

Міністерство освіти і науки України  
Вінницький національний технічний університет

**БОБРОВНИК ВОЛОДИМИР МИКОЛАЙОВИЧ**

УДК [621.311:005]:378(043)

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

05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи

**Автореферат**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Вінниця – 2021

Дисертацією є кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Робота виконана в Київському національному університеті технологій та дизайну, Міністерство освіти і науки України.

**Науковий керівник:** доктор технічних наук, професор  
**Каплун Віктор Володимирович,**  
Національний університет біоресурсів та природокористування України, директор навчально-наукового інституту енергетики, автоматики і енергозбереження.

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**Бурбело Михайло Йосипович,**  
Вінницький національний технічний університет,  
завідувач кафедри електротехнічних систем  
електроспоживання та енергетичного  
менеджменту;

доктор технічних наук, професор  
**Чорний Олексій Петрович,**  
Кременчуцький національний університет  
імені Михайла Остроградського, директор Інституту  
електромеханіки, енергозбереження і систем управління,  
професор кафедри систем автоматичного управління та  
електроприводу.

Захист відбудеться “ 29 ” квітня 2021р. о 12<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 05.052.05 у Вінницькому національному технічному університеті за адресою: 21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, ГНК, ауд. 210.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Вінницького національного технічного університету за адресою: 21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95.

Автореферат розісланий “26” березня 2021 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради,  
доктор технічних наук, доцент

В. В. Кулик

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Обґрунтування вибору теми дослідження.** Питання ефективного використання енергетичних ресурсів в бюджетній сфері все активніше ініціюється з боку держави. Освітня реформа в Україні, яка передбачає децентралізацію управління та фінансову автономію закладів вищої освіти задля підвищення рівня їх конкурентоспроможності та стійкого розвитку в довгостроковій перспективі, не може бути успішною без адекватної відповіді на виклики в енергетичній сфері. Неefективність існуючих підходів до управління процесами енергозбереження в системі закладів вищої освіти потребує обґрунтування та реалізації нових шляхів управління енергоефективністю.

Сучасний заклад вищої освіти (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 рівня 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.

Розробленню алгоритмів і методів підвищення енергетичної ефективності, оптимізації та раціоналізації управління у сфері енергоспоживання присвячено багато праць вітчизняних і зарубіжних вчених: А. В. Праховника, А. В. Бобрякова, С. П. Денисюка, В. П. Розена, В. І. Дешка, В. І. Гнатюка, В. А. Кадієвського та ін.

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 рівня енергоефективності закладу вищої освіти загалом.

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

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

Досягнення мети обумовило розв'язання наступних наукових завдань:

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

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

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

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

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

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

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

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

**Наукова новизна отриманих результатів** 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, зокрема:

1. Вперше запропоновано метод аналізу рівнів електроспоживання з урахуванням особливих періодів освітнього процесу, сезонності та підвищення рівня ефективності використання аудиторного фонду, що дозволило отримати математичні моделі 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.** Основні положення, що винесені на захист, отримані здобувачем самостійно. 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 вирашу 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 залежності для розрахунку електричних опорів фазних та нейтрального проводів трифазної чотирипровідної системи електроживлення на основі вимірів напруг еталонних навантажень; у [6] – запропоновано введення розширених регресійних моделей, які додатково включають в себе так звані фіктивні змінні, додатні значення яких вказують на наявність періоду з підвищеними рівнями електроспоживання; у [7] – розроблено методику визначення складових повної потужності за значеннями активних та реактивних потужностей окремих фаз; у [8] – проілюстровано застосування методики оцінювання енергозберігаючого ефекту від застосування паралельних активних фільтрів при періодично змінюваному навантаженні

коефіцієнтом виграшу з енергією втрат розрахунком енергозберігаючого ефекту за результатами тижневого моніторингу споживання електроенергії.

**Апробація матеріалів дисертації.** Викладені в дисертації результати досліджень були апробовані на таких наукових конференціях: «Енергоефективний університет» Київ, 2017 р.; «Обробка сигналів і негаусівських процесів», Черкаси, 2017; «Проблеми сучасної електротехніки-2018», Київ, 2018 р.; «Мехатронні системи: інновації та інжиніринг» Київ, 2018.

**Публікації.** Основний зміст дисертаційної роботи відображено у 12 публікаціях, у тому числі: 8 статей у наукових фахових виданнях України, 1 – стаття у науковому фаховому виданні України, включеному до міжнародних наукометричних баз даних, 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 таблиці. Список використаних джерел складається з 104 найменувань. Додатки містять акти впровадження результатів роботи, список публікацій за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, зазначено зв'язок роботи з науковими програмами, темами. Визначено мету та основні задачі дослідження. Наведено характеристику наукової новизни і практичного значення отриманих результатів, апробацію роботи і публікації.

У **першому розділі** приведено аналіз вітчизняного та закордонного досвіду з питань управління електроспоживанням закладів вищої освіти.

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 впливає 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.

У **другому розділі** проведено структурний аналіз електроспоживання з використанням добових статистичних даних про графіки електроспоживання з півгодинною дискретністю, одержаних з локальних пристроїв збору і обробки даних з урахуванням впливу особливостей організації освітнього процесу, сезону та експлуатаційних чинників. Обґрунтовані умови та визначені показники, які впливають на рівні електроспоживання закладів вищої освіти (рис. 1).

В якості математичних моделей електроспоживання у будівлях ЗВО застосовувалися лінійні регресійні моделі виду

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

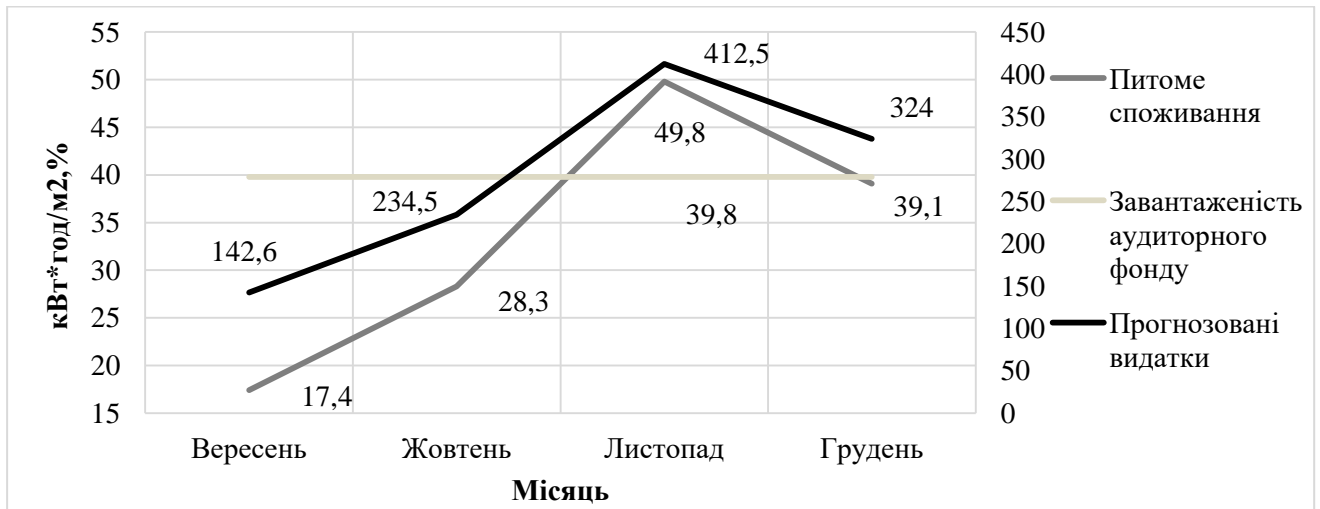
де  $y$  — середня величина добового електроспоживання на обраному часовому інтервалі, кВт·год);  $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_{p-1}$  — коефіцієнти, що підлягають визначенню,  $x_1, x_2, \dots, x_{p-1}$  — змінні, що суттєвим чином впливають на значення  $y$ ,  $\varepsilon$  — випадкова величина, яка характеризує варіабельність моделі і викликана нерегулярними подіями стохастичного характеру.

Для моделі електроспоживання у будівлях гуртожитків покладалося  $p = 3$  (модель типу 1, скорочена) або  $p = 4$  (на модель типу 2, розширена),  $x_1, x_2, x_3$  — відповідно, кількість проживаючих у гуртожитку, температура зовнішнього середовища і додатковий числовий параметр (фіктивна змінна, яка входить тільки в розширену модель) для врахування особливостей графіка освітнього процесу.

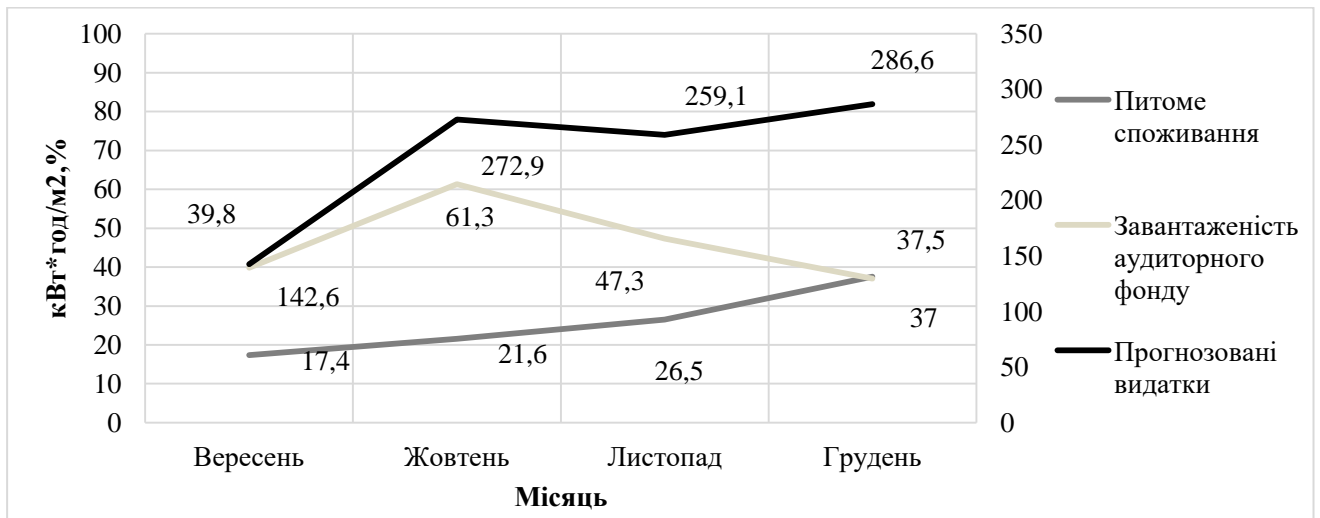
Для ідентифікації коефіцієнтів регресійних моделей, а також враховуючи потенційну можливість розширення множини пояснюючих змінних як у зв'язку з потребами вдосконалення побудованих моделей, так і з потребами включення в опис нових об'єктів інфраструктури ЗВО, розроблено спеціалізоване



програмне забезпечення у середовищі Delphi з використанням обчислювальних та графічних можливостей комплексу статистичних програм Statistica 10.0.



а)



б)

Рисунок 1 – Прогнозоване оцінювання споживання електроенергії в залежності від завантаженості аудиторного фонду без урахування а) та з урахуванням б) зміни освітнього процесу

Для оцінювання параметрів загальної лінійної регресійної моделі використано рівняння

$$Y = X\beta + \varepsilon, \quad (2)$$

де  $Y$  — вектор спостережень залежної змінної,  $X$  — матриця спостережень незалежних змінних (регресійна матриця або матриця експерименту чи плану),  $\beta$  — вектор (невдомих) коефіцієнтів;  $\varepsilon$  — вектор помилок з нульовим середнім значенням:

$$Y = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \dots \\ y_n \end{pmatrix}, \beta = \begin{pmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \dots \\ \beta_{p-1} \end{pmatrix}, X = \begin{pmatrix} x_{10} & x_{11} & \dots & x_{1,p-1} \\ x_{20} & x_{21} & \dots & x_{2,p-1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{n0} & x_{n1} & \dots & x_{n,p-1} \end{pmatrix}, \varepsilon = \begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \dots \\ \varepsilon_n \end{pmatrix}, \quad (3)$$

при  $n \geq p$ .

Етапи реалізації математичної моделі полягають у наступному:

1. Автоматизація побудови матриці експерименту  $X$  в форматі Delphi на базі представлених даних спостережень в форматі Excel.

2. Дослідження регресійних даних на погану обумовленість матриці плану за допомогою алгоритму Грама — Шмідта:

$$Z_{iT} = Z_i - Z(Z'Z)^{-1}Z'Z_i, i = 1, \dots, p, \quad (4)$$

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

3. Оцінювання коефіцієнтів регресії методом найменших квадратів та побудова графіка залишків для одержаної моделі.

Одержані регресійні моделі електроспоживання будівель для ЗВО з приведним контингентом 6-8 тис студентів та площею будівель 60-70 тис. м<sup>2</sup>:

Моделі типу 1 (скорочені):

$$\text{Будівля №1: } \hat{y} = 381,81 + 0,61x_1 - 10,57x_2.$$

$$\text{Будівля №2: } \hat{y} = 584,33 + 0,82x_1 - 19,69x_2.$$

$$\text{Будівля №3: } \hat{y} = 836,75 + 1,55x_1 - 32,19x_2.$$

$$\text{Будівля №4: } \hat{y} = 735,45 + 0,85x_1 - 117,08x_2.$$

Моделі типу 2 (розширені):

$$\text{Будівля №1: } \hat{y} = 382,26 + 0,69x_1 - 10,64x_2 - 11,35x_3.$$

$$\text{Будівля №2: } \hat{y} = 576,53 + 0,68x_1 - 17,96x_2 + 456,98x_3.$$

$$\text{Будівля №3: } \hat{y} = 835,71 + 1,55x_1 - 32,04x_2 + 43,66x_3.$$

$$\text{Будівля №4: } \hat{y} = 735,19 + 0,85x_1 - 17,04x_2 + 13,71x_3.$$

Оцінювання адекватності моделей виконувалося за допомогою обчислення значущості регресійних рівнянь в цілому та значущості окремих коефіцієнтів цих рівнянь, аналізу залишків та порівнянням розрахункових даних з даними спостережень, що не враховувалися при побудові моделей.

Для числового оцінювання якості регресійних моделей, а саме: вибіркоче значення  $S$  середньоквадратичного відхилення випадкової складової  $\varepsilon$ , оцінка  $R$  множинного коефіцієнту кореляції між показником енергоспоживання  $y$  і незалежними змінними  $x_0, x_1, x_2, \dots$ ,  $F$  - статистика для перевірки значущості

регресійної моделі,  $t$  (задіяне під позначення часу) - статистика для перевірки значущості окремих коефіцієнтів, були використані співвідношення:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n - p}}, R = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})(\hat{y}_i - \bar{y})}{(\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 (\hat{y}_i - \bar{y})^2)^{1/2}}, \quad (5)$$

$$F = \frac{R^2}{1 - R^2} \cdot \frac{n - p}{p - 1}, t = \frac{|b_j|}{S \sqrt{d_{jj}}}, j = 0, \dots, p - 1, \quad (6)$$

де  $y_i$  та  $\hat{y}_i$  — відповідно, реальне значення спостережуваної та оціночної (згідно з прийнятою моделлю) величини спожитої електроенергії при  $i$ -му значенні набору пояснювальних змінних  $(x_0, x_1, \dots, x_{p-1})$ ,  $\bar{y}$  — середнє значення величин  $y_i, i = 1, \dots, n$ ,  $d_{jj} - (j + 1)$ -й діагональний елемент матриці  $(X'X)^{-1}$ ,  $b_j$  — оцінка  $j$ -го коефіцієнту регресії,  $j = 0, \dots, p - 1$ .

Одержані графіки залишків  $y_i - \hat{y}_i, i = 1, \dots, n$  для перевірки гіпотези щодо нормальності випадкової складової даної моделі. Для виявлення екстремальних значень залишків використовувалися діаграми розкиду BoxPlot (Box-and-WhiskerPlot).

Результати реалізації моделі (приклад для будівлі №1. Скорочена модель  $n = 36, p = 3$ ):

$$S=140,904; R = 0,853; F = 44,247.$$

Значення статистики  $R$  показує на доволі високу кореляцію величини електроспоживання з обраними пояснюючими змінними, значення  $F$  - статистики підтверджує значимість моделі в цілому. Аналогічно значення  $t$  - статистик (9,17580; 4,29048; -7,26476) підтверджують, відповідно, значимість вільного члена і змінних  $x_1, x_2$ . Аналізування залишків  $y_i - \hat{y}_i, i = 1, \dots, n$  вказують на необхідність покращення збіжності розрахункових і спостережених за певні періоди часу у ті роки, в яких спостерігаються більш високі рівні енергоспоживання, ніж це звичайно має місце для даних періодів.

Два значення залишків діаграми кваліфікуються як викиди (це ті значення, що відповідають вершинам ламаних у кінцевих точках графіка залишків). Звертаючись до точних значень вказаних залишків, на табл. 1 маємо наступну інформацію.

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

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

Застосування розширеної моделі із додатковою «фіктивною» змінною  $x_3$ , що дорівнює 1 у вказані періоди часу і 0 в інших випадках привело до моделі з наступними покращеними порівняно із попередніми значеннями стандартного відхилення, коефіцієнта множинної кореляції і  $F$  – статистики:

$$S=83, 2108; R = 0, 9530; F = 105, 4557.$$

Екстремальні залишки розширеної регресійної моделі (з введеною додатковою фіктивною змінною  $x_3$ ) наведені у табл. 2.

Таблиця 2 – 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

Відсутність періодів підвищеного електроспоживання моделі 1 і 2 при  $x_3 = 0$  дають приблизно однакову точність прогнозу. Розрахункові значення моделі 2 при  $x_3 = 1$  відповідають періодам підвищеного електроспоживання (за їх наявністю). У загальному випадку розширені моделі можна застосовувати для оцінки верхніх границь рівнів електроспоживання (табл. 3).

Таблиця 3 – Результати математичного моделювання (прогноз) та спостережень для об'єкту № 1 за опалювальні періоди 2016 -18 рр.

Період	Січень 2016 р.	Лютий 2016 р.	Березень 2016р.
<b>Фактично</b>	781,94	731,65	754,04
<b>За моделлю 1</b>	760,16; [649,15-871,17]	685,99; [619,66-752,32]	802,56; [743,06-862, 07]
<b>За моделлю 2, <math>x_3=0</math></b>	735,89; [664,1-807,7]	660,71 [617,37-704,04]	754,82 [714,03-795,62]

Математичне моделювання електроспоживання у будівлях навчальних корпусів закладів вищої освіти виконане з використанням лінійних регресійних моделей для будівель ЗВО з урахування приведеної кількості проживаючих у гуртожитках, сезонності та особливостей графіка освітнього процесу, що дало змогу одержати залежності для дослідження сценаріїв та прогнозного оцінювання функціонування системи електрозабезпечення.

Запропоноване рішення дає змогу узагальнити та обґрунтувати нові теоретичні та методичні аспекти управління електроспоживанням ЗВО на основі використання питомих показників електроспоживання з урахуванням особливостей організації освітнього процесу, сезону та експлуатаційних чинників. Розроблені рекомендації щодо виконання техніко-економічних обґрунтувань управління витратами на електроспоживання під час планування освітнього процесу та реалізації проектів з енергозбереження у ЗВО.

У третьому розділі розроблено метод визначення неактивних складових повної потужності за значеннями активних та реактивних потужностей окремих фаз.

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.

Встановлено вираз для декомпозиція квадрата повної потужності:

$$S^2 = 3U_\phi^2(I_A^2 + I_B^2 + I_C^2 + I_N^2 r_N / r) = P^2 + Q^2 + D^2 + N^2 + H^2, \quad (7)$$

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.

Ілюстративний приклад з використанням одержаних формул для навантаження, зі з'єднанням фаз в зірку з провідністю фази  $A_{\Delta} = 2G$ , що увімкнена послідовно з діодом (однопівперіодним випрямлячем, та активно-індуктивною та активно-ємнісною лінійними провідностями в фазах В і С,  $\bar{y}_B = Ge^{j\varphi}$ ;  $\bar{y}_C = Ge^{-j\varphi}$  показали, що неактивні складові повної потужності можуть перевищувати активну потужність (рис. 2), внаслідок чого суттєво знижується коефіцієнт потужності трифазної чотирипровідної системи електроживлення (рис. 3).

Врахування зазначених неактивних 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.

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

$$k_{\Delta P} = \frac{\Delta P}{\Delta P_F} = \lambda^{-2}, \quad (8)$$

де квадрат коефіцієнта потужності визначається за формулою:

$$\lambda^2 = P^2 / 3U_\phi^2 (I_A^2 + I_B^2 + I_C^2 + I_N^2 r_N / r). \quad (9)$$

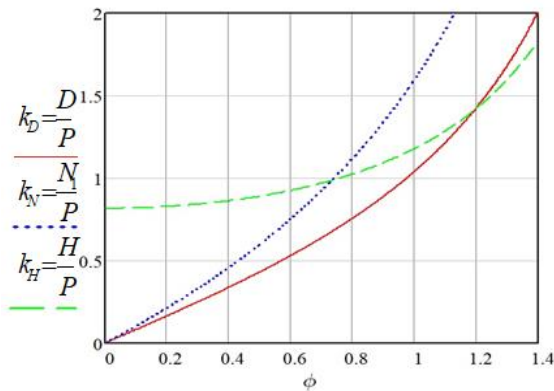


Рисунок 2 – Графіки залежностей коефіцієнтів складових повної потужності від параметра  $\phi$  при  $r_N = r$

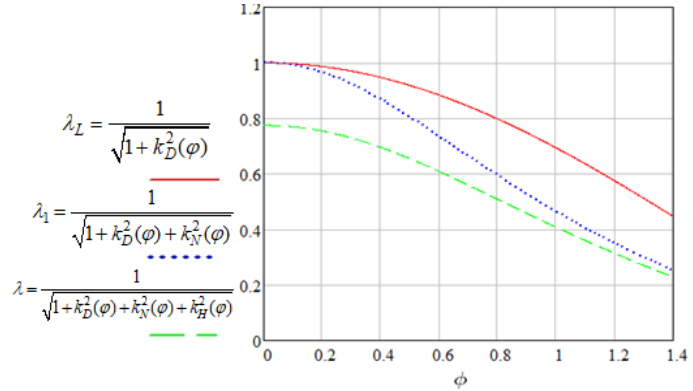


Рисунок 3 – Графіки часткових коефіцієнтів потужності

На рис. 4 представлено графік зміни активної потужності, а в табл. 4 результати моніторингу параметрів споживання електроенергії гуртожитку університету, отримані з інтервалом 16 хвилин аналізатором С.А 8335 QUALISTAR PLUS виробництва компанії Chauvin-ArnouxGroup (Франція) в режимі «Trend». Цей прилад застосовувався, оскільки існуюча ЛУЗОД не вимірює струм нейтралі.



Рисунок 4 – Графік зміни активної потужності гуртожитку №7 КНУТД

Таблиця 4 – Моніторинг параметрів електропостачання г-ку №7 КНУТД

Дата	$n$	$P_n, \text{Вт}$	$U_{\phi n} = \frac{U_{An} + U_{Bn} + U_{Cn}}{3}, \text{В}$	$I_{An}, \text{А}$	$I_{Bn}, \text{А}$	$I_{Cn}, \text{А}$	$I_{Nn}, \text{А}$	$\lambda_n^2$	$P_{0n}, \text{Вт}$
20.06.17	1	4829	233,6	75,7	76,6	92,3	24,2	0,696	9307
	2	4575	233,4	67,2	76,7	86,3	20,7	0,707	9291
	...	...	...	...	...	...	...	...	...
	90	5093	232,7	88	85,2	93	15,4	0,671	9235

Обґрунтовано концепцію перерозподілу добового графіку енергоспоживання на інтервал дії пільгового тарифу з використанням накопичувачів енергії (рис. 5).

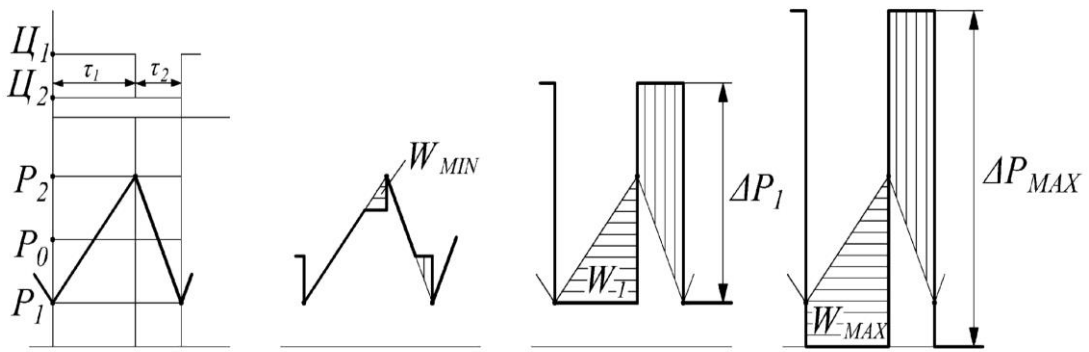


Рисунок 5 – Ідеалізовані добові графіки енергоспоживання при застосуванні накопичувачів енергії

Встановлені нові аналітичні залежності відносного добового платежу та підвищення теплового навантаження ліній електропередачі від величини ємності накопичувача енергії при перерозподілу добового графіку енергоспоживання на інтервал дії пільгового тарифу (рис. 6).

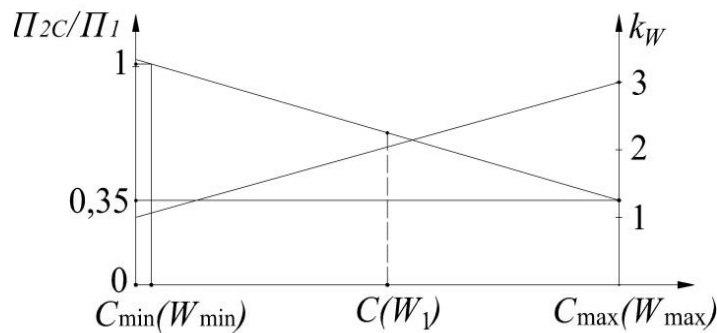


Рисунок 6 – Графіки залежності відносного добового платежу та коефіцієнта нерівномірності споживання енергії від величини ємності накопичувачів енергії

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.

У **четвертому розділі** досліджується застосування ПАФ для одного із перспективних технічних напрямів енергозбереження в ЗВО шляхом зниження теплових втрат в лінії передачі. Відомо, що в споживаних від трифазного джерела струмах навантаження можуть бути виділені активна та неактивна складові, причому тільки активна складова передає електричну енергію споживачеві, а неактивна складова, зумовлена реактивним характером, несиметрією та нелінійністю навантаження, викликає додатковий нагрів проводів лінії передачі та відповідні втрати електроенергії. Енергозберігаючий ефект від застосування ідеального ПАФ полягає в тому, що він, не споживаючи електроенергію, на основі оброблення миттєвих значень фазних напруг та

лінійних струмів, генерує неактивну складову струмів навантаження безпосередньо на клеммах навантаження, позбавляючи від неї лінію передачі. Таким чином, від джерела споживається лише активна складова струмів навантаження з мінімально можливими тепловими втратами, такий режим енергоспоживання характеризується одиничним значенням коефіцієнта потужності.

*Методика розрахунку енергозберігаючого ефекту від застосування ПАФ з урахуванням його власних втрат.*

Для практичного застосування ПАФ в якості засобу енергозберігання ЗВО необхідно враховувати його власні втрати в загальному балансі втрат електроенергії. Відповідна методика розроблялася в три етапи. На першому етапі були отримані аналітичні умови доцільності застосування ПАФ для економії енергії та коефіцієнти виграшу за потужністю (енергією) втрат як для стаціонарного, так і періодично змінюваного навантаження (табл. 5).

На другому етапі на основі вимірювання фазних напруг системи електропостачання від дії еталонних навантажень розраховувались відношення опорів мережі електроживлення  $r_N / r$  та потужність короткого замикання  $P_0$ , що фігурують в аналітичних виразах.

На третьому етапі здійснювався розрахунок енергозберігаючого ефекту за результатами тижневого моніторингу споживання електроенергії гуртожитку № 7 КНУТД.

Таблиця 5 – Аналітичні умови доцільності застосування ПАФ для економії енергії та коефіцієнти виграшу за потужністю (енергією) втрат для стаціонарного та періодично змінюваного навантаження

Стаціонарне навантаження	Періодично змінюване $T_L = NT_S$
$\Delta P - \Delta P_F (\lambda = 1) \geq P_F = k_F \sqrt{S^2 - P^2}$	$\Delta W - \Delta W_F (\lambda_n = 1) \geq T_S k_F \sum_{n=1}^N \sqrt{S_n^2 - P_n^2}$
$k_F < k_F^{TP} = \sqrt{\lambda^{-2} - 1} / (k_L + 1)$	$k_F < k_{FW}^{TP} = \sum_{n=1}^N P_n^2 (\lambda_n^{-2} - 1) \div \sum_{n=1}^N P_n (P_0 + P_n) \sqrt{\lambda_n^{-2} - 1}$
$k_{\Delta P} = \frac{\Delta P}{\Delta P_F} = \frac{\lambda^{-2}}{1 + (1 + k_L) k_F \sqrt{\lambda^{-2} - 1}}$	$k_W = \frac{\Delta W}{\Delta W_F} = \sum_{n=1}^N P_n^2 \lambda_n^{-2} \div \sum_{n=1}^N P_n [P_n + k_F (P_0 + P_n) \sqrt{\lambda_n^{-2} - 1}]$

В розрахунках значення фактору втрат фільтра  $K_F$  приймалося рівним 0,02; що відповідає заявленому ККД ПАФ у 98% фірми Danfoss серії АНФ з потужністю 150 кВА. Визначені значення добових коефіцієнтів виграшу за енергією втрат зведені в табл. 6.



Таблиця 6 – Значення добового коефіцієнта виграшу

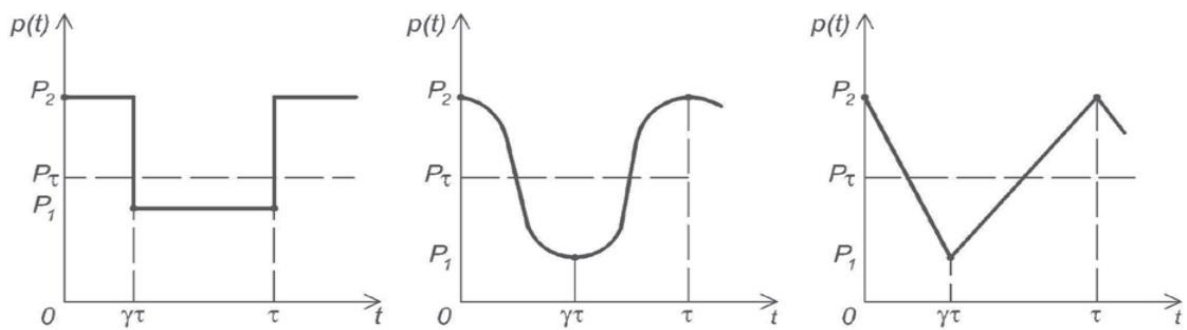
Дата	19.06.20	20.06.20	21.06.20	22.06.20	23.06.20	24.06.20	25.06.20	26.06.20
$k_W$	1,35	1,35	1,286	1,31	1,297	1,33	1,37	1,45

Дослідження перспектив застосування ПАФ при збільшенні інтервалу осереднення вимірюваних величин.

Однією із задач дисертаційної роботи є розв'язання положень теорії потужності трифазних мереж для випадку, коли період зміни навантаження (наприклад, доба) значно перевищує період мережі, з метою розроблення енергоефективних алгоритмів активної фільтрації споживаних струмів.

Показано, що таке збільшення інтервалу усереднення до періоду зміни однорідного навантаження при стабільній фазній напрузі збільшує коефіцієнт виграшу за потужністю втрат пропорційно величині, яка названа коефіцієнтом нерівномірності споживання енергії.

де  $k_H = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} p^2(t) dt / \left[ \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} p(t) dt \right]^2 - k_W = \frac{k_H}{\lambda^2}$ , коефіцієнт нерівномірності споживання енергії в інтервалі. Отримані значення цього коефіцієнта для типових графіків зміни активної потужності (рис. 7).



а) прямокутна  
 $k_{W1} = 1 + 4\gamma(1-\gamma)D^2$

б) кусково-синусоїдна  
 $k_{W2} = 1 + D^2 / 2$

в) кусково-лінійна  
 $k_{W3} = 1 + D^2 / 3$

Рисунок 7 – Типові форми графіків зміни активної потужності та значення коефіцієнта нерівномірності споживання енергії

Найбільшого значення коефіцієнт нерівномірності досягає двох при прямокутній формі зазначеного графіку.

Розроблено наступний алгоритм керування ПАФ, аналогічний алгоритму S. Fryze, але період осереднення потужності та напруг живлення приймається рівним періоду  $\tau$  зміни навантаження:

$$\mathbf{i}_\phi(t) = \mathbf{i}_H(t) - \mathbf{g}\mathbf{u}(t), \quad \mathbf{g} = \int_0^{\tau} p(t) dt / \int_0^{\tau} \mathbf{u}^T(t)\mathbf{u}(t) dt.$$

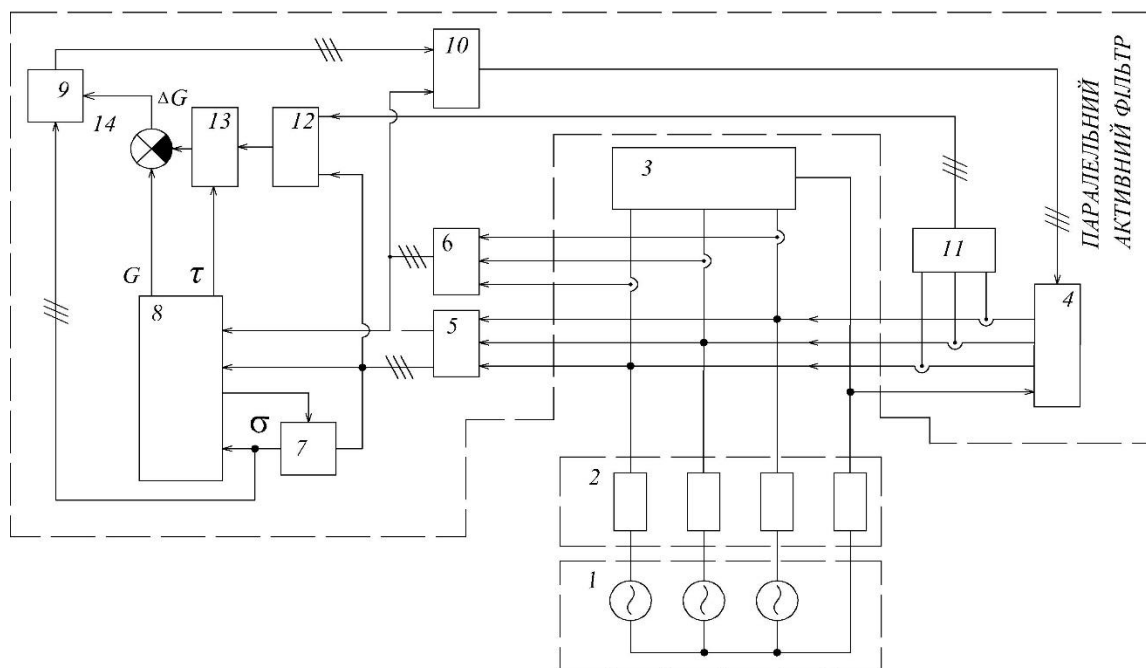


Рисунок 8 – Структурна схема ПАФ відповідно до патенту на корисну модель №125021 «Спосіб керування паралельним активним фільтром чотирипровідної трифазної мережі»:

- 1 - трифазне джерело; 2 – чотирипровідний кабель; 3 – трифазне навантаження; 4 – силова частина; 5 – вимірювач миттєвих значень фазних напруг; 6 – вимірювач миттєвих значень струмів навантаження; 7 – формувач; 8 – блок вибору стратегії керування; 9 – блок множення вектора на скаляр; 10 – блоку векторного віднімання; 11 – вимірювач миттєвих значень струмів фільтра; 12 – блок скалярного множення векторів; 13 – блок підсилення та осереднення; 14 – суматор

На зазначений алгоритм керування ПАФ зі збільшенням інтервалу осереднення до періоду зміни навантаження отримано патент на корисну модель (рис. 8).

Елементна база накопичувачів електроенергії швидко прогресує (PowerBank, суперконденсатори) і за їх наявності усувається проблема зберігання пульсуючої добової енергії, а також з'являються нові можливості управління енергоспоживанням в системі «трифазна система електроживлення-ПАФ-накопичувач енергії (НЕ)» (рис. 9).

Показана функціональна схема трифазного варіанту ПАФ з НЕ для чотирипровідної системи живлення 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  $C_1, C_2$  в ланці постійного струму. Алгоритм роботи вентилів забезпечує позбавлення трифазного джерела від неактивних складових поточних струмів навантаження шляхом формування їх у вихідних дроселях інвертора. Для цього оброблюється інформація, що надходить до системи

керування (СК) від датчиків фазних напруг  $U_\phi$ , струмів навантаження  $I_H$  та джерела  $I_{\Delta\lambda}$ .



Рисунок 9 – Структурна схема фільтраційної системи з додатковою системою накопичення енергії та системою управління та регулювання

Наявність четвертого плеча інвертора дозволяє вирівнювання напруги на конденсаторах  $C_1$ ,  $C_2$ , кожна з яких має перевищувати амплітуду фазної напруги мережі електропостачання.

Для обміну енергією з  $HE$ , представленого конденсатором  $C_H$ , в систему електропостачання включений імпульсний перетворювач постійної напруги (ІППН), що містить два ключі з двосторонньою провідністю  $Q_1$ ,  $Q_2$  та дросель  $L_H$ . В режимі заряду  $HE$  ключ  $Q_2$  закритий, а на ключ  $Q_1$  подаються широтно-модульовані імпульси СК, в результаті чого ІППН працює як знижувальний перетворювач постійної напруги, передаючи енергію від конденсаторів  $C_1$ ,  $C_2$  до  $HE$ . В режимі розряду  $HE$  ключ  $Q_1$  закритий, а на ключ  $Q_2$  подаються широтно-модульовані імпульси СК, в результаті чого ІППН працює як підвищувальний перетворювач, передаючи енергію від  $HE$  до конденсаторів  $C_1$ ,  $C_2$ . Напрямок перетoku енергії визначає прогнозна часова залежність потужності споживання  $P_n(t)$  протягом інтервалу часу, що значно перевищує період мережної напруги.

## ВИСНОВКИ

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

1. За результатами аналізу нормативного 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 прогностичне 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-whiskerplot* 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. м<sup>2</sup>, від 10 до 20 тис. м<sup>2</sup> і до 10 тис. м<sup>2</sup>.

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 витрат для стаціонарного та періодично змінюваного навантаження, які покладені в основу методики визначення умов доцільності застосування паралельних активних фільтрів для зменшення витрат 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 прогнозними оцінюванням у певній часовій перспективі (місячній, кварталній, сезонній, річній).

### **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.

## 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». – Вінницький національний технічний університет, Вінниця, 2021.

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

Розроблено 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;

Розроблено моделі визначення складових повної потужності трифазної чотиририпровідної системи електроживлення для розрахунку додаткових втрат електроенергії внаслідок несиметрії та нелінійності електроспоживачів в електротехнічних комплексах інфраструктури ЗВО;

Досліджено режими трифазних мереж з несиметричним та нелінійним навантаженням та обґрунтувати алгоритми роботи ПАФ для підвищення енергоефективності внутрішніх мереж ЗВО.

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

## ABSTRACT

**Bobrovnyk V. M. Management of electricity consumption of higher education institutions to improve their energy efficiency. – Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.**

Thesis for the degree of a candidate of technical sciences in specialty 05.09.03 "Electrotechnical complexes and systems". – Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, 2021.

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.

The use of simulation results allows developing methodological recommendations for the implementation of a set of energy saving measures in the educational institution, taking into account the existing engineering infrastructure and increasing 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).

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  $\varphi_3$ , 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.

The corresponding regression model has the form

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

The use of active power filters in three-phase power supply system's 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 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.

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 KNUTD. When using modern shunt active filter, energy losses in the power line of the dormitory №7 KNUTD 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.

## АННОТАЦИЯ

***Бобровник В. Н. Управление электропотреблением высших учебных заведений для повышения их энергоэффективности. – Квалификационный научный труд на правах рукописи.***

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы». – Винницкий национальный технический университет, Винница, 2021.

Проведен анализ современной нормативной базы в сфере повышения энергоэффективности, состояния электроснабжения высших учебных заведений и нормирования потребления энергоносителей.

Разработаны математические модели потребления электроэнергии в инфраструктуре высших учебных заведениях на основе прогнозирования удельных показателей с учетом назначения зданий, особых периодов

образовательного процесса, сезонности и повышения эффективности использования аудиторного фонда высших учебных заведений;

Разработаны модели определения составляющих полной мощности трехфазной четырехпроводной системы электропитания для расчета дополнительных потерь электроэнергии вследствие несимметрии и нелинейности электропотребления в электротехнических комплексах инфраструктуры высших учебных заведений;

Исследованы режимы трехфазных сетей с несимметричным и нелинейной нагрузкой и обосновать алгоритмы работы ПАФ для повышения энергоэффективности внутренних сетей высших учебных заведений.

*Ключевые слова:* высшие учебные заведения, управление электропотреблением, модель электропотребления, мощность потерь, параллельный активный фильтр с накопителем энергии, энергоменеджмент.

Підп. до друку 16.03.2021 р. Формат 60x84 1/16.  
Ум. друк. арк. 1,39. Облік. вид. арк. 1,09. Наклад 100 пр. Зам. 1577.

Видавець і виготовлювач Київський національний університет технологій та дизайну.  
вул. Немировича-Данченка, 2, м. Київ-11, 01011.

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до державного реєстру видавців, виготовників і розповсюджувачів видавничої продукції ДК № 993 від 24.07.2002.