всіх інших випадках.

Числа перед квадратними дужками у табл. 2.5 – це прогнознi значення електроспоживання, обчислені за рівностями (2.3) і (2.7) (відповідно), а у квадратних дужках представлені довірчі інтервали рівня надійності 0,95 для таких значень.

Згідно з даними табл. 2.5 сумарна величина електроспоживання за представлені місяці 2016 року дорівнює 4749,3158 кВт×год, а відповідна розрахункова величина за моделлю 1 – 4634,76 кВт×год. Відносна похибка дорівнює 0,0241. Модель 2 при $x_3 = 0$ дає розрахункову величину 0,055. Аналогічно за 2017 рік маємо відносні похибки 0,06 і 0,009 відповідно. Дані за 2018 рік з моделлю 2 при $x_3 = 1$ за листопад та грудень і моделлю 1 для інших місяців дає відносну похибку 0,001.

Об'єкт 2.

Періодів надвисокого споживання не виявлено. Представлено спостереження і розрахунки за моделлю 2.1.

Визначення відносної помилки сумарного прогнозу електроспоживання дають величини того ж порядку, що й при аналізі даних табл. 2.5.

Як видно з наведених даних, відсутність вищезгаданих періодів підвищеного електроспоживання моделі 1 і 2 при $x_3 = 0$ дають приблизно однакову точність прогнозу (табл. 2.6). Розрахункові значення моделі 2 при $x_3 = 1$ відповідають періодам підвищеного електроспоживання (за їх наявністю).

Для інших періодів розрахункові значення суттєво завищені. Їх можна застосовувати і у тих випадках, коли необхідно оцінити верхні межі рівнів електроспоживання.

Таблиця 2.6 – Дані спостережень і розрахункові значення рівнів електроспоживання для об'єкту № 2 за опалювальні періоди 2016 - 2018 років

Період	Січень 2016 р.	Лютий 2016 р.	Березень
Фактично	1478,77	1869,986	1953,4613
За моделлю 1	1551,123; [1432,78-1669651]	1912,965; [1842,26-1983,67]	1928,577; [1856,66-2000,45]
Період	Листопад 2016 р.	Грудень 2016р.	Січень 2017р.
Фактично	2087,159	2003,5019	1593,73
За моделлю 1	1971,63; [1897,06-2046,22]	2077,44; [1993,45-2161,44]	1526,459; [1411,4-1641,52]
Період	Лютий 2017	Березень 2017	Листопад 2017 р.
Фактично	1885,1671	1737,1216	1954,371
За моделлю 1	2096,38; [2010,66-2126,11]	1949,92; [1876,9–2012,9]	1851,908; [1746,37-1918,44]
Період	Грудень 2017р.	Січень 2018р.	Лютий 2018
Фактично	1881,341	1533,088	1869,986
За моделлю 1	1933,15; [1861,0-2005,3]	1438,371; [1333,48-1541,94]	1796; [1702,97-1889,28]

2.3 Математичне моделювання електроспоживання у будівлях гуртожитків закладів вищої освіти

Передумовою ефективного впровадження політики енергоощадності є розроблення нормативного забезпечення для ефективного функціонування системи управління інформаційного забезпечення заходів з підвищення ефективності енергоспоживання.

Автором наведено результати побудови та реалізації математичних моделей електроспоживання у будівлях ЗВО на прикладі Київського національного університету технологій та дизайну. Для розроблення таких

моделей використані бази даних про енергоспоживання в університеті за останні п'ять років, одержані за допомогою ПТК «АСУЕУ». В основу розроблення математичної моделі покладені залежності рівнів енергоспоживання певного об'єкта на заданому часовому проміжку від факторів, що впливають на формування базового споживання енергоносіїв [73]. До таких факторів відносяться, насамперед, кількість проживаючих у гуртожитках, сезонність та погодні умови, графік освітнього процесу. Крім того, є цілком очевидним, що на зазначені чинники впливають певні події, що мають стохастичну природу (наприклад, постійна зміна кількості проживаючих, використання додаткового догріву приміщень, використання необлікованих побутових електроприладів, тощо) [74].

Через x_1 , x_2 , x_3 позначено величини електроспоживання, що характеризують відповідно кількість проживаючих у гуртожитку, температуру зовнішнього середовища і додатковий числовий параметр для врахування особливостей графіка освітнього процесу. Через ε позначено деяку випадкову величину, яка характеризує варіабельність моделі і викликана нерегулярними подіями стохастичного характеру. Із наведеного випливає, що у загальному вигляді модель можна представити наступним чином:

$$y = f(\beta, x_1, x_2, x_3, \varepsilon), \quad (2.9)$$

де f – деяка функція, β – (векторний) параметр залежності.

Використовуючи статистичні дані [75] необхідно встановити функціональну залежність f для її реалізації у моделі (2.9) і розробити відповідне програмне забезпечення з автоматизованим експортом даних з ПТК «АСУЕУ» для реалізації алгоритмів математичного моделювання.

У якості математичної моделі електроспоживання у будівлях університету було обрано лінійну регресійну модель виду

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \varepsilon, \quad (2.10)$$

і її узагальнення

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \varepsilon \quad (2.11)$$

де y – середня величина добового електроспоживання на обраному часовому інтервалі, $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3$ – коефіцієнти, що підлягають визначенню. У якості часового інтервалу приймаємо календарний місяць. Надалі рівності (2.10) і (2.11) будемо умовно називати скороченою і розширеною моделями відповідно. Для обробки наявних статистичних даних була розроблена комп'ютерна програма, розроблена у середовищі Delphi. Зазначена програма виконує перетворення вихідних даних у матрицю плану для побудови моделей (2.10), (2.11) і обчислює коефіцієнти моделі. Дослідження імовірнісних властивостей одержаної моделі і аналіз її відповідності реальним даним виконувався за допомогою розробленої програми у середовищі Delphi і статистичного пакету *STATISTICA*.

Враховуючи потенційну можливість введення додаткових змінних до моделі, а також поширення одержаних моделей на об'єкти іншого призначення, розроблене програмне забезпечення дає можливість реалізовувати більш розширені залежності типу (2.10) і (2.11) з ідентифікацією параметрів лінійних моделей. Для пояснення одержаних результатів наведемо декілька положень щодо особливостей зазначених моделей.

З метою кращого розрізняння скалярних і векторно-матричних величин для останніх використовується напівжирний шрифт. Крім того, використання знаку ' свідчитиме про транспонування матриці або вектора, зокрема, вектор-стовпець $\mathbf{Y}$ може бути записаним у рядок як $(y_1, \dots, y_n)'$.

ЗЛМ будемо вважати залежність виду:

$$\mathbf{Y} = \mathbf{X}\boldsymbol{\beta} + \boldsymbol{\varepsilon}, \quad (2.12)$$

де $\mathbf{Y}$ – вектор спостережень залежної змінної, $\mathbf{X}$ – матриця спостережень незалежних змінних, вона носить назву регресійної матриці або матриці

експерименту чи плану, β – вектор (невдомих) коефіцієнтів, ε – вектор помилок з нульовим середнім значенням. Розмірності $\dim(\cdot)$ даних величин позначаються відповідно:

$$\dim(Y) = \dim(\varepsilon) = n, \dim(\beta) = p, \dim(X) = n \times p,$$

тому можна записати:

$$Y = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \dots \\ y_n \end{pmatrix}, \beta = \begin{pmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \dots \\ \beta_{p-1} \end{pmatrix}, X = \begin{pmatrix} x_{10} & x_{11} & \dots & x_{1,p-1} \\ x_{20} & x_{21} & \dots & x_{2,p-1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{n0} & x_{n1} & \dots & x_{n,p-1} \end{pmatrix}, \varepsilon = \begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \dots \\ \varepsilon_n \end{pmatrix}.$$

Надалі приймається, що $n > p$. Перехід від скалярного запису ЗЛМ типу (2.10) і (2.11) до векторно-матричного (2.12) має стандартну процедуру: постулюється, що дійсна залежна змінна y з точністю до випадкової адитивної похибки ε може бути представлена як лінійна комбінація (незалежних) дійсних змінних, інакше, регресорів $x_0, x_1, \dots, x_{p-1}$:

$$y = \beta_0 x_0 + \dots + \beta_{p-1} x_{p-1} + \varepsilon, \quad (2.13)$$

а також наявність відповідної вибірки об'єму n . При цьому функція $f(x) = \beta'x = \beta_0 x_0 + \dots + \beta_{p-1} x_{p-1}$ (тобто права частина без випадкової складової має усталену назву (лінійної) функція регресії, а коефіцієнти $\beta_0, \dots, \beta_{p-1}$ – коефіцієнти регресії. Згадана вибірка являє собою сукупність n , одержаних експериментальним шляхом перебору чисел вигляду

$$(x_{i0}, \dots, x_{i,p-1}, y_i), i = 1, 2, \dots, n, \quad (2.14)$$

де x_{ij} – значення j -го регресора (j -ї незалежної змінної) при i -му спостереженні, y_i – відповідне значення залежної змінної y . Тоді, позначивши ε_i значення похибки ε при i -му спостереженні і підставляючи послідовно вибірккові значення (2.13) в рівність (2.14), одержимо n рівностей:

$$y_i = \beta_0 x_{i0} + \dots + \beta_{p-1} x_{i,p-1} + \varepsilon_i, i = 1, 2, \dots, n, \quad (2.15)$$

які зручно представляти у вигляді однієї векторно-матричної рівності (2.12).

Для оцінювання вектора коефіцієнтів β в роботі використовується відомий МНК, тобто вектор $\mathbf{b} = (b_0, \dots, b_{p-1})'$ є розв'язком задачі мінімізації

$$\|\mathbf{Y} - \mathbf{X}\beta\|^2 \xrightarrow{\beta \in R^p} \min, \quad (2.16)$$

де R^p – p -вимірний евклідов простір, мінімум визначається за $\beta \in R^p$, а норма $\|z\|$ вектора $z = (z_1, \dots, z_n) \in R^n$ визначена як $(z_1^2 + \dots + z_n^2)^{1/2}$. Добре відомо [35], [36], [2], що розв'язок задачі (2.16) можна знайти як розв'язок $\mathbf{b}$ системи так званих нормальних рівнянь:

$$\mathbf{X}'\mathbf{X}\beta = \mathbf{X}'\mathbf{Y}. \quad (2.17)$$

За будь-яких умов система (2.17) є сумісною, причому у випадку, коли матриця $\mathbf{X}$ має повний ранг, її розв'язок (а отже і розв'язок задачі (2.16)) єдиний і має вигляд:

$$\mathbf{b} = (\mathbf{X}'\mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}'\mathbf{Y}, \quad (2.10)$$

де $^{-1}$ – знак обертання матриці. Оцінювання $\mathbf{b}$ вектора β здійснюється МНК. Функція $\hat{y} = \mathbf{b}'\mathbf{x} = b_0x_0 + b_1x_1 + \dots + b_{p-1}x_{p-1}$ є оцінкою функції регресії $\beta'\mathbf{x}$.

Числові дані, які використовуються при побудові регресійних моделей реальних виробничих процесів, досить часто не гарантують невиродженість матриці експерименту. Якщо матриця експерименту $\mathbf{X}$ є виродженою або близькою до виродженої (погано узгодженою), то задача оцінювання стає більш складною. Погана узгодженість матриці експерименту $\mathbf{X}$, що викликана лінійною залежністю або наближеною лінійною залежністю між стовпцями цієї матриці, загалом знижує цінність побудованих моделей. Одним із поширених способів уникнення таких ситуацій є пошук стовпців матриці $\mathbf{X}$, які є лінійно залежними від інших стовпців та їх наступне видалення [62]. Подальшим кроком є видалення відповідного регресору x_j з моделі (2.13). У даній роботі використовується саме останній підхід. Процедура видалення базується на відомому алгоритмі Грама–Шмідта ортогоналізації системи векторів евклідового простору [62], [76]. У нашому випадку зміст зазначеного алгоритму

полягає в наступному: стовпці матриці X послідовно перетворюються таким чином, щоб кожен новий стовпець являвся ортогональним щодо раніше перетворених стовпців (під ортогональністю n - вимірних векторів $x = (x_1, \dots, x_n)'$ і $y = (y_1, \dots, y_n)'$ мається на увазі рівність нулю їх скалярного добутку $x'y$: $x'y = \sum_{i=1}^n x_i y_i$). Якщо між стовпцями існує лінійна залежність, то на якомусь k - му кроці ($1 \leq k \leq p$) буде отримано стовпець, повністю складений з нулів. Це і означає, що k - й стовпець лінійно залежить від попередніх стовпців. Він вилучається з матриці, а з моделі виключається відповідна незалежна змінна. Процедура триває до розгляду останнього стовпця включно. У випадку пошуку наближено лінійної залежності (як це і реалізовано в даній роботі) вилученню підлягають стовпці перетвореної матриці, евклідова норма яких не перевищує заданого малого числа. У матричному вигляді процедура може бути представлена наступним чином [62]:

$$Z_{iT} = Z_i - Z(Z'Z)^{-1}Z'Z_i, i = 1, \dots, p, \quad (2.19)$$

де Z – матриця вже перетворених стовпців, Z_i – наступний стовпець матриці X , що перетворюється, Z_{iT} – вектор-результат перетворення, ортогональний стовпцям матриці Z .

В даній роботі при побудові регресійної моделі виду (2.12) в якості значень залежної змінної y беруться місячні сумарні величини врахованої активної частини спожитої електроенергії (у кВт*год), поділені на кількість облікованих діб у даному місяці. В позначеннях рівності (2.12) для «скороченої» моделі (2.10) в якості незалежних змінних взяті три змінні: x_0 , x_1 , x_2 , а для розширеної моделі було введено ще змінна x_3 (так, що $p = 3$ у першому випадку і $p = 4$ у другому). Варто пояснити, що x_0 і x_3 – це так звані фіктивні змінні, причому x_0 завжди дорівнює 1 (її роль полягає у введенні сталої складової у модель), а x_3 дорівнює 1 або 0 в залежності від того, чи використовувався у даному часовому відрізку спеціальний режим опалення

(електродогрів), x_1 – кількість проживаючих у гуртожитку за обраний місяць, x_2 – відповідна середньомісячна температура зовнішнього середовища. Найбільша загальна кількість місяців спостережень (тобто величина n із співвідношень (2.14), (2.15)) дорівнює 36 - 3 роки спостережень). Важливо відмітити, що опрацювання статистичних даних шляхом реалізації запропонованої моделі може бути використано для дослідження майбутніх сценаріїв побудованої моделі та прогнозного оцінювання поведінки системи електроспоживання. Таким чином, загальна модель типу (2.12) електроспоживання для конкретної будівлі реалізується у формі наведених вище виразів (2.10) і (2.11).

Для аналізу адекватності математичного моделювання (відхилення між фактичними та розрахованими значеннями) в роботі використовуються так звані графіки залишків, які у даному випадку (можливі і інші варіанти) являють собою сукупність точок декартової площини, що мають координати $(i, \hat{y}_i - y_i)$, $i = 1, \dots, n$ (для більшої наочності вони з'єднуються прямолінійними відрізками). Тут $\hat{y}_i$ – розрахункове за моделлю значення, а y_i – реальне значення залежної змінної при i -му спостереженні.

Як зазначалося вище, реалізації належних обчислень була реалізована за допомогою розробленої комп'ютерної програми в середовищі Delphi, функціональний алгоритм якої полягають у наступному:

- автоматизація побудови матриці експерименту X в форматі Delphi на основі статистичних спостережень ПТК «АСУЕУ» у форматі MS Excel;
- дослідження регресійних даних на узгодженість матриці плану з використанням описаного вище алгоритму Грама–Шмідта (2.19) та відсіювання (за необхідності) зайвих змінних;
- визначення коефіцієнтів регресії у відповідності до (2.18) та побудова графіків залишків для одержаної моделі.

Форма, наведена на рис. 2.17 візуально відображає діалогове вікно програми для одержання моделі (2.10).

Зауважимо, що вихідні дані для одержання математичних моделей були обрані на основі добових графіків електроспоживання в університеті з 30-хвилинною дискретністю у відповідності до протоколів спеціалізованого програмного забезпечення «ПТК АСУЕ».

Для більшої конкретності наведемо кілька одержаних результатів:

- моделі типу (2)

гуртожиток №4. $\hat{y} = 381,8076 + 0,6045x_1 - 10,5754x_2$.

гуртожиток №6. $\hat{y} = 584,3330 + 0,8223x_1 - 19,6922x_2$.

гуртожиток №7. $\hat{y} = 836,7495 + 1,5511x_1 - 32,1912x_2$.

гуртожиток №8. $\hat{y} = 735,4488 + 0,8553x_1 - 117,0849x_2$.

- моделі типу (3)

гуртожиток №4. $\hat{y} = 382,2638 + 0,6968x_1 - 10,6435x_2 - 11,3522x_3$.

гуртожиток №6. $\hat{y} = 576,5303 + 0,6862x_1 - 17,9671x_2 + 456,9815x_3$.

гуртожиток №7. $\hat{y} = 835,7055 + 1,5458x_1 - 32,0411x_2 + 43,6572x_3$.

гуртожиток №8. $\hat{y} = 735,1917 + 0,8493x_1 - 17,0358x_2 + 13,7046x_3$.

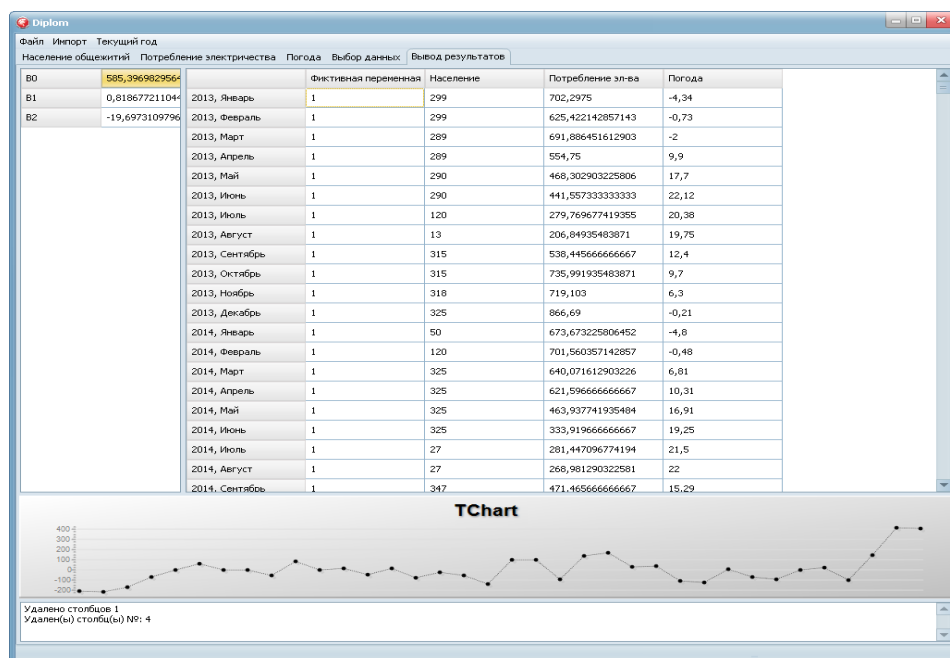


Рисунок 2.17 – Діалогове вікно програми для побудови моделі електроспоживання у гуртожитку університету

Оцінювання адекватності моделей та достовірності одержаних результатів буде показано у наступній частині дослідження, використовуючи числові реалізації моделей на декількох об'єктах однакового призначення.

Таким чином одержані та реалізовані регресійні моделі процесів електроспоживання в гуртожитках університету. Запропоновано до використання два типи математичних моделей: базову і розширену. Вибір типу моделі для конкретних випадків реалізується за допомогою методу додаткової суми квадратів з порівнянням ймовірнісних характеристик результатів розрахунків. Розроблено програмне забезпечення для автоматизації числової реалізації моделей та аналізу одержаних результатів.

2.4 Аналіз та інтерпретація результатів математичного моделювання електроспоживання у будівлях закладів вищої освіти

Для побудови і оцінювання рівнів електроспоживання в будівлях навчальних корпусів пропонується створення математичних моделей які базуються на використанні регресійного аналізу та проведення перевірки моделі на адекватність та достовірність результатів моделювання.

В якості математичної моделі електроспоживання приймається ЗЛМ вигляду

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_{p-1} x_{p-1} \quad (2.20)$$

або, у матричному виді

$$Y = X\beta + \varepsilon, \quad (2.21)$$

де: $Y = \begin{pmatrix} y_1 \\ \dots \\ y_n \end{pmatrix}$ – n - вектор спостережень залежної змінної або *відгуку* y ,

$X = \begin{pmatrix} x_{10} & \dots & x_{1,p-1} \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ x_{n0} & \dots & x_{n,p-1} \end{pmatrix}$ – матриця спостережень незалежних, інакше,

пояснювальних змінних або регресорів (регресійна матриця або матриця

експерименту чи плану); $\beta = \begin{pmatrix} \beta_0 \\ \dots \\ \beta_{p-1} \end{pmatrix}$ – вектор (невдомих) коефіцієнтів,

$\varepsilon = \begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \dots \\ \varepsilon_n \end{pmatrix}$ – вектор помилок.

Для зручності роботи з даними на базі прийнятої моделі розроблено спеціальну комп'ютерну програму, яка функціонує у середовищі Delphi і дозволяє виконувати наступні процедури:

- автоматизацію побудови матриці експерименту X в форматі Delphi на основі статистичних спостережень ПТК «АСУЕУ» у форматі MS Excel;
- дослідження регресійних даних на виявлення достатнього степеню зумовленості матриці плану з використанням алгоритму Грама – Шмідта для відсіювання (за необхідністю) зайвих змінних;
- оцінювання за МНК вектора коефіцієнтів регресії b згідно з рівністю

$$b = (X'X)^{-1}X'Y;$$

- обчислення значень компонентів вектору оцінок

$$\hat{Y} = \begin{pmatrix} \hat{y}_1 \\ \dots \\ \hat{y}_n \end{pmatrix}$$

за рівністю

$$\hat{Y} = Xb$$

- побудову графіків залишків для одержаної моделі, тобто величин виду $\hat{y}_i - y_i, i = 1, \dots, n$.

Для розширення графічних і обчислювальних можливостей аналізу даних використовувався також пакет комп'ютерних статистичних програм STATISTICA.

В основу розроблення математичної моделі покладені залежності рівнів енергоспоживання досліджуваних об'єктів (у даній роботі здебільшого навчальних корпусів) на заданому часовому проміжку від факторів, що

впливають на формування базового споживання енергоносіїв. До таких факторів відносяться особливості формування графіка освітнього процесу: рівні завантаженості аудиторного фонду, площа або об'єм будівлі, сезонність та погодні умови. Крім того, є цілком очевидним, що на показники електроспоживання впливають чинники, які мають стохастичну природу, наприклад, зміна кількості споживачів електроенергії, використання додаткових засобів догрівання приміщень або використання необлікованих струмоприймачів тощо. Зауважимо, що між сукупностями головних пояснювальних змінних при побудові регресійних моделей енергоспоживання будівлями різних призначень спостерігаються суттєві розбіжності. Так, як з'ясувалось у [6], графік навчального процесу впливає на процес електроспоживання у гуртожитках досить нерегулярним чином, в той час як різні конкретні моделі даного процесу для навчальних корпусів у більшості випадків виявляють значимі і співставні величини відповідних коефіцієнтів регресії.

Аналіз конкретних даних про електроспоживання у будівлях навчальних корпусів показав доцільність розробки принаймні двох класів відповідних регресійних моделей: для окремих будівель і для сукупностей (категорій) таких будівель [77]. При цьому аналіз даних для конкретної будівлі сприяє виявленню можливості включення в модель тієї чи іншої додаткової пояснювальної змінної, яка при сукупному аналізі може не потрапити до числа значущих регресорів. При цьому окремі моделі є більш простими для розрахунків, зрозумілими за змістом, і більш точними при прогнозуванні. З іншого боку, моделі для обраних об'єктів надають можливість їх порівняння для різних категорій будівель (наприклад, для з'ясування питань про співпадіння або принципову різницю відповідних моделей). Крім того моделі надають принципову можливість прогнозування значень досліджуваного процесу у

випадку наявності будівель, у яких відсутні статистичні дані про електроспоживання.

2.5 Застосування кореляційно-регресійного аналізу для прогнозування рівнів електроспоживання у будівлях закладів вищої освіти

Розглянемо спочатку декілька регресійних моделей для окремих будівель навчальних корпусів. У подальшому будемо їх іменувати таким чином: об'єкт №1, об'єкт №2 і об'єкт №3. Об'єкт №1 являє собою будівлю загальною площею – 39,4 тис. м². Об'єкти №№2,3 – учбові корпуси площею –14,9 тис. м² і 2,1 тис. м².

В якості можливих пояснювальних змінних для моделей виду (1.1,2.1) згаданих об'єктів оберемо наступне:

- N – номер календарного місяця ($1 \leq N \leq 12$);
- $z = z(N)$ – рівень завантаженості аудиторного фонду (у відсотках),
- $t = t(N)$ – температура зовнішнього середовища (середня добова температура у фіксованому місяці в градусах за Цельсієм);
- $\varphi = \varphi(N)$ – фіктивна змінна, що дорівнює 0 для $N = 1,7,8,12$ (лютий, липень, серпень, грудень) та 1 для інших значень N .

Таким чином, зазначені пояснювальні змінні (регресори) є певними характеристиками, з одного боку, ефекту сезонності (N, t), а з іншого – окремих аспектів організації навчального процесу (z, φ).

В якості залежної змінної відгуку у ЗЛМ (2.20), (2.21) приймається величина $e = e(N)$, яка для фіксованого місяця N дорівнює відповідній місячній сумарній величині спожитої електроенергії (кВт×год), поділеної на кількість облікованих діб у даному місяці. Пояснимо, що вираз $e = e(N)$ тут вжито в узагальненому сенсі, маючи на увазі, що всі наведені вище пояснювальні змінні залежать від N , так що подані далі вирази виду $e = e(t), e = e(t, z)$ та ін. не

суперечать ні один одному, ні даному виразу. З іншого боку, в подальшому під наведеними вище рівностями ми будемо розуміти регресійні моделі, у яких в якості пояснювальних змінних, не рахуючи вільного члену, входить у явному вигляді, відповідно, лише змінна N , лише змінна t або лише (t, z) і т.п. [66], [67].

Наведемо одержані регресійні моделі типу (2.20), (2.21), що, відповідають вищезазначеним об'єктам. При побудові вказаних моделей використовувалися статистичні дані служби енергоменеджменту з вересня 2014 по вересень 2016 років, що пов'язано із зручністю доступу до даних щодо завантаження навчальних аудиторій. Відповідні дані за наступні роки використовувалися для перевірки якості одержаних моделей.

Об'єкт № 1

Таблиця 2.7 – Моделі простої лінійної регресії для об'єкту № 1

№	Об'єкт	Модель	Рівняння регресійної моделі
1,1	1	$e = e(N)$	$2773,668 + 3,668N$
2,1	1	$e = e(z)$	$2025,643 + 30,181z$
3,1	1	$e = e(t)$	$3706,075 - 91,058t$
4,1	1	$e = e(\varphi)$	$2976,842 - 537,995\varphi$

Моделі 1.1 – 3.1 та їх характеристики (див. нижче табл. 2.7 наведено для з'ясування питання, чи може динаміка зміни величини електроспоживання бути поясненою найпростішим чином: згідно з 1.1 – простою залежністю від календарної змінної N ; згідно з 2.1 – аналогічною залежністю від організації завантаженості аудиторій; згідно з 3.1 – простою залежністю від зміни температури навколишнього середовища. В табл. 1 та в подальшому вживаються позначення: R – вибіркового множинний коефіцієнт кореляції

(показник лінійної залежності між реальними і розрахунковими значеннями відгуку e), $F_{m,n}$ – значення F статистики критерію незначущості моделі (1), (2), S – стандартна помилка регресійної оцінки.

Нагадаємо, що при порівнянні якості моделей окремо за кожним з вказаних показників, перевагу мають більші значення R , $F_{m,n}$ і, звичайно, менші значеннями S .

З даних табл. 2.8 ми бачимо, що модель 3.1 є кращою поміж вказаними трьома моделями за всіма показниками. Мінімальне і максимальне значення залишків для моделей 1.1, 2.1, 3.1 дорівнюють, відповідно: 1.1: (–1584,13; 1206,71.1, 2.1: (–1130,02; 1892,76.1, 3.1: (–897,639; 654,445), 4.1: (–1254,38; 1548,87).

Таблиця 2.8 – Імовірнісні характеристики моделей енергоспоживання 1.1 – 3.1

№ моделі	Модель	R	$F_{1,22}$	S	Примітки
1,1	$e(N)$	0,0141	0,00439	936,4	Модель незначуща
2,1	$e(z)$	0,565	10,316	772,66	
3,1	$e(t)$	0,8924	86,044	422,59	
4,1	$e(\varphi)$	0,2828	1,9132	898,25	Модель незначуща

Наступні діаграми розкиду (*box-and-whisker plots*) [62], [69] відповідних залишків (Зал $e(N)$, ..., Зал $e(\varphi)$) надають графічну ілюстрацію порівняної якості даних моделей (рис. 2.18).

Очевидно, третя зліва діаграма (яка відповідає моделі 3.1) має суттєво менший розкид значень і є дещо більш симетричною відносно центральної точки (медіани), ніж інші діаграми (рис. 2.19). Останнє свідчить на користь припущення про більшу подібність розподілу залишків моделі 3.1 до нормального розподілу, ніж це має місце до сукупності залишків інших моделей.

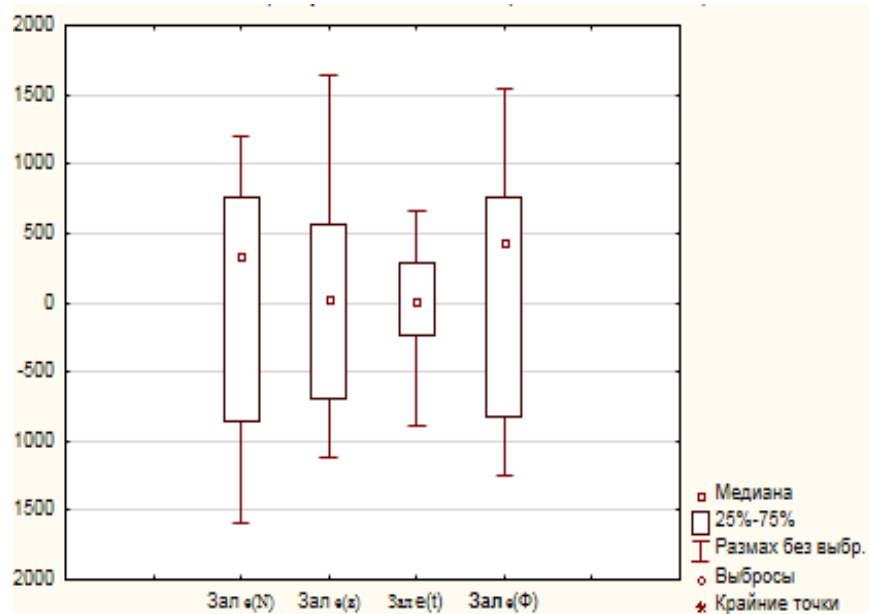


Рисунок 2.18 – Диаграмми Box Plot для сукупності залишків регресійної моделей 1.1 – 4.1

Наступні ймовірнісні графіки відповідності нормальному розподілу, перші два з яких відповідають моделям 1.1, 2.1, а третій – моделі 3.1, в цілому відповідають цьому спостереженню.

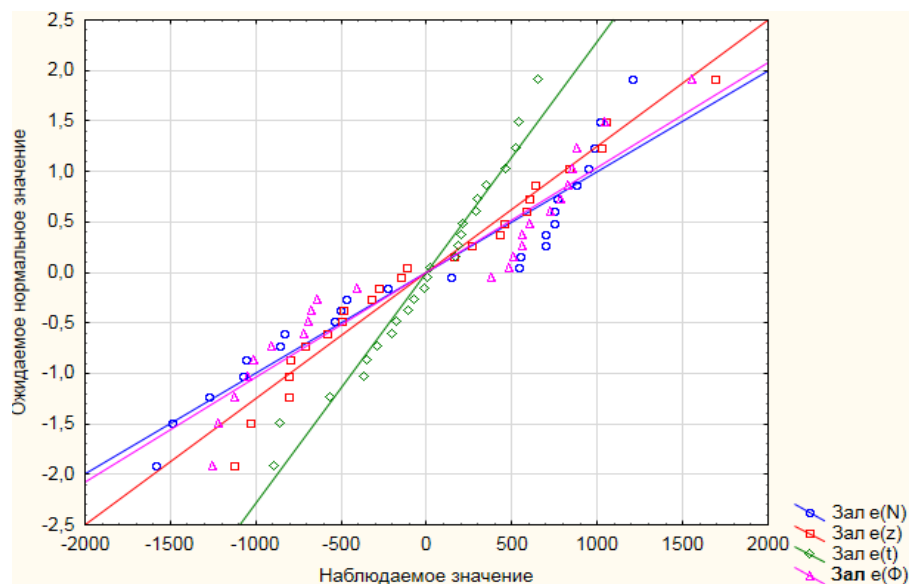


Рисунок 2.19 – Нормальні ймовірнісні графіки сукупності залишків регресійних моделей 1.1 – 3.1

Надалі за умовчуванням рівень значущості α статистичних критеріїв перевірки гіпотез дорівнює 0,05. Зауважимо, що оскільки критична точка $u_{0,95}^{F_{1,22}}$ F - статистики значущості регресійних моделей 1.1 – 4.1 (квантиль рівня 0,95 розподілу Фішера $F_{(1,22)}$) дорівнює 4,301, то модель 1.1, 4.1 є незначущими, тобто не кращими від моделі у вигляді сталої величини, що й відображено у табл. 2.8. З іншого боку, модель 3.1 доцільно окремо дослідити на якість прогнозування, оскільки для квантиля $u_{1-\alpha}^{F_{p-1,n-p}}$ розподілу Фішера $F_{p-1,n-p}$ (рівень квантиля $1 - \alpha$, степені свободи розподілу $(p - 1, n - p)$); у даному випадку $p = 2, n = 24$) виконується нерівність [70]:

$$F_{p-1,n-p} > 4u_{1-\alpha}^{F_{p-1,n-p}}. \quad (2.22)$$

В подальшому буде виконано порівняння прогнозуючих можливостей моделі (3.1) з більш повними моделями.

Таблиця 2.9 – Моделі з двома пояснювальними змінними для об'єкту № 1

№	Об'єкт	Модель	Рівняння регресійної моделі
5,1	1	$e = e(z, N)$	$240,106 + 30,267z - 28,419N$
6,1	1	$e = e(t, N)$	$3448,320 - 93,995t + 44,162N$
7,1	1	$e = e(t, z)$	$3258,192 - 81,390t + 14,332z$
8,1	1	$e = e(t, \varphi)$	$3873,910 - 90,680t - 514,833\varphi$

Розглянемо декілька регресійних моделей електроспоживання, що залежать від двох незалежних (пояснювальних) змінних.

Дані табл. 2.10 свідчать, що показники моделей 6.1 – 8.1 є близькими один до одного, причому всі вони суттєво переважають відповідні показники моделі 5.1.

Таблиця 2.10 – Імовірнісні характеристики моделей енергоспоживання 5.1 – 8.1

№ моделі	Модель	R	$F_{2,21}$	S	Примітки
5,1	$e(z, N)$	0,5602	4,814	794,03	Коефіцієнт при N незначущий
6,1	$e(t, N)$	0,9079	49,316	401,6	Коефіцієнт при N незначущий
7,1	$e(t, z)$	0,9279	65,113	357,19	Всі коефіцієнти є значущими
8,1	$e(t, \varphi)$	0,9325	70,041	346,09	Всі коефіцієнти є значущими

Мінімальне і максимальне значення залишків для моделей 4.1, 5.1, 6.1 дорівнюють, відповідно, 5.1: $(-1235,58; 1534,1636)$, 6.1: $(-700,488; 763,917)$, 7.1: $(-531,496; 764,415)$, 8.1: $(-548,521; 810,001)$. Нерівність (2.22) виконується для моделей 6.1 – 8.1: $u_{0,95}^{F_{2,21}} = 3,468$.

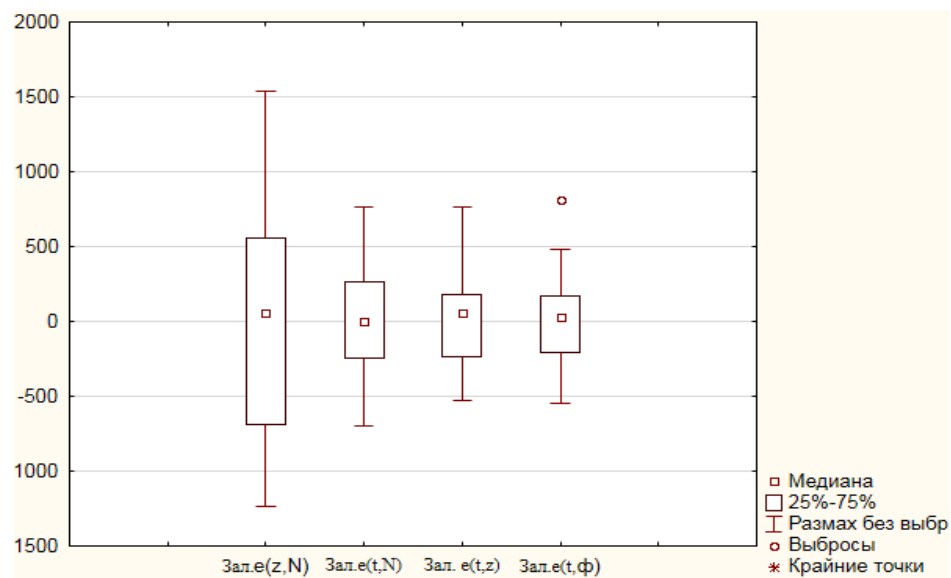


Рисунок 2.20 – Діаграми Box Plot для сукупності залишків регресійної моделей 5.1 – 8.1

З рис. 2.20 видно, що моделі 6.1–8.1 мають менший розкид регресійних залишків у порівнянні з моделлю 5.1, однак також помітно перевагу моделей 7.1, 8.1 над моделлю 6.1 (якщо не враховувати викид в останній діаграммі на рівні $\cong 810,01$).

Наступний рис. 2.21 ілюструє ступінь подібності розподілу ймовірностей залишків моделей 5.1–8.1 до нормального розподілу. Перевагу і в даному аспекті мають моделі 7.1, 8.1, хоча й відповідний графік моделі 6.1 є доволі близьким до вказаних графіків.

Враховуючи результати порівняння моделей 1.1–4.1, а також 5.1–8.1, порівняємо вживані вище графічні аспекти поведінки моделей 3.1 та 7.1, 8.1.

Бачимо, що важливі проценти інтервали 25%–75% є помітно компактнішим для моделей 7.1 ($e(t, z)$) і 8.1 ($e(t, \varphi)$) порівняно з 3.1 ($e(t)$). Показники R та S також кращі у моделей 7.1, 8.1.

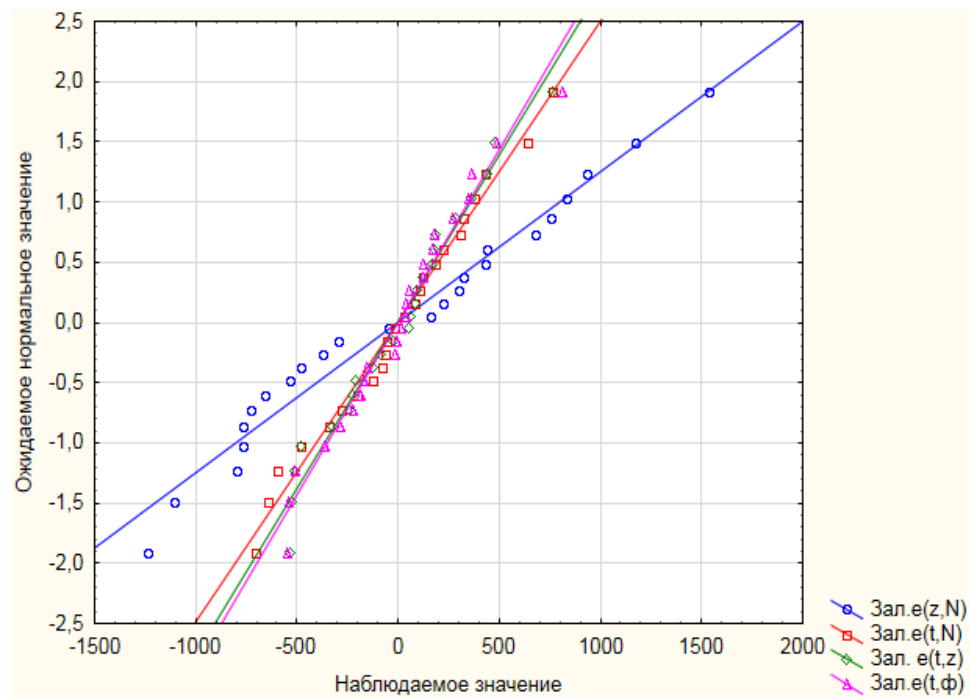


Рисунок 2.21 – Нормальні імовірнісні графіки сукупності залишків регресійних моделей 5.1–8.1

Це дозволяє зробити висновок про те, що розширення моделі 3.1 за рахунок включення в число пояснювальних змінних змінної z (завантаження аудиторного фонду) або φ (фіктивна змінна, що відповідає певному помісячному режиму енергопостачання об'єкту), є доцільним.

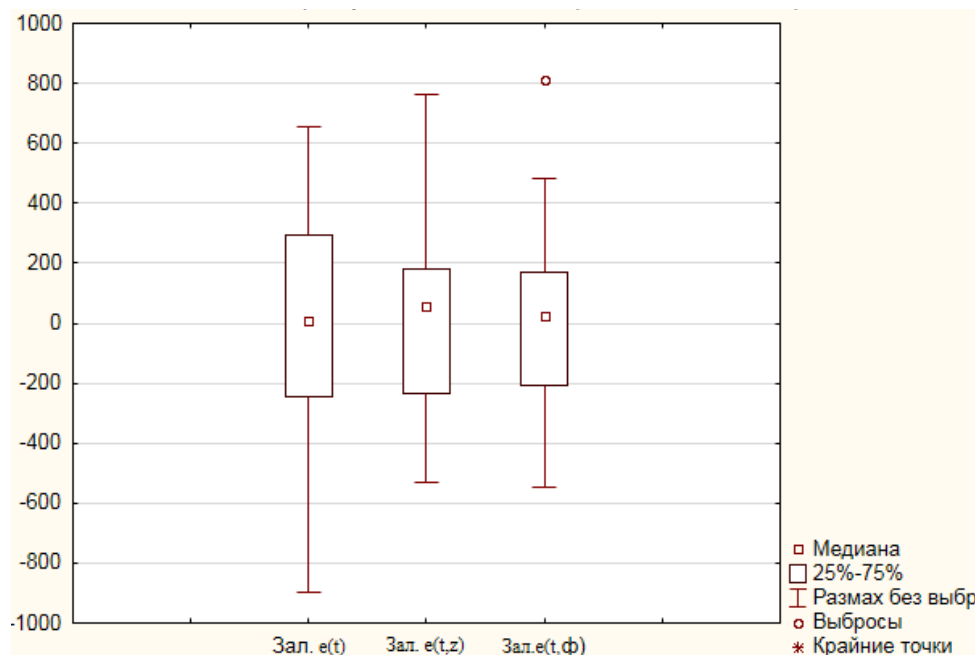


Рисунок 2.22 – Діаграми Box Plot для сукупності залишків регресійних моделей 3.1 та 7.1, 8.1

Зауважимо, що подальше утворення моделей електроспоживання типу (2.20), (2.21) за рахунок вживання більшої кількості зумовлених вище пояснювальних змінних (до трьох або чотирьох)) не призвело до покращення їх якості: за приблизно тими ж, що й вище, значеннями показників R , F , S , кожна така модель містить незначущі коефіцієнти, що фактично зводить її до однієї з попередніх моделей 3.1, 7.1 або 8.1 [64].

Наведемо деякі результати щодо прогнозування величини електроспоживання за даними з вересня 2016 по серпень 2017 року (табл. 2.11).

Таблиця 2.11 – Результат прогнозування рівнів електроспоживання з використанням моделей 3.1, 7.1, 8.1

Місяць, рік	t	z	Спостережуване значення ϵ	Прогноз з за 3.1	Прогноз за 7.1	Прогноз за 8.1
9,2016	16,1	36,66	2045,43	2240,17	2473,33	2413,96
10,2016	6,5	38,76	3252,85	3114,25	3284,77	3284,49
11,2016	1,2	38,13	4062,26	3596,81	3707,06	3765,09
12,2016	-1,5	34,5	4065,19	3842,65	3874,74	4009,93
1,2017	-4,9	9,16	3580,26	4152,22	3788,38	3803,41
2,2017	-2,7	28,33	3863,02	3951,91	3884,02	3603,91
3,2017	-1,5	34,95	3355,24	3842,25	3881,18	4009,93
4,2017	10,4	39,5	2646,57	2759,15	2977,86	2930,84
5,2017	15,3	26,72	1983,67	2313,01	2395,93	2486,51
6,2017	20	8,63	1656,11	1885,07	1754,03	2060,31
7,2017	20,9	0	1192,34	1083,13	1557,15	1463,87
8,2017	22,3	0	1149,62	1675,66	1443,2	1336,91

Середнє значення абсолютних відхилень прогнозних значень одержаних шляхом спостережень для моделей 3.1, 7.1 і 8.1 дорівнює, відповідно:

289, 610; 271, 6982; 294, 971.

Мінімальне і максимальне значення зазначених відхилень є наступними:

min: 88,882; 20,996; 31,6387916

max: 571,954194; 525,942855; 654,686548.

За показниками R, F, S та величиною розкиду регресійних залишків перевагу має модель 7.1 $e(t,z)$ (залежність електроспоживання від температури і завантаженості аудиторного фонду).

При цьому кожна із означених моделей має непусте поле застосування. Модель 3.1 доцільно застосовувати для швидких попередніх розрахунків.

Таблиця 2.12 – Абсолютні відхилення прогнозних значень моделей 3.1, 7.1, 8.1 від значень електроспоживання, одержаних шляхом спостережень

Місяць, рік	Модель 3.1	Модель 7.1	Модель 8.1
9,2016	194,74	427,9	368,53
10,2016	138,6	31,92	31,63
11,2016	465,44	355,21	297,16
12,2016	222,54	190,45	55,26
1,2017	571,95	208,11	223,14
2,2017	88,88	20,99	259,11
3,2017	487,01	525,94	654,68
4,2017	112,58	331,29	284,26
5,2017	329,34	412,26	502,83
6,2017	228,97	97,92	404,2
7,2017	109,22	364,79	271,51
8,2017	526,03	293,57	187,28

Модель 7.1, як така, що додає значущим чином ефект рівня зайнятості учбових аудиторій, уточнює розрахунки моделі 3.1, особливо за умови суттєвої зміни зазначеного рівня зайнятості. При фіксованому рівні зайнятості аудиторій доцільно паралельне використання моделей 7.1 і 8.1 для утворення більш надійних прогнозних інтервалів величин електроспоживання.

Об'єкт № 2 . З табл. 2.14 ми робимо висновок, що величина множинного коефіцієнту кореляції є надто низькою для адекватного відображення даних (вибіркові коефіцієнти детермінації R^2 є не вищими за величину 0,36). Нерівність (2.22) не виконується для жодної з даних моделей.

Таблиця 2.13 – Моделі простої лінійної регресії для об'єкту № 2

№	Об'єкт	Модель	Рівняння регресійної моделі
1.2	2	$e_2 = e_2(N)$	$593,2038 + 27,0912N$
2.2	2	$e_2 = e_2(z)$	$660,3046 + 4,0106z$
3.2	2	$e_2 = e_2(t)$	$887,6649 - 10,8609t$
4.2	2	$e_2 = e_2(\varphi)$	$845,279 - 227,946\varphi$

Таблиця 2.14 – Імовірнісні характеристики моделей енергоспоживання 1.2–3.2

№ моделі	Модель	R	$F_{1,22}$	S
1.2	$e(N)$	0,5288	8,2347	159,66
2.2	$e(z)$	0,4731	6,3429	164,9
3.2	$e(t)$	0,5326	8,7108	158,41
4.2	$e(\varphi)$	0,5996	12,352	149,78

Малість величин S порівняно з моделями 1.1–4.1 пояснюється просто меншим порядком величин електроспоживання для даного об'єкту. Висновок: моделі простої лінійної регресії не можуть адекватним чином описувати процес зміни електроспоживання для об'єкту № 2. Перейдемо до застосування моделей від двох змінних.

Таблиця 2.15 – Моделі з двома пояснювальними змінними об'єкту № 2

№	Об'єкт	Модель	Рівняння регресійної моделі
5.2	2	$e = e(z, N)$	$516,0699 + 3,4986z + 24,3307N$
6.2	2	$e = e(t, N)$	$686,7670 - 13,0355t + 32,7070N$
7.2	2	$e = e(t, z)$	$772,6649 - 9,6432t + 3,4166z$
8.2	2	$e = e(t, \varphi)$	$951,084 - 10,695t - 225,214\varphi$
9.2	2	$e = e(N, \varphi)$	$716,047 + 17,231N - 176,253\varphi$
10.2	2	$e = e(z, \varphi)$	$823,127 + 0,58z - 208,783\varphi$

Наведемо прийняті в роботі показники якості для моделей 6.2 і 8.2. Показники інших моделей поступаються щойно вказаним. До того ж, коефіцієнт при змінній N моделі 9.2 і при змінній z моделі 10.2 виявилися незначущими (за критерієм Стюдента).

Таблиця 2.16 – Імовірнісні характеристики моделей енергоспоживання 6.2, 8.2

№ моделі	Модель	R	$F_{2,21}$	S	Прим.
6.2	$e(t, N)$	0,8181	21,246	110,18	Умова (3) виконується
8.2	$e(t, \varphi)$	0,7966	18,243	115,81	Умова (3) виконується

Мінімальне і максимальне значення залишків для моделей 6.2, і 8.2 дорівнюють, відповідно, $(-155,199; 187,419)$ і $(-154,313; 236,019)$.

На відміну від попередньої ситуації (для об'єкту № 1), у випадку об'єкту № 2 моделі з трьома пояснювальними (незалежними) змінними виявилися більш якісними, ніж з двома, у зв'язку з чим ми більш детально ніж у попередніх двох випадках (з моделями 1.2–10.2) наведемо дані щодо їх числових і графічних характеристик.

Таблиця 2.17 – Моделі з трьома пояснювальними змінними об'єкту № 2

№	Об'єкт	Модель	Рівняння регресійної моделі
11.2	2	$e = e(t, N, z)$	$620,5412 - 11,9235t + 30,1435N + 2,6418z$
12.2	2	$e = e(t, N, \varphi)$	$788,576 - 12,332t + +23,817N - 153,315\varphi$
13.2	2	$e = e(t, z, \varphi)$	$984,094 - 10,96t - 0,796z - 251,439\varphi$
14.2	2	$e = e(z, N, \varphi)$	$630,841 + 1,785z + 19,503N - 110,468\varphi$

Таблиця 2.18 – Імовірнісні характеристики моделей енергоспоживання
11.2 - 14.2

№ моделі	Модель	R	$F_{3,20}$	S	Примітки
11.2	$e(t, N, z)$	0,8728	21,326	95,798	Виконується умова (3)
12.2	$e(t, N, \varphi)$	0,8964	27,252	139,1	Виконується умова (3)
13.2	$e(t, z, \varphi)$	0,799	11,772	118,04	Коефіцієнт z при незначущий
14.2	$e(z, N, \varphi)$	0,6855	5,9103	142,92	Модель незначуща

З даних табл. 2.18 видно, що показники моделей 11.2–13.2 є значно кращими, ніж відповідні показники моделі 14.2. Мінімальне і максимальне значення залишків для моделей 11.2–14.2 дорівнюють, відповідно, $(-124,38; 188,869)$, $(-107,720; 139,104)$, 7.1: $(-154,732; 236,791)$, $(-208,384, 254,847)$. Графічне представлення розрахованих залишків зазначених моделей, як і вище, дає чітке уявлення про їх порівняльні якісні властивості. Послідовність (зліва направо) діаграм розкиду на рис. 2.23 відповідає нумерації моделей у табл. 2.18

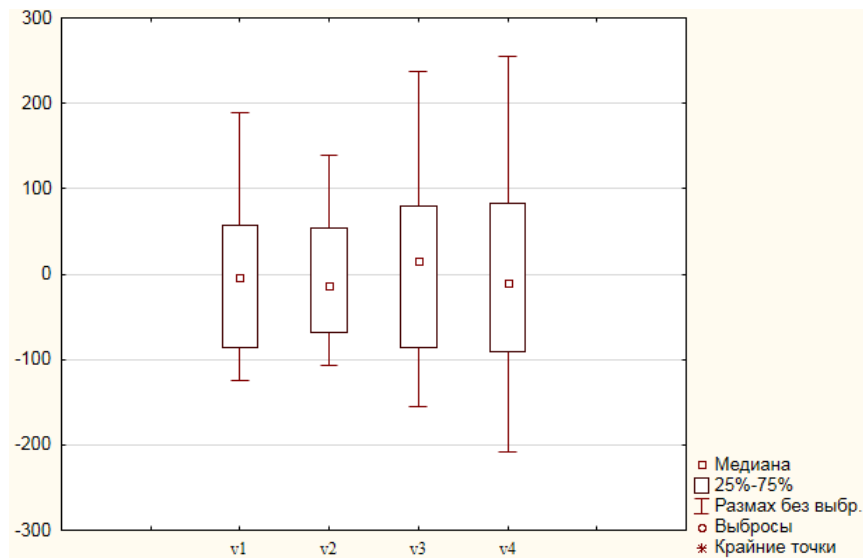


Рисунок 2.23 – Діаграми Box Plot для сукупності залишків регресійних
моделей 11.2– 14.2

У кожному разі помітна несиметричність відносно центральної точки даних діаграм викликає певні сумніви з точки зору відповідності нормальному розподілу. Проте очевидно, що з точки зору компактності розташування слід віддати перевагу моделям віддати суттєву перевагу моделям 11.2 (температура, календарний місяць, завантаженість навчальних аудиторій) і 12.2 (температура, календарний місяць, фіктивна змінна φ , котра відповідає певному помісячному режиму енергопостачання об'єкту). З міркувань, що наведено вище, в конкретних розрахунках є сенс використовувати обидві моделі 11.2 і 12.2.

Зауважимо, що регресійна модель $e(t, z, N, \varphi)$ для даного об'єкту №2, що використовує всі чотири пояснювальні змінні, має показники якості, близькі до моделей 11.2 і 12.2, і при тому містить два незначущих коефіцієнти. В даній роботі ми не наводимо явний вигляд $e(t, z, N, \varphi)$.

Об'єкт № 3. Як і вище, почнемо формалізацію процесу електроспоживання для даного об'єкту з моделей простої лінійної регресії.

Моделі $e(N), e(t), e(\varphi)$ виявилися незначущими (коефіцієнти при N, t і φ можна вважати рівними 0 за критерієм Ст'юдента). Значущою виявилася лише одна модель $e(z)$. При цьому всі зазначені моделі містили великі помилки в розрахунках електроспоживання для осінніх місяців у обох роках 2014 і 2015.

Зважаючи на таке спостереження, для додаткової характеристики розподілу електроенергії у даному приміщенні було вирішено перевизначити фіктивну змінну φ . Для запобігання непорозумінь надалі вказана змінна позначається φ_3 і визначається рівністю

$$\varphi_3 = \begin{cases} 1, N = 4, 10, 11 \\ 0 \text{ в інших випадках} \end{cases}$$

Відповідні рівняння та їх числові і графічні характеристики наведено у табл. 2.19.

Таблиця 2.19 – Моделі простої лінійної регресії для об'єкту № 3

№	Об'єкт	Модель	Рівняння регресійної моделі
1.3	3	$e = e(z)$	$121,1425 + 0,5055z$
2.3	3	$e = e(\varphi_3)$	$788,576 - 12,332t + +23,817N - 153,315\varphi$

Таблиця 2.20 – Імовірнісні характеристики моделі енергоспоживання 1.3

№ моделі	Модель	R	$F_{1,22}$	S	Примітки
1.3	$e(z)$	0,4578	5,8334	30,678	Умова (3) не виконується
2.3	$e(\varphi_3)$	0,8689	67,841	17,075	Умова (3) виконується

Мінімальне значення залишків для 1.3 – - 55,2740, максимальне – 69,1302. Для моделі 2.3, відповідно, - 43, 156 і 33,846.

Дана діаграма свідчить про більш якісну апроксимацію наявних даних за допомогою моделі 2.3. Наступні дані наведено для порівняння якості даних моделей щодо прогнозування величин електроспоживання. Для реалізації цих моделей використовуються дані з липня 2016 року по серпень 2017 року.

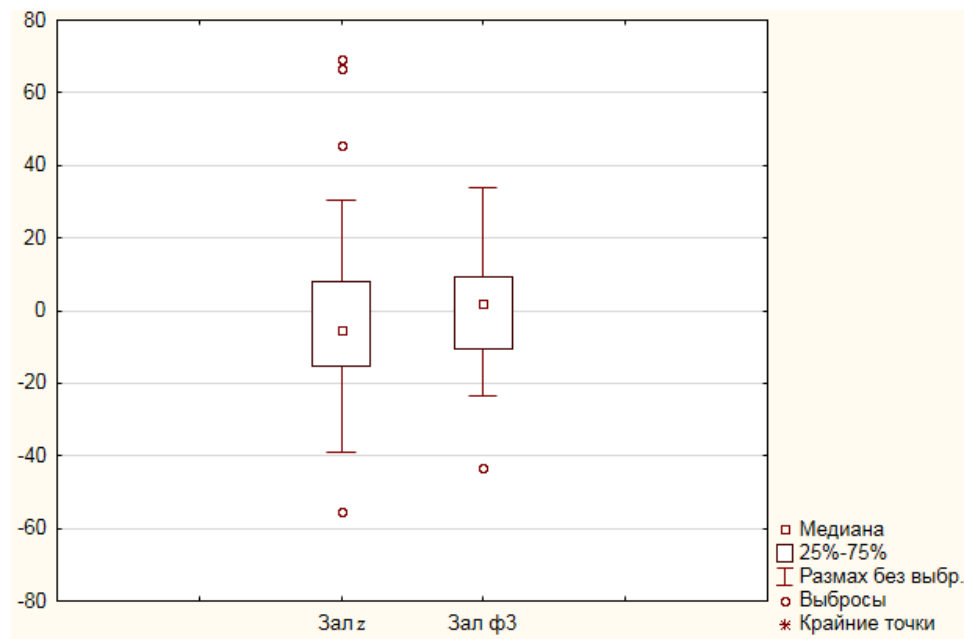


Рисунок 2.24 – Діаграма Box Plot для сукупності залишків регресійних моделей 1.3, 2.3

Обидві моделі 1.3 і 2.3, використовуючи лише по одній пояснювальній змінній, є простими і зручними в користуванні. При цьому модель 2.3 має суттєву перевагу перед моделлю 1.3 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 3.1 мало в чому поступалася моделі 3.3, 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.

Таблиця 2.21 – Результати прогнозування рівнів електроспоживання для об'єкту №3 з використанням моделей 1.3, 2.3

Місяць, рік	φ_3	z	Спостережуване значення e	Прогноз за 1.3	Прогноз за 2.3
7.2016	0	0	130,457	121,143	123,508
8.2016	0	0	118,723	121,143	123,508
9.2016	0	42,77	139,909	142,761	123,508
10.2016	1	70,9	220,573	156,97	189,807
11.2016	1	96,51	159,88	169,924	189,807
12.2016	0	95	143,36	169,161	123,508
1.2017	0	10,69	129,148	126,546	123,508
2.2017	0	35,5	150,589	139,086	123,508
3.2017	0	42,77	134,034	142,761	123,508
4.2017	1	70,9	147,042	156,97	189,807
5.2017	0	96,51	132,304	169,924	123,508
6.2017	0	23,75	114,445	133,147	123,508
7.2017	0	0	108,16	121,143	123,508
8.2017	0	0	124,221	121,143	123,508

Для більшої наочності порівняємо поквартальні сумарні значення спостережуваних і розрахункових значень електроспоживання.

Таблиця 2.22 – Поквартальні спостережувані і розрахункові значення

Квартал	Спостережуване значення	Розрахунок за моделлю 1.3	Розрахунок за моделлю 2.3
IV.2016	663,722	638,816	626,631
I.2017	560,812	565,363	560,331
II.2017	479,13	545,356	494,032

Про моделі з двома і більше пояснювальними змінними для об'єкту №3.

Змінні z і φ_3 , 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_{z,φ_3} дорівнює 0,445, що в даному випадку є значимим на рівні $p < 0,05$. Відповідна регресійна модель має вигляд

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

Коефіцієнт при z є незначущим (статистика Стюдента дорівнює у даному випадку 0,74201, що значно менше 1,72 – квантиля розподілу Стюдента t_{21}).

Як виявилось, серед інших можливих варіантів моделей з двома пояснювальними змінними, не містять незначущих коефіцієнтів лише $e(t, \varphi_3)$ і $e(z, N)$. При цьому для останньої моделі маємо $R = 0,5821, F_{2,21} = 5,3835, S = 28,16$. Зокрема, для $e(z, N)$ не виконується нерівність (3), а основні статистичні показники поступаються розглянутій вище моделі 2.3.

Для моделі 3.3 – $e(t, \varphi_3)$ маємо:

$$e(t, \varphi_3) = 132,4503 - 0,8208t + 63,2881\varphi_3;$$

$$R = 0,8725, F_{2,21} = 33,503, S = 17,252.$$

Зазначені показники є того ж порядку, що й у розглянутої вище моделі 2.3. 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 №3 рекомендуються для застосування визначені вище моделі 1.3, 2.3 і 3.3.

2.6 Висновки до розділу 2

1. Рівні споживання у будівлях гуртожитків та навчальних корпусів мають відмінності, які обумовлені наявністю певних чинників, зокрема для корпусів: сезонність, періоди освітнього процесу, особливості організації освітнього процесу, клас енергоефективності будівель, використання електроенергії для догрівання аудиторних приміщень.

2. Реалізація моделі у вигляді регресійних лінійних рівнянь дозволила встановити регресори моделей та їх статистичні показники та на основі відомих статистичних даних зробити прогнозне оцінювання рівнів електроспоживання. Наявність моделей, які мають близьку реалізацію, але різні значущі фактори, які на неї впливають, дозволяє використати комбінацію цих моделей для одержання діапазону розкиду імовірних значень прогнозу.

3. Дані моделювання можуть бути використані у формуванні управлінських рішень системи енергоменеджменту ЗВО на основі використання базових рівнів споживання та їх порівняння з прогнозним оцінюванням у певній часовій перспективі (місячній, квартальній, сезонній, річній). Модель прогнозування дозволяє здійснювати на певні календарні періоди (місяць, квартал, сезон, рік) з

урахуванням відмінностей зовнішньої температури в ОП та особливостей ведення освітньої діяльності.

РОЗДІЛ 3

ОЦІНЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ УПРАВЛІННЯ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯМ ЗАКЛАДІВ ВИЩОЇ ОСВІТИ

3.1 Оцінювання ефективності внутрішніх електромереж шляхом компенсації струму нульової послідовності

Як відомо, теоретична електротехніка визначає інтегральним критерієм енергоефективності процесу споживання електроенергії коефіцієнт потужності:

$$\lambda = P / S, \quad (3.1)$$

де $P = \frac{1}{T} \int_0^T \mathbf{u}^T(t) \mathbf{i}(t) dt$ – активна потужність трифазної системи; S – повна потужність; $\mathbf{u}(t), \mathbf{i}(t)$ – трикоординатні вектори миттєвих значень фазних напруг та лінійних струмів; T – період мережної напруги; T – знак транспонування вектора. При визначенні повної потужності як трипровідних так і чотирипровідних систем здебільшого застосовується формула F. Buchholz у вигляді добутку середньоквадратичних норм векторів фазних напруг та лінійних струмів [78], [79], [80]

$$S = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \mathbf{i}^T(t) \mathbf{i}(t) dt \frac{1}{T} \int_0^T \mathbf{u}^T(t) \mathbf{u}(t) dt}. \quad (3.2)$$

Однак наявність нейтрального проводу, в якому протікає сумарний струм лінійних проводів, є суттєвою відмінністю чотирипровідної системи, оскільки збільшується потужність втрат порівняно з трипровідною системою. Незалежність повної потужності, розрахованої за формулою F. Buchholz, від співвідношення активних опорів з'єднувальних проводів викликає сумнів в коректності її застосування для чотирипровідних систем за наявності ненульового струму нейтрального проводу. Через неадекватність формули

повної потужності невірно визначається і коефіцієнт потужності, внаслідок чого існуючі алгоритми врівноважування несиметричного навантаження, що реалізуються в активних фільтрах та реактивних компенсаторах, не забезпечують оптимального енергетичного режиму, що характеризується мінімумом втрат та одиничним коефіцієнтом потужності.

Згідно діючих нормативних актів, для розрахунку втрат електроенергії враховуються лише показники засобів обліку про спожиту активну та реактивну енергії, які пропорційні відповідним потужностям, що традиційно визначаються додаванням активних та реактивних потужностей фаз. При цьому поза увагою та оплатою залишаються потужності несиметрії (небалансу) та спотворення. В запропонованій методиці знайдені їх аналітичні вирази через активні та реактивні потужності фаз, які можуть бути використані для розрахунку додаткових витрат електричної енергії в лініях електроживлення без зміни метрологічної бази на стороні споживачів.

Автори дослідження [81], [82] запропонували часткове вирішення проблеми врахування складових повної потужності, які не вимірюються, обґрунтувавши аналітичні вирази для потужності небалансу через значення активних та реактивних потужностей окремих фаз. Це вирішує завдання врахування додаткових втрат електроенергії для трифазної трипровідної системи електроживлення з лінійним навантаженням, оскільки дозволяє без зміни метрологічної бази на стороні споживачів визначати розрахунковим шляхом потужність небалансу та враховувати усі складові втрат електроенергії з боку споживачів, шляхом зміни нормативної бази обліку витрат. Наявність таких змін стимулюватиме споживачів до вжиття організаційних та технічних заходів щодо вирівнювання навантаження фаз. Разом з тим, актуальною залишається проблема визначення потужності спотворення та складової повної потужності, викликаній струмом нейтралі трифазної чотирипровідної системи електроживлення [7].

Відповідно до [83], що узгоджується з сучасним стандартом [84], квадрат повної потужності трифазної чотирипровідної системи електроживлення за умов симетричної синусоїдної напруги та несиметричного в загальному випадку нелінійного навантаження визначається виразом

$$S^2 = 3U_\phi^2(I_A^2 + I_B^2 + I_C^2 + I_N^2 r_N / r), \quad (3.1)$$

де U_ϕ – діюче значення фазної напруги; I_A, I_B, I_C, I_N – діючі значення лінійних струмів та струму в нейтралі; r_N / r – відношення активних опорів нейтрального та кожного з лінійних проводів.

Покази ватметрів та результати вимірювань реактивної потужності адекватно відображають енергетичні процеси трифазної чотирипровідної системи лише за умови синусоїдності струмів, коли останні можна представити комплексним вектором діючих значень основної гармоніки $\left\| \dot{I}_{A1} \quad \dot{I}_{B1} \quad \dot{I}_{C1} \right\|^T$ та перейти до комплексного вектора діючих значень симетричних складових нульової (0), прямої (+) та зворотної (-) послідовностей

$$\left\| \begin{matrix} \dot{I}_0 \\ \dot{I}_+ \\ \dot{I}_- \end{matrix} \right\| = \frac{1}{\sqrt{3}} \left\| \begin{matrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \dot{a} & \tilde{a} \\ 1 & \tilde{a} & \dot{a} \end{matrix} \right\| \left\| \begin{matrix} \dot{I}_{A1} \\ \dot{I}_{B1} \\ \dot{I}_{C1} \end{matrix} \right\| = \mathbf{F}^{-1} \left\| \begin{matrix} \dot{I}_{A1} \\ \dot{I}_{B1} \\ \dot{I}_{C1} \end{matrix} \right\|, \quad (3.2)$$

де $\mathbf{F} = \frac{1}{\sqrt{3}} \left\| \begin{matrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \tilde{a} & \dot{a} \\ 1 & \dot{a} & \tilde{a} \end{matrix} \right\|$ – модифікована матриця Фортеск'ю, що задовольняє умовам

$\mathbf{F}^{-1} = \mathbf{F}^*$; $\mathbf{F}^T = \mathbf{F}$; $\dot{a} = e^{j2\pi/3}$; $\tilde{a} = (\dot{a})^*$; та $*$ – знаки транспонування та комплексного спряження відповідно.

Декомпозиція квадрату повної потужності трифазної чотирипровідної системи на квадратичні складові за умов симетричної синусоїдної напруги та несиметричного лінійного навантаження має вигляд [83]

$$S_1^2 = P^2 + Q^2 + R^2 + T^2, \quad (3.3)$$

де P, Q – активна й реактивна потужності трифазної системи; $R^2 = 3U_\phi^2 I_-^2$ – квадрат потужності пульсацій; $T^2 = 3U_\phi^2 I_0^2 (1 + 3r_N / r)$ – квадрат так званої прихованої потужності.

За результатами вимірювання на частоті основної гармоніки активних P_{A1}, P_{B1}, P_{C1} та реактивних Q_{A1}, Q_{B1}, Q_{C1} потужностей окремих фаз навантаження безпосередньо можуть бути визначені у відповідності до [83] лише перші дві складові формули (3.3)

$$P = P_{A1} + P_{B1} + P_{C1}; Q = Q_{A1} + Q_{B1} + Q_{C1}. \quad (3.4)$$

З урахуванням співвідношення $P^2 + Q^2 = 3U_\phi^2 I_+^2$ [3], перегрупуємо доданки формули (3.3)

$$S_1^2 = P^2 + Q^2 + R^2 + 3U_\phi^2 I_0^2 (1 + 3r_N / r) = L_1^2 + N_1^2, \quad (3.5)$$

де $L_1^2 = P^2 + Q^2 + R^2 + 3U_\phi^2 I_0^2 = 3U_\phi^2 (I_+^2 + I_-^2 + I_0^2)$ – частина квадрату повної потужності основної гармоніки струму, зумовлена струмами у лінійних проводах; $N_1^2 = 9U_\phi^2 I_0^2 r_N / r$ – частина квадрату повної потужності основної гармоніки струму, зумовлена струмом у нейтралі.

На основі властивостей матриці $\mathbf{F}$:

$$\begin{aligned}
I_0^2 + I_+^2 + I_-^2 &= \left\| \begin{pmatrix} \dot{I}_0 \\ \dot{I}_+ \\ \dot{I}_- \end{pmatrix} \right\|^T \left\| \begin{pmatrix} \dot{I}_0 \\ \dot{I}_+ \\ \dot{I}_- \end{pmatrix} \right\|^* = \left(\mathbf{F}^{-1} \begin{pmatrix} \dot{I}_{A1} \\ \dot{I}_{B1} \\ \dot{I}_{C1} \end{pmatrix} \right)^T \left(\mathbf{F}^{-1} \begin{pmatrix} \dot{I}_{A1} \\ \dot{I}_{B1} \\ \dot{I}_{C1} \end{pmatrix} \right)^* = \begin{pmatrix} \dot{I}_{A1} \\ \dot{I}_{B1} \\ \dot{I}_{C1} \end{pmatrix}^T \mathbf{F}^{-1} \mathbf{F} \begin{pmatrix} \dot{I}_{A1} \\ \dot{I}_{B1} \\ \dot{I}_{C1} \end{pmatrix}^* = \begin{pmatrix} \dot{I}_{A1} \\ \dot{I}_{B1} \\ \dot{I}_{C1} \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} \dot{I}_{A1} \\ \dot{I}_{B1} \\ \dot{I}_{C1} \end{pmatrix}^* = \\
&= I_{A1}^2 + I_{B1}^2 + I_{C1}^2; 3I_0^2 = (\dot{I}_{A1} + \dot{I}_{B1} + \dot{I}_{C1})(\dot{I}_{A1} + \dot{I}_{B1} + \dot{I}_{C1})^* = I_{N1}^2,
\end{aligned}$$

тому після відповідних підстановок матимемо вирази для уведених складових повної потужності:

$$\begin{aligned}
L_1^2 &= 3U_\phi^2(I_{A1}^2 + I_{B1}^2 + I_{C1}^2) = 3(S_{A1}^2 + S_{B1}^2 + S_{C1}^2); \\
N_1^2 &= 3U_\phi^2 I_{N1}^2 r_N / r,
\end{aligned} \tag{3.6}$$

де $S_{n1}^2 = P_{n1}^2 + Q_{n1}^2$; $n = A, B, C$ – квадрати повних потужностей окремих фаз.

З використанням формули Лагранжа [85] можна довести, що

$$3(P_{A1}^2 + P_{B1}^2 + P_{C1}^2) = (P_{A1} + P_{B1} + P_{C1})^2 + (P_{A1} - P_{B1})^2 + (P_{A1} - P_{C1})^2 + (P_{B1} - P_{C1})^2,$$

аналогічна формула справедлива для реактивних потужностей, тому має місце декомпозиція

$$L_1^2 = P^2 + Q^2 + D^2, \tag{3.7}$$

де:

$$\begin{aligned}
D^2 &= (P_{A1} - P_{B1})^2 + (P_{A1} - P_{C1})^2 + (P_{B1} - P_{C1})^2 + (Q_{A1} - Q_{B1})^2 + (Q_{A1} - Q_{C1})^2 + (Q_{B1} - Q_{C1})^2 - \\
&\quad - \text{квадрат потужності небалансу, величина якої повністю збігається з} \\
&\quad \text{результатами роботи [81].}
\end{aligned}$$

Для скорочення обчислень квадрат потужності небалансу може бути обчислений за формулою

$$D^2 = 3(S_{A1}^2 + S_{B1}^2 + S_{C1}^2) - (P^2 + Q^2), \tag{3.8}$$

що впливає з формул (3.6) та (3.7).

Відмінність даного дослідження полягає у врахуванні квадратичної складової повної потужності N_1^2 , зумовленої струмом першої гармоніки нейтралі.

Для її визначення через показання приладів вимірювання потужностей знайдемо еквівалентну комплексну провідність кожної фази лінійного навантаження

$$\bar{y}_n = \dot{I}_{n1} / \dot{U}_n = \dot{I}_{n1} (\dot{U}_n)^* / \dot{U}_n (\dot{U}_n)^* = (P_{n1} - jQ_{n1}) / U_\phi^2. \quad (3.9)$$

Комплекс діючого значення струму нейтралі можна записати через потужності

$$\begin{aligned} \dot{I}_{N1} &= \dot{I}_{A1} + \dot{I}_{B1} + \dot{I}_{C1} = \dot{U}_A \bar{y}_A + \dot{U}_B \bar{y}_B + \dot{U}_C \bar{y}_C = \\ &= [(P_{A1} - jQ_{A1}) + \dot{a}^2(P_{B1} - jQ_{B1}) + \dot{a}(P_{C1} - jQ_{C1})] / U_\phi = \\ &= \left\{ \left[P_{A1} - \frac{P_{B1} + P_{C1}}{2} + \frac{\sqrt{3}(Q_{C1} - Q_{B1})}{2} \right] + \right. \\ &\quad \left. + j \left[-Q_{A1} + \frac{Q_{C1} + Q_{B1}}{2} + \frac{\sqrt{3}(P_{C1} - P_{B1})}{2} \right] \right\} / U_\phi. \end{aligned} \quad (3.10)$$

Підстановка квадрата модуля струму нейтралі в другу формулу (3.6) дає вираз для квадратичної складової повної потужності трифазної чотирипровідної системи електропостачання, зумовленою основною гармонікою струму нейтралі

$$N_1^2 = 3 \left\{ \left[P_{A1} - \frac{P_{B1} + P_{C1}}{2} + \frac{\sqrt{3}(Q_{C1} - Q_{B1})}{2} \right]^2 + \left[-Q_{A1} + \frac{Q_{C1} + Q_{B1}}{2} + \frac{\sqrt{3}(P_{C1} - P_{B1})}{2} \right]^2 \right\} r_N / r. \quad (3.11)$$

Відношення опорів проводів лінії електроживлення r_N / r може бути визначене експериментальним шляхом за методикою [5].

Для ілюстрації у якості прикладу розглянемо визначення квадратичних складових повної потужності трифазної чотирипровідної системи за наявності лінійного несиметричного навантаження, яке задано комплексними

провідностями $\bar{y}_A = G; \bar{y}_B = Ge^{j\varphi}; \bar{y}_C = Ge^{-j\varphi}$. Відповідно до формули (3.9) розраховуємо комплексні потужності

$$\begin{aligned} P_{A1} - jQ_{A1} &= U_\phi^2 G; \\ P_{B1} - jQ_{B1} &= U_\phi^2 Ge^{j\varphi} = U_\phi^2 G \cos \varphi + jU_\phi^2 G \sin \varphi; \\ P_{C1} - jQ_{C1} &= GU_\phi^2 e^{-j\varphi} = U_\phi^2 G \cos \varphi - jU_\phi^2 G \sin \varphi. \end{aligned}$$

Визначаємо квадрати повних потужностей окремих фаз: активну та реактивну потужності трифазної системи

$$\begin{aligned} S_{A1}^2 &= S_{B1}^2 = S_{C1}^2 = U_\phi^4 G^2, \\ P &= P_{A1} + P_{B1} + P_{C1} = U_\phi^2 G(1 + 2\cos \varphi); Q = Q_{A1} + Q_{B1} + Q_{C1} = 0. \end{aligned}$$

Квадрат потужності небалансу визначаємо за спрощеною формулою (3.8) та переконуємось у її адекватності підстановкою різницевих значень потужностей в опис формули (3.7)

$$D^2 = L_1^2 - (P^2 + Q^2) = 9U_\phi^4 G^2 - U_\phi^4 G^2 (1 + 2\cos \varphi)^2 = U_\phi^4 G^2 (8 - 4\cos \varphi - 4\cos^2 \varphi).$$

Для визначення квадрату повної потужності першої гармоніки струму нейтралі при заданому навантаженні спочатку доречно знайти комплексний струм нейтралі

$$\begin{aligned} \dot{I}_{N1} &= \dot{U}_A \bar{y}_A + \dot{U}_B \bar{y}_B + \dot{U}_C \bar{y}_C = U_\phi G [1 + e^{-j(2\pi/3-\varphi)} + e^{j(2\pi/3-\varphi)}] = \\ &= U_\phi G [1 + 2\cos(2\pi/3 - \varphi)] \end{aligned}$$

та другою скористатися другою формулою (3.6)

$$N_1^2 = 3U_\phi^2 I_{N1}^2 r_N / r = 3U_\phi^4 G^2 [1 + 2\cos(2\pi/3 - \varphi)]^2 r_N / r.$$

Уведемо відносні коефіцієнти складових повної потужності

$$k_D = \frac{D}{P} = \frac{2\sqrt{2 - \cos(\varphi) - \cos^2(\varphi)}}{1 + 2\cos(\varphi)}; k_N = \frac{N_1}{P} = \frac{\sqrt{3}[1 + 2\cos(2\pi/3 - \varphi)]}{1 + 2\cos(\varphi)}$$

та побудуємо графіки їх залежностей від параметра φ при $r_N = r$ (рис. 3.1).

Початкові значення зазначених коефіцієнтів є нульовими, оскільки при $\varphi = 0$ маємо симетричне навантаження. Складова повної потужності першої гармоніки струму нейтралі перевищує потужність небалансу в усьому діапазоні зміни параметра навантаження φ , причому при деякому його значенні обидві досліджувані складові повної потужності перевищують активну потужність, що свідчить про важливість їх врахування при визначенні витрат електроенергії.

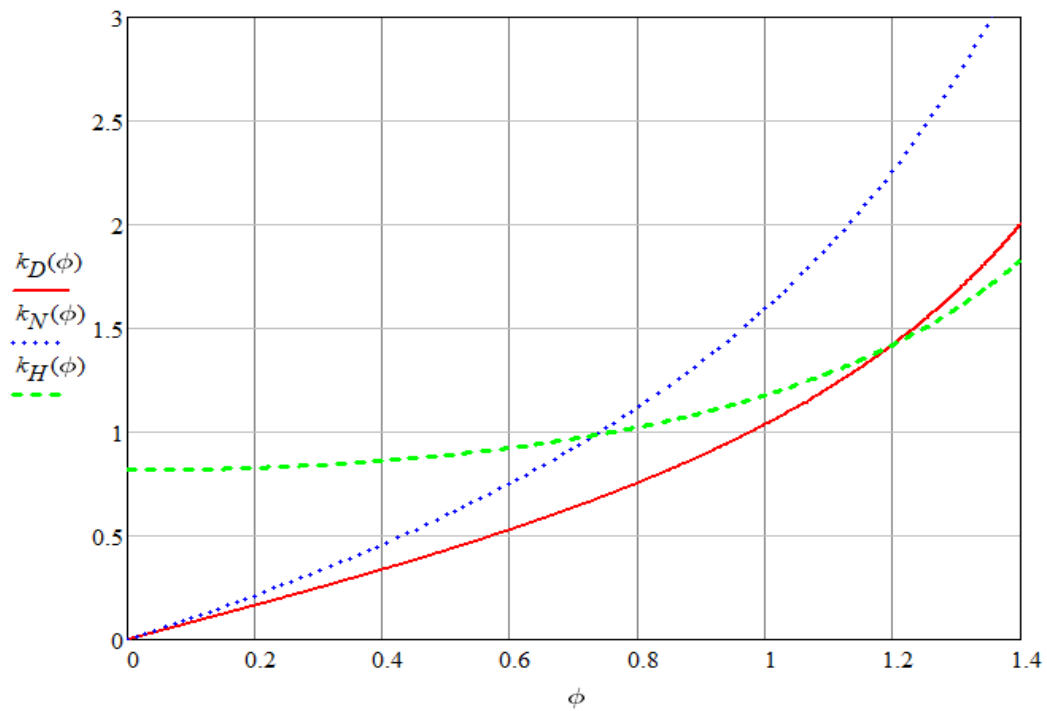


Рисунок 3.1 – Графіки залежностей коефіцієнтів складових повної потужності від параметра φ при $r_N = r$

При нелінійному навантаженні трифазної системи через наявність вищих гармонік збільшуються діючі значення струмів лінійних та нейтрального проводів, повна потужність обчислюється за формулою (3.1) і її декомпозиція містить додаткову складову у вигляді квадрата потужності спотворення [83]

$$H^2 = 3U_\phi^2(I_A^2 + I_B^2 + I_C^2 + I_N^2 r_N / r) - S_1^2. \quad (3.12)$$

З урахуванням ортогональності струмів основної та вищих гармонік $I_n^2 = I_{n1}^2 + I_{nH}^2$, так само розкладається і квадрат діючого значення струму нейтралі, тому розрахункова формула для квадрата потужності спотворення набуває вигляду:

$$H^2 = 3U_\phi^2(I_{AH}^2 + I_{BH}^2 + I_{CH}^2 + I_{NH}^2 r_N / r). \quad (3.13)$$

Квадрати діючих значень струмів вищих гармонік, що входять до формули (3.13), можуть бути визначені за результатами вимірювання діючих значень відповідних струмів, потужностей та напруг за формулами:

$$\begin{aligned} I_{nH}^2 &= I_n^2 - (P_{n1}^2 + Q_{n1}^2) / U_\phi^2; \\ I_{NH}^2 &= I_N^2 - \left\{ \left[P_{A1} - \frac{P_{B1} + P_{C1}}{2} + \frac{\sqrt{3}(Q_{C1} - Q_{B1})}{2} \right]^2 + \right. \\ &\quad \left. + \left[-Q_{A1} + \frac{Q_{C1} + Q_{B1}}{2} + \frac{\sqrt{3}(P_{C1} - P_{B1})}{2} \right]^2 \right\} / U_\phi^2. \end{aligned} \quad (3.14)$$

Зауважимо, що для визначення потужності спотворення вимірювальний комплекс має містити високочастотні вимірювачі діючих значень як лінійних струмів, так і струму нейтралі.

Розглянемо другий ілюстративний приклад, який відрізняється від першого наявністю ідеального діода в колі активного навантаження фази A , причому для збереження такого самого струму основної гармоніки цієї фази провідність навантаження обрана рівною $2G$. Таким чином, миттєве значення струму лінійного проводу фази A визначається виразом:

$$i_A(t) = \sqrt{2}U_\phi G[\cos(\omega t) + |\cos(\omega t)|] = i_{A1}(t) + i_{AH}(t). \quad (3.15)$$

Оскільки перебіг енергетичного процесу трифазної системи на частоті основної гармоніки не змінився, маємо ті ж самі значення $I_{A1}, I_{B1}, I_{C1}, P, S_1$, що і в першому прикладі. Як впливає з ортогонального розкладання струмів (3.15), діюче значення струму $i_{AH}(t)$ складає $I_{AH} = I_{A1} = UG$. в інших фазах

навантаження вищих гармонік струму немає ($I_{BH} = I_{CH} = 0$), отже, в нейтралі маємо $I_{NH} = I_{AH} = UG$. За формулою (3.13)

$$H^2 = 3U_\phi^2(I_{AH}^2 + I_{AH}^2 r_N / r) = 3U_\phi^4 G^2 (1 + r_N / r). \quad (3.16)$$

Коефіцієнт відносної потужності спотворення має вигляд

$$k_H = \frac{H}{P} = \frac{\sqrt{3(1 + r_N / r)}}{1 + 2 \cos(\varphi)},$$

графік його залежності від параметра φ при $r_N = r$ наведений на рис. 3.1. На відміну від коефіцієнтів, що характеризують інші складові повної потужності, k_H набуває ненульового початкового значення, оскільки в даному прикладі вищі гармоніки струму діють в фазі навантаження A та нейтралі навіть за симетричного режиму на основній частоті.

Отже, вираз для декомпозиції квадрата повної потужності має такий вигляд

$$S^2 = 3U_\phi^2(I_A^2 + I_B^2 + I_C^2 + I_N^2 r_N / r) = P^2 + Q^2 + D^2 + N^2 + H^2,$$

де $P = P_{A1} + P_{B1} + P_{C1}$ – активна потужність;

$Q = Q_{A1} + Q_{B1} + Q_{C1}$ – реактивна потужність;

$D^2 = 3(S_{A1}^2 + S_{B1}^2 + S_{C1}^2) - (P^2 + Q^2)$ – квадрат потужності небалансу;

$N^2 = \frac{3r_N}{4r} \left\{ \left[2P_{A1} - P_{B1} - P_{C1} + \sqrt{3}(Q_{C1} - Q_{B1}) \right]^2 + \left[Q_{C1} + Q_{B1} - 2Q_{A1} + \sqrt{3}(P_{C1} - P_{B1}) \right]^2 \right\}$ – квадрат потужності, що зумовлена основною гармонікою струму нейтралі;

$H^2 = 3U_\phi^2(I_{AH}^2 + I_{BH}^2 + I_{CH}^2 + I_{NH}^2 r_N / r)$ – квадрат потужності спотворення;

$I_{kH}^2 = I_k^2 - (P_{k1}^2 + Q_{k1}^2) / U_\phi^2$ – квадрати діючих значень вищих гармонік фазових струмів.

Інтегральним показником енергоефективності процесу споживання електроенергії в частині відображення енерговитрат є коефіцієнт потужності [83]

$$\lambda = P / S = 1 / \sqrt{1 + k_Q^2(\varphi) + k_D^2(\varphi) + k_N^2(\varphi) + k_H^2(\varphi)}. \quad (3.17)$$

У розглянутих прикладах $Q=0; k_Q = Q / P = 0$, тому розрахунок коефіцієнта потужності лише за показниками активної та реактивної потужності веде до хибного оцінювання енергоефективності процесу як ідеального ($\lambda_Q = 1$).

Поступове прийняття до уваги відносних коефіцієнтів складових потужностей в розрахунковій формулі (3.17) породжує низку наступних формул для часткових коефіцієнтів потужності

$$\lambda_L = \frac{P}{L_1} = \frac{1}{\sqrt{1+k_D^2(\varphi)}} - \text{в якості повної потужності враховується лише її частина,}$$

зумовлена струмами основної гармоніки лінійних проводів;

$$\lambda_1 = \frac{P}{S_1} = \frac{1}{\sqrt{1+k_D^2(\varphi)+k_N^2(\varphi)}} - \text{враховує лише повну потужність першої гармоніки усіх}$$

струмів;

$$\lambda = \frac{P}{S} = \frac{1}{\sqrt{1+k_D^2(\varphi)+k_N^2(\varphi)+k_H^2(\varphi)}} - \text{враховує усі складові повної потужності.}$$

Графіки зазначених часткових коефіцієнтів потужності наведені на рис. 3.2.

Їх аналіз демонструє суттєву відмінність фактичного коефіцієнта потужності від ідеального. Наприклад, при $\varphi=1$ рад $\lambda \approx 0,4$, що означає перевищення фактичних витрат в $1/\lambda^2 \approx 6$ разів порівняно з мінімально можливими при $\lambda=1$.

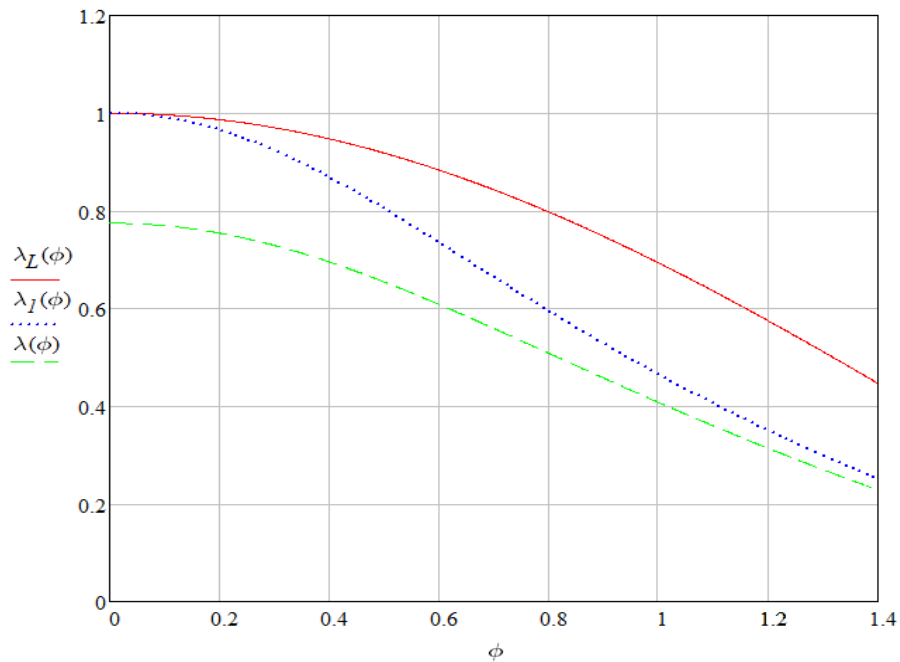


Рисунок 3.2 – Графіки часткових коефіцієнтів потужності

У разі компенсації усіх неактивних складових струмів виграш за потужністю втрат складає

$$k_{\Delta P} = \frac{\Delta P}{\Delta P_F} = \lambda^{-2},$$

де квадрат коефіцієнта потужності визначається за формулою:

$$\lambda^2 = P^2 / 3U_{\phi}^2(I_A^2 + I_B^2 + I_C^2 + I_N^2 r_N / r).$$

3.2 Оцінювання ефективності застосування накопичувачів електричної енергії у системах електроспоживання закладів вищої освіти

Моніторинг параметрів якості електричної мережі проведено з використанням аналізатора С.А 8335 QUALISTAR PLUS виробництва компанії Chauvin-Arnoux Group (Франція) в режимі «Trend», схема підключення якого до системи електропостачання гуртожитку №7 КНУТД наведена на рис. 3.3.

Оскільки нейтраль в даній системі є заземленою, а фізичний принцип вимірювання струму базується на використанні поясу Роговського, що охоплює провідник з досліджуваним струмом, то струм нейтралі вимірювався шляхом обробки даних датчика, що охоплював усі три фазні проводи, штучно відтворюючи суму миттєвих значень струмів цих проводів.

Моніторинг проводився протягом семи діб з інтервалом відліку параметрів 16 хв. Вимірювались та записувались в оперативну пам'ять приладу діючі значення фазних струмів та напруг, струму нейтралі. Одночасно аналізатором обчислювались та фіксувались також і інші параметри системи електропостачання, а саме: активні та реактивні потужності фаз, загальне споживання енергії, зсув фаз та коефіцієнти потужності кожної фази, гармонічний склад струмів та напруг, тощо.

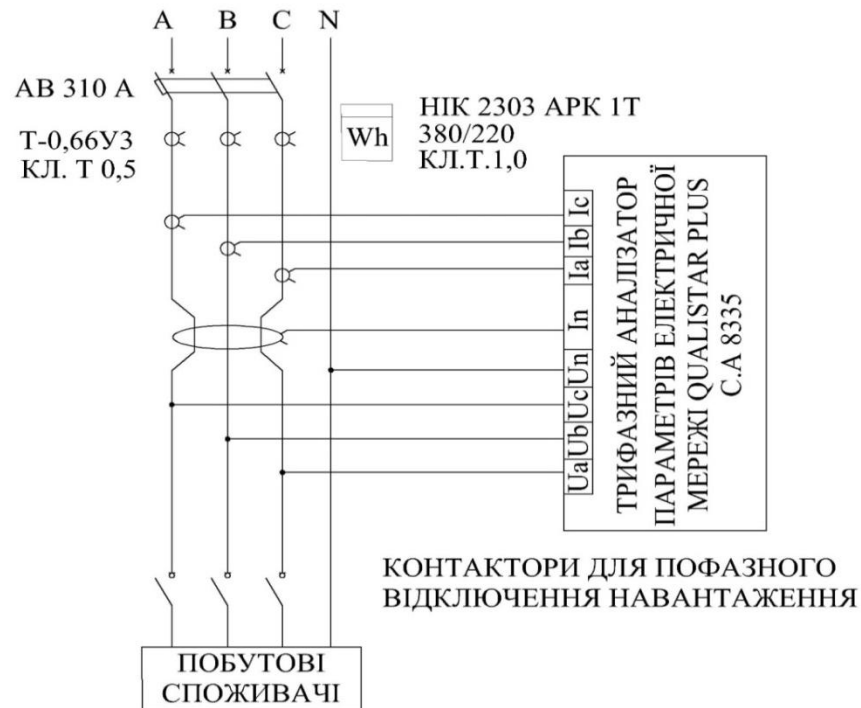


Рисунок 3.3 – Схема підключення аналізатора параметрів електричної мережі

На рис. 3.4, 3.5 представлені графік споживаної потужності протягом інтервалу моніторингу, накладений на графік зміни тарифу за двотарифною системою оплати та графік зміни струму у нульовому проводі.



Рисунок 3.4 – Графіки зміни споживаної потужності гуртожитку №7 КНУТД та тарифів за двотарифною системою оплати

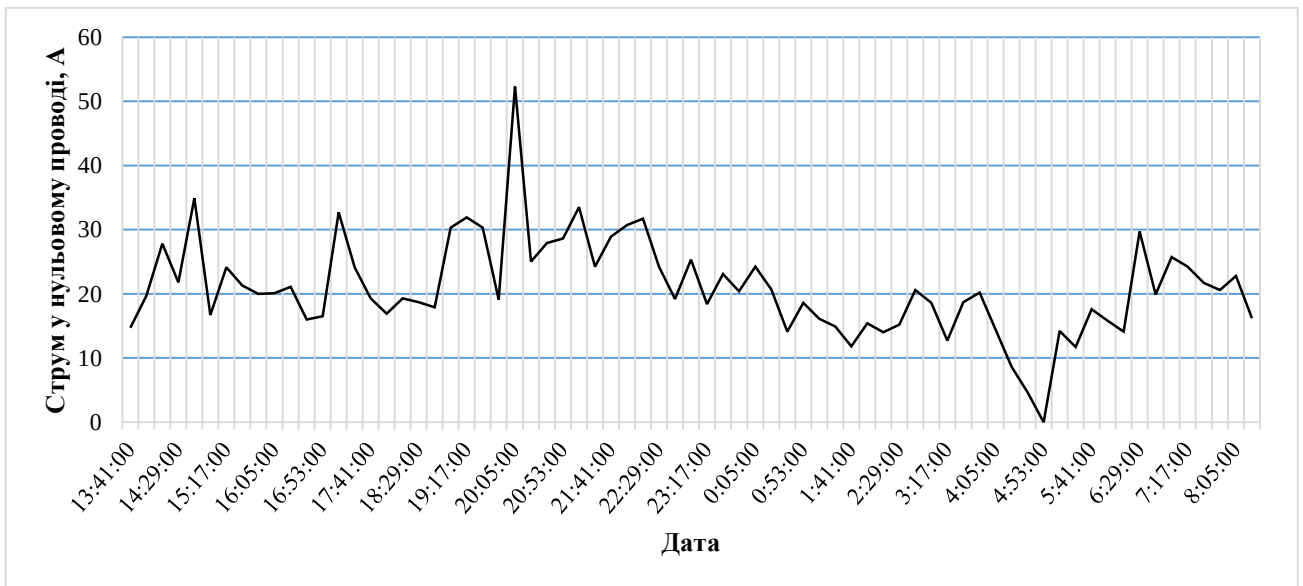


Рисунок 3.5 – Графік зміни струму у нульовому проводі гуртожитку №7 КНУТД

Аналіз цих графіків дозволяє застосувати для аналітичних розрахунків кусково-лінійну апроксимацію часової залежності добового енергоспоживання (рис. 3.6, а), де $P_2=75$ кВт, $P_1=25$ кВт – осереднені максимальне та мінімальне значення споживаної потужності, що припадають на моменти зміни тарифів; $P_0=(P_2+P_1)/2=50$ кВт – середньодобове значення споживаної потужності; $\tau_1=16$ год, $\tau_2=8$ год – тривалості часових інтервалів дії тарифів.

Розглянемо доцільність використання двотарифної оплати за електроенергію для прийнятої моделі енергоспоживання за відсутності накопичувача.

При однотарифній оплаті величина добового платежу:

$$\Pi_1 = P_0(\tau_0 + \tau_1)\Pi_0 = 24P_0\Pi_0, \quad (3.18)$$

де Π_0 – вартість базового тарифу.

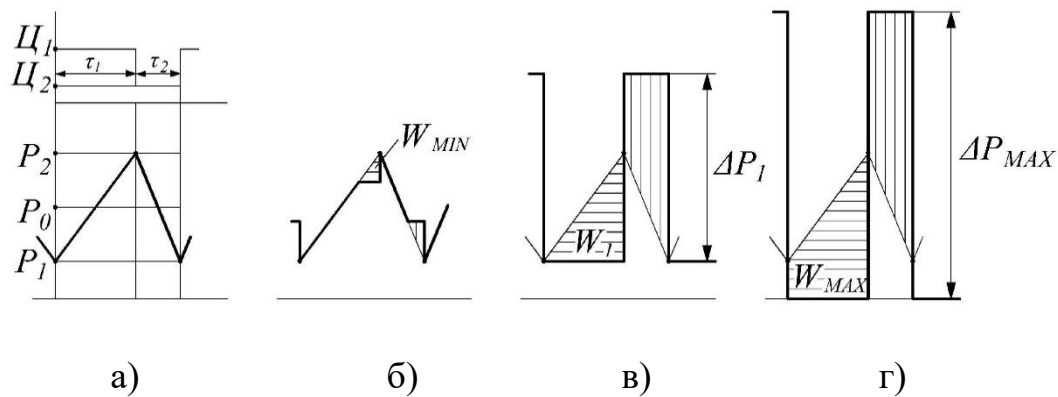


Рисунок 3.6 – Ідеалізовані добові графіки споживаних з мережі потужностей при застосуванні ПАФ з НЕ

При двотарифній оплаті величина добового платежу

$$\begin{aligned} \Pi_2 &= P_0\tau_1\Pi_1 + P_0\tau_2\Pi_2 = P_0\tau_1k_1\Pi_0 + P_0\tau_2k_2\Pi_0 = \\ &= P_0\Pi_0(\tau_1k_1 + \tau_2k_2) = 24,4P_0\Pi_0, \end{aligned} \quad (3.19)$$

де $k_1 = \Pi_1 / \Pi_0 = 1.35$; $k_2 = \Pi_2 / \Pi_0 = 0.35$ – тарифні коефіцієнти, затверджені в [86].

Таким чином, за відсутності накопичувача $\Pi_2 / \Pi_1 = 24,4 / 24 = 1,01666$, тобто двотарифна оплата коштує на 1.666% дорожче однотарифної.

Величина добового платежу за наявності накопичувача ємністю $C_{\max}$, коли вся добова енергія постачається джерелом протягом інтервалу τ_2 пільгового тарифу, складає 35% добового платежу при однотарифній оплаті. Графік залежності відносного добового платежу Π_{2C} / Π_1 від величини ємності накопичувального конденсатора є лінійним та представлений на рис. 3.7.

Він може бути використаний для оптимізації співвідношення між капітальними та експлуатаційними витратами при розробці бізнес-плану модернізації системи електроживлення гуртожитку чи будь-якого іншого навчально-господарського об'єкту.

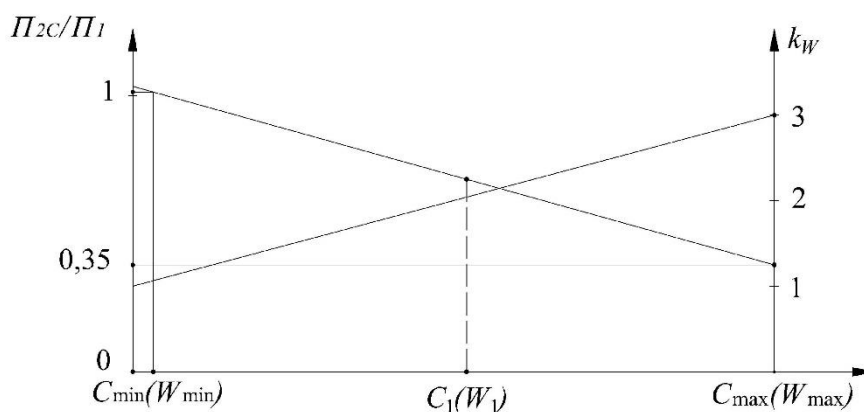


Рисунок 3.7 – Графіки залежності відносного добового платежу Π_{2C}/Π_1 та коефіцієнта нерівномірності споживання енергії k_W від величини ємності накопичувального елемента

Певним негативним фактором інтенсивного енергоспоживання протягом пільгового інтервалу є підвищення теплового навантаження ліній

електропередачі, яке може бути охарактеризовано коефіцієнтом нерівномірності споживання енергії [3], [11]

$$k_w = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} [\tilde{p}(t) + P_0]^2 dt / P_0^2 = 1 + \frac{P_{\sim}^2}{P_0^2},$$

де $P_{\sim} = \sqrt{\frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} \tilde{p}^2(t) dt}$ – середньоквадратичне значення змінної складової активної потужності $\tilde{p}(t) = p(t) - P_0$ за період її зміни $\tau = \tau_1 + \tau_2$.

Початкове значення цього коефіцієнта при кусково-лінійному законі зміни графіка активної потужності (рис. 3.6, а) дорівнює:

$$k_{w0} = 1 + D^2 / 3 = 13/12,$$

де $D = (P_2 - P_1) / 2P_0 = 0,5$ – коефіцієнт приросту [3], [11].

Графік споживаної активної потужності стає прямокутним (рис. 3.6, в) за величини перерозподіленої енергії $W_1 = (P_2 - P_1)\tau_1 / 2 = P_0 D \tau_1$. При цьому різниця рівнів дорівнює $\Delta P_1 = 3(P_2 - P_1) / 2 = 3DP_0$, а величина коефіцієнта нерівномірності споживання енергії для такої форми [3], [11]

$$k_{w1} = 1 + 4\gamma(1 - \gamma) \times (1,5D)^2 = 1 + 9\gamma(1 - \gamma)D^2 = 1 + 2 \times 1,5^2 / 4 = 2,125,$$

де $\gamma = \tau_1 / \tau = 2 / 3$.

Нарешті, за величини перерозподіленої енергії $W_{\max}$ різниця рівнів дорівнює $\Delta P_{\max} = 3(P_2 - P_1) = 6DP_0$, а величина коефіцієнта нерівномірності споживання енергії:

$$k_{w\max} = 1 + 4\gamma(1 - \gamma) \times (3D)^2 = 1 + 36\gamma(1 - \gamma)D^2 = 3.$$

Графік залежності коефіцієнта нерівномірності споживання енергії від величини перерозподіленої енергії при $D = (P_2 - P_1) / 2P_0 = 1/2$ наведений на рис. 3.6. Його аналіз свідчить, що при зміні величини перерозподіленої енергії від 0 до

$W_{\max}$ величина коефіцієнта нерівномірності збільшується в $\frac{k_{W\max}}{k_{W0}} = \frac{3}{12/13} = 3,25$ разів.

3.3 Висновки до розділу 3

1. Розроблено метод визначення неактивних складових повної потужності за значеннями активних та реактивних потужностей окремих фаз, що забезпечує оцінювання ефективності компенсації струму нульової послідовності. Отримані нові аналітичні вирази для складової повної потужності трифазної чотиририпровідної системи електроживлення, яка зумовлена основною гармонікою струму нейтралі та потужністю спотворення за відомими значеннями активних та реактивних потужностей окремих фаз, які можуть бути використані для розрахунку додаткових витрат електричної енергії в лініях електроживлення без зміни метрологічної бази на стороні споживачів. Ілюстративний приклад з використанням одержаних формул показав, що зазначені складові повної потужності можуть перевищувати як активну потужність, так і потужність небалансу, внаслідок чого суттєво знижується коефіцієнт потужності трифазної чотиририпровідної системи електроживлення. Врахування зазначених складових повної потужності в нормативній базі обліку витрат електричної енергії сприятиме стимулюванню споживачів до впровадження організаційних та технічних заходів щодо покращення електромагнітної сумісності систем електроспоживання.

2. Запропоновано концепцію побудови трифазної системи енергопостачання з паралельним активним фільтром та НЕ для можливості перерозподілу добового графіку енергоспоживання на інтервал дії пільгового тарифу.

3. Встановлені аналітичні залежності відносного добового платежу та підвищення теплового навантаження ліній електропередачі від величини

ємності НЕ, які 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 .

РОЗДІЛ 4

ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ АКТИВНИХ СИЛОВИХ ФІЛЬТРІВ

4.1 Показники енергоефективності активних силових фільтрів трифазних систем електропостачання

Основні стратегії керування ПАФ можуть бути розділені на дві групи: пропорційно-векторного формування струмів трифазного джерела, побудовані на теорії потужності S. Fryze [87], [88], кросс-векторній теорії та векторній стратегії формування струмів компенсації, та з матричним перетворенням координат (найпоширенішими є оригінальна та модифікована pq - теорії, а також перетворення в $\alpha\beta 0$, $dq0$, pqr системах координат [89], [90], [91], [92]. Стратегії керування першої групи передбачають формування вектора миттєвих значень струмів трифазного джерела пропорційним вектору миттєвих значень фазних напруг чи його частині з поліпшеним спектральним складом і переважають стратегії другої групи, що застосовують неодноразове матричне перетворення координат за трудомісткістю обчислень, точністю та швидкодією. Опорним вектором в межах першої групи стратегій є безпосередньо вектор миттєвих значень фазних напруг (стратегія S. Fryze) чи вектор миттєвих значень фазних напруг, позбавлений складової нульової послідовності, що дозволяє повністю позбутися струму в нейтральному проводі (стратегія P. Salmeron, J. Montano [93], [94]). Коефіцієнт пропорційності між векторами лінійних струмів та фазних напруг формують з умови нульової активної потужності ПАФ декількома способами, але найвища енергоефективність системи електроживлення забезпечується, якщо він дорівнює активній потужності навантаження, ділений на квадрат опорної напруги, осереднений на періоді T мережної напруги. В [93], [95] показано, що при стратегії керування P. Salmeron,

J. Montano потужність втрат в силовому чотирипровідному кабелі менша в порівнянні з втратами при керуванні за стратегією S. Fryze.

Коректно повна потужність трифазної чотирипровідної системи живлення визначається як максимальна активна потужність навантаження, що може бути досягнута в процесі передачі енергії від трифазного джерела при заданих напругах та втратах на активних опорах силового кабелю [96]. У зв'язку з цим постає завдання розв'язання екстремальних задач для параметрів, що визначають енергетичні характеристики трифазної системи живлення в несинусоїдному несиметричному режимі: визначення повної потужності з урахуванням співвідношення активних опорів силового чотирипровідного кабелю; мінімізація потужності втрат та максимізація коефіцієнта потужності.

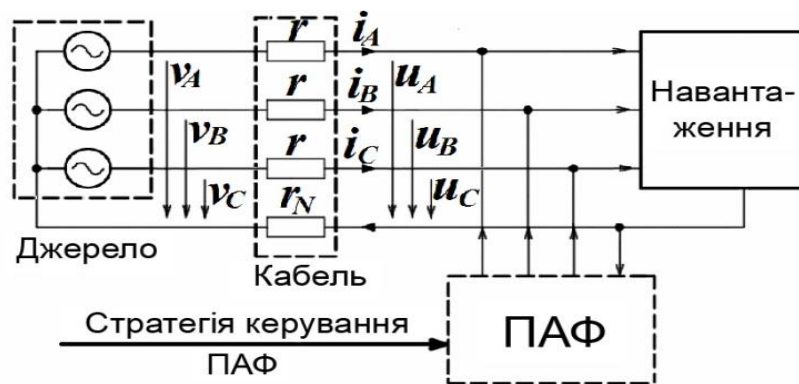


Рисунок 4.1 – Резистивна модель силового кабелю

Розв'язки цих задач для резистивної моделі силового кабелю (Рис.4.1) узагальнені в монографії [97]. Для повної потужності трифазної системи S отримано вираз

$$S = P_{\max} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \mathbf{i}^T(t) \mathbf{R} \mathbf{i}(t) dt \frac{1}{T} \int_0^T \mathbf{u}^T(t) \mathbf{R}^{-1} \mathbf{u}(t) dt}, \quad (4.1)$$

де $\mathbf{R} = r\mathbf{E} + r_N\mathbf{j}\mathbf{j}^T$ – матриця опорів втрат, симетрична відносно головної діагоналі, $\mathbf{E}$ – одинична матриця. $\mathbf{j}^T = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$ В трипровідній системі живлення потужність втрат також описується виразом (4.1) при $\mathbf{R} = r\mathbf{E}$. і формула (4.1) відповідає формулі F.Buchholz у вигляді добутку середньоквадратичних норм векторів фазних напруг та лінійних струмів [79].

Для чотирипровідної системи матриця $\mathbf{R}$ впливає на інтегральні вирази з (4.1) за наявності складових нульової послідовності векторів фазних напруг та лінійних струмів, і формула повної потужності може бути представлена у вигляді

$$S = \sqrt{[U_{\perp}^2 + (1 - \sigma_0)U_0^2][I_{\perp}^2 + (1 - \sigma_0)^{-1}I_0^2]}, \quad (4.2)$$

$$\text{де } U_{\perp}^2 = \frac{1}{T} \int_0^T \mathbf{u}_{\perp}^T(t) \mathbf{u}_{\perp}(t) dt; U_0^2 = \frac{1}{T} \int_0^T \mathbf{u}_0^T(t) \mathbf{u}_0(t) dt = \frac{1}{3T} \int_0^T u_+^2(t) dt; \mathbf{u}_0(t) = \mathbf{u}(t) - \mathbf{j} \frac{u_+(t)}{3};$$

$$u_+(t) = \mathbf{j}^T \mathbf{u}(t); \mathbf{u}_{\perp}(t) = \mathbf{u}(t) - \mathbf{u}_0(t); I_{\perp}^2 = \frac{1}{T} \int_0^T \mathbf{i}_{\perp}^T(t) \mathbf{i}_{\perp}(t) dt; I_0^2 = \frac{1}{T} \int_0^T \mathbf{i}_0^T(t) \mathbf{i}_0(t) dt; \sigma_0 = \frac{3r_N}{r + 3r_N}.$$

На відміну від формули Бухгольца, в формулі (4.2) за наявності складових нульової послідовності фазних напруг чи лінійних струмів чітко проглядається залежність повної потужності від співвідношення опорів силового кабелю, що задає коефіцієнт σ_0 .

Порівняємо отриману в [97] формулу (4.2) з виразом для ефективної повної потужності чотирипровідної системи, наведеним у європейському стандарті [84]

$$S_e = 3U_e I_e, \quad (4.3)$$

$$\text{де } U_e = \sqrt{\frac{3(U_A^2 + U_B^2 + U_C^2) + \xi(U_{AB}^2 + U_{BC}^2 + U_{CA}^2)}{9(1 + \xi)}};$$

$$I_e = \sqrt{\frac{I_A^2 + I_B^2 + I_C^2 + (r_N / r)I_N^2}{3}} - \text{відповідно, ефективна фазна напруга та}$$

еквівалентний струм, $\xi = 3R_Y / R_\Delta$ – коефіцієнт, що дорівнює відношенню активних потужностей, викликаних заданими фазними напругами, в частинах навантаження, з'єднаних трикутником та зіркою в схемі на рис. 4.2. Таке визначення повної потужності викликає певні незручності. По-перше, відношення опорів R_Y / R_Δ і значення коефіцієнта ξ в загальному випадку є невідомим, і тоді рекомендовано [98] приймати $\xi = 1$, що відповідає необґрунтованій рівності зазначених активних потужностей $P_Y = P_\Delta$. По-друге, зміна співвідношення між активними опорами r_N / r впливає лише на еквівалентний струм, та не впливає на ефективну фазну напругу.

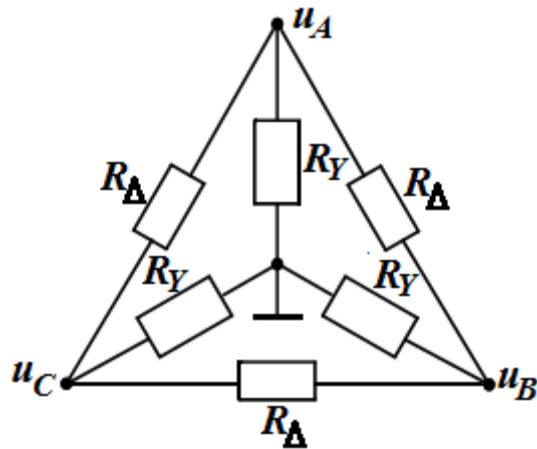


Рисунок 4.2 – Схема з'єднання опорів навантаження у трикутник та зірку

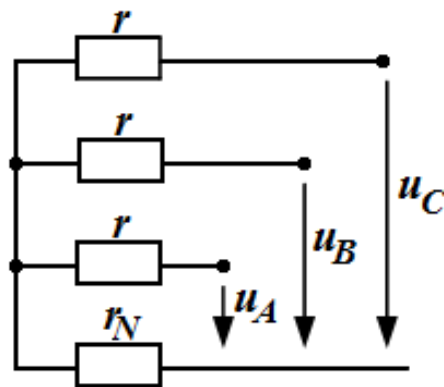


Рисунок 4.3 – Спрощена резистивна модель силового кабелю

Щоб позбутися зазначених недоліків, встановимо залежність між опорами R_Y, R_Δ та r_N, r за якої формули (4.2) та (4.3) є еквівалентними. Піднісши до квадрату обидві частини рівності (4.3) з урахуванням позначень формули (4.2) матимемо:

$$S_e^2 = \frac{(U_A^2 + U_B^2 + U_C^2) + \xi(U_{AB}^2 + U_{BC}^2 + U_{CA}^2) / 3}{(1 + \xi)} \times [I_\perp^2 + (1 - \sigma_0)^{-1} I_0^2]. \quad (4.4)$$

Множник напруг з виразу (4.4) перетворюється до вигляду:

$$\begin{aligned} \frac{(U_A^2 + U_B^2 + U_C^2) + \xi(U_{AB}^2 + U_{BC}^2 + U_{CA}^2) / 3}{(1 + \xi)} &= \frac{(U_\perp^2 + U_0^2) + \xi U_\perp^2}{(1 + \xi)} = \\ &= U_\perp^2 + U_0^2 / (1 + \xi). \end{aligned}$$

Із порівняння його з першим множником виразу (4.2) встановлюємо умову еквівалентності:

$$1 - \sigma_0 = \frac{1}{1 + \xi},$$

звідки з урахуванням значень коефіцієнтів впливає співвідношення еквівалентності:

$$R_Y / R_\Delta = r_N / r. \quad (4.5)$$

Отже, запропоновані формули повної потужності (4.1), (4.2) повністю еквівалентні стандартизованим [84] при виборі в схемі рис.4.2 для розрахунку еквівалентної напруги $R_Y = r_N; R_\Delta = r$. Співвідношення еквівалентності (4.5) усуває невизначеність коефіцієнта ξ в зазначеному європейському стандарті.

Знайдемо величину активної потужності P_N в схемі на рис. 4.3, що утворюється зі схеми рис. 4.1 видаленням шляхом закоротки трифазного джерела. Потенціал спільної точки резисторів позначимо $\varphi(t)$, тоді:

$$\begin{aligned}
 P_N &= \frac{1}{T} \int_0^T \left\| \begin{bmatrix} u_A(t) & u_B(t) & u_C(t) \end{bmatrix} \right\| \left\| \begin{bmatrix} i_A(t) \\ i_B(t) \\ i_C(t) \end{bmatrix} \right\| dt = \frac{1}{rT} \int_0^T \left\| \begin{bmatrix} u_A(t) & u_B(t) & u_C(t) \end{bmatrix} \right\| \left\| \begin{bmatrix} u_A(t) - \varphi(t) \\ u_B(t) - \varphi(t) \\ u_C(t) - \varphi(t) \end{bmatrix} \right\| dt = \\
 &= \frac{1}{rT} \int_0^T \mathbf{u}^T(t) [\mathbf{u}(t) - \varphi(t) \mathbf{j}] dt = \frac{1}{rT} \int_0^T \mathbf{u}^T(t) \left[\mathbf{u}(t) - \frac{u_A(t) + u_B(t) + u_C(t)}{r(3/r + 1/r_N)} \mathbf{j} \right] dt = \\
 &= \frac{1}{rT} \int_0^T \mathbf{u}^T(t) \left[\mathbf{u}(t) - \frac{3}{3 + r/r_N} \mathbf{u}_0(t) \right] dt = \frac{1}{rT} \int_0^T \mathbf{u}^T(t) [\mathbf{u}(t) - \sigma_0 \mathbf{u}_0(t)] dt = \frac{1}{T} \int_0^T \mathbf{u}^T(t) \mathbf{R}^{-1} \mathbf{u}(t) dt.
 \end{aligned}$$

Таким чином, інтеграл напруг з виразу (4.1) є величиною активної потужності, зумовленою фазними напругами навантаження, що розсіюється на активних опорах силового кабелю при короткому замиканні трифазного джерела, а фізичний зміст повної потужності, що задається формулами (4.1) та (4.2), формулюється як середнє геометричне потужностей втрат та зворотного короткого замикання системи живлення.

В результаті застосування формули (4.1) для цієї ж моделі трифазної чотирипровідної системи живлення в [97] отриманий вираз для коефіцієнта корисної дії $\eta = P_L / P_S$ у вигляді розв'язку квадратного рівняння:

$$\eta^{-2} - k_L \eta^{-1} + k_L - 1 + 1/\lambda^2 = 0, \quad (4.6)$$

де $k_L = P_0 / P_L$ – коефіцієнт навантаження; $P_0 = \frac{1}{T} \int_0^T \mathbf{v}^T(t) \mathbf{R}^{-1} \mathbf{v}(t) dt$ – активна потужність короткого замикання. Графіки залежностей ККД від коефіцієнта навантаження k_L при різних значеннях параметра $a = \lambda^{-2} - 1$ наведені на рис. 4.4.

З його аналізу випливає, що при підвищенні значення коефіцієнта потужності до одиниці за рахунок застосування ПАФ ККД трифазної чотирипровідної системи живлення може бути збільшений на 5-15 відсотків. Зі зменшенням відношення P_0 / P_L ефективність застосування засобів ПАФ зростає.

З його аналізу випливає, що при підвищенні значення коефіцієнта потужності до одиниці за рахунок застосування ПАФ ККД трифазної чотирипровідної системи живлення може бути збільшений на 5-15 відсотків. Зі зменшенням відношення P_0 / P_L ефективність застосування засобів ПАФ зростає.

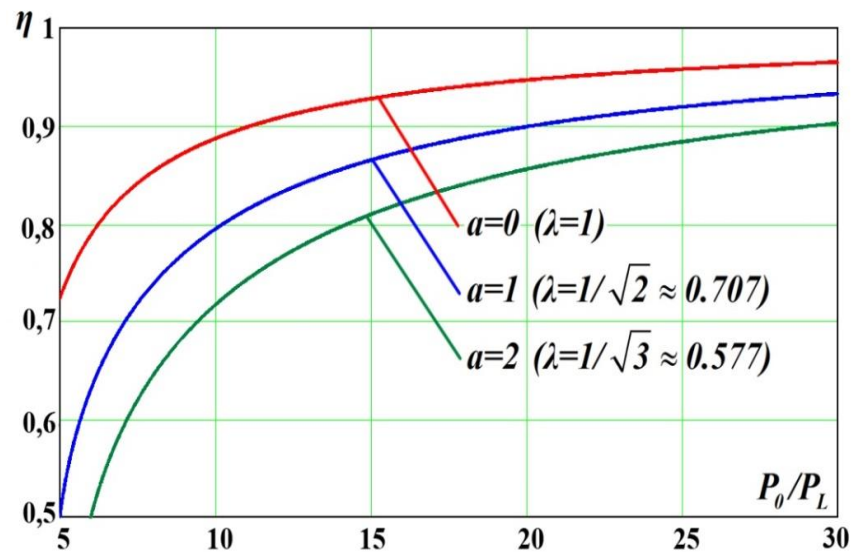


Рисунок 4.4 – Графіки залежностей ККД від коефіцієнта навантаження k_L при різних значеннях параметра a

Коефіцієнт потужності з визначенням повної потужності за виразом (4.1) набуває одиничного значення лише за умови формування вектора фазних струмів пропорційним вектору фазних напруг з частково послабленою складовою нульової послідовності $\mathbf{u}_\sigma(t)$

$$\mathbf{i}(t) = G\mathbf{u}_\sigma(t) = G[\mathbf{u}_\perp(t) + (1 - \sigma_0)\mathbf{u}_0(t)], \quad (4.7)$$

де G – довільна дійсна константа, оскільки в цьому випадку в формулі $\lambda = P / S$,

$$P = P_\perp + P_0 = G[U_\perp^2 + (1 - \sigma_0)U_0^2]; I_\perp^2 + I_0^2 / (1 - \sigma_0) = G^2[U_\perp^2 + (1 - \sigma_0)U_0^2]; \lambda = 1.$$

За наявності ПАФ вектор лінійних струмів трифазного джерела, який у несиметричному несинусоїдному режимі забезпечує постачання енергії в навантаження з одиничним коефіцієнтом потужності, визначається виразом [97]

$$\mathbf{i}_d(t) = G_\sigma \mathbf{u}_\sigma(t),$$

причому значення коефіцієнта пропорційності знаходиться з умови відсутності споживання енергії активним фільтром

$$G_\sigma = \frac{P}{U_\perp^2 + (1 - \sigma_0)U_0^2}.$$

Звідси випливає оригінальний алгоритм керування ПАФ [9]

$$\mathbf{i}_\phi(t) = \mathbf{i}_H(t) - G_\sigma \mathbf{u}_\sigma(t), \quad (4.8)$$

що при значній несиметрії фазних напруг дає переваги за потужністю втрат до 1.8 разів порівняно зі стратегією S. Fryze, та до 7% у порівнянні зі стратегією P. Salmeron, J. Montano.

Підвищення коефіцієнта потужності та відповідного значення ККД можна досягти шляхом підключення в систему паралельного активного фільтра з НЕ. Однак функціонування ПАФ супроводжується втратами енергії в силових елементах інвертора, тому економія величини втрат в силовому кабелі за рахунок підвищення коефіцієнта потужності має перевищувати власні втрати енергії ПАФ. Знайдемо аналітичну умова доцільності застосування ПАФ за показником економії електроенергії.

З виразу (4.6) знайдемо рівняння для відносної потужності втрат $\chi = (P_S - P_L) / P_L$

$$\chi = \frac{1}{\lambda^2(k_L - 2 - \chi)}. \quad (4.9)$$

Після перетворень (4.9) маємо квадратне рівняння для визначення відносної потужності втрат

$$\chi^2 - (k_L - 2)\chi + \lambda^{-2} = 0. \quad (4.10)$$

З двох можливих коренів рівняння (4.10) фізичному змісту задовольняє така функціональна залежність кореня від коефіцієнта потужності, при якій зі збільшенням λ зменшується χ , тобто

$$\chi = 0.5k_L - 1 - \sqrt{(0.5k_L - 1)^2 - \lambda^{-2}}. \quad (4.11)$$

Ця величина має перевищувати потужність втрат активного фільтра P_F , віднесену до активної потужності навантаження

$$\chi > P_F / P_L. \quad (4.12)$$

Вважатимемо, що потужність втрат ПАФ пропорційна його встановленій потужності, що відповідає початковому значенню коефіцієнта потужності λ_1

$$P_F = k_F \sqrt{S^2 - P_L^2} = k_F P_L \sqrt{\lambda_1^{-2} - 1}, \quad (4.13)$$

де k_F - коефіцієнт пропорційності. Тоді, підставляючи формули (4.11) та (4.13) в вираз (4.12), отримаємо аналітичну умову доцільності застосування ПАФ за показником економії електроенергії

$$\sqrt{(0.5k_L - 1)^2 - \lambda_2^{-2}} - \sqrt{(0.5k_L - 1)^2 - \lambda_1^{-2}} > k_F \sqrt{\lambda_1^{-2} - 1}. \quad (4.16)$$

Якщо значення коефіцієнта потужності внаслідок дії ПАФ підвищується до одиничного ($\lambda_2 = 1$), нерівність (4.14) після перетворення набуває вигляду

$$k_F < \frac{\sqrt{\lambda_1^{-2} - 1}}{\sqrt{(0.5k_L - 1)^2 - 1} + \sqrt{(0.5k_L - 1)^2 - \lambda_1^{-2}}}. \quad (4.15)$$

Графіки для граничного значення k_F за формулою (4.15) наведені на рис. 4.5.

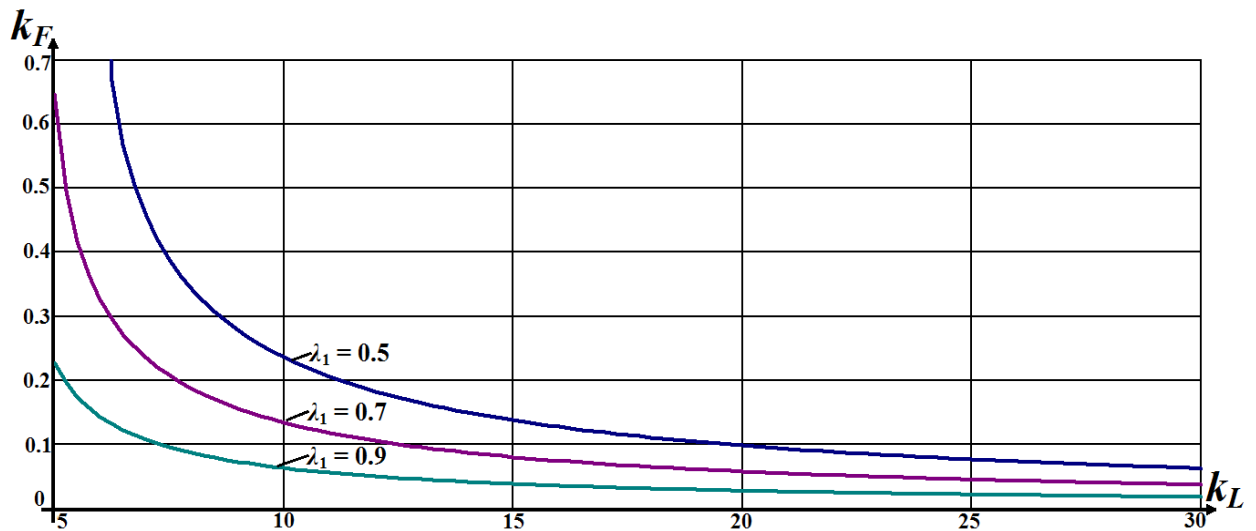


Рисунок 4.5 – Графічні залежності для визначення граничних значень співвідношення потужності активного фільтра до активної потужності навантаження

Ці графіки накладають обмеження на вибір елементної баз та частоту комутації силового інвертора на ранніх стадіях проектування ПАФ.

4.2. Розрахунок енергозберігаючого ефекту від застосування ПАФ в трифазній чотирипровідній системі електропостачання при збільшенні інтервалу осереднення вимірюваних величин

Розглянемо алгоритм керування ПАФ при збільшенні інтервалу осереднення вимірюваних величин та виведемо розрахункові співвідношення для оцінювання енергозберігаючого ефекту від його застосування в трифазній чотирипровідній системі електропостачання.

Відповідно до методики [99] визначення енергетичних характеристик трифазної чотирипровідної системи електропостачання (рис. 4.1) в синусоїдному несиметричному режимі для струмів перейдемо від миттєвих

значень фазних напруг та лінійних струмів до тривимірних комплексних векторів діючих значень

$$\bar{\mathbf{u}} = \frac{\omega}{\pi\sqrt{2}} \int_0^{2\pi/\omega} \begin{Bmatrix} u_A(t) \\ u_B(t) \\ u_C(t) \end{Bmatrix} e^{-j\omega t} dt = \begin{Bmatrix} U_A e^{j\varphi_A} \\ U_B e^{j\varphi_B} \\ U_C e^{j\varphi_C} \end{Bmatrix} \varphi = \begin{Bmatrix} \dot{U}_A \\ \dot{U}_B \\ \dot{U}_C \end{Bmatrix};$$

$$\bar{\mathbf{i}} = \frac{\omega}{\pi\sqrt{2}} \int_0^{2\pi/\omega} \begin{Bmatrix} i_A(t) \\ i_B(t) \\ i_C(t) \end{Bmatrix} e^{-j\omega t} dt = \begin{Bmatrix} I_A e^{j\psi_A} \\ I_B e^{j\psi_B} \\ I_C e^{j\psi_C} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \dot{I}_A \\ \dot{I}_B \\ \dot{I}_C \end{Bmatrix}.$$

Далі перейдемо до комплексних векторів симетричних складових прямої, зворотної та нульової послідовностей (позначені індексами +, -, 0 відповідно), причому складові нульової послідовності модифікуємо відповідно до значення коефіцієнта $\sigma_0 = 3r_N / (r + 3r_N)$, який визначається співвідношенням опорів лінійних та нейтрального проводів лінії передачі (рис. 4.1)

$$\bar{\mathbf{u}}_- = \begin{Bmatrix} \sqrt{1-\sigma_0} & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{Bmatrix} \bar{\mathbf{F}}^{-1} \bar{\mathbf{u}} = \begin{Bmatrix} \dot{U}_0 \sqrt{1-\sigma_0} \\ \dot{U}_+ \\ \dot{U}_- \end{Bmatrix};$$

$$\bar{\mathbf{i}}_- = \begin{Bmatrix} 1/\sqrt{1-\sigma_0} & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{Bmatrix} \bar{\mathbf{F}}^{-1} \bar{\mathbf{i}} = \begin{Bmatrix} I_0 e^{j\psi_0} / \sqrt{1-\sigma_0} \\ I_+ e^{j\psi_+} \\ I_- e^{j\psi_-} \end{Bmatrix}.$$

де $\bar{\mathbf{F}} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{Bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \tilde{a} & \dot{a} \\ 1 & \dot{a} & \tilde{a} \end{Bmatrix}$ – модифікована матриця Фортеск'ю, що задовольняє умовам

$$\bar{\mathbf{F}}^{-1} = \bar{\mathbf{F}}^*; \bar{\mathbf{F}}^T = \bar{\mathbf{F}}; \dot{a} = e^{j2\pi/3}; \tilde{a} = (\dot{a})^*.$$

Оцінімо квадрат модуля комплексного вектора фазних напруг з урахуванням обмежень на діючі значення напруг складових нульової та зворотної

послідовностей ($\varepsilon_0 = U_0 / U_+ \leq 0.04$; $\varepsilon_- = U_- / U_+ \leq 0.04$), що задає міждержавний стандарт 13109-97

$$\begin{aligned} \underline{\mathbf{u}}_-^T \underline{\mathbf{u}}_-^* &= U^2 = U_0^2(1 - \sigma_0) + U_+^2 + U_-^2 \leq U_0^2 + U_+^2 + U_-^2 = \\ &= U_+^2(1 + \varepsilon_0^2 + \varepsilon_-^2) \leq U_+^2(1 + 0.04^2 + 0.04^2) = U_+^2(1.0032) \leq 1.0016^2 U_+^2, \end{aligned}$$

тобто з похибкою, що не перевищує 16 сотих відсотка, модуль вектора фазної напруги визначається складовою прямої послідовності

$$\underline{\mathbf{u}}_-^T \underline{\mathbf{u}}_-^* \approx U_+^2 = 3U_\phi^2; \underline{\mathbf{u}}_- \approx \sqrt{3}U_\phi \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (4.16)$$

де U_ϕ – діюче значення фазної напруги.

Квадрат модуля комплексного вектора струмів визначається виразом

$$\begin{aligned} \underline{\mathbf{i}}_-^T \underline{\mathbf{i}}_-^* &= I^2 = I_0^2 / (1 - \sigma_0) + I_+^2 + I_-^2 = \\ &= I_0^2(1 + 3r_N / r) + I_+^2 + I_-^2 = \\ &= I_N^2 r_N / r + I_A^2 + I_B^2 + I_C^2, \end{aligned} \quad (4.17)$$

оскільки

$$\begin{aligned} I_0^2 + I_+^2 + I_-^2 &= (\bar{\mathbf{F}}^{-1} \bar{\mathbf{i}})^T (\bar{\mathbf{F}}^{-1} \bar{\mathbf{i}})^* = \bar{\mathbf{i}}^T \bar{\mathbf{F}}^{-1} \bar{\mathbf{F}} \bar{\mathbf{i}}^* = \bar{\mathbf{i}}^T \bar{\mathbf{i}}^* = \\ &= I_A^2 + I_B^2 + I_C^2; 3I_0^2 = (\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C)(\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C)^* = I_N^2. \end{aligned}$$

Для синусоїдного режиму симетричних напруг та несиметричних струмів скалярний добуток отриманих комплексних векторів $\underline{\mathbf{u}}; \underline{\mathbf{i}}$ визначає активну потужність

$$P = \operatorname{Re}(\underline{\mathbf{u}}_-^T \underline{\mathbf{i}}_-^*) = \sqrt{3}U_\phi I_+ \cos \psi_+$$

та реактивну потужність

$$Q = \operatorname{Im}(\underline{\mathbf{u}}_-^T \underline{\mathbf{i}}_-^*) = -\sqrt{3}U_\phi I_+ \sin \psi_+,$$

векторний добуток визначає вектор потужності небалансу [99], [82]

$$\underline{\mathbf{n}} = \underline{\mathbf{i}} \times \underline{\mathbf{u}} = \begin{bmatrix} \dot{I}_0 / \sqrt{1-\sigma_0} \\ \dot{I}_+ \\ \dot{I}_- \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0 \\ \sqrt{3}U_\phi \\ 0 \end{bmatrix} = \sqrt{3}U_\phi \begin{bmatrix} -\dot{I}_- \\ 0 \\ \dot{I}_0 / \sqrt{1-\sigma_0} \end{bmatrix},$$

а добуток модулів – повну потужність $S=UI$.

Між зазначеними потужностями має місце квадратичне співвідношення, зумовлене властивостями скалярного та векторного добутків комплексних векторів [99], [82]

$$S^2 = 3U_\phi^2 (I_A^2 + I_B^2 + I_C^2 + I_N^2 \frac{r_N}{r}) = P^2 + Q^2 + N^2,$$

де $N^2 = \underline{\mathbf{n}}^T \underline{\mathbf{n}}^* = \sqrt{3}U_\phi [I_-^2 + I_0^2 / (1-\sigma_0)]$ – квадрат модуля вектора потужності небалансу, який в [83] розділений на суму квадратів потужності пульсацій та так званої прихованої потужності.

Енергозберігаючий ефект від застосування засобів паралельної активної фільтрації проявляється у зменшенні потужності втрат та відповідного теплового навантаження лінії електропередачі внаслідок формування струмів трифазного джерела, яким відповідає тільки активна потужність навантаження, а всі неактивні складові повної потужності, необхідні навантаженню, формуються активним фільтром на його затискачах [100], [98], [79]. Енергоефективність процесу споживання енергії трифазного джерела характеризується коефіцієнтом потужності, що в синусоїдному режимі для симетричного джерела напруги має вигляд

$$\lambda = \frac{P}{S} = k_3 k_H, \quad (4.18)$$

де $k_3 = P / \sqrt{P^2 + Q^2} = \cos \psi_+$ – коефіцієнт зсуву,

$$k_H = \sqrt{\frac{P^2 + Q^2}{P^2 + Q^2 + N^2}} = \frac{I_+}{\sqrt{I_0^2 / (1-\sigma_0) + I_+^2 + I_-^2}} -$$

коефіцієнт несиметрії.

Для зручності вимірювання коефіцієнта потужності вираз (4.18) може бути перетворений таким чином

$$\lambda = I_+ \cos \psi_+ / \sqrt{I_0^2 / (1 - \sigma_0) + I_+^2 + I_-^2} = P / \sqrt{3} U_\phi \sqrt{I_A^2 + I_B^2 + I_C^2 + I_N^2 r_N / r}. \quad (4.19)$$

За наявності вищих гармонік струмів та дії синусоїдного симетричного джерела цей вираз для коефіцієнта потужності залишається справедливим, але діючі значення усіх струмів враховують увесь їх спектральний склад.

Оцінкою енергоефективності застосування ПАФ може слугувати коефіцієнт виграшу за потужністю втрат:

$$k_B = \frac{\Delta P}{\Delta P_F},$$

де $\Delta P = P_S - P_L = \frac{1}{T} \int_0^T \mathbf{i}^T(t) \mathbf{Ri}(t) dt$ – потужність втрат в системі електропостачання

за відсутності фільтра; ΔP_F – мінімальне значення потужності втрат за наявності ПАФ при одиничному значенні коефіцієнта потужності.

Алгоритм керування ПАФ, що забезпечує одиничне значення коефіцієнта потужності системи електропостачання в синусоїдному симетричному режимі напруг також задається формулою (4.20), причому величина коефіцієнта пропорційності в цій формулі обирається з умови нульової активної потужності фільтра за період напруги електромережі у вигляді $g = P / 3U_\phi^2$.

Тоді коефіцієнт виграшу за потужністю втрат в зазначеному режимі

$$k_B = \frac{(I_A^2 + I_B^2 + I_C^2)r + I_N^2 r_N}{\frac{g^2 r^T}{T} \int_0^T \mathbf{u}^T(t) \mathbf{u}(t) dt} = \frac{I_A^2 + I_B^2 + I_C^2 + I_N^2 r_N / r}{P^2 / 3U_\phi^2} = \frac{1}{\lambda^2}. \quad (4.20)$$

Таким чином, коефіцієнт виграшу за потужністю втрат [8] при застосуванні алгоритму керування ПАФ, що забезпечує одиничне значення

коефіцієнта потужності системи електропостачання, є обернено пропорційним квадрату коефіцієнта потужності навантаження, що визначається за формулою (4.19).

Оцінимо виграш за потужністю втрат, що досягається при збільшенні інтервалу осереднення потужності навантаження та напруг живлення. При цьому вектор струмів трифазного джерела будемо формувати пропорційним вектору $\mathbf{u}(t)$ відповідно до формули (4.20), але коефіцієнт пропорційності обиратимемо за умови відсутності споживання енергії активним фільтром протягом усього часу осереднення τ

$$g_\tau = \int_0^\tau p(t)dt / \int_0^\tau \mathbf{u}^T(t)\mathbf{u}(t)dt. \quad (4.21)$$

Величина виграшу за потужністю втрат в зазначеному інтервалі часу визначається коефіцієнтом

$$k_{B\tau} = \frac{\int_0^\tau \mathbf{i}^T(t)\mathbf{R}\mathbf{i}(t)dt}{g_\tau^2 r \int_0^\tau \mathbf{u}^T(t)\mathbf{u}(t)dt} = \frac{\int_0^\tau \mathbf{i}^T(t)\bar{\mathbf{R}}\mathbf{i}(t)dt \int_0^\tau \mathbf{u}^T(t)\mathbf{u}(t)dt}{\left(\int_0^\tau p(t)dt\right)^2} = \frac{I_\tau^2 U_\tau^2}{P_\tau^2} = \frac{1}{\lambda_\tau^2}, \quad (4.22)$$

де

$$\begin{aligned} I_\tau &= \sqrt{\int_0^\tau i^2(t)dt / \tau} = \sqrt{\int_0^\tau \mathbf{i}^T(t)\bar{\mathbf{R}}\mathbf{i}(t)dt / \tau} = \\ &= \sqrt{\frac{1}{\tau} \int_0^\tau [i_A^2(t) + i_B^2(t) + i_C^2(t) + (r_N / r)i_N^2(t)]dt} - \end{aligned}$$

– середньоквадратичне значення еквівалентного теплового струму $\mathbf{i}(t)$, що в інтервалі осереднення спричиняє таке саме теплове навантаження лінії електропередачі, що й струми лінійних та нейтрального проводів;

$U_\tau = \sqrt{\int_0^\tau \mathbf{u}^T(t)\mathbf{u}(t)dt / \tau}$ – середньоквадратичне значення фазових напруг;

$P_\tau = \int_0^\tau p(t)dt / \tau$ - середня активна потужність в часовому інтервалі τ ;

$\lambda_\tau = P_\tau / U_\tau I_\tau$ - інтегральний коефіцієнт потужності.

Для цілей вимірювання коефіцієнт виграшу за енергією втрат за формулою (4.22) може бути поданий наближеною рівністю:

$$k_{B\tau} = \frac{3 \left(\sum_{k=1}^N I_k^2 \right) \left(\sum_{k=1}^N U_{\phi k}^2 \right)}{\left(\sum_{k=1}^N P_k \right)^2}, \quad (4.23)$$

де N – кількість вимірювальних тактів в інтервалі осереднення τ ; $P_k, U_{\phi k}$,

$I_k^2 = \frac{I_{Ak}^2 + I_{Bk}^2 + I_{Ck}^2 + I_{Nk}^2 r_N}{r}$ – активна потужність, діюче значення фазної напруги та

квадрат еквівалентного теплового струму в k -му вимірювальному такті.

Оцінимо виграш за потужністю втрат при стабільній напрузі трифазного джерела для однорідного змінюваного в часі несиметричного навантаження, що для будь-якого періоду напруги електромережі характеризується однаковою величиною коефіцієнта потужності, який визначається за формулою (4.19).

Тоді в формулі (4.23) для тривалості вимірювального такту, що збігається з періодом напруги електромережі,

$$U_{\phi k} = U_\phi; I_k = \frac{P_k}{\sqrt{3} U_\phi k_P}.$$

Підставивши в формулу (4.22) наближений вираз для часової залежності еквівалентного теплового струму

$$i(t) = \frac{p(t)}{\sqrt{3} U_\phi k_P},$$

та $U_\tau^2 = 3U_\phi^2$, після перетворень матимемо вираз для коефіцієнта виграшу за потужністю втрат:

$$k_{Br} = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} p^2(t) dt \times \left[\frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} p(t) dt \right]^{-2} \times \frac{1}{\lambda^2} = k_w k_B, \quad (4.24)$$

де $k_w = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} p^2(t) dt \times \left[\frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} p(t) dt \right]^{-2}$ – коефіцієнт нерівномірності споживання енергії в інтервалі осереднення τ .

Якщо інтервал осереднення є періодом зміни активної потужності, наприклад, в певному технологічному циклі, доцільно в її миттєвому значенні виділити змінну складову $\tilde{p}(t) = p(t) - P_\tau$, тоді

$$k_w = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} [\tilde{p}(t) + P_\tau]^2 dt / P_\tau^2 = 1 + \frac{P_\sim^2}{P_\tau^2},$$

де $P_\sim = \sqrt{\frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} \tilde{p}^2(t) dt}$ – середньоквадратичне значення змінної складової активної потужності за період її зміни.

Знайдемо значення коефіцієнтів нерівномірності споживання енергії для типових форм графіків зміни активної потужності (рис.4.6).

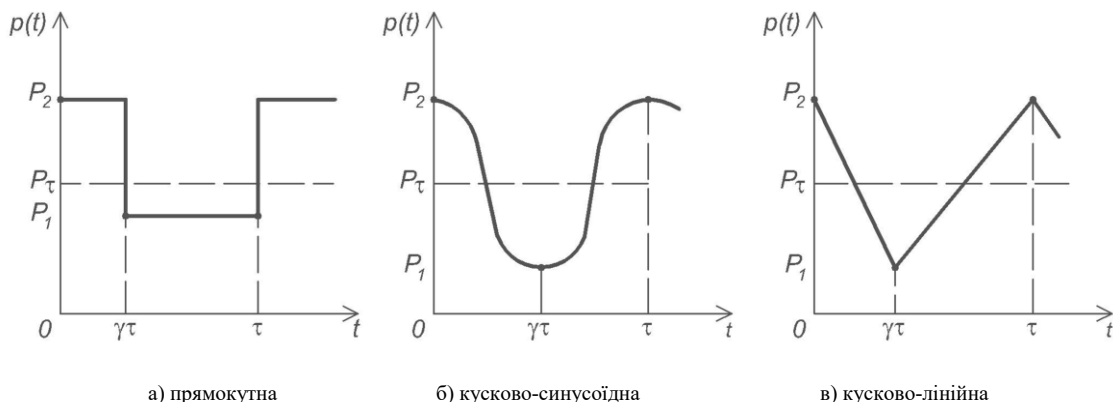


Рисунок 4.6 – Типові форми графіків зміни активної потужності

При прямокутній формі графіку активної потужності (рис. 4.6а) коефіцієнт нерівномірності споживання енергії визначається двома параметрами: коефіцієнтом приросту $D = (P_2 - P_1) / 2P_\tau$ та коефіцієнтом заповнення γ

$$k_{w1} = 1 + 4\gamma(1 - \gamma)D^2,$$

сягаючи при обмеженні $P_1 \geq 0$ максимального значення $k_{w1MAX} = 2$ за умов $D = 1$ та $\gamma = 0,5$.

Форма графіку з кусково-синусоїдним законом зміни активної потужності (рис.4.6б) характеризується коефіцієнтом нерівномірності споживання енергії

$$k_{w2} = 1 + D^2 / 2,$$

що визначається лише одним параметром D незалежно від γ . Максимальне значення $k_{w2MAX} = 1,5$ при тому ж самому обмеженні має місце при $D = 1$.

Так само не залежить від параметра γ коефіцієнт нерівномірності споживання енергії, якщо графік активної потужності змінюється за кусково-лінійним законом (рис. 4.6в):

$$k_{w3} = 1 + D^2 / 3,$$

сягаючи максимального значення $k_{w3MAX} = 4 / 3$ за аналогічної умови $D = 1$.

4.3. Нові алгоритми керування ПАФ для підвищення енергоефективності трифазних чотирипровідних систем електропостачання

На рис. 4.7 зображено схему чотирипровідної трифазної системи живлення нелінійного навантаження з паралельним активним фільтром, що реалізовує одиничний коефіцієнт потужності [101].

Трифазне джерело через чотирипровідний кабель з'єднане з навантаженням. ПАФ чотирипровідної трифазної системи живлення складається з силової частини, включеної паралельно навантаженню, та системи керування.

Остання містить вимірювачі миттєвих значень фазних напруг та струмів навантаження, формувач 1 різниці вектора миттєвих значень фазних напруг та

його частково послабленої складової нульової послідовності із зовнішнім входом установки величини коефіцієнта послаблення σ , формувач 2 коефіцієнта пропорційності, величина якого виключає споживання активної потужності паралельним активним фільтром, помножувач 3 та блок векторного віднімання 4. Система керування за допомогою датчиків струму та напруги в блоках відповідних вимірювачів формує сигнали векторів миттєвих значень фазної напруги та струму навантаження.

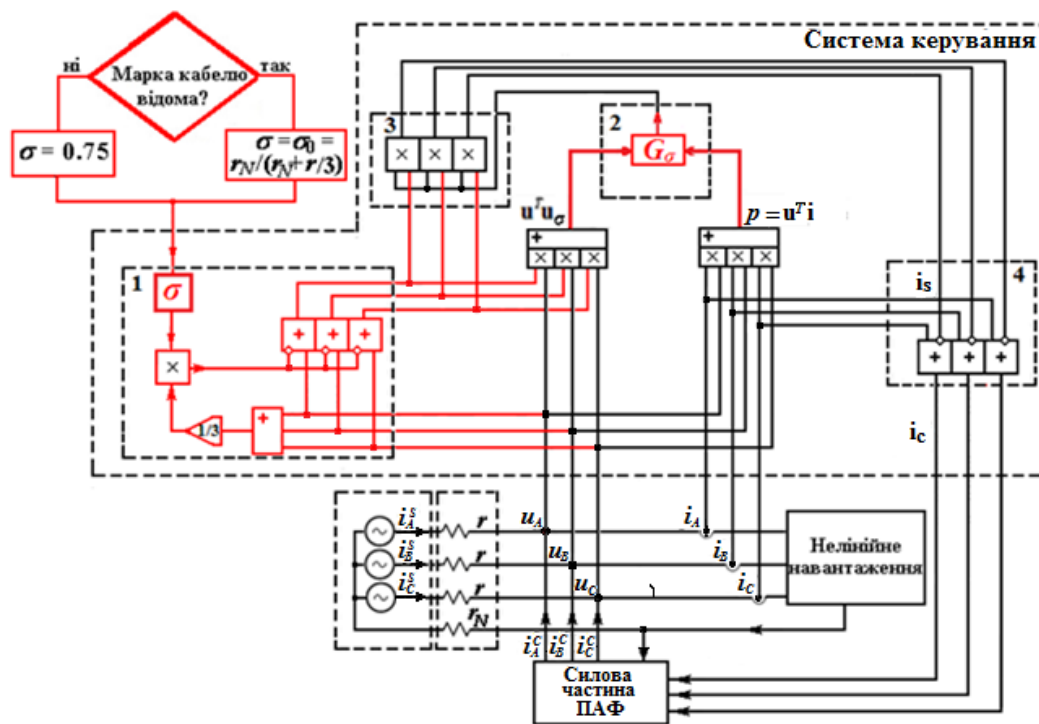


Рисунок 4.7 – Схема чотирипровідної трифазної системи живлення нелінійного навантаження з паралельним активним фільтром, що реалізовує одиничний коефіцієнт потужності

На виході блоку формувача опорної напруги у відповідності до заданого значення коефіцієнта σ за виразом (4.7) формується вектор фазної напруги з частковим послабленням складової нульової послідовності і подається на один

із входів формувача скалярного коефіцієнта пропорційності g або G , значення яких розраховуються за умови рівності нулю миттєвої або інтегральної потужності паралельного активного фільтра, в залежності від обраного режиму компенсації (миттєвий/інтегральний).

З іншого боку, цей вектор як опорна напруга поступає на векторний вхід блока множення 3, на скалярний вхід якого подається значення коефіцієнта пропорційності g або G .

Сформований на виході блока множення вектор миттєвих значень струмів джерела віднімається від вектора миттєвих значень струмів навантаження з виходу відповідного вимірювача в блоці віднімання, і сформований вектор миттєвих значень струмів активного фільтра з виходу цього блока подається на керуючі входи силової частини.

При відомій марці силового кабелю для мінімізації втрат в ньому та забезпечення одиничного значення коефіцієнта потужності, коефіцієнт послаблення складової нульової послідовності обирається рівним оптимальному значенню $\sigma_0 = r_n / (r_n + r / 3)$, де r – активний опір кожного з фазних проводів кабелю, r_n – активний опір нейтралі.

При невідомій марці кабелю, коли неможливо точно встановити співвідношення між r та r_n , доцільно прийняти $\sigma_0^* = 0,75$, що відповідає мінімізації втрат для найпоширенішого випадку $r = r_n$.

Тоді

$$\mathbf{u}_\sigma = \mathbf{u} - \sigma_0^* \mathbf{u}_0 = \mathbf{u} - 0.75 \frac{u_+}{3} \mathbf{j} = \mathbf{u} - \frac{u_a + u_b + u_c}{4} \mathbf{j},$$

тобто при формуванні опорного вектора від миттєвого значення кожної фазної напруги віднімають четверту частину суми миттєвих значень фазних напруг [101].

Комбінована система керування ПАФ з прямим формуванням струмів джерела, в якій в залежності від конкретних умов застосування обирається один із дев'яти способів керування, оптимальний за певним показником якості [102], представлена на рис. 4.8.

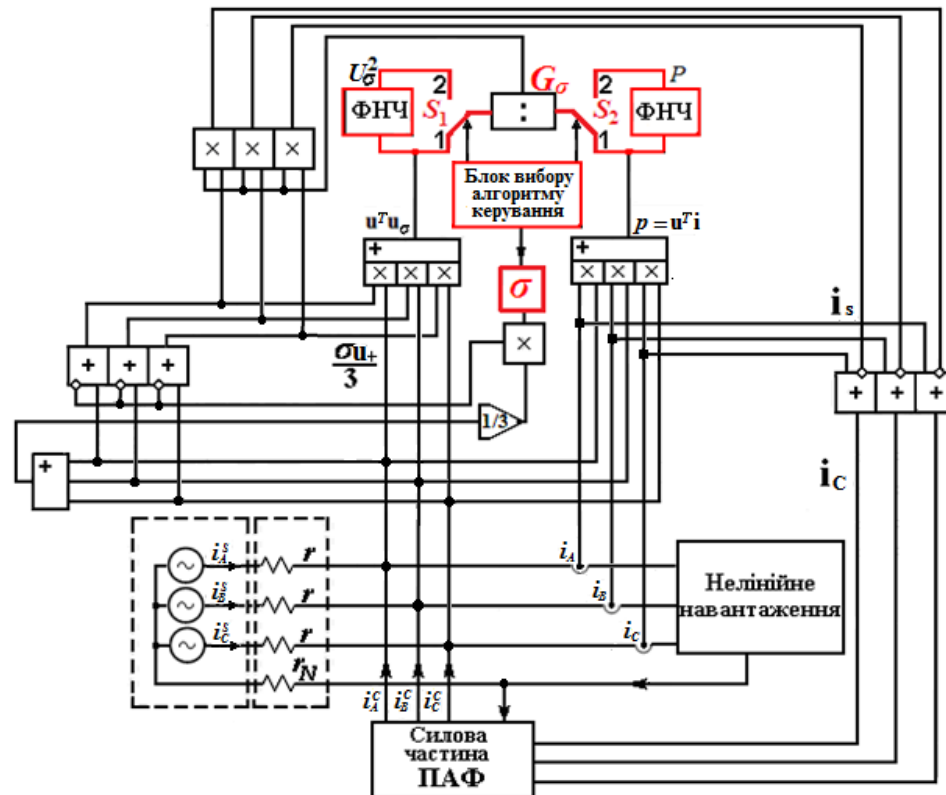


Рисунок 4.8 – Комбінована система керування ПАФ з прямим формуванням струмів джерела, в якій в залежності від конкретних умов застосування обирається один із дев'яти способів керування, оптимальний за певним показником якості

Трифазне джерело через чотирипровідний кабель з'єднане з навантаженням. ПАФ трифазної системи живлення складається з силової частини, включеної паралельно навантаженню, та системи керування. Остання містить вимірювачі миттєвих значень фазних напруг та струмів навантаження, формувач різниці вектора миттєвих значень фазних напруг та його частково

послабленої складової нульової послідовності із зовнішнім входом установки величини коефіцієнта послаблення σ , блоки скалярного множення векторів, осереднювачі миттєвих значень, в якості яких виступають ФНЧ з частотою зрізу, що дорівнює половині частоти мережі, двохпозиційні ключі, дільник, величина частки на виході якого виключає споживання активної потужності паралельним активним фільтром, блок вибору методу керування, який управляє ключами та величиною коефіцієнта послаблення σ , помножувач вектора на скаляр та блок векторного віднімання.

Вхідною величиною ФНЧ – осереднювача потужності є миттєва скалярна потужність навантаження p , вихідною – активна потужність навантаження P , а для ФНЧ – осереднювача напруг вхідною величиною є добуток миттєвих значень векторів $\mathbf{u}^T \mathbf{u}_\sigma$, вихідною – середнє значення зазначеного добутку $U_\sigma^2 = U_\perp^2 + (1 - \sigma)U_0^2$.

При переборі станів ключів S_1 та S_2 , що здійснюють комутацію цих величин з входами дільника та $\sigma = \sigma_0$, на його виході отримаємо чотири варіанти коефіцієнтів пропорційності

$$G_{\sigma 1} = \frac{p}{\mathbf{u}^T \mathbf{u}_\sigma}; \quad (4.25)$$

$$G_{\sigma 2} = \frac{P}{\mathbf{u}^T \mathbf{u}_\sigma}; \quad (4.26)$$

$$G_{\sigma 3} = \frac{P}{U_\sigma^2}; \quad (4.27)$$

$$G_{\sigma 4} = \frac{p}{U_\sigma^2}; \quad (4.28)$$

При коефіцієнті $G_{\sigma 1}$ маємо нульову миттєву потужність активного фільтра, оскільки

$$p_C = \mathbf{u}^T \mathbf{i}_C = \mathbf{u}^T (\mathbf{i} - \mathbf{i}_S) = \mathbf{u}^T \mathbf{i} - \mathbf{u}^T G_{\sigma 1} \mathbf{u}_\sigma = p - p = 0, \quad (4.29)$$

і компенсація неактивних складових потужності навантаження може здійснюватись активним фільтром без накопичувального реактивного елемента, що зменшує його масу та габарити.

Величина коефіцієнта $G_{\sigma 2}$ забезпечує сталу величину споживаної від мережі потужності навіть при несиметричних фазних напругах та нелінійному навантаженні, оскільки

$$p_S = \mathbf{u}^T \mathbf{i}_S = \mathbf{u}^T G_{\sigma 2} \mathbf{u}_\sigma = P = \text{const}. \quad (4.30)$$

Це виключає пульсації миттєвої потужності, які погіршують умови роботи електрообладнання, ведуть до непродуктивного завантаження ліній електропередач та електрообладнання, знижуючи ефективність їх використання.

Значення коефіцієнта $G_{\sigma 3}$ і відповідний спосіб керування реалізований в роботі [101], при цьому мінімізується потужність втрат в силовому кабелі.

Всі три розглянуті коефіцієнта забезпечують рівність нулю активної потужності на затискачах паралельного активного фільтра, оскільки активна потужність трифазного джерела дорівнює активній потужності навантаження

$$P_S = \frac{1}{T} \int_0^T \mathbf{u}^T \mathbf{i}_S dt = P. \quad (4.31)$$

Значення коефіцієнта пропорційності $G_{\sigma 4}$ останню умову не забезпечує, оскільки при несиметричних фазних напругах

$$P_S = \frac{1}{T} \int_0^T \mathbf{u}^T \mathbf{i}_S dt = \frac{1}{T} \int_0^T \mathbf{u}^T \frac{P}{U_{\alpha\beta}^2 + (1-\sigma)U_0^2} \mathbf{u}_\sigma dt = \frac{1}{T[U_{\alpha\beta}^2 + (1-\sigma)U_0^2]} \int_0^T \mathbf{u}^T \mathbf{u}_\sigma p dt \neq P. \quad (4.32)$$

Використовуючи відзначену узагальнюючу властивість стратегії керування з опорним вектором миттєвих значень фазних напруг з частковим послабленням складової нульової послідовності та комутацію з входами

дільника вхідних та вихідних величин зазначених осереднювачів, можна реалізувати більшість відомих стратегій при різних значеннях параметра σ .

Так для $\sigma = 0$ $\mathbf{u}_\sigma = \mathbf{u}$ та при зазначеній комутації реалізуються три алгоритми керування з опорним вектором фазних напруг, а при $\sigma = 1$ $\mathbf{u}_\sigma = \mathbf{u}_{\alpha\beta}$ і реалізуються три алгоритми керування з опорним вектором фазних напруг, позбавленим складової нульової послідовності.

При $\sigma = \sigma_0$ та комутації до входів дільника вихідних величин зазначених осереднювачів реалізується відома стратегія (4.25), а при комутації до входів дільника різних величин зазначених осереднювачів реалізуються способи керування (4.26), (4.27) з відзначеними позитивними властивостями.

Блок вибору алгоритму керує двопозиційними ключами S_1 та S_2 , а також величиною коефіцієнта послаблення σ . В залежності від станів двопозиційних ключів та вибору значення коефіцієнта послаблення складової нульової послідовності вектора миттєвих значень фазних напруг σ система керування може реалізувати дев'ять способів формування вектора струмів трифазного джерела, наведених в табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Способи формування вектора струмів трифазного джерела

Положення ключів	Значення коефіцієнта σ		
	$\sigma = 0$	$\sigma = \sigma_0$	$\sigma = 1$
$S_1 - 1$ $S_2 - 1$	$\frac{p}{u^2} \mathbf{u}$	$\frac{p}{\mathbf{u}^T \mathbf{u}_\sigma} \mathbf{u}_\sigma$	$\frac{p}{u_{\alpha\beta}^2} \mathbf{u}_{\alpha\beta}$
$S_1 - 1$ $S_2 - 2$	$\frac{P}{u^2} \mathbf{u}$	$\frac{P}{\mathbf{u}^T \mathbf{u}_\sigma} \mathbf{u}_\sigma$	$\frac{P}{u_{\alpha\beta}^2} \mathbf{u}_{\alpha\beta}$
$S_1 - 2$ $S_2 - 2$	$\frac{P}{U^2} \mathbf{u}$	$\frac{P}{U_\sigma^2} \mathbf{u}_\sigma$	$\frac{P}{U_{\alpha\beta}^2} \mathbf{u}_{\alpha\beta}$

Оскільки значення коефіцієнта пропорційності в усіх розглянутих способах визначається розрахунковим шляхом без врахування фактичного значення осередненої потужності на затискачах паралельного активного фільтра, точність підтримання нульового значення осередненої потужності паралельного активного фільтра є недостатньою, внаслідок чого функціональні можливості та призначення паралельного активного фільтра реалізуються не повністю, особливо для змінного навантаження, період якого перевищує період мережної напруги.

В основу нової корисної моделі [9] покладено задачу створення такого способу керування паралельним активним фільтром чотирипровідної трифазної мережі, в якому введенням нових операцій забезпечилося б підвищення точності керування при збереженні функціональних можливостей вибору стратегії, оптимальної за певним показником якості в залежності від конкретних умов застосування.

Поставлена задача досягається тим, що в способі керування паралельним активним фільтром чотирипровідної трифазної мережі, при якому вектор миттєвих значень струмів трифазного джерела формують пропорційним вектору миттєвих значень фазних напруг з частково послабленою складовою нульової послідовності та визначають коефіцієнт пропорційності з умови рівності нулю осередненої потужності на затискачах паралельного активного фільтра відповідно до декількох стратегій керування з використанням осереднених значень миттєвої потужності навантаження та скалярного добутку вектора миттєвих значень фазних напруг на вектор миттєвих значень фазних напруг з частково послабленою складовою нульової послідовності створюють додатковий канал автоматичного регулювання зазначеним коефіцієнтом пропорційності за відхиленням, віднімаючи від його значення, розрахованого відповідно до заданої стратегії керування, величину, пропорційну виміряній миттєвій потужності паралельного активного фільтра, що осереднена так само,

як і в заданій стратегії керування. При цьому інтервал осереднення миттєвих потужностей навантаження і паралельного активного фільтра та скалярного добутку зазначених векторів напруг приймають рівним періоду зміни потужності навантаження.

Створення додаткового каналу автоматичного регулювання зазначеним коефіцієнтом пропорційності за відхиленням, в якому від його значення, розрахованого відповідно до заданої стратегії керування, віднімається величина, пропорційна виміряній миттєвій потужності паралельного активного фільтра, що осереднена так само, як і в заданій стратегії керування, сприяє підвищення точності керування активним фільтром чотирипровідної трифазної мережі, що забезпечує розширення можливостей керування активним фільтром чотирипровідної трифазної мережі, в якому в залежності від конкретних умов застосування обирається стратегія, оптимальна за певним показником якості.

На рис. 4.9 зображено функціональну схему паралельного активного фільтра трифазної чотирипровідної мережі, що реалізовує запропонований спосіб керування.

Заявлений спосіб керування паралельним активним фільтром чотирипровідної трифазної мережі полягає в наступному. Вектор миттєвих значень струмів трифазного джерела формують пропорційним вектору миттєвих значень фазних напруг з частково послабленою складовою нульової послідовності, визначають коефіцієнт пропорційності з умови рівності нулю осередненої потужності на затискачах паралельного активного фільтра відповідно до декількох стратегій керування з використанням осереднених значень миттєвої потужності навантаження та скалярного добутку вектора миттєвих значень фазних напруг на вектор миттєвих значень фазних напруг з частково послабленою складовою нульової послідовності, та створюють додатковий канал автоматичного регулювання зазначеним коефіцієнтом пропорційності за відхиленням, віднімаючи від його значення, розрахованого

відповідно до заданої стратегії керування, величину, пропорційну вимірній миттєвій потужності паралельного активного фільтра, що осереднена так само, як і в заданій стратегії керування, а інтервал осереднення миттєвих потужностей навантаження і паралельного активного фільтра та скалярного добутку зазначених векторів напруг приймають рівним періоду зміни потужності навантаження.

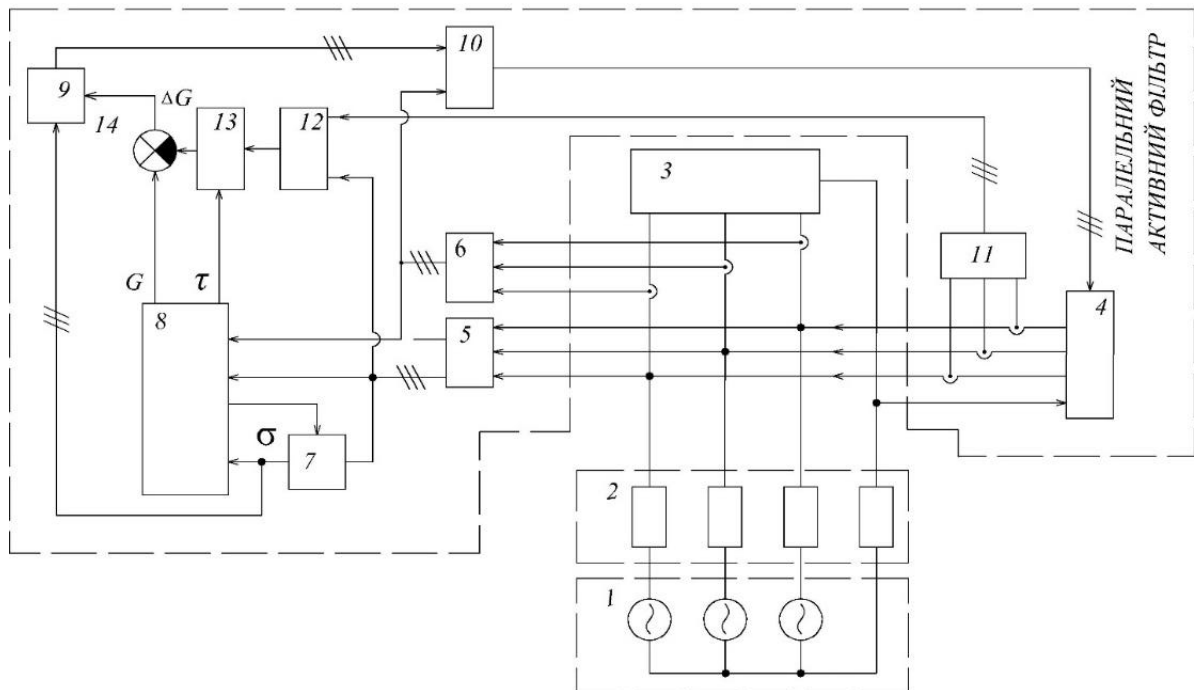


Рисунок 4.9 – Функціональна схема паралельного активного фільтра трифазної чотирипровідної мережі

Для реалізації заявленого способу трифазне джерело 1 через чотирипровідний кабель 2 з'єднане з навантаженням 3. ПАФ чотирипровідної трифазної мережі складається з силової частини 4, з'єднаної паралельно з трифазним навантаженням 3, та системи керування. Остання містить вимірювачі миттєвих значень фазних напруг 5 та струмів навантаження 6, формувач 7 різниці вектора миттєвих значень фазних напруг та його частково

послабленої складової нульової послідовності із зовнішнім входом установки величини коефіцієнта послаблення σ , що задає блок 8 вибору стратегії керування, на інших його виходах формуються розрахункові значення коефіцієнта пропорційності G та інтервал τ осереднення вимірюваних величин. Опорний вектор напруги з частково послабленої складової нульової послідовності з виходу формувача 7 подається на векторний вхід блоку 9 множення вектора на скаляр, з виходу якого розрахункове миттєве значення вектора струмів подається на один із входів блоку 10 векторного віднімання, на інший вхід якого поступає миттєве значення вектора струмів навантаження, а різниця цих векторів з виходу блоку 10 поступає як сигнал завдання на керуючі входи силовій частини фільтра 4. Канал автоматичного регулювання коефіцієнтом пропорційності за відхиленням утворюють вимірювач 11 миттєвих значень струмів фільтра, блок 12 скалярного множення векторів, з виходу якого миттєве значення потужності фільтра подається на блок 13 підсилення та осереднення, а з виходу останнього сигнал помилки ΔG подається на інвертуючий вхід суматора 14. Вихідний сигнал суматора є корегованим значенням коефіцієнта пропорційності, що поступає на скалярний вхід блоку множення 9.

Заявлений спосіб забезпечує підвищення точності та розширення можливостей керування активним фільтром чотирипровідної трифазної мережі, в якому в залежності від конкретних умов застосування обирається стратегія, оптимальна за певним показником якості.

4.4. Перспективи застосування ПАФ з накопичувачами енергії для вибору стратегії оптимізації розрахунків за спожиту електроенергію

Найбільші економічні перспективи відкриваються при використанні ПАФ в комбінації з сучасними НЕ [103], здатними акумулювати десятки

мегаватгодин електроенергії [104], оскільки з'являється можливість концентрувати добовий обсяг енергоспоживання з мережі на пільговий часовий інтервал двотарифної системи оплати. Метою даної роботи є виведення розрахункових співвідношень для втрат енергії і ємності НЕ та оцінювання перспектив економічної ефективності від застосування ПАФ та НЕ на прикладі трифазної чотирипровідної системи електропостачання гуртожитку №7 КНУТД.

На рис. 4.10 показана функціональна схема трифазного варіанту ПАФ з НЕ для чотирипровідної системи живлення, що відповідає поставленій меті. ПАФ складається з вихідних дроселів $L1...L3$, трифазного чотириплечового мостового інвертора, виконаного на повністю керованих вентилях з двосторонньою провідністю $S1 - S8$, та двоконденсаторного джерела реактивної енергії $C1, C2$ в ланці постійного струму [104]. Алгоритм роботи вентилів забезпечує позбавлення трифазного джерела від неактивних складових поточних струмів навантаження шляхом формування їх у вихідних дроселях інвертора [3]. Для цього оброблюється інформація, що надходить до СК від датчиків фазних напруг U_{ϕ} , струмів навантаження I_n та джерела $I_{дж}$. Наявність четвертого плеча інвертора дозволяє вирівнювання напруги на конденсаторах $C1, C2$, кожна з яких має перевищувати амплітуду фазної напруги мережі електропостачання.

Для обміну енергією з НЕ, представленого конденсатором C_n , в систему електропостачання включений ІППН, що містить два ключі з двосторонньою провідністю $Q1, Q2$ та дросель L_n . В режимі заряду НЕ ключ $Q2$ закритий, а на ключ $Q1$ подаються широтно-модульовані імпульси СК, в результаті чого ІППН працює як знижувальний перетворювач постійної напруги, передаючи енергію від конденсаторів $C1, C2$ до НЕ. В режимі розряду НЕ ключ $Q1$ закритий, а на ключ $Q2$ подаються широтно-модульовані імпульси СК, в результаті чого ІППН працює як підвищувальний перетворювач, передаючи енергію від НЕ до конденсаторів $C1, C2$. Напрямок перетоку енергії визначає прогнозна часова

залежність потужності споживання $Pn(t)$ протягом інтервалу часу τ , що значно перевищує період мережної напруги.

Розрахуємо максимальну електричну ємність накопичувача $C_{\max}$, за якої вся добова енергія постачається джерелом протягом інтервалу τ_2 пільгового тарифу (рис. 3.6, г), тобто відтермінованим є споживання максимального значення енергії $W_{\max} = P_0 \tau_1$, що припадає на інтервал τ_1 дії підвищеного тарифу.

Величина ємності накопичувача $C_{\max}$ розраховується з рівняння балансу енергій для випадку, що розглядається

$$W_{\max} = C_{\max} (U_2^2 - U_1^2) / 2, \quad (4.33)$$

звідки, прийнявши середнє значення напруги конденсатора накопичувача $U_0 = (U_1 + U_2) / 2 = 800 \text{ В}$ та величину пульсацій $U_2 - U_1 = 0,1 U_0$, отримаємо вираз для максимального номіналу ємності

$$C_{\max} = \frac{W_{\max}}{0,1 \times U_0^2} = \frac{\tau_1 (P_1 + P_2)}{2 \times 0,1 \times U_0^2} = \frac{5 \times 16 \times 3600 \times (25 + 75) \times 10^3}{800^2} = 45 \times 10^3 \text{ Ф}. \quad (4.34)$$

Таким чином, при прийнятих формі графіку енергоспоживання, напрузі та пульсаціях НЕ задана мета споживання енергії під час дії пільгового тарифу супроводжується необхідністю встановлення суперконденсатора ємністю 1 Ф на кожний ват середньодобового споживання.

Знайдемо мінімальне доцільне значення конденсатора накопичувача $C_{\min}$, за якої внаслідок відтермінованого мінімального енергоспоживання $W_{\min}$ протягом дії пільгового тарифу (рис. 3.6, в) зрівняються платежі за обома системами розрахунку

$$\Pi_{2C_{\min}} = (P_0 \tau_1 - W_{\min}) k_1 \Pi_0 + (P_0 \tau_2 + W_{\min}) k_2 \Pi_0 = (\tau_1 + \tau_2) P_0 \Pi_0 = \Pi_1,$$

звідки після перетворень

$$W_{\min} = P_0 \frac{(\tau_1 k_1 + \tau_2 k_2) - (\tau_1 + \tau_2)}{k_1 - k_2} = P_0 \frac{24,4 - 24}{1,35 - 0,35} = 0,4 P_0. \quad (4.35)$$



Рисунок 4.10 – Структурна схема фільтраційної системи з додатковою системою накопичення енергії та системою управління та регулювання

Оскільки величина ємності конденсатора лінійно залежить від величини накопиченої енергії відповідно до формули (4.33)

$$C_{\min} = C_{\max} \frac{\Delta W_{\min}}{\Delta W_{\max}} = C_{\max} \frac{0.4P_0}{\tau_1 P_0} = \frac{C_{\max}}{40} = 1,125 \times 10^3 \Phi. \quad (4.36)$$

4.5 Висновки до розділу 4

1. Встановлено, що запропоновані формули повної потужності трифазної системи електроживлення повністю еквівалентні викладеній у європейському стандарті [87] при виборі в схемі для розрахунку еквівалентної фазної напруги $R_Y = r_N; R_\Delta = r$. Співвідношення еквівалентності (4.5) усуває невизначеність коефіцієнта ξ в зазначеному європейському стандарті. Отримано аналітичну умову (4.16) доцільності застосування ПАФ за показником економії

електроенергії, що накладає обмеження на вибір елементної бази та частоту комутації силового інвертора ПАФ.

2. Запропоновано вдосконалений спосіб керування паралельним активним фільтром трифазної чотирипровідної системи електроспоживання, який відрізняється збільшенням інтервалу осереднення потужності навантаження та напруг живлення в значенні коефіцієнта пропорційності за формулою (4.7). Заявлений спосіб [9] забезпечує підвищення точності та розширення можливостей керування активним фільтром чотирипровідної трифазної мережі, в якому в залежності від конкретних умов застосування обирається стратегія, оптимальна за певним показником якості.

3. Запропоновано оцінювати енергозберігаючий ефект від застосування паралельних активних фільтрів в системах електропостачання величиною коефіцієнта виграшу за потужністю втрат, для якого виведена розрахункова формула (4.23) при зазначеному законі керування.

4. 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 (4.24), яка названа коефіцієнтом нерівномірності споживання енергії. Отримані значення коефіцієнта нерівномірності споживання енергії для типових графіків зміни активної потужності.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено науково-прикладне завдання подальшого розвитку теоретико-методичних положень і практичних рекомендацій щодо підвищення енергоефективності систем електрозабезпечення закладів вищої освіти, які ґрунтується на удосконаленні наявних і розробці нових моделей управлінських та технічних рішень шляхом оцінювання рівнів електроспоживання на основі моніторингу. Результати наукового дослідження, одержані в дисертаційній роботі, дозволяють зробити такі висновки:

1. За результатами аналізу нормативно-правового забезпечення процесів енергоспоживання виокремлено елементи, які визначають вимоги до управління енергоефективністю у закладах вищої освіти на основі науково-методичного та інформаційно-технічного забезпечення під час здійснення освітнього, науково-дослідного та виховного процесів, спрямованого на зменшення електроспоживання. Обґрунтовані складові управління електроспоживанням в інфраструктурі ЗВО та сформульовані принципи управління енергоефективністю електротехнічних комплексів з використанням сучасних технічних засобів та систем моніторингу.

2. Одержані базові та розширені регресійні моделі процесів електроспоживання у будівлях ЗВО. У якості значень характерних змінних обрано середньомісячні значення спожитої електроенергії, а для ідентифікації змінних (регресорів) обрано середній рівень завантаженості аудиторного фонду (для навчальних корпусів) та середню кількість проживаючих (для гуртожитків) за місяцями року і середньомісячну температуру зовнішнього середовища (модель першого типу, що дозволило встановити існування окремих періодів з підвищеними рівнями електроспоживання).

3. На основі використання ймовірнісних характеристик моделей електроспоживання запропоновано введення розширених регресійних моделей, які додатково включають в себе так звані фіктивні змінні (відображають деякі особливості організації освітнього процесу), додатні значення яких вказують на наявність періоду з підвищеними рівнями електроспоживання. Чисельна реалізація моделей електроспоживання показала суттєве зростання узгодженості результатів моделювання з реальними даними у випадку наявності періодів підвищеного споживання електроенергії, що дало змогу виконати прогнозне оцінювання рівнів електроспоживання і перевірити їх достовірність.

4. Реалізація моделей виконувалася шляхом перебору варіантів з визначенням основних статистичних характеристик множинного коефіцієнту кореляції, статистики Фішера і стандартних помилок регресійної оцінки відповідно та компактності розкиду регресійних залишків за допомогою діаграм *box-and-whisker plot* і відповідності залишків моделей нормальному розподілу імовірностей. Аналіз результатів моделювання показав доцільність побудови моделей регресії окремо для будівель, що мають різні за порядком загальні приведені площі: від 20 до 40 тис. м² (об'єкти типу 1), від 10 до 20 тис. м² (об'єкти типу 2) і до 10 тис. м² (об'єкти типу 3). Встановлені значимі пояснюючі змінні регресійних моделей, що відповідають зазначеним різним типам будівель.

5. Запропоновано вдосконалений спосіб керування струмами джерела трифазної чотирипровідної системи електропостачання паралельним активним фільтром, який відрізняється збільшенням інтервалу осереднення потужності навантаження та напруг живлення, що дозволяє майже вдвічі зменшити втрати в залежності від форми зміни графіку активної потужності навантаження.

6. За відомими значеннями активних та реактивних потужностей окремих фаз отримані нові аналітичні вирази для складової повної потужності трифазної чотирипровідної системи електроживлення, що зумовлена

основною гармонікою струму нейтралі, та складової потужності спотворення, які використані при розробленні методики визначення складових додаткових витрат електричної енергії в електротехнічних комплексах інфраструктури ЗВО.

7. На основі одержаних аналітичних виразів розраховані коефіцієнти виграшу за енергією втрат для стаціонарного та періодично змінюваного навантаження, які покладені в основу методики визначення умов доцільності застосування паралельних активних фільтрів для зменшення втрат електроенергії в системі електроспоживання ЗВО. На основі моніторингу параметрів споживання електроенергії доведено, що використання паралельних активних фільтрів дозволить зменшити втрати у електротехнічних комплексах інфраструктури ЗВО на 8-15 %.

8. Як показали дослідження, процеси споживання електроенергії у навчальних корпусах та гуртожитках мають суттєві відмінності, які обумовлені сезонністю, наявністю особливих періодів освітнього процесу, класом енергоефективності будівель, кількості проживаючих, використанням електроенергії для догрівання та рівнів завантаженості аудиторних приміщень. Встановлені закономірності рівнів електроспоживання ЗВО дозволяють побудувати статистично-математичні моделі прогнозування питомого електроспоживання, визначати граничні межі електроспоживання та втрати електроенергії у електротехнічних комплексах схожих за енерготехнологічними ознаками об'єктів та на їх основі формувати управлінські рішення в системі енергоменеджменту шляхом використання базових рівнів споживання та їх порівняння з прогнозним оцінюванням у певній часовій перспективі (місячній, квартальній, сезонній, річній).

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-правовое регулирование 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 политех. 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 «ХПИ»*, 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,» *Проблемы, перспективы і нормативно-правовое 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. Анфилов, 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. Нояб. 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_sovmes_timost_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. Хилук, *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,» *Przegląd 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, «Мощь czynna, bierna i pozorna ukladu 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.Watanable, 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.

ДОДАТКИ

Додаток А

Результати впровадження дисертаційного дослідження

ЗАТВЕРДЖУЮ

Перший проректор Національного
університету біоресурсів та
природокористування України,
академік НААН України



батулін І.І.

_____ 2020 р.

АКТ

Впровадження результатів дисертаційної роботи Бобровника В.М. на тему
**«Управління електроспоживанням закладів вищої освіти для підвищення
їх енергоефективності»,**

поданої на здобуття вченого ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю
05.09.03 «Електротехнічні комплекси та системи»

Даним актом підтверджується, що спосіб керування струмами джерела трифазної чотирипровідної системи електропостачання паралельним активним фільтром, який відрізняється збільшенням інтервалу осереднення потужності навантаження та напруг живлення, що дозволяє майже вдвічі зменшити втрати в залежності від форми зміни графіку активної потужності навантаження впроваджений у базові дисципліни підготовки студентів за спеціальністю 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

За відомими значеннями активних та реактивних потужностей окремих фаз отримані нові аналітичні вирази для складової повної потужності трифазної чотирипровідної системи електроживлення, що зумовлена основною гармонікою струму нейтралі, та складової потужності спотворення, які використані Центром енергоменеджменту Навчально-науково інституту енергетики, автоматики і енергозбереження при розробленні Методики визначення складових додаткових витрат електричної енергії в електротехнічних комплексах університету.

Заступник директора ННІ енергетики,
автоматики і енергозбереження
НУБіП України, к.т.н.

О.І. Романенко

ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з наукової та інноваційної
діяльності КНУТД

д.е.н., проф. Ганущак-Єфіменко Л. М.

Вихідний № _____

від « _____ » _____ 2020р.

АКТ

про використання результатів дисертаційної роботи

Бобровник В. М.

у навчальному процесі Київського національного університету
технологій та дизайну

Ми, що нижче підписалися, директор Інституту інженерії та інформаційних технологій Київського національного університету технологій та дизайну д.т.н., професор Панасюк І.В., завідувач кафедри комп'ютерної інженерії та електромеханіки д.т.н., професор Злотенко Б.М., к.т.н., доц. Стаценко В.В., склали Акт впровадження результатів дисертаційної роботи асистента кафедри комп'ютерної інженерії та електромеханіки Бобровника В. М. «Управління електроспоживанням закладів вищої освіти для підвищення їх енергоефективності», а саме:

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».

Директор ІІТ

д.т.н., проф. Панасюк І.В.

Завідувач кафедри КІЕМ

д.т.н., проф. Злотенко Б.М.

Доцент кафедри КІЕМ

к.т.н., доц. Стаценко В.В.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Технічний директор

ТОВ НВП «Техносервіспривід», к.т.н.



Мисак Т.В.

« ____ »

2020р.

АКТ

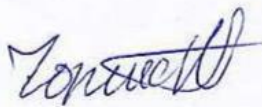
Впровадження результатів дисертаційної роботи Бобровника В.М. на тему **Управління електроспоживанням закладів вищої освіти для підвищення їх енергоефективності**, поданої на здобуття вченого ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.03 «Електротехнічні комплекси та системи»

Даним актом підтверджується, що принципи побудови системи управління паралельним активним фільтром трифазної чотирипровідної системи живлення, які розроблені в дисертаційній роботі асистента кафедри комп'ютерної інженерії та електромеханіки Інституту інженерії та інформаційних технологій Київського національного університету технологій та дизайну Бобровника В.М., прийняті до впровадження ТОВ НВП «Техносервіспривід» та використані при проектуванні системи керування паралельним активним фільтром трифазної чотирипровідної системи живлення встановленою потужністю 100 кВА.

Паралельні активні фільтри з розробленою системою керування забезпечують задовільні показники якості напруги та струму в точках під'єднання та дозволяють підвищити енергетичну ефективність системи живлення в цілому.

Провідний фахівець

ТОВ НВП «Техносервіспривід», к.т.н.



Чопик В.В.

Додаток Б

Акт проведення моніторингу енергоспоживання гуртожитку №7, КНУТД



Акт
проведення моніторингу енергоспоживання
гуртожитку №7, КНУТД

Об'єкт: Студентський гуртожиток №7, вул. Лейпцизька, 16, Київ, 02000

Засоби вимірювання: Аналізатор якості електричної енергії С.А 8335 QUALISTAR PLUS, Автоматизована система комерційного обліку електричної енергії Київського національного університету технологій та дизайну.

Початок: 19.06.2017 13.41.00

Хід: AAA1906

Вид з'єднання: 3-фази 5-проводів

Дата	Час	V1 RMS		A1 RMS	A2 RMS	A3 RMS	AN RMS		W Підсумок	PF Середнє
		V		A	A	A	A	I2K	W	
19.06.2017	13:41:00	225	50670	87,9	83,3	76,7	14,7	20764,28	49134,7	0,87
19.06.2017	13:57:00	226	51121,2	82,8	97,8	88	19,7	24552,77	55061,46	0,898
19.06.2017	14:13:00	225	50760,1	90,7	111	83,4	27,8	28275,89	58542,3	0,898
19.06.2017	14:29:00	226	51166,4	84,4	94,6	77,4	21,8	22538,52	53046,97	0,905
19.06.2017	14:45:00	223	49550,8	105	94,8	65,9	34,9	25572,86	54465,95	0,893
19.06.2017	15:01:00	226	51166,4	85,9	92,4	84,2	16,7	23285,1	53696,29	0,897
19.06.2017	15:17:00	229	52349,4	82,3	89	100	24,1	25315,14	53996,51	0,871
19.06.2017	15:33:00	228	51892,8	91,9	81,9	95,2	21,3	24669,95	53046,34	0,862
19.06.2017	15:49:00	229	52303,7	72,6	87,4	85,2	20	20568,56	48662,78	0,868
19.06.2017	16:05:00	228	51938,4	76,8	90,8	77,3	20,1	20522,18	48342,38	0,859
19.06.2017	16:21:00	230	52716,2	78,6	93,1	83,6	21,1	22279,74	52420,6	0,894
19.06.2017	16:37:00	228	52166,6	86,4	74,6	82,3	16	20059,41	48542,73	0,866
19.06.2017	16:53:00	231	53222,5	89,1	85,7	90,5	16,5	23745,8	54109,31	0,881
19.06.2017	17:09:00	233	54289	81,9	87,1	108	32,7	26984,15	56246,84	0,878
19.06.2017	17:25:00	232	53592,3	81,6	101	104	24,1	28236,82	59168,09	0,892
19.06.2017	17:41:00	230	52808	90,2	99,9	88,5	19,3	26320,79	55998,97	0,868
19.06.2017	17:57:00	231	53314,8	86	98,5	92,8	16,9	25995,7	56059,63	0,872
19.06.2017	18:13:00	231	53546	97,2	83,2	96,1	19,3	25977,78	55682,91	0,866
19.06.2017	18:29:00	232	53870,4	96	88,3	97,9	18,7	26946,99	58114,2	0,884
19.06.2017	18:45:00	232	53963,3	99,5	98,8	101	17,9	30142,74	61733,88	0,886
19.06.2017	19:01:00	233	54242,4	89,2	111	95,5	30,3	30271,62	61644,77	0,891
19.06.2017	19:17:00	232	53684,9	83	110	113	31,9	32641,41	63170,99	0,892
19.06.2017	19:33:00	233	54382,2	89,5	109	133	30,3	38326,79	68947,49	0,898
19.06.2017	19:49:00	232	54009,8	106	103	114	19,1	35179,14	67032,87	0,892
19.06.2017	20:05:00	237	56311,3	90,6	105	146	52,3	43226,29	70603,35	0,883
19.06.2017	20:21:00	233	54289	107	102	128	25	38956,08	71630,66	0,913
19.06.2017	20:37:00	232	53777,6	99,3	130	118	27,9	41481,83	72923,76	0,902
19.06.2017	20:53:00	234	54849,6	100	120	128	28,6	41462,39	72798,58	0,902
19.06.2017	21:09:00	233	54102,8	109	132	123	33,5	45375,67	77077,03	0,911
19.06.2017	21:25:00	231	53130,3	101	120	119	24,2	39215,58	71080	0,911
19.06.2017	21:41:00	232	53916,8	98,4	115	121	28,9	38340,37	69072,89	0,896
19.06.2017	21:57:00	232	53916,8	115	120	139	30,7	47942,43	78067,49	0,906
19.06.2017	22:13:00	232	53638,6	99,4	125	120	31,7	40986,42	71611,59	0,897
19.06.2017	22:29:00	233	54195,8	114	124	141	24,2	48854,73	80333,78	0,915
19.06.2017	22:45:00	233	54195,8	99,5	101	114	19,2	33365,14	65068,29	0,891
19.06.2017	23:01:00	232	53870,4	87,1	103	95	25,3	27757,75	56701,83	0,856
19.06.2017	23:17:00	234	54569	84	89,1	94,7	18,4	24301,46	51773,47	0,828
19.06.2017	23:33:00	231	53453,4	75,2	91,2	85,9	23,1	21884,9	48626,88	0,836
19.06.2017	23:49:00	232	53592,3	76,5	88,3	86,3	20,4	21512,99	47122,47	0,812
20.06.2017	0:05:00	234	54569	75,7	76,6	92,3	24,2	20702,98	48293,03	0,848
20.06.2017	0:21:00	233	54475,6	67,2	76,7	86,3	20,7	18274,91	45759,32	0,854
20.06.2017	0:37:00	233	54195,8	66,4	63,1	68,9	14,1	13336,59	38327,33	0,828
20.06.2017	0:53:00	234	54662,4	65,7	69,5	76,2	18,6	15299,14	39163,75	0,794
20.06.2017	1:09:00	233	54475,6	68,2	68,3	67,9	16,1	14185,75	38289,2	0,803
20.06.2017	1:25:00	234	54615,7	65	65,4	68,6	14,9	13430,13	36956,08	0,794
20.06.2017	1:41:00	233	54382,2	70,6	61,5	71,7	11,8	14046,74	37481,4	0,786
20.06.2017	1:57:00	231	53499,7	62,2	61,6	70,9	15,4	12927,37	35606,73	0,79

20.06.2017	2:13:00	232	53916,8	59,3	60,7	64,1	14	11505,79	34056,04	0,796
20.06.2017	2:29:00	233	54102,8	62	58,6	67,1	15,2	12011,41	34894,05	0,799
20.06.2017	2:45:00	234	54522,3	52	62,2	61,5	20,6	10779,45	31881,93	0,782
20.06.2017	3:01:00	233	54335,6	60,1	56,5	69,5	18,6	11980,47	34734,33	0,799
20.06.2017	3:17:00	232	53870,4	60,7	59,9	57,1	12,7	10694,2	32083,83	0,777
20.06.2017	3:33:00	234	54615,7	51,4	52,9	63,2	18,7	9784,3	30627,7	0,781
20.06.2017	3:49:00	234	54615,7	56,7	58,2	71,7	20,2	12151,06	33327,32	0,763
20.06.2017	4:05:00	233	54428,9	59,6	57,7	65,1	14,4	11326,82	32342,29	0,758
20.06.2017	4:21:00	231	53546	58	55,9	52,9	8,6	9361,18	29841,68	0,768
20.06.2017	4:37:00	232	53592,3	55,5	50,4	59,1	4,6	9134,38	28938,7	0,754
20.06.2017	4:53:00	232	53638,6	57,6	56,9	60,1	0	10167,38	30830,76	0,759
20.06.2017	5:09:00	232	53592,3	59,2	50,7	67,8	14,2	10873,61	33291,84	0,804
20.06.2017	5:25:00	230	52854	63,7	59,6	62,4	11,7	11640,5	34237,44	0,799
20.06.2017	5:41:00	230	52762,1	58,1	60,4	67,3	17,6	11862,82	35159,08	0,819
20.06.2017	5:57:00	229	52486,8	54,6	50,4	63,4	15,8	9790,52	31773,98	0,819
20.06.2017	6:13:00	228	51938,4	63,8	66,3	78,4	14,1	14811,5	40573,57	0,851
20.06.2017	6:29:00	229	52349,4	58,9	63,7	89	29,7	16329,99	41283	0,853
20.06.2017	6:45:00	225	50715	62,5	75,3	68,8	19,9	14705,79	40603,48	0,872
20.06.2017	7:01:00	228	51847,3	63,5	82,8	86,1	25,7	18961,79	45922,62	0,865
20.06.2017	7:17:00	224	50265,6	73,8	89,2	81,5	24,2	20630,97	47898,22	0,873
20.06.2017	7:33:00	226	51166,4	71,5	80,6	88,9	21,7	19982,71	47659,12	0,876
20.06.2017	7:49:00	225	50445,2	62,3	78	78,6	20,6	16567,61	42518,96	0,863
20.06.2017	8:05:00	228	51892,8	73,7	71,9	90,6	22,8	19329,5	47029,04	0,874
20.06.2017	8:21:00	226	51166,4	81,6	87,3	77	16,2	20471,29	47868	0,856
20.06.2017	8:37:00	230	52992	67,6	72,6	98,8	36	20897,96	47224,73	0,862
20.06.2017	8:53:00	228	51756,3	70,4	75,3	86,6	19,4	18502,17	44588,05	0,843
20.06.2017	9:09:00	228	52075,2	73,6	68,4	96	26,2	19997,96	47657,19	0,877
20.06.2017	9:25:00	225	50715	75,1	89,2	97,6	27,6	23884,17	51563,32	0,874
20.06.2017	9:41:00	227	51710,8	77,3	90,6	85,8	21	21986,29	51186,61	0,883
20.06.2017	9:57:00	226	51076	82	89,9	77,9	19,3	21246,91	49113,12	0,859
20.06.2017	10:13:00	229	52395,2	77,2	75,6	82,7	17,9	18834,9	45383,08	0,841
20.06.2017	10:29:00	228	52120,9	72,8	71,7	73	15,6	16013,09	41020,54	0,823
20.06.2017	10:45:00	230	52762,1	73	85,5	80,8	26,3	19859,58	46855,16	0,849
20.06.2017	11:01:00	230	53084,2	76,7	83,2	88,2	17,9	20904,78	49975,33	0,873
20.06.2017	11:17:00	231	53314,8	80,6	86,8	99,3	20,1	24295,1	53991,49	0,877
20.06.2017	11:33:00	231	53314,8	85,4	97,1	109	24	29069,82	59765,95	0,891
20.06.2017	11:49:00	230	52762,1	82,3	89,1	92,8	17,5	23630,19	52851,35	0,87
20.06.2017	12:05:00	230	52946	88	68,6	101	28,9	23425,66	51121,22	0,86
20.06.2017	12:21:00	230	52854	76,6	75,5	95,3	24	21225,9	49672,64	0,874
20.06.2017	12:37:00	226	50895,4	105	92,7	81,9	16,6	26601,46	57170,63	0,893
20.06.2017	12:53:00	228	51984	92,3	84,4	94	15,5	24718,9	54358,3	0,877
20.06.2017	13:09:00	227	51619,8	88,9	81,8	93,4	17,5	23624,26	52575,73	0,873
20.06.2017	13:25:00	229	52624,4	78,4	84,6	103	27,4	24725,37	53380,25	0,877
20.06.2017	13:41:00	228	51938,4	99,7	85,3	112	26,4	30524,43	61036,01	0,9
20.06.2017	13:57:00	226	51257	88,3	117	94,3	30,5	31261,87	61975,98	0,908
20.06.2017	14:13:00	229	52258	84,3	98	106	17,8	28284,54	58049,8	0,882
20.06.2017	14:29:00	228	52029,6	89,8	89,5	104	18,8	27243,73	58251,3	0,9
20.06.2017	14:45:00	227	51392,9	94,4	105	103	17,4	30784,61	63020,22	0,916
20.06.2017	15:01:00	229	52624,4	89	101	117	29,7	32743,19	63756,45	0,911
20.06.2017	15:17:00	227	51619,8	96,5	102	99,2	17,4	29778,21	61877,66	0,91

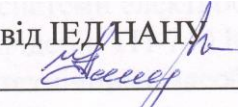
20.06.2017	15:33:00	227	51483,6	96,6	97,1	98,2	15,2	28634,25	60461,47	0,906
20.06.2017	15:49:00	227	51710,8	96,7	82,6	93,6	18,8	25288,05	55239,83	0,883
20.06.2017	16:05:00	229	52486,8	90	85	93,9	21,7	24613,1	54702,84	0,886
20.06.2017	16:21:00	230	52762,1	85,3	84,3	92,7	19,4	23352,23	52807,59	0,875
20.06.2017	16:37:00	231	53314,8	87,2	76,6	97,8	22,3	23533,53	53938,57	0,891
20.06.2017	16:53:00	232	54009,8	87,6	94,8	103	16,4	27538,76	59421,18	0,895
20.06.2017	17:09:00	232	53870,4	93,6	96,4	93,6	14,3	27019,37	59457,27	0,896
20.06.2017	17:25:00	228	52075,2	98	108	96,1	16,9	30853,71	63066,07	0,905
20.06.2017	17:41:00	233	54056,3	91,2	93	106	16,9	28530,49	60535,49	0,895
20.06.2017	17:57:00	232	53731,2	93,1	91,9	85,8	15,8	24724,5	56060,71	0,887
20.06.2017	18:13:00	232	53684,9	103	100	97,7	13,9	30305,3	61998,75	0,883
20.06.2017	18:29:00	232	53777,6	98,5	80,4	115	32,5	30516,75	59429,92	0,87
20.06.2017	18:45:00	230	53038,1	92,1	90,6	107	18,7	28468,07	60345,37	0,902
20.06.2017	19:01:00	229	52578,5	93,3	94,5	92,7	16,4	26497,39	57810,82	0,889
20.06.2017	19:17:00	230	53038,1	104	115	113	16,3	37136,06	71400,29	0,927
20.06.2017	19:33:00	233	54102,8	113	94,7	122	25,2	37331,3	68676,74	0,894
20.06.2017	19:49:00	231	53499,7	114	120	119	16,3	41633,73	73889,8	0,902
20.06.2017	20:05:00	233	54382,2	112	104	131	24	41027,18	73331,62	0,908
20.06.2017	20:21:00	231	53546	111	100	113	17,7	35597,58	67945,73	0,899
20.06.2017	20:37:00	233	54289	115	96,7	125	23,3	38764,83	70532,89	0,898
20.06.2017	20:53:00	235	54990,3	101	95,7	124	29,9	35578,39	66233,25	0,886
20.06.2017	21:09:00	234	54709,2	119	112	144	26,6	48100,81	78194,43	0,898
20.06.2017	21:25:00	233	54056,3	109	139	121	28,4	46809,36	78046,07	0,907
20.06.2017	21:41:00	233	54289	109	115	140	35,3	45971,62	76379,62	0,91
20.06.2017	21:57:00	232	53731,2	115	112	133	23,7	44063,99	76041,21	0,914
20.06.2017	22:13:00	233	54195,8	101	103	126	23,6	37111,5	68726,12	0,9
20.06.2017	22:29:00	233	54149,3	93,6	115	120	31,1	37210,43	69322,35	0,908
20.06.2017	22:45:00	234	54943,4	92,4	98,1	127	30,9	35143,74	64320,43	0,872
20.06.2017	23:01:00	233	54056,3	92,5	97,7	88,7	16,7	26248,12	56609,32	0,871
20.06.2017	23:17:00	232	53638,6	86,6	90,3	92,6	18,7	24578,1	51315,86	0,822
20.06.2017	23:33:00	232	53638,6	81,4	74,7	83,2	14,8	19347,33	45957,44	0,825
20.06.2017	23:49:00	233	54149,3	88	85,2	93	15,4	23889,2	50938,46	0,821
21.06.2017	0:05:00	233	54382,2	78,9	87,3	85	21,9	21551,11	46573,81	0,795
21.06.2017	0:21:00	229	52303,7	75,1	77,4	76,2	14	17633,21	43268,99	0,821
21.06.2017	0:37:00	232	53731,2	72,1	71,3	71,1	12	15481,31	39790,81	0,798
21.06.2017	0:53:00	233	54102,8	69,6	77,3	76,3	15,8	16890,78	38950,07	0,749
21.06.2017	1:09:00	233	54056,3	68,1	67,8	66,2	13	13785,89	35360,96	0,75
21.06.2017	1:25:00	233	54289	63,6	67	67,1	12,9	13202,78	34028,81	0,737
21.06.2017	1:41:00	233	54335,6	66	66,3	66,3	11	13268,38	33864,68	0,73
21.06.2017	1:57:00	235	55037,2	60,3	69,1	69,9	15,7	13543,4	34171,17	0,733
21.06.2017	2:13:00	231	53176,4	65,9	69,7	55,7	14,5	12513,64	32312,12	0,731
21.06.2017	2:29:00	231	53222,5	65	61,8	56,1	11,6	11326,01	30923,51	0,729
21.06.2017	2:45:00	232	53638,6	58,5	53,7	59,3	2,3	9827,72	28956,04	0,726
21.06.2017	3:01:00	231	53499,7	63,3	64,6	60,2	0,3	11804,18	30555,64	0,701
21.06.2017	3:17:00	232	53638,6	63,5	61,7	61,1	0	11572,35	30583,88	0,707
21.06.2017	3:33:00	231	53453,4	60,4	52,6	60,3	0,3	10051,1	28373,13	0,703
21.06.2017	3:49:00	232	53777,6	54,6	51,8	58,6	1	9099,36	26890,77	0,698
21.06.2017	4:05:00	232	53684,9	55,8	57,8	54,1	2,6	9388,05	27174,5	0,697
21.06.2017	4:21:00	232	53638,6	55,5	55,2	54,1	0	9054,1	26810,78	0,699
21.06.2017	4:37:00	232	53963,3	55,7	52,1	66,5	14,5	10449,4	28666,8	0,704

21.06.2017	4:53:00	231	53546	55,3	57,3	55,6	0	9432,74	27378,25	0,7
21.06.2017	5:09:00	231	53268,6	74,1	65,9	75,4	16,2	15781,22	39987,31	0,801
21.06.2017	5:25:00	229	52441	77,4	64,7	67,9	4,1	14804,07	39006,21	0,803
21.06.2017	5:41:00	228	51938,4	80,1	55,8	69,1	19	14665,46	39187,69	0,825
21.06.2017	5:57:00	229	52303,7	75,4	60,4	78,9	21,2	16007,97	41140,97	0,832
21.06.2017	6:13:00	227	51483,6	78,4	71,2	76,4	8,1	17118,57	42893,42	0,831
21.06.2017	6:29:00	227	51438,2	79,9	80,9	88	14,2	20874,46	49958,7	0,884
21.06.2017	6:45:00	224	50355,4	92,7	60,2	91,5	26,7	21302,47	47605,15	0,857
21.06.2017	7:01:00	229	52578,5	60,9	68,6	84,5	26	16231,02	40368,66	0,822
21.06.2017	7:17:00	226	51076	68	67,9	75,8	13,8	15170,49	39355,63	0,82
21.06.2017	7:33:00	224	49997	62,1	73,3	69,2	18,1	14345,55	38010,55	0,822
21.06.2017	7:49:00	228	51892,8	64,5	68,4	77	19,7	15155,9	39309,26	0,821
21.06.2017	8:05:00	226	51076	68,9	64,8	79,5	18,2	15597,74	39508,09	0,817
21.06.2017	8:21:00	226	50985,6	68,9	69,4	76,6	13,9	15624,34	41796,59	0,857
21.06.2017	8:37:00	225	50805,2	69,1	59,1	70,7	15,5	13506,36	37133,38	0,823
21.06.2017	8:53:00	228	51756,3	70	54,2	92,2	30,8	17287,12	41195,43	0,831
21.06.2017	9:09:00	226	50895,4	62,4	69,8	71,3	18,3	14184,38	38794,67	0,844
21.06.2017	9:25:00	228	52075,2	63,4	86,5	87,9	26,5	19930,47	46145,33	0,845
21.06.2017	9:41:00	230	52716,2	67,7	75,8	95,4	30,2	20342,13	47227,31	0,866
21.06.2017	9:57:00	228	51847,3	69	63,5	81,7	20,3	15880,23	41625,52	0,85
21.06.2017	10:13:00	227	51574,4	79,2	64,5	96,5	20,7	20173,63	46847,16	0,855
21.06.2017	10:29:00	227	51574,4	95,3	77,4	99,1	24,7	25503,75	54194,02	0,873
21.06.2017	10:45:00	226	50940,5	92,8	100	83,1	15,7	25783,95	56588,08	0,897
21.06.2017	11:01:00	225	50805,2	97,9	90,9	82,8	15	24928,06	54870,87	0,885
21.06.2017	11:17:00	224	50355,4	98,6	137	84,3	44,4	37596,22	67617,97	0,924
21.06.2017	11:33:00	225	50715	97,1	118	90,5	33,4	32729,11	63899,62	0,914
21.06.2017	11:49:00	225	50535	99,7	102	91,2	19,8	28951,82	61601,58	0,922
21.06.2017	12:05:00	227	51347,6	90,1	77,7	88,5	17,5	22293,8	52655,3	0,9
21.06.2017	12:21:00	226	50985,6	84,1	99,4	88,8	17,4	25141,37	56276,7	0,908
21.06.2017	12:37:00	226	50940,5	79,3	101	78,8	20,3	23010,27	53063,65	0,898
21.06.2017	12:53:00	226	51257	65,5	109	69,6	40,5	22612,1	49852,05	0,886
21.06.2017	13:09:00	226	51076	73,2	80,9	75,3	16,9	17858,75	46534,28	0,888
21.06.2017	13:25:00	225	50490,1	88,7	108	87,2	24,9	27755,54	59039,28	0,915
21.06.2017	13:41:00	224	50355,4	91,5	96,9	64,5	22,1	22410,52	51796,56	0,899
21.06.2017	13:57:00	224	50086,4	96,5	84,6	68	21,3	21547,1	51112,81	0,902
21.06.2017	14:13:00	227	51574,4	80,3	69,2	82,3	19,6	18394,18	47972,09	0,905
21.06.2017	14:29:00	230	52946	79,9	85,4	114	32,6	27781,57	58172,11	0,913
21.06.2017	14:45:00	228	52120,9	71,1	89	93,9	25	22418,42	52572,82	0,906
21.06.2017	15:01:00	230	52900	68,6	84,5	94,3	32,7	21807,99	51110,65	0,9
21.06.2017	15:17:00	230	52854	87	89	95,7	21,2	25097,93	57828,22	0,926
21.06.2017	15:33:00	229	52349,4	95	76,3	98,4	21,1	24974,46	56137,43	0,905
21.06.2017	15:49:00	229	52349,4	84,1	92,1	90,3	18,8	24062,75	56208,58	0,918
21.06.2017	16:05:00	229	52303,7	73,5	102	87,3	25,3	24006,52	54339,52	0,899
21.06.2017	16:21:00	229	52624,4	86,7	91,6	96,7	15,5	25498,59	57672,92	0,911
21.06.2017	16:37:00	232	53592,3	73,3	101	98,2	29,4	26121,93	55775,56	0,882
21.06.2017	16:53:00	231	53407,2	76,8	102	94,3	31,6	26152,53	55218,82	0,872
21.06.2017	17:09:00	231	53499,7	84	92,7	93,5	20,2	24799,58	57050,18	0,911
21.06.2017	17:25:00	234	54522,3	77,4	91,9	99,1	25,2	24892,22	56176,83	0,898
21.06.2017	17:41:00	232	53916,8	85,1	96,6	103	19	27543,57	59453,56	0,895
21.06.2017	17:57:00	234	54709,2	86,1	92,3	109	23,6	28348,67	60673,67	0,904

21.06.2017	18:13:00	234	54896,5	74,7	109	94,5	34,7	27682,79	58472,18	0,893
21.06.2017	18:29:00	230	52854	78,2	117	88,1	41,5	29288,1	59387,12	0,905
21.06.2017	18:45:00	233	54242,4	75	102	108	38,2	29112,74	59353,16	0,895
21.06.2017	19:01:00	230	52992	94,1	111	106	23,6	32858,02	65182,29	0,908
21.06.2017	19:17:00	228	51756,3	116	118	103	22,9	38537,02	72367,51	0,928
21.06.2017	19:33:00	230	53038,1	110	134	112	25,6	43144,69	76435,07	0,926
21.06.2017	19:49:00	231	53361	111	130	114	23	42737,26	76458,03	0,928
21.06.2017	20:05:00	232	53731,2	105	114	121	19	38965,34	72513,24	0,92
21.06.2017	20:21:00	230	52762,1	124	105	114	23,3	39806,63	73477,97	0,924
21.06.2017	20:37:00	233	54382,2	113	114	131	24,8	43643,38	76454,22	0,919
21.06.2017	20:53:00	234	54802,8	100	108	124	30,1	37970,98	68993,7	0,894
21.06.2017	21:09:00	234	54615,7	113	122	140	26,6	47871,43	79906,53	0,921
21.06.2017	21:25:00	234	54615,7	114	133	134	27,5	49283,32	82185,02	0,929
21.06.2017	21:41:00	232	54009,8	125	124	131	16,1	48368,53	81015,05	0,918
21.06.2017	21:57:00	231	53268,6	112	117	135	20	44776,81	76705,03	0,916
21.06.2017	22:13:00	232	53684,9	104	116	128	24,7	41394,38	73164,09	0,911
21.06.2017	22:29:00	232	53731,2	107	127	126	27,5	44053,7	76273,43	0,915
21.06.2017	22:45:00	232	53870,4	115	126	123	18,4	44498,51	77919,75	0,922
21.06.2017	23:01:00	229	52486,8	98,4	94,4	89,3	17	26857,41	57751,8	0,888
21.06.2017	23:17:00	232	53916,8	83	91,2	93	21,7	24326,33	51975,35	0,84
21.06.2017	23:33:00	234	54615,7	74,9	78,1	89,9	21,9	20271,24	46866,63	0,829
21.06.2017	23:49:00	231	53407,2	75,1	80,8	77,1	17,9	18433,47	44645,72	0,829
22.06.2017	0:05:00	232	53731,2	73,1	79,7	74,6	17,3	17560,15	43085,1	0,817
22.06.2017	0:21:00	232	53870,4	65,6	66,7	70,4	13,7	13896,1	38949,39	0,826
22.06.2017	0:37:00	234	54662,4	65,5	67,9	82,1	21	16082,07	41256,64	0,82
22.06.2017	0:53:00	234	54615,7	63,3	69,3	65,4	15,9	13339,35	37159,35	0,804
22.06.2017	1:09:00	230	52992	63,2	60,6	63,6	12	11855,56	35839,7	0,827
22.06.2017	1:25:00	231	53453,4	57	64	53,8	15,4	10476,6	31958,74	0,792
22.06.2017	1:41:00	232	53638,6	54,3	56,3	60,9	12,9	9993,4	31043,7	0,781
22.06.2017	1:57:00	232	53638,6	57	59,2	58,1	12	10273,25	30988,74	0,767
22.06.2017	2:13:00	232	53684,9	60,4	55	62,7	13,5	10786,7	32189	0,777
22.06.2017	2:29:00	232	53870,4	57,9	61,6	56,6	12,4	10504,29	31835,4	0,78
22.06.2017	2:45:00	233	54195,8	53,7	59,9	57,7	14,1	9999,8	30083,5	0,756
22.06.2017	3:01:00	233	54289	50,4	55,8	51,7	14,1	8525,5	28135,91	0,768
22.06.2017	3:17:00	233	54195,8	53,1	53,8	54,9	9,1	8810,87	28621,88	0,759
22.06.2017	3:33:00	233	54149,3	54,2	60,1	56,6	12,7	9914,5	29237,01	0,735
22.06.2017	3:49:00	233	54149,3	49,2	45,6	57,2	13,8	7962,28	26737,22	0,751
22.06.2017	4:05:00	232	53731,2	54,7	49,4	50,2	0	7952,49	26772,91	0,743
22.06.2017	4:21:00	233	54195,8	51,1	54,5	49,7	11,2	8176,99	27370,59	0,757
22.06.2017	4:37:00	232	54009,8	48,6	51,4	53,2	11,5	7966,41	26475,05	0,742
22.06.2017	4:53:00	231	53546	54,1	51,5	53,9	0	8484,27	27390,86	0,737
22.06.2017	5:09:00	231	53176,4	79,9	59,8	67,1	17,9	14782,87	40522,68	0,838
22.06.2017	5:25:00	232	53824	72,4	45,7	84,9	34,2	15707,9	40882,34	0,856
22.06.2017	5:41:00	231	53314,8	75,2	55,9	89,5	29,3	17648,59	44362	0,863
22.06.2017	5:57:00	230	52716,2	71,5	69,8	79,2	19,1	16621,74	44046,24	0,869
22.06.2017	6:13:00	226	50895,4	82,1	63,5	77,4	13,5	16945,67	44341,79	0,873
22.06.2017	6:29:00	224	50131,2	76,3	70,5	76,1	1,3	16584,84	45570,08	0,908
22.06.2017	6:45:00	228	51938,4	75,4	59,6	84,5	28,4	17184,13	43036,61	0,853
22.06.2017	7:01:00	226	50940,5	75,9	61,1	88,7	23,6	17918,67	44366,33	0,867
22.06.2017	7:17:00	226	51030,8	65	72	55,4	13,4	12657,72	36212,04	0,827

22.06.2017	7:33:00	225	50760,1	75,4	78,2	77,1	8,4	17815,37	45815,81	0,875
22.06.2017	7:49:00	224	50041,7	70,6	86,4	73,9	19,8	18302,57	45021,02	0,862
22.06.2017	8:05:00	226	51211,7	62,5	83,4	67,6	18,4	15770,13	42147,53	0,866
22.06.2017	8:21:00	226	51030,8	61,4	81,9	71,1	19	15893,78	41362,02	0,846
22.06.2017	8:37:00	222	49417,3	66,6	92,9	67,7	38	19093,26	45845,1	0,885
22.06.2017	8:53:00	224	50265,6	67,3	73,9	74	19,3	15838,99	42486,49	0,875
22.06.2017	9:09:00	225	50805,2	64,9	67,5	71,6	16,6	14170,38	39012,26	0,847
22.06.2017	9:25:00	225	50535	67	86,3	76,2	25,2	18378,17	43892,19	0,843
22.06.2017	9:41:00	224	50041,7	62,1	84,2	68,7	29,4	16530,1	41479,51	0,849
22.06.2017	9:57:00	224	49997	61,5	76,2	67,6	17,2	14454,29	40516,72	0,873
22.06.2017	10:13:00	226	51211,7	67,4	75,8	70,6	18,6	15618,72	40865,69	0,835
22.06.2017	10:29:00	227	51665,3	60,7	90,8	76,3	30,3	18668,91	44753,93	0,854
22.06.2017	10:45:00	227	51483,6	65,8	78,5	65,6	21,5	15257,5	40767,6	0,847
22.06.2017	11:01:00	226	51030,8	76	75,7	64	17	15891,49	41450,56	0,837
22.06.2017	11:17:00	227	51619,8	88,6	78,2	85,8	16,7	21605,73	51361,39	0,887
22.06.2017	11:33:00	226	51257	89,9	80,4	81,3	14	21351,86	50420,34	0,877
22.06.2017	11:49:00	226	50850,3	91,9	73,9	80,6	18	20727,18	49631,55	0,882
22.06.2017	12:05:00	227	51483,6	81,2	86,3	89,8	16,2	22367,61	52828,74	0,901
22.06.2017	12:21:00	226	51211,7	86,6	83,2	91,4	15,9	23028,57	53744,95	0,905
22.06.2017	12:37:00	225	50670	95,8	85,8	79,2	16	23067,92	54406,7	0,917
22.06.2017	12:53:00	227	51710,8	77	77,3	86,7	15,9	19673,99	50174,69	0,912
22.06.2017	13:09:00	230	52900	68,1	68,3	101	33,6	20693,15	48557,39	0,893
22.06.2017	13:25:00	229	52532,6	67,8	81,1	95,8	26,6	21059,25	50477,08	0,902
22.06.2017	13:41:00	230	53084,2	71,9	75,5	107	32,1	23306,51	53059,84	0,911

Виконавці:

Від ІЕД НАНУ

 С.Й. Поліщук

Від КНУТД

 М.Ю. Артеменко

Від НВО «Техносервіспривід»

 К.І. Денисенко

Додаток В

**СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ ТА ВІДОМОСТІ ПРО
АПРОБАЦІЮ РЕЗУЛЬТАТІВ 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.