

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**

**Харківський національний університет міського господарства  
імені О. М. Бекетова**

**ЩЕРБАК ІРИНА ЄВГЕНІВНА**

УДК 621.311

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ РОЗПОДІЛЬНИХ  
ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ ШЛЯХОМ КЕРУВАННЯ  
ЕЛЕКТРИЧНИМ НАВАНТАЖЕННЯМ**

Спеціальність 05.14.02 – Електричні станції, мережі і системи

**Автореферат**

дисертації на здобуття наукового ступеня

кандидата технічних наук

Харків – 2020

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Харківському національному університеті міського господарства імені О. М. Бекетова Міністерства освіти і науки України.

**Науковий керівник:** заслужений діяч науки і техніки України  
доктор технічних наук, професор  
**Маляренко Віталій Андрійович,**  
Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова  
професор кафедри систем електропостачання та електроспоживання міст

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**Лежнюк Петро Дем'янович**  
Вінницький національний технічний університет  
завідувач кафедри електричних станцій та систем

доктор технічних наук, професор  
**Сасенко Юрій Леонідович**  
ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет»  
декан енергетичного факультету, професор кафедри електроенергетичних комплексів і систем

Захист відбудеться «08» жовтня 2020 р. о 14:00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 64.089.05 у Харківському національному університеті міського господарства імені О. М. Бекетова за адресою: 61002, м. Харків, вул. Маршала Бажанова, 17, зал засідань Вченої ради (конференц-зал № 1).

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Харківського національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова за адресою: 61002, м. Харків, вул. Маршала Бажанова, 17.

Автореферат розісланий «25» серпня 2020 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради

М.О. Пілічева

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми дослідження.** Одним із напрямків підвищення ефективності роботи розподільних електричних мереж є вирівнювання графіків електричного навантаження (ГЕН). Аналіз методів та засобів регулювання ГЕН свідчить, що покриття ГЕН відбувається в основному на вищих рівнях електроенергетичної системи (ЕЕС), в той час як найбільш ефективно впливати саме на процес електроспоживання в розподільних електричних мережах. Формування рівномірних режимів електроспоживання, в свою чергу, забезпечить підвищення ефективності виробництва, передачі та споживання електричної енергії. Покращення конфігурації ГЕН на нижчих рівнях ЕЕС дозволить в певній мірі впливати і на вирівнювання ГЕН на вищих рівнях електроенергетичної системи.

В останні роки спостерігається перерозподіл структури споживання електроенергії в економіці країни. Зменшення споживання електричної енергії (ЕЕ) промисловістю, де широко застосовуються методи регулювання ГЕН, відповідно відобразилось зміною характеру режимів електроспоживання в енергетичних системах (ЕС) та призвело до розуцільнення графіків електричного навантаження енергетичних систем.

На ефективність роботи електричних мереж впливає територіальна розосередженість споживачів, кількість, потужність та їх режими роботи. А також нерівномірний режим електроспоживання, суттєві втрати електричної енергії та низька автоматизація керування режимами розподільних електричних мереж.

На добовому інтервалі наявні періоди пікових навантажень ГЕН та тривалі періоди суттєвого зниження навантаження у нічні години. Відповідно, через змінний режим електроспоживання значні капітальні вкладення в обладнання електричних мереж використовуються неефективно, бо встановлене обладнання працює у номінальному режимі незначний час.

Таким чином, перспективним напрямком підвищення ефективності роботи розподільних електричних мереж міст є залучення спеціальної групи споживачів-регуляторів (СР) та керування їхніми режимами електроспоживання з метою зміни конфігурації ГЕН на рівні ТП 10/0,4 кВ. Актуальності набувають питання впровадження систем автоматичного керування режимами роботи СР на нижчих рівнях електричних мереж. До того ж, впровадження та керування додатковим навантаженням споживачів-регуляторів дозволяє збільшити відпуск електричної енергії в мережу, ефективно використовувати встановлені потужності електричних станцій та елементів електричних мереж, а саме мережевих трансформаторів та кабельних ліній, що дозволяє досягти зменшення втрат електричної енергії.

Вирішенню питання підвищення ефективності роботи електричних мереж приділяли увагу багато вчених, зокрема, Зорін В.В., Кириленко О.В., Яндульський О.С., Говоров П.П., Михайлов В.В., Розен В.П. та інші. В роботах розглядалися питання оптимізації схем, параметрів та режимів у розподільних

мережах. Але до цього часу не вирішено питання автоматичного вибору оптимальної структури та режимів роботи споживачів-регуляторів, які забезпечують формування рівномірного ГЕН.

Таким чином, наукове обґрунтування методів, критеріїв та технічних засобів керування режимами електроспоживання споживачів-регуляторів у розподільних електричних мережах з метою вирівнювання графіків електричного навантаження є актуальною науковою задачею.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконувалась на кафедрі систем електропостачання та електроспоживання міст Харківського національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова. Здобувач як виконавець брала участь у виконанні науково-дослідних робіт за темами «Енергоефективність і надійність систем передачі та споживання електричної енергії» (№ ДР 0111U010507), «Підвищення ефективності виробництва, передачі та використання електроенергії» (№ ДР 0115U001898), «Підвищення енергоефективності розподільних мереж 0,4 кВ» (№ ДР 0118U007610).

**Мета і задачі дослідження.** Мета роботи – підвищення ефективності роботи розподільних електричних мереж шляхом керування режимом електроспоживання.

Для досягнення поставленої мети в роботі розв'язувались наступні наукові задачі:

- аналіз методів регулювання режимів електроспоживання на різних рівнях електроенергетичної системи та визначення рівня ЕЕС для здійснення ефективного регулюючого ефекту;
- дослідження режимів роботи електроспоживачів міст та виявлення основних факторів, що впливають на графіки навантаження ТП 10/0,4 кВ;
- розроблення методики вибору типу та місця приєднання споживачів-регуляторів до міських мереж;
- удосконалення та розвиток методів керування електричним навантаженням споживачів-регуляторів з врахуванням особливостей графіків електричного навантаження основних споживачів ТП 10/0,4 кВ;
- удосконалення методики комплексної системи оцінювання результатів вирівнювання графіків електричного навантаження споживачами-регуляторами на вищі рівні електроенергетичної системи.

*Об'єкт дослідження* – процеси електроспоживання у міських розподільних електричних мережах.

*Предмет дослідження* – методи та засоби керування електроспоживанням в міських електричних мережах, які забезпечують вирівнювання добових графіків електричного навантаження.

**Методи дослідження.** Обґрунтованість та достовірність сформульованих наукових положень та результатів базується на проведених експериментальних дослідженнях режимів роботи міських електроспоживачів. Перевірка стаціонарності виконана за параметричними тестами (F-критерій Фішера, t-критерій Стьюдента) та кореляційними кривими. Для моделювання роботи

ТП 10/0,4 кВ використовувався метод ймовірно-статистичного моделювання. Коригування оптимізаційної функції ваговими коефіцієнтами здійснено за методом експертних оцінок, для рішення використовувалось нелінійне програмування, знаходження екстремуму функції здійснювалось за методом Ньютона. Для оцінки ефекту від впровадження СР на вирівнювання ГЕН на рівнях ЕЕС застосовувався кореляційний аналіз. Математична обробка результатів виконувалась з використанням програмного забезпечення (MS Excel, STATISTICA).

**Наукова новизна** одержаних результатів полягає у наступному:

- *вперше*

розроблено метод вирівнювання графіка електричного навантаження ТП 10/0,4 кВ, заснований на оптимізації складу та потужності споживачів-регуляторів, який відрізняється врахуванням технічного критерію – втрат електричної енергії та економічного критерію – вартості послуги, що надається споживачами-регуляторами, чим забезпечується зменшення втрат електричної енергії в мережах на 9,5 %;

- *дістало подальшого розвитку:*

метод визначення потужності споживачів-регуляторів та меж фактичних зон доби для підключення їх до діючої ТП 10/0,4 кВ, який відрізняється тим, що на етапі попередньої оцінки враховується навантажувальна здатність та знос ізоляції трансформаторів, чим забезпечується підвищення ефективності використання трансформаторних потужностей та кабельної продукції;

принципи вибору споживачів-регуляторів в системах тепло-електропостачання, які відрізняються комплексним вибором СР, чим забезпечується збільшення величини та якості послуг споживачів;

- *вдосконалено*

ймовірнісну математичну модель навантаження ТП 10/0,4 кВ, що на відміну від існуючих враховує ділянки стаціонарності, чим досягається підвищення повноти інформаційного забезпечення процесу керування і на її основі ефективності роботи мереж та підключених до них споживачів.

**Практичне значення одержаних результатів:**

- розроблено і запропоновано для практичного використання концепцію, методичні засади та алгоритм керування електроспоживанням споживачів-регуляторів, що додатково підключаються до міських електричних мережах з метою регулювання графіків навантаження;

- збільшено середньодобове завантаження ТП 10/0,4 кВ, що забезпечить підвищення ефективності використання капітальних вкладень у міських розподільних електричних мережах;

- розроблено рекомендації щодо підключення споживачів-регуляторів до житлових будинків, торгових центрів та молоко-переробних комбінатів.

Практична цінність підтверджена актами впровадження результатів дисертаційної роботи ТОВ «ІНСОЛАР КЛІМАТ» (м. Харків, акт від 19.09.2018 р.), ПрАТ «МАНОМЕТР-ХАРКІВ» (Харк. обл., м. Мерефа, акт № 7 від 20.10.2018 р.). Новизна і значимість технічних рішень підтверджені

патентами України та публікаціями у наукових виданнях. Результати проведених досліджень використовуються у навчальному процесі на кафедрі систем електропостачання та електроспоживання міст ХНУМГ ім. О.М. Бекетова при читанні дисциплін «Електропостачання та електрозбереження», «Електричні мережі і системи», «Споживачі електричної енергії» (м. Харків, акт № 476 від 28.02.2019 р.).

**Особистий внесок здобувача.** Основні положення і результати дисертаційної роботи були одержані автором самостійно, що підтверджується одноосібними публікаціями. У роботах опублікованих у співавторстві, здобувачу належать наступні результати: [1] – виявлено кореляцію та суттєвий вплив графіку навантаження населення на графік навантаження енергосистеми; [2] – визначено шляхи підвищення показників роботи обладнання у міських розподільних мережах; показано зв'язок між нерівномірністю графіку електричного навантаження та рівнем втрат електроенергії; [3] – розроблено схему керування потужністю споживачів-регуляторів; [7] – проаналізовано нерівномірність ГЕН ОЕС, методи та засоби вирівнювання ГЕН, споживання електричної енергії різними галузями економіки; [9] – запропоновано керувати споживачами-регуляторами залежно від завантаження трансформатора; [10] – розроблено схему керування потужністю споживачів-регуляторів з тиристорним регулятором потужності; [11] – визначено перспективи збільшення споживачів, що застосовують тарифи диференційовані за періодами часу; [12] – виділено підходи до керування навантаженням в енергетичній системі.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати роботи доповідались, обговорювались та були схвалені на 6 міжнародних конференціях: IV Міжнародній науково-технічній конференції «Сучасні проблеми світлотехніки та електроенергетики» (м. Харків, 2011 р.); IV Международной научно-технической интернет-конференции «Новейшие технологии в электроэнергетике» (г. Харьков, 2012 р.); II Міжнародній науково-технічній конференції «Оптимальне керування електроустановками» (м. Вінниця, 2013 р.); Міжнародних науково-практичних конференціях «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України» (м. Харків 2014–2016 рр.).

**Публікації.** За темою дисертації опубліковано 13 наукових праць, у тому числі: 6 статей у фахових виданнях України, 3 у наукометричних базах даних, 2 тези доповідей науково-технічних конференцій та 2 патенти на корисну модель.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається із анотації двома мовами, вступу, чотирьох розділів, висновків, переліку використаних джерел та додатків. Повний обсяг дисертації складає 200 сторінок, 41 рисунок за текстом, з них 5 рисунків на 5 сторінках; 24 таблиці за текстом, з них 2 таблиці на 2 сторінках; 115 найменувань використаних літературних джерел на 12 сторінках, 6 додатків на 44 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації, зазначено зв'язок роботи з науковими програмами, планами та темами. Сформульовано мету, задачі, об'єкт та предмет дослідження, визначено методи виконання досліджень. Представлено основні положення, що характеризують наукову новизну роботи, практичну цінність отриманих результатів. Наведено відомості щодо апробації та публікації основних результатів дисертації.

У **першому розділі** дисертаційної роботи проаналізовано особливості роботи енергетичних систем. Виділено проблему нерівномірності графіків електричного навантаження, виявлено тенденцію зменшення значення коефіцієнтів нерівномірності ГЕН, відтак загострення проблеми розущільнення ГЕН. Зазначено, що на формування ГЕН впливає значення температури повітря, як підвищення у літній період, так і міжсезонні (неопалювальні) та зимові зниження температури. Визначено зростання електроспоживання населенням, комунально-побутовими та іншими непромисловими споживачами поряд із тенденцією до зменшення електроспоживання провідними галузями промисловості.

Встановлено, що дієвим напрямком підвищення ефективності роботи міських розподільних електричних мереж є вирівнювання ГЕН. Проведено аналіз методів та засобів покриття ГЕН. Визначено, що найбільш ефективно впливати на процес електроспоживання споживачів. Зазначено, що перспективним напрямком впливу на режими електроспоживання є впровадження споживачів-регуляторів. Особливу увагу слід приділяти енергоємним споживачам міст, де не набули широкого впровадження заходи щодо регулювання ГЕН. Такими споживачами можуть стати житлові будинки (ЖБ), торгові центри (ТЦ), об'єкти соціальної сфери, харчової та переробної промисловості.

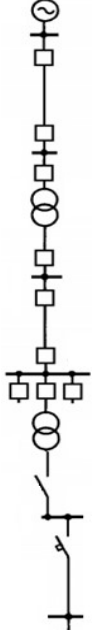
При виборі параметрів елементів розподільної мережі має місце завищення значення потужності встановленого обладнання, зважаючи на навантажувальну здатність трансформаторів та технічні вимоги до надійності роботи. Так, резерв потужності складає 20 – 40 % у години максимуму, через нерівномірність графіків електричного навантаження у години мінімуму резерв досягає до 70 – 80 %. Відповідно можливе підключення додаткового навантаження споживачів-регуляторів. Визначено задачі дисертації.

**Другий розділ** присвячений моделюванню режимів навантаження ТП 10/0,4 кВ. Проаналізовано методи та засоби вирівнювання ГЕН на рівнях електроенергетичної системи. З позиції регулювання графіків навантаження шляхом залучення споживачів-регуляторів виділено три рівні (табл. 1).

Основним методом покриття ГЕН є централізоване регулювання електричного генерування, що здійснюється вводом в експлуатацію ГЕС та ГАЕС (застосовуються в якості СР), розвантаженням або зупинкою блоків ТЕС. Встановлено, що можливо здійснити суттєвий (до 30 %) вплив на формування ГЕН шляхом групового (місцевого) регулювання електроспоживання,

підключаючи СР на рівні ТП 10/0,4 кВ в розподільних мережах міст, ефект від вирівнювання ГЕН буде досягнуто у мережі 10 кВ. Вплив на формування ГЕН шляхом індивідуального регулювання передбачає підключення в якості СР окремих електроприймачів та позначається на роботі мережі низької напруги 0,4 кВ, що потребує значних фінансових інвестицій для реалізації заходів регулювання за незначної одиничної потужності електроприймачів.

Таблиця 1 – Методи, засоби та стимули регулювання графіків навантаження

Рівень погляду регулювання ГЕН СР	ЕЕС з регулювання ГЕН	Регулювання ГЕН	Засоби для регулювання електричного навантаження	Стимули до регулювання навантаження
	3 Магістральні мережі 110(35)кВ	Централізоване	Режими роботи електростанцій, перетоки потужності по магістральним лініям, відключення споживачів III категорії	Підтримка номінальних значень напруги $U$ та частоти $f$
	2 Мережа 10 кВ	Міськове, групове	Режими роботи промислових підприємств Застосування споживачів-регуляторів, що підключаються до шин низької напруги ТП 10/0,4 кВ. Вирівнюється ГЕН на рівні ТП 10/0,4 кВ (РП)	Обмеження потужності енергокомпаніями; договори про участь у торгах на ринку «на добу наперед» або внутрішньо добовому ринку; ТДПЧ
	1 Мережа 0,4 кВ	Індивідуальне	Застосування в якості СР окремих електроприймачів. Вирівнюється ГЕН ГРЩ, шини вводно-розподільного пристрою	Тарифи диференційовані за періодами часу

Пріоритет надано місцевому (груповому) регулюванню ГЕН. Ефект від вирівнювання ГЕН позначиться у мережах 10 кВ та на режимах роботи трансформаторів ТП 10/0,4 кВ. Стимулом впровадження споживачів-регуляторів є укладання договорів про купівлю-продаж електроенергії з оператором ринку та участь у торгах на ринку «на добу наперед» або внутрішньодобовому ринку. Під час торгів на ринку «на добу наперед» оператор ринку визначає ціну купівлі-продажу електричної енергії для кожного розрахункового періоду доби постачання торгової зони за принципом граничного ціноутворення та обсяги електричної енергії.

З метою дослідження рівня завантаження ТП 10/0,4 кВ міських розподільних мереж виконано вимірювання навантаження трансформаторів з номінальною потужністю 100 – 630 кВА на ТП 10/0,4 кВ в зимовий режимний день. За допомогою програми STATISTICA побудовано статистичний ряд у вигляді гістограми та кривої нормального закону розподілу (рис. 1). Математичне очікування навантаження трансформаторів має значення 43,5 %. Значення завантаження більше 100 % спостерігались у всіх випадках за номінальної потужності трансформаторів 100 кВА.



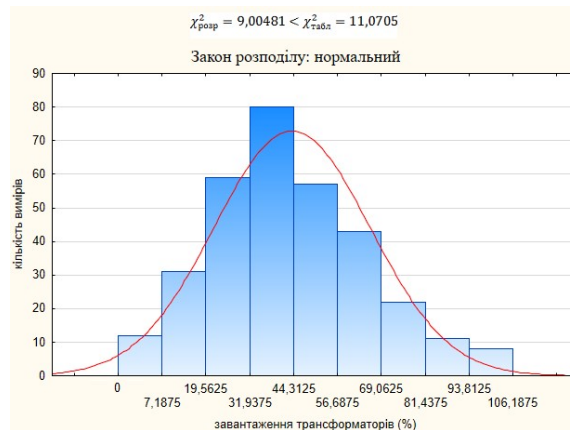


Рисунок 1 – Розподіл значень завантаження трансформаторів ТП 10/0,4 кВ

Для подальшого дослідження визначено умови виконання вимірювань ГЕН, їхню тривалість, обрано технічні засоби вимірювання та проведено експериментальні дослідження режимів роботи електроспоживачів міст.

Виконано дослідження графіків електричного навантаження на різних рівнях системи електропостачання. А саме: загальний ГЕН Об'єднаної енергосистеми України (ОЕС), Харківобленерго, районної понижуючої підстанції 110/10 кВ, від якої отримують живлення побутово-промислові споживачі (60 % побутові споживачі та 40 % промислові), ТП 10/0,4 кВ селітебної зони, на вводах житлового будинку, торгового центру, молоко-переробного комбінату в зимовий та літній режимні дні (табл. 2), за результатами яких можна стверджувати про загальну проблему нерівномірності ГЕН, особливо виражену на нижчих рівнях ЕЕС. Зміна конфігурації графіків електричного навантаження на нижчих рівнях в цілому ефективно вплине на вирівнювання ГЕН енергетичних систем.

Аналіз реальних графіків електричного навантаження свідчить про відмінність їхньої конфігурації від типових. Виділено особливості споживання електричної потужності у торгових центрах та на молоко-переробному комбінаті. Відзначено, що рівень споживання електричної потужності переважає у літній період, це пояснюється застосуванням системи кондиціонування повітря та збільшенням навантаження холодильних центрів для охолодження продукції на молоко-переробному комбінаті. До того ж, в літній період спостерігається менша різниця між значеннями споживаної потужності у часи денного та вечірнього піків навантаження. Визначені особливості ГЕН важливо враховувати при подальшому виборі типів споживачів-регуляторів для зазначених об'єктів.

З метою повноцінного дослідження закономірностей зміни навантаження основних споживачів ТП 10/0,4 кВ важливо оперувати даними реальних ГЕН. Зміна навантаження відбувається випадковим чином, що обумовлено відсутністю детермінованих зв'язків між споживачами електричної енергії. До того ж випадкова функція навантаження на добовому інтервалі нестационарна. З метою підвищення ефективності роботи електричних мереж важливо забезпечити повноту інформаційного забезпечення процесу керування. Для

цього вдосконалено ймовірнісну математичну модель навантаження ТП 10/0,4 кВ враховуючи ділянки стаціонарності.

Таблиця 2 – ГЕН на різних рівнях системи електропостачання

Рівень ЕС	ГЕН зимовий режимний день	Коеф. ГЕН	ГЕН літній режимний день	Коеф. ГЕН
ОЕС		$k_H=0,77$ $k_3=0,91$ «провал» 3300MWt		$k_H=0,74$ $k_3=0,91$ «провал» 2900MWt
ХОЕ		$k_H=0,64$ $k_3=0,85$ «провал» 320 MWt		$k_H=0,61$ $k_3=0,83$ «провал» 270 MWt
ПС 110/10 кВ		$k_H=0,44$ $k_3=0,74$ «провал» 15 MWt		$k_H=0,42$ $k_3=0,72$ «провал» 12,5 MWt
ТП 10/0,4 кВ		$k_H=0,24$ $k_3=0,56$ «провал» 154кВт		$k_H=0,39$ $k_3=0,74$ «провал» 124кВт
ЖБ		$k_H=0,28$ $k_3=0,54$ «провал» 10,5кВт		$k_H=0,36$ $k_3=0,68$ «провал» 10кВт
ТЦ		$k_H=0,62$ $k_3=0,81$ «провал» 170кВт		$k_H=0,5$ $k_3=0,76$ «провал» 280кВт
Молоко-переробний комбінат		$k_H=0,27$ $k_3=0,67$ «провал» 230кВт		$k_H=0,26$ $k_3=0,66$ «провал» 240кВт

Поділ та дослідження процесу на стаціонарність виконаємо на годинних інтервалах. Для кожного інтервалу проведено оцінку закону розподілу за критерієм Пірсона  $\chi^2_{\text{табл}} = 11,1 > \chi^2_{\text{розр4}} = 4,0787$  (на рис. 2, наведено результати для інтервалу 4 з 03:00 до 04:00 годин), з метою перевірки стаціонарності застосовувались параметричні тести, для підтвердження гіпотези про постійність дисперсій – F-критерій Фішера ( $F_p = 1,47582 > F_4 = 1,13763$ ), про постійність математичного очікування – t-критерій Стьюдента ( $t_p = 1,97646 > t_4 = -0,23258$ ), побудовано графік автокореляційної функції, яка апроксимована аналітичною залежністю  $R(\tau) = D \cdot e^{-\alpha\tau} \cdot \cos(\beta\tau)$  (рис. 2, б), враховуючи згасаючий характер функції підтверджена стаціонарність процесу на виділеному інтервалі.

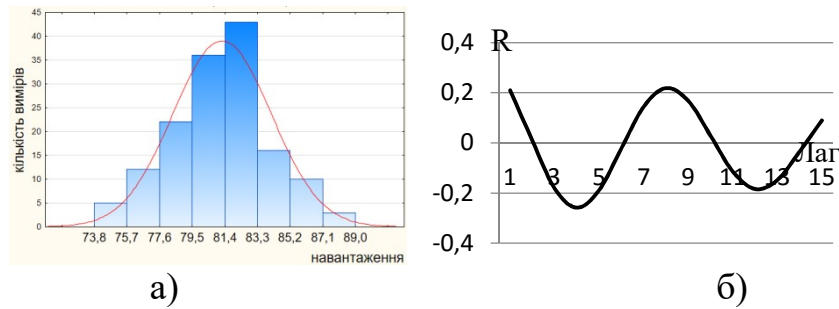


Рисунок 2 – Добовий інтервал з 03:00 до 04:00 годин: а) гістограма та закон розподілу навантаження; б) графік кореляційної функції

Для достовірного опису процесу зміни навантаження обґрунтовано застосування ймовірнісно-статистичного методу моделювання, що враховує стохастичний характер зміни навантаження. Ймовірнісна математична модель навантаження для кожної ділянки стаціонарності представлена як

$$P_i(t) = M[P_i(t)] + \beta\sigma[P_i(t)], \quad (1)$$

де  $M[P_i(t)]$  – математичне очікування навантаження в момент часу  $t$ ;  
 $\sigma[P_i(t)]$  – середньоквадратичне відхилення навантаження у момент часу  $t$ ;  
 $\beta$  – коефіцієнт розкиду випадкової величини навантаження.

Отримані числові характеристики навантаження на ділянках стаціонарності (рис. 3) та побудовано моделі навантаження.

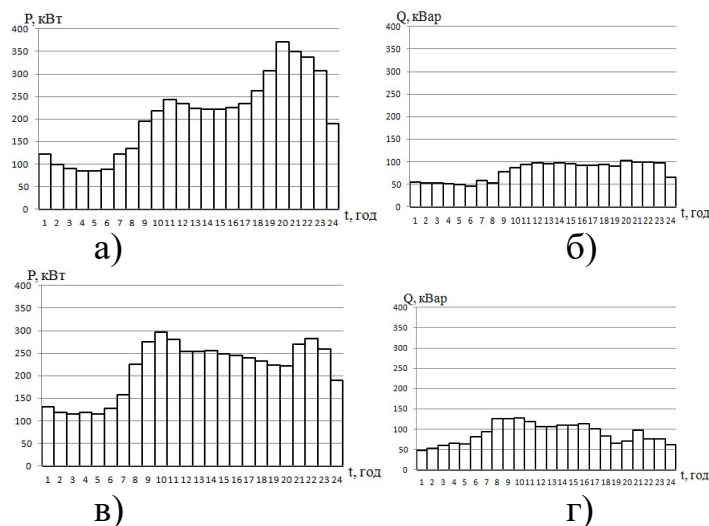


Рисунок 3 – Модель навантаження на ділянках стаціонарності: а) активне, б) реактивне – в режимі максимальних навантажень, в) активне, г) реактивне – в режимі мінімальних навантажень

Наведені моделі основного навантаження ТП 10/0,4 кВ є основою для подальшої оптимізації режимів роботи споживачів-регуляторів.

**Третій розділ** дисертаційної роботи присвячений підвищенню ефективності роботи міських електричних мереж за рахунок вирівнювання графіка електричного навантаження та ефективного завантаження

встановленого обладнання електричних мереж на базі оптимального керування електроспоживанням споживачів-регуляторів.

З метою підвищення використання трансформаторних потужностей та кабельної продукції розвинуто метод визначення максимальної потужності споживачів-регуляторів та період доби для їхнього підключення до діючої ТП 10/0,4 кВ з врахуванням навантажувальної здатності за критерієм термічного зношення ізоляції трансформатора у попередньому режимі роботи (змодельованого ГЕН основних споживачів ТП 10/0,4 кВ). Відповідно до цього створено алгоритм визначення можливої максимальної потужності СР для підключення до діючої ТП 10/0,4 кВ (рис. 4).

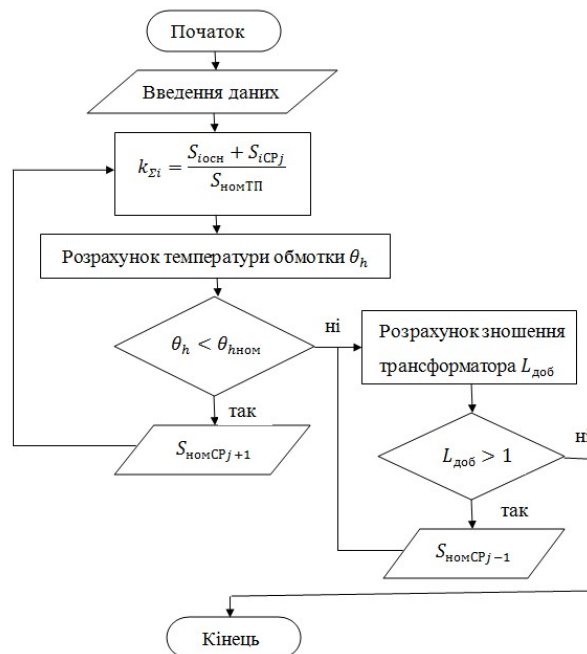


Рисунок 4 – Алгоритм вибору максимальної потужності СР при підключенні до діючої ТП 10/0,4 кВ

З метою забезпечення підвищення якості та величини послуг, що надаються СР визначено принципи їх вибору в системах тепло-електропостачання, що полягають у комплексному застосуванні різних типів СР та сучасних автоматизованих систем для керування режимами їх роботи.

В якості СР запропоновано залучати системи тепло- холодопостачання. З метою вибору СР для теплопостачання об'єктів ЖКГ розглянуто особливості гарячого водопостачання. Графік споживання гарячої води за добу досить нерівномірний, часи максимуму та мінімуму збігаються за часом із ГЕН ЕС, що свідчить про ускладнення проблеми нерівномірності при збільшенні застосування населенням квартирних електробойлерів. Натомість, протягом місяця графік споживання гарячої води не має суттєвої нерівномірності. Відповідно він більш прогнозований, що дозволяє визначити необхідний об'єм гарячої води. Як СР можуть застосовуватися промислові електричні водонагрівачі з блок-ТЕНами.

Також в якості СР запропоновано застосування льдоакумуляторів, які можливо задіяти як в систему кондиціонування повітря, так і в систему холодильного центру. Застосування в якості СР льдоакумуляторів, що працюють у складі холодильного центру дозволяє зменшити приєднану потужність холодильного центру, покращити конфігурацію ГЕН, збільшити обсяги виробництва без заміни діючого обладнання електричних мереж.

Забезпечення умов оптимального режиму дозволить мати максимальний прибуток. З метою ефективного використання споживачів-регуляторів їхнє навантаження має бути керованим.

З метою створення сумісного графіка активного навантаження  $P_{\Sigma}(t) = P_{\text{оч.сп}}(t) + P_{\text{СР}}(t)$ ,  $0 \leq t \leq T < \infty$  за максимальної щільності ГЕН  $\gamma_{\Sigma} \rightarrow 1$  необхідно та достатньо, щоб на кожному інтервалі часу періоду, що аналізується  $t \in [0, T]$  зміна навантаження споживачів-регуляторів була протиставлена зміні навантаження основних споживачів ТП 10/0,4 кВ.

Для реалізації процесу оптимізації керування навантаженням споживачів-регуляторів задана цільова функція, де критерієм оптимізації приймаємо сумарний мінімум вартості додаткових витрат енергопостачальної організації на покриття втрат електричної енергії в мережі викликаних нерівномірністю ГЕН та за спожиту електричну енергію для виконання технологічного процесу споживачами-регуляторами

$$\begin{aligned}
 B = & T \cdot \left( \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^T \left( \frac{(P_i(t) + P_{\text{СР}i})^2 + Q_i^2}{U_{\text{л}}^2} \cdot r_{\text{л}} \cdot t_i \right)_n + \right. \\
 & \left. + \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^T \left( \frac{\Delta P_{\text{кз}} \cdot ((P_i(t) + P_{\text{СР}i})^2 + Q_i^2)}{m \cdot S_{\text{НОМ}}^2} \cdot t_i + m \cdot \Delta P_{\text{xx}} \cdot t_i \right)_j \right) + \\
 & + T \cdot \sum_{i=1}^N (k_i P_{\text{СР}i} t_i) \rightarrow \min
 \end{aligned} \tag{2}$$

за системи обмежень обумовлених навантажувальною здатністю трансформаторів і кількістю ЕЕ на виконання технологічного процесу СР

$$\begin{cases} P_{\text{СР}i} \leq (m \cdot S_{\text{НОМТП}} - \sqrt{P_i(t)^2 + Q_i(t)^2}) \cdot \cos \varphi \\ \sum_{i=1}^N P_{\text{СР}i} \cdot t_i = W_{\text{СР}} \end{cases} \tag{3}$$

та граничних умов, що задають діапазон зміни значень потужностей СР:

$$0 \leq P_{\text{СР}i} \leq P_{\text{НОМСР}}, \tag{4}$$

де  $T$  – тариф на електричну енергію;  $N$  – кількість ліній в мережі;  $J$  – кількість трансформаторних підстанцій;  $r_{л}$  – опір ліній електропередавання;  $S_{ном}$  – номінальна потужність трансформаторів;  $m$  – кількість силових трансформаторів;  $\Delta P_{кз}, \Delta P_{хх}$  – втрати активної потужності короткого замикання та холостого ходу силових трансформаторів;  $k_i$  – тарифні коефіцієнти;  $P_{CPi}$  – потужність СР в  $i$ -тий період часу;  $t_i$  – період часу;  $T$  – кількість періодів часу;  $\sqrt{P_i(t)^2 + Q_i(t)^2}$  – навантаження основних споживачів ТП в  $i$ -тий період часу (визначається із ймовірнісної моделі);  $\cos\varphi$  – коефіцієнт зсуву;  $W_{CP}$  – електроенергія на потреби СР,  $P_{номCP}$  – номінальна потужність СР.

Науково обґрунтовані пропорції між врахуванням складових математичної моделі є важливим фактором ефективного регулювання ГЕН. Багатокритеріальна оптимізація здійснюється за узагальненою цільовою функцією до якої входять прийняті критерії із ваговими коефіцієнтами:

$$B_{уз} = \sum_{k=1}^K \frac{\alpha_k B_k}{B_{кнорм}} \rightarrow \min, \quad (5)$$

де  $B_k$  –  $k$ -а цільова функція, що виражає  $k$ -й критерій;  $B_{кнорм}$  – нормоване значення  $k$ -ої цільової функції;  $\alpha_k$  – коефіцієнт ваги  $k$ -ої цільової функції;  $K$  – кількість прийнятих критеріїв.

За методом експертних оцінок надано значення вагових коефіцієнтів  $\alpha_1 = 0,85$  для складової втрат ЕЕ та  $\alpha_2 = 0,15$  для складової витрат за спожиту ЕЕ, як такі за яких оптимізаційна функція є найбільш чутливою до двох складових.

Для реалізації процесу оптимізації використано метод нелінійного програмування. Застосування нелінійного програмування дозволяє за встановленої системи обмежень, отримати на кожному інтервалі оптимальні значення потужності споживачів-регуляторів. Рішення оптимізаційної задачі реалізовано у пакеті MS Excel. Використання отриманої інформації дає змогу оптимально керувати навантаженням СР. Застосування запропонованого методу оптимізації регулювання навантаження СР дозволяє сформувати ГЕН за економічними критеріями з врахуванням конфігурації ГЕН основного навантаження ТП 10/0,4 кВ.

Створення системи автоматичного керування СР передбачає, що кожен із СР має свій мікроконтролер, що визначає та контролює умови його роботи. Установка СР1 працює в автоматичному режимі під керуванням по термостату товщини льоду. Блок керування СР2 залежно від налаштування терморегулятора і температури води у водонагрівачі виконує включення або відключення контакторів нагрівальних груп блок-ТЕНів, що дозволяє регулювати потужність нагріву і відключає нагрівачі при виникненні аварійних ситуацій. Важливою задачею комплексного застосування СР різних типів є автоматизація процесу їх сумісної роботи враховуючи обмеження на

електричну потужність на потреби СР та їх поточний стан. Система керування складається із датчика потужності та мікроконтролера, який видає керуючі команди на підключення споживачів-регуляторів.

Розроблений метод вирівнювання графіка електричного навантаження ТП 10/0,4 кВ, заснований на оптимізації складу та потужності споживачів-регуляторів враховуючи критерій економічності послуги, що надається СР. Застосування запропонованого методу керування режимами роботи різних типів СР за вказаних обмежень дає змогу використовувати резерв потужності ТП 10/0,4 кВ, що дозволяє збільшити відпуск електричної енергії по існуючій електричній мережі та зменшити коливання навантаження на добовому інтервалі, що призводить до зменшення втрат електричної енергії.

У **четвертому розділі** розглянуто техніко-економічний ефект застосування методу вирівнювання графіка електричного навантаження ТП 10/0,4 кВ, шляхом оптимізації складу та потужності СР.

В межах виділеної ділянки електричної мережі (рис. 5) розглянуто 2 варіанти впливу від керування потужністю споживачів-регуляторів на ГЕН ТП 10/0,4 кВ: перерозподіл споживаної потужності у часі з метою вирівнювання ГЕН та зменшення приєднаної потужності об'єкту до мережі; збільшення відпуску електричної енергії в мережу (збільшення обсягів виробництва підприємством) без заміни діючого обладнання електричних мереж та вирівнювання загального графіку електричного навантаження.

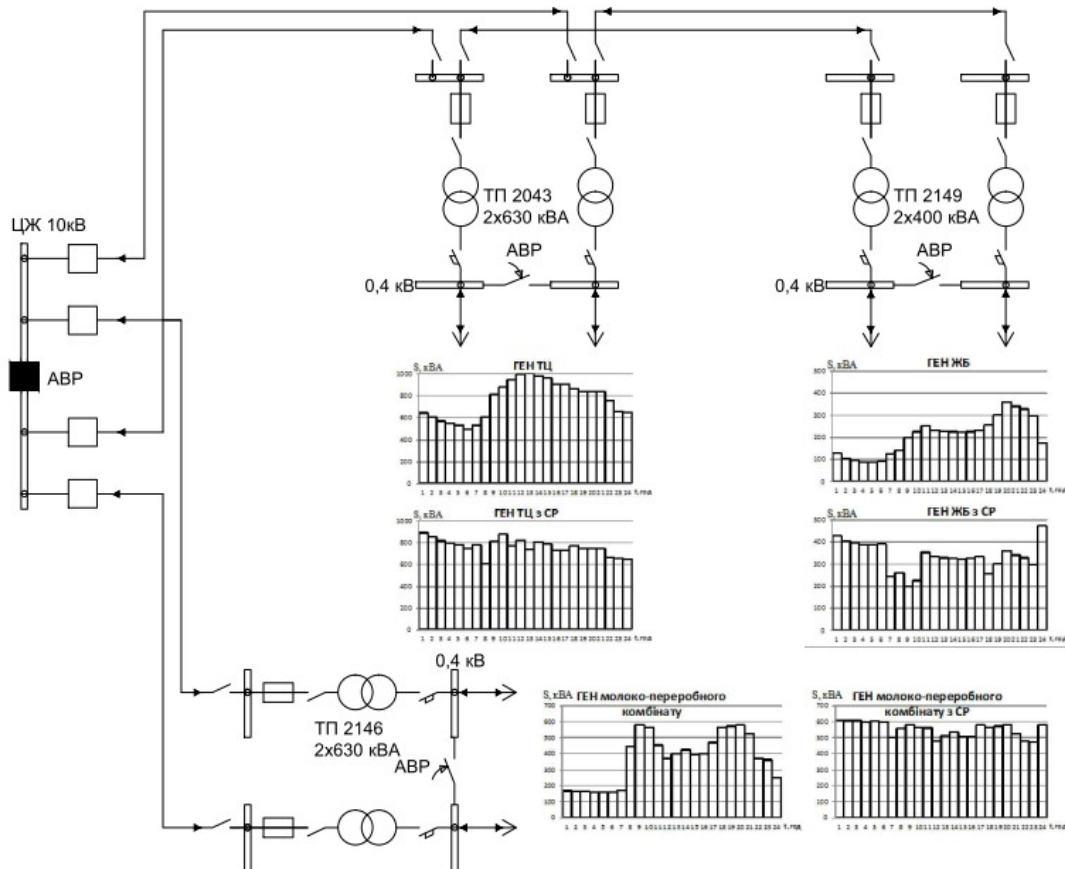


Рисунок 5 – Схема досліджуваної ділянки мережі з графіками електричного навантаження до та після підключення споживачів-регуляторів



Аналіз основних коефіцієнтів, що характеризують ГЕН ТП 10/0,4 кВ до та після підключення СР свідчить про покращення конфігурації ГЕН ТП 10/0,4 кВ після оптимізації режимів роботи споживачів-регуляторів.

Для здійснення повноцінної оцінки ефекту від впровадження СР на вищій рівні ЕЕС проведена оцінка ступеню співпадіння форм ГЕН із споживачами-регуляторами та ГЕН на вищих рівнях ЕЕС за значенням коефіцієнту взаємної кореляції між ними, що свідчать про протидію формованого ГЕН споживачами-регуляторами та позитивного ефекту на формування ГЕН вищих рівнів.

Постійна зміна навантаження призводить до зміни величини втрат потужності та ККД трансформатора в кожен з періодів часу (рис. 6).

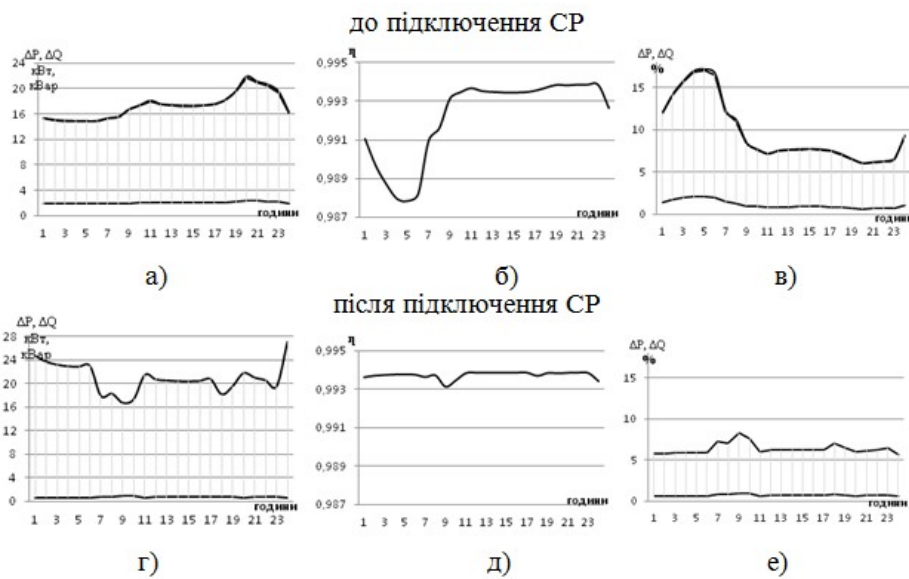


Рисунок 6 – Динаміка зміни значення: а), г) втрат активної та реактивної потужності; б), д) ККД трансформатора; в), е) відносних втрат активної та реактивної потужності на 1 кВт·год до та після підключення СР

Застосування запропонованого методу вирівнювання ГЕН ТП 10/0,4 кВ шляхом оптимізації складу та потужності СР дозволило змінити умови експлуатації трансформаторів міських електричних мереж, а саме підвищити завантаження до рівня оптимального, що вплинуло на значення коефіцієнтів корисної дії трансформаторів та конфігурацію графіків електричного навантаження. Дані заходи дозволили досягти: на ТП 2149 зниження втрат потужності в трансформаторах на 34,1 % на одиницю переданої потужності; на ТП 2043 перерозподіл споживаної потужності протягом доби призвів до зниження втрат в трансформаторах на 2,1 % на одиницю переданої потужності та зменшення приєднаної потужності об'єкту ТЦ на 100 кВт; по ТП 2146 вирішена задача збільшення відпуску електричної енергії для потреб молокопереробного комбінату в 1,5 рази без заміни діючого обладнання електричних мереж та поряд із цим досягнуто зменшення втрат на 17,9 % на одиницю переданої потужності. Проведено розрахунки втрат потужності у кабельних



лініях. Встановлено, що загалом по ділянці мережі досягнуто зниження втрат потужності на 9,5 %.

Економічна доцільність застосування в якості СР систем нагріву води електроенергією з баками-акумуляторами досягається за виконання умови:

$$\frac{T \cdot \sum_{i=1}^n k_i \cdot P_{CPI} \cdot T_i}{V} + B_{рес} + B_{к.вкл} \leq B_{носл}, \quad (6)$$

де  $V$  – об'єм послуги, що надається СР;  $B_{рес}$  – вартість ресурсу;  $B_{к.вкл}$  – вартість капітальних вкладень у встановлення СР;  $B_{носл}$  – вартість аналогічної послуги без застосування СР. Вартість зазначена на одиницю об'єму послуги, що надається споживачами-регуляторами.

Економія коштів при застосуванні льодоакумуляторів, що здатні до переносу споживаної потужності з годин максимуму у години мінімуму графіків електричного навантаження буде зумовлена багатьма чинниками:

$$E = B_3 \Delta P_3 t + \sum_{i=1}^n T \cdot (W_{cp} - k_i \cdot W_{cp}) + T \sum_{j=1}^m \Delta W_{плі} + T \sum_{j=1}^m \Delta W_{пті} + \\ + \sum_{i=1}^n \Delta B_{прі} L_{прі} + \sum_{i=1}^n \Delta B_{трі} - B_{CP} - B_{аCP} - W_{CP}(1 - \eta)T, \quad (7)$$

де  $B_3$  – вартість заявленої потужності,  $\Delta P_3$  – зниження заявленої потужності;  $t$  – час роботи;  $T$  – тариф на електричну енергію;  $k_i$  – тарифний коефіцієнт;  $W_{cp}$  – електроенергія перерозподілена СР за час  $t$ ;  $\Delta W_{плі}$  – зниження втрат на нагрів  $i$ -го провідника за час  $t$ ;  $\Delta W_{пті}$  – зниження втрат у  $i$ -му трансформаторі за час  $t$ ;  $\Delta B_{прі}$  – зниження вартості метру  $i$ -го провідника, за рахунок зменшення його перерізу;  $L_{прі}$  – довжина  $i$ -го провідника;  $\Delta B_{трі}$  – зниження вартості  $i$ -го трансформатора за зменшення номінальної потужності;  $B_{CP}$  – вартість СР;  $\eta$  – ККД СР;  $B_{аCP}$  – амортизаційні відрахування та вартість обслуговування споживачів-регуляторів.

Техніко-економічний ефект від вирівнювання ГЕН шляхом оптимізації складу та потужності СР складається із зменшення втрат електроенергії на 9,5 % та зниження вартості послуги, що надається СР на 15 %.

Ефективний розподіл споживання електричної енергії на добовому інтервалі сприяє зниженню необхідності в нових генеруючих потужностях та досягненню рентабельності виробництва. Вирівнювання графіків електричного навантаження за рахунок споживачів-регуляторів сприяє збільшенню прибутку та підвищенню ефективності енергозбутової діяльності енергорозподільних компаній. Для споживачів залежно від виробничої необхідності досягається зменшення заявленої потужності підключення або збільшення відпуску електричної енергії в мережу, а відтак, зростання обсягів виробництва без заміни діючого обладнання електричних мереж.

## ВИСНОВКИ

Отримані у дисертаційній роботі наукові результати дозволяють підвищити ефективність роботи міських розподільних електричних мереж шляхом вирівнювання графіків електричного навантаження, зокрема вирішена задача оптимального керування навантаженням споживачів-регуляторів при підключенні до діючих ТП 10/0,4 кВ з урахуванням особливостей їхньої роботи за виконання технологічного процесу споживачами-регуляторами. Ці розробки є внеском у розвиток методів вирівнювання графіків електричного навантаження в міських розподільних мережах і дозволяють зробити наступні висновки:

1. Проведений аналіз методів та засобів регулювання режимів електроспоживання на різних рівнях електроенергетичної системи та визначено рівень електроенергетичної системи для здійснення ефективного регулюючого ефекту, а саме обґрунтовано застосування споживачів-регуляторів, як вагомого засобу коригування графіка навантаження у міських розподільних мережах при підключенні СР до ТП 10/0,4 кВ.

2. Проведені експериментальні дослідження режимів роботи міських електроспоживачів дозволили виявити основні фактори, що впливають на формування ГЕН ТП 10/0,4 кВ. Експериментальні дослідження ТП 10/0,4 кВ показали, що вони працюють з низьким коефіцієнтом завантаження, що свідчить про наявність резерву встановленої потужності для додаткового підключення навантаження СР. Виділено ділянки стаціонарності функції навантаження на годинних інтервалах часу. Для опису процесу зміни навантаження ТП 10/0,4 кВ побудована ймовірнісна математична модель навантаження. Це дало змогу розвинути метод визначення можливої потужності споживачів-регуляторів та меж фактичних зон доби для підключення до діючої ТП 10/0,4 кВ з урахуванням навантажувальної здатності та зносу ізоляції трансформаторів.

3. Розроблено методику вибору типу та місця приєднання споживачів-регуляторів до міських розподільних мереж. Зазначено, що найбільш ефективне комплексне застосування СР різних типів. Доведена ефективність використання СР для систем тепло-холодопостачання. Обрано схемні рішення та обладнання, що випускаються промисловістю.

4. Удосконалено та розвинуто метод керування електричним навантаженням споживачів-регуляторів у міських електричних мережах з врахуванням особливостей ГЕН основних споживачів ТП 10/0,4 кВ. Для оптимізації режимів роботи РЕМ, шляхом вирівнювання ГЕН, задана цільова функція з врахуванням технічного критерію – втрат електричної енергії та економічного критерію – вартості послуги, що надається СР, система обмежень, що враховує технічні фактори та граничні умови. Для рішення оптимізаційної задачі використовувалось нелінійне програмування, знаходження екстремуму функції здійснено за методом Ньютона. Розроблено алгоритм роботи мікропроцесора для керування потужністю споживачів-регуляторів різних типів.

5. Удосконалено методику комплексної системи оцінювання результатів вирівнювання ГЕН споживачами-регуляторами у розподільних мережах зважаючи на чисельно неспіврозмірні графіки електричного навантаження на різних рівнях електроенергетичної системи.

6. Визначено комплекс чинників, що призводять до економії коштів при залученні споживачів-регуляторів, а саме зниження заявленої потужності на 10 % за рахунок перерозподілу навантаження протягом доби, зниження втрат електричної енергії по ділянці мережі на 9,5 %.

7. Підвищення ефективності роботи міських електричних мереж на основі автоматичного керування сумісною роботою СР різних типів дозволяє покращити конфігурацію ГЕН, збільшити середньодобове завантаження ТП, що забезпечує підвищення ефективності використання капітальних вкладень в міських розподільних електричних мережах, збільшити відпуск електричної енергії на встановлених потужностях, відповідно, прибуток енергопостачальної організації та забезпечити споживача якісними послугами за нижчим тарифом.

8. Результати наукових досліджень та практичних розробок, що здійсненні у дисертаційній роботі втілені в проектну та експлуатаційну практику ТОВ «ІНСОЛАР», ПрАТ «МАНОМЕТР-ХАРКІВ», а також використовуються в навчальному процесі ХНУМГ ім. О. М. Бекетова.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

### *Статті у наукових фахових виданнях України*

1. Маляренко В. А., Нечмоглод І. Е., Колотило І. Д. Неравномерность графика загрузки энергосистемы и способы ее выравнивания. *Світлотехніка та електроенергетика*. 2011. № 4. С. 61–66. (Особистий внесок: здобувачем виявлено кореляцію та суттєвий вплив графіку навантаження населення на графік навантаження енергосистеми).

2. Маляренко В. А., Щербак І. Є., Колотило І. Д. Економія електроенергії і зниження втрат в електричних мережах. *Енергосбереження Енергетика Енергоаудит*. 2012. № 8. С. 9–14. (Особистий внесок: здобувачем визначено шляхи підвищення показників роботи обладнання у міських розподільних мережах; показано зв'язок між нерівномірністю графіку електричного навантаження та рівнем втрат електроенергії).

3. Маляренко В. А., Щербак І. Є., Колотило І. Д. Потребители-регуляторы как эффективное направление регулирования графика загрузки электрических сетей. *Інтегровані технології та енергозбереження*. 2014. № 1. С. 3–14. (Особистий внесок: здобувачем розроблено схему керування потужністю споживачів-регуляторів).

4. Щербак І. Є. Моделювання режимів роботи споживачів-регуляторів в міських розподільних мережах. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка*. 2014. № 153. С. 119–121.

5. Щербак І. Є. Дослідження можливостей керування споживачами-

регуляторами залежно від навантажувальної здатності трансформаторів. *Енергетика та комп'ютерно-інтегровані технології в АПК*. 2015. № 1. С. 30–32.

6. Щербак І. Є. Дослідження навантаження трансформаторів міських розподільних мереж. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Технічні науки*. 2016. № 176. С. 26–27.

***Наукові праці у виданнях іноземних держав або виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз***

7. Маляренко В. А., Щербак І. Є. Аналіз споживання паливно-енергетичних ресурсів України та їх раціонального використання. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування*. 2013. № 14. С. 118–126. (Ulrich's Periodicals Directory). (Особистий внесок: здобувачем проаналізовано нерівномірність ГЕН ОЕС, методи та засоби вирівнювання ГЕН, споживання електричної енергії різними галузями економіки).

8. Щербак І. Є. Оцінка вирівнювання графіків електричних навантажень. *Світлотехніка та електроенергетика*. (Index Copernicus, World Cat). 2018. № 1. С. 36–39.

9. I. Shcherbak. Mathematical model of consumer regulators management for alignment of electric load graphs of transformer substation 10/0.4 kV. *Світлотехніка та електроенергетика*. (Index Copernicus, WorldCat). 2019. № 3. С. 125–129.

***Патенти***

10. Спосіб регулювання навантаження трансформатора в мережевих трансформаторних підстанціях: пат. 75207 Україна: МПК51 H02J3/14, H02J3/28. № u 201205527; заявка 07.05.2012; публікація 26.11.2012, Бюл. № 22. 3 с. (Особистий внесок: здобувачем запропоновано керувати споживачами-регуляторами залежно від завантаження трансформатора).

11. Спосіб коригування балансу активної потужності і частоти в енергосистемі: пат. 92684 Україна: МПК H02J3/24, H02J3/00. № u 2014 03570; заявка 07.04.2014; публікація 26.08.2014, Бюл. № 16. 4 с (Особистий внесок: здобувачем розроблено схему керування потужністю споживачів-регуляторів з тиристорним регулятором потужності).

***Праці апробаційного характеру***

12. Маляренко В. А., Щербак І. Є. До питання організації впливу на графік навантаження. *Новейшие технологии в электроэнергетике: материалы IV международной научно-технической интернет-конференции* (г. Харьков, 1–25 нояб. 2012 р.). Харків: ХНАГХ, 2012. С. 88–89. (Здобувачем визначено перспективи збільшення споживачів, що застосовують тарифи диференційовані за періодами часу).

13. Маляренко В. А., Щербак І. Є. Управление потребителями-регуляторами для регулирования нагрузки электроэнергетической системы. *Оптимальное управление электроустановками: материалы II міжн. наук.-техн. конф.* (м. Вінниця, 22–24 жовт. 2013 р.). Вінниця: ВНТУ, 2013. С. 66.

(Здобувачем виділено підходи до керування навантаженням в енергетичній системі).

Наведені публікації містять результати безпосередньої роботи здобувача на окремих етапах дослідження, відображають основні положення та висновки роботи. Авторська участь здобувача в опублікованих наукових працях погоджена зі співавторами.

## АНОТАЦІЯ

**Щербак Ірина Євгенівна. Підвищення ефективності роботи розподільних електричних мереж шляхом керування електричним навантаженням. – Рукопис.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.02 – електричні станції, мережі і системи. Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова. Харків, 2020.

Дисертаційна робота присвячена питанням підвищення ефективності роботи міських розподільних мереж шляхом вирівнювання графіків електричного навантаження.

У роботі визначено особливості ГЕН ТП 10/0,4 кВ, виділено ділянки стаціонарності. Побудовано ймовірнісну математичну модель навантаження ТП 10/0,4 кВ з метою забезпечення підвищення повноти інформаційного забезпечення процесу керування СР. Визначено потужність споживачів-регуляторів та межі зон доби для їх підключення до діючої ТП 10/0,4 кВ з врахуванням навантажувальної здатності та зносу ізоляції трансформаторів.

Розвинуто принципи вибору СР, зазначена перевага комплексного застосування різних типів СР у системах тепло- холодопостачання.

Розроблено метод комплексного вирішення проблеми вирівнювання графіків електричного навантаження та оптимізації завантаження трансформаторів міських розподільних мереж шляхом керування потужністю споживачів-регуляторів враховуючи сумарний мінімум вартості додаткових витрат енергопостачальної організації на покриття втрат електричної енергії викликаних нерівномірністю ГЕН та за спожиту електричну енергію для виконання технологічного процесу споживачами-регуляторами. Зазначено вагові коефіцієнти для складових математичної моделі. Оптимізаційна математична модель вирішена за методом нелінійного програмування.

Застосування розробленого методу дозволило знизити втрати потужності у мережі за рахунок підвищення ККД трансформаторів на 9,5 % та зменшити нерівномірність графіку електричного навантаження.

*Ключові слова:* графік електричного навантаження, електроенергетична система, міські розподільні мережі, споживач-регулятор, трансформаторна підстанція

## ABSTRACT

**Shcherbak Iryna. «Improvement of the efficiency of electrical distribution networks by power load management».** – Manuscript.

Dissertation for obtaining the scientific degree of the candidate of technical sciences in the specialty 05.14.02 – Electric stations, networks and systems. O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. Kharkiv, 2020.

The dissertation is devoted to issues of increasing the efficiency of urban distribution networks functioning on the basis of equalization of electric load graphs (ELG). The study of the methods and technical means of alignment of ELG showed that the coverage of ELG mainly on the higher levels of the electro energetic system occurs, while the most effect on the process of electricity consumption is at the level of distribution in electrical networks. The factors that have a significant effect on the formation of the ELG of energy systems in Ukraine are identified. The level of the hierarchical structure of the power system, on which it is expedient to use consumer regulators for alignment of the ELG is justified.

The features of the ELG 10 / 0.4 kV are determined in the work, stationary areas are allocated and a probabilistic mathematical model of the 10/0.4 kV TS load is constructed in order to ensure the completeness of information support for the process of control of consumers-regulators (CR). The power of the consumers-regulators and the boundaries of the zones of the day for their connection to the existing TS 10 / 0.4 kV were determined taking into account the load capacity and the insulation wear of the transformers.

The principles of choice of CR have been developed, the advantage of complex application of different types of consumers-regulators in systems of heat and cold supply has been stated. The peculiarities of the use of automated water heating systems and ice accumulators as CR have been investigated.

The method of complex solution of the problem of alignment of ELG of TS 10/0,4 kV based on optimization of composition and power of CR is developed. An optimization mathematical model of power management of CR was created, taking into account the total minimum cost of additional costs of the energy supply organization to cover the losses of electricity caused by the unevenness of the ELG and for the consumed electricity for the technological process by the consumers-regulators. Weight coefficients for the components of the mathematical model have been determined. The optimization mathematical model is solved by the nonlinear programming method. The application of the developed method allowed to reduce the power losses in the network by 9.5% per unit of transmitted power by reducing the irregularity of the ELG and increasing the efficiency of the transformers.

The effectiveness of applying the alignment methods of the graph of electrical load under conditions of numerically in commensurate the ELG on the levels of Energy System are evaluated. The factors that lead to cost savings due to the redistribution of electricity consumed during the day when used as consumers-regulators of water heaters and ice-accumulators are identified.

*Keywords:* electric power system, graph of electrical load, urban distribution networks, consumer-regulator, transformer substation

**Щербак Ірина Євгенівна**

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ РОЗПОДІЛЬНИХ  
ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ ШЛЯХОМ КЕРУВАННЯ  
ЕЛЕКТРИЧНИМ НАВАНТАЖЕННЯМ**

05.14.02 – електричні станції, мережі і системи

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Підп. до друку 18.08.2020  
Друк на різнографі  
Зам. № 10170

Формат 60x84 1/16  
Ум. друк. арк. 0,9  
Тираж 100 пр.

Видавець і виготовлювач:  
Харківський національний університет міського господарства  
імені О.М. Бекетова,  
вул. Маршала Бажанова, 17, Харків, 61002  
Електронна адреса: rectorat@kname.edu.ua  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:  
ДК № 5328 від 11.04.2017