

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

**ОПРИШКО ВІТАЛІЙ ПАВЛОВИЧ**



УДК 621.316.1

**ОЦІНЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ КЕРУВАННЯ ПОПИТОМ В  
СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ З АКТИВНИМ  
СПОЖИВАЧЕМ**

Спеціальність 05.14.01 – Енергетичні системи та комплекси

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Київ – 2019

### **Дисертацією є рукопис.**

Робота виконана на кафедрі електропостачання Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Міністерства освіти і науки України.

**Науковий керівник:** доктор технічних наук, професор  
**ДЕНИСЮК Сергій Петрович,**  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря  
Сікорського», директор Інституту енергозбереження та  
енергоменеджменту.

**Офіційні  
опоненти:** доктор технічних наук, старший науковий співробітник  
**БЛІНОВ Ігор Вікторович,**  
Інститут електродинаміки Національної академії наук  
України, провідний науковий співробітник відділу  
моделювання електроенергетичних об'єктів і систем № 3;

кандидат технічних наук, доцент  
**ЛАЗУРЕНКО Олександр Павлович,**  
Національний технічний університет «Харківський  
політехнічний інститут», завідувач кафедри електричних  
станцій.

Захист дисертації відбудеться «10» жовтня 2019 р. о 16<sup>30</sup> на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.002.20 при Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м. Київ, вул. Борщагівська, 115, корп. 22, ауд. 316.

З дисертацією можна ознайомитися у Науково-технічній бібліотеці ім. Г.І. Денисенка Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м. Київ, проспект Перемоги, 37.

Автореферат розісланий «9» вересня 2019 р.

В.о. вченого секретаря  
спеціалізованої  
вченої ради Д 26.002.20



В.А. Попов

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Ключовим трендом розвитку систем електропостачання (СЕП) на початку ХХІ ст. є модернізація існуючих систем та впровадження нових технологій на базі концепції Smart Grid. Реалізація положень концепції обумовлена факторами технологічного розвитку, вимогами споживачів до якості та надійності енергозабезпечення, факторами функціонування лібералізованого ринку та зростаючими вимогами у сфері екологічної безпеки та енергоефективності. СЕП на базі концепції Smart Grid стає єдиним саморегулюючим і самовідновлюваним комплексом, що має власну мережеву топологію та включає в себе генеруючі джерела, розподільні мережі разом зі всіма видами споживачів електричної енергії, що керуються єдиною мережею інформаційно-керуючих пристроїв та систем в режимі реального часу.

Зростання кількості активних споживачів – prosumer (АС) споживачів, які мають власну генерацію, в тому числі відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) та системи акумуляції, можуть керувати власним графіком та впливати на загальний графік електроенергетичної системи, до складу якої вони входять, тісно пов'язане з лібералізацією ринку електричної енергії, впровадженням клієнтоорієнтованих бізнес-процесів електропостачальних компаній, тобто створення сприятливих умов для взаємовигідної роботи електропостачальних компаній та споживачів.

Розвиток СЕП України має відповідати основним цілям та положенням запропонованого міжнародними організаціями International Energy Agency (IEA), International Renewable Energy Agency (IRENA), World Energy Council (WEC), енергетичного переходу (energy transition). Енергетичний перехід – це перехід провідних країн до сталих економік шляхом відновлюваної енергетики, енергоефективності та сталого розвитку, де кінцевою метою є відмова від використання вугілля та інших невідновлюваних енергоресурсів.

Енергетичний перехід вимагає забезпечення стабільності мережі в контексті керування зі зростанням ролі операторів систем розподілу (ОСР), які забезпечують безпеку та якість обслуговування, діють в інтересах суспільства, враховуючи витрати та вигоди; застосовують нові бізнес-моделі та клієнтоорієнтовні підходи. Для здійснення такого «процесу переходу енергетики» необхідно провести цілий ряд реформ у сферах енергозабезпечення та енергоспоживання.

Для забезпечення відповідності світовим напрямам розвитку електроенергетики, балансів, високого рівня якості та зменшення рівню втрат електричної енергії в СЕП актуальними постають проблеми оптимізації та узгодження графіків виробництва і споживання, враховуючи сучасні можливості мережевих технологій Smart Grid та АС.

У роботах Стогнія Б.С., Кириленка О.В., Буткевича О.Ф., Денисюка С.П., Жуйкова В.Я., Ямненко Ю.С., Праховника А.В., Находова В.Ф., Лежнюка П.Д., Кулика В.В., Волкової І.О., Ackermann T., Andersson G., Ahmed W., Ajjarapu V., Baggini A., Bossi C., Chambers A., Cutsem V., Dolezal J., Donpi P., Katiraei F., Jiayi H., Hingorani N., Kumpulainen I., Kundur P., Purchala K., Chowdhury S., Wang S. та інших вчених розроблені основи аналізу оптимальності процесів, у тому числі з НВДЕ на основі аналізу режимів роботи цих систем. Проте вони розглядаються або для великих електроенергетичних систем, або для спрощених електричних кіл.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційне дослідження виконувалося згідно з планом наукових робіт кафедри електропостачання КПІ ім. Ігоря Сікорського у рамках найважливіших напрямів фундаментальних та прикладних наукових досліджень: «Методи керування виробництвом, передачею, розподілом, перетворенням та споживанням електричної енергії. Керування ефективністю енерговикористання». Результати відображено у науково-дослідних роботах «Розроблення науково-методологічних основ агрегування та керування віртуальними електростанціями і активними споживачами в умовах енергоринку» (№ держреєстрації 0117U004285), гранту Президента України для підтримки наукових досліджень молодих учених «Розробка моделі оптимального функціонування енергетичних хабів в інтелектуальних системах енергопостачання України (№ держреєстрації 0118U100552 ) та «Дослідження оптимального функціонування інтегрованих систем енергозабезпечення споживачів із застосуванням комплексного акумулювання електричної та теплової енергій» (№ держреєстрації 0117U003825).

**Мета і задачі дослідження.** Метою дисертаційного дослідження є вдосконалення та подальший розвиток методів оцінювання ефективності керування попитом на електроенергію в системах з активним споживачем.

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

- провести аналіз особливостей функціонування СЕП згідно з вимогами концепції Smart Grid, зокрема, дослідити існуючі механізми функціонування оператора розподільних мереж та інтеграції програм DSM в СЕП;
- проаналізувати вплив нерівномірності споживання електричної енергії споживачами на збитки та погіршення якості електричної енергії та якості енергопостачання ЛСЕП;
- вдосконалити оптимізаційну задачу для отримання ідеалізованих графіків генерації та споживання АС у разі застосування адресних механізмів керування для отримання мінімальних витрат на оплату електричної енергії;
- оптимізувати режими роботи АС з врахуванням можливості видозміни добового графіка електроспоживання з використанням систем акумуляції електричної енергії;
- оцінити потенціал АС щодо видозміни власного графіка споживання, враховуючи особливості встановленого обладнання та режиму роботи системи;
- розширити систему показників оцінки складових втрат потужності, що враховують вплив факторів нерівномірності споживання електричної енергії на електроенергетичну систему на основі потужності Фризе  $Q_{\Phi}$ ;
- розробити методологію та програмно-алгоритмічне забезпечення для оптимізації графіків потужності електроспоживання з використанням декомпозиції потужності Фризе  $Q_{\Phi}$  у разі керування режимами електроспоживання та впровадження програм з керування попитом на електричну енергію.

*Об'єктом дослідження* є процеси споживання та керування попитом на електричну енергію в системах електропостачання з активними споживачами.

*Предметом дослідження* є методи та засоби оптимізації нерівномірності процесів споживання електричної енергії з використанням механізмів керування попитом на електричну енергію.

**Методи дослідження.** Науково-методичну основу виконаних досліджень склали такі методи: системного аналізу, математичного моделювання, оцінки нерівномірності споживання електричної енергії, оцінки можливості видозміни режиму споживання споживачів та груп споживачів, а також методи комп'ютерного моделювання. Перевірка достовірності й ефективності запропонованих методів ґрунтується на результатах експериментів та підтверджується даними, отриманими в умовах виробничої діяльності підприємств та електричних мереж України.

**Наукова новизна** одержаних результатів проведеного в дисертаційній роботі дослідження полягає в такому:

вперше:

- запропоновано метод оцінки впливу нерівномірності споживання електричної енергії на рівень втрат у системі електропостачання, в якому на відміну від існуючих використано модифіковані показники декомпозиції потужності Фризе  $Q_{\Phi}$  та поширення визначення потужності Фризе на довільний інтервал часу;

- запропоновано метод оптимізації режимів генерації та споживання енергії активним споживачем у системі електропостачання, що враховує можливості зміни графіків споживання електричної енергії у разі застосуванні адресних механізмів керування попитом;

удосконалено:

- механізм оптимізації добового графіку електроспоживання на прикладі житлового комплексу з можливістю акумулювання енергії;

- розширено систему показників адекватного врахування складових втрат електроенергії на основі модифікації та декомпозиції потужності Фризе  $Q_{\Phi}$  за рахунок оцінювання впливу факторів нерівномірності споживання електричної енергії на електроенергетичну систему на довільному інтервалі часу;

набули подальшого розвитку:

- методологія оптимізації графіків потужності електроспоживання з використанням декомпозиції потужності Фризе  $Q_{\Phi}$  у разі керування режимом електроспоживання та впровадженні програм з керування попитом на електричну енергію;

- математична модель оптимізації добового графіка активного споживача, що враховує значення коефіцієнтів гнучкості обладнання та режими його функціонування.

**Практичне значення одержаних результатів** полягає у комплексному розв'язанні задачі оцінювання ефективності керування попитом в СЕП та оптимізації графіків навантаження і режимів роботи обладнання з мінімізацією витрат на електричну енергію.

Результати використані у науково-дослідних роботах (НДР):

- оптимізаційні моделі та розрахункові результати зміни витрат на електричну енергію та безпосередніх втрат від нерівномірності споживання електричної енергії у НДР «Розроблення науково-методологічних основ агрегування та керування віртуальними електростанціями і активними споживачами в умовах енергоринку» (номер державної реєстрації: 0117U004285);

– оригінальне програмно-алгоритмічне забезпечення, призначене для керування попитом на електричну енергію у випадку оптимізації режимів функціонування енергетичного хабу в рамках виконання гранту Президента України для підтримки наукових досліджень молодих учених НДР «Розробка моделі оптимального функціонування енергетичних хабів в інтелектуальних системах енергопостачання України (№ державної реєстрації 0118U100552);

– метод оцінки можливості видозміни добового графіка споживання електричної енергії групами споживачів з подальшим формуванням оптимізованого графіка генерації та споживання електричної енергії НДР «Дослідження оптимального функціонування інтегрованих систем енергозабезпечення споживачів із застосуванням комплексного акумулювання електричної та теплової енергій» (№ державної реєстрації 0117U003825);

– програмне забезпечення, розроблені оптимізаційні моделі та отримані розрахункові результати впроваджено у практичну діяльність ПрАТ «ДТЕК Київські електромережі», м. Київ, НКРЕКП, м. Київ, ПАТ «Київенерго», м. Київ, «Принт Маркет», м. Рівне.

Отримані результати використовуються у навчальному процесі на кафедрі електропостачання КПІ ім. Ігоря Сікорського.

**Особистий внесок здобувача.** Наукові положення, висвітлені в дисертаційній роботі отримані здобувачем особисто. У роботах, опублікованих у співавторстві, здобувачеві безпосередньо належать: у публікації [1] – наведено класифікацію показників енергоефективності; [2] – аналіз ефективності програм з керування попитом споживачів; [4] – особливості застосування програм з керування попитом на електричну енергію у сучасних силових установках; [5] – застосування програм з керування попитом на електричну енергію для морських складів; [7] – аналіз кращих світових практик та приклад роботи алгоритму для поліграфічного підприємства; [8] – представлений механізм оцінки нерівномірності споживання та генерації електричної енергії в енергетичних хабах; [9] – дорожня карта та методи проведення енергоаудиту; [10] – оцінка ефективності інноваційних програм з енергоменеджменту; [11] – розробка програмного забезпечення методу та алгоритму визначення нерівномірності електропостачання; [12] – класифікація ступеня залучення активних споживачів та їх потенціалу; [13] – характеристика інтелектуальних енергетичних систем; [14] – класифікація основних методів керування попитом на електричну енергію; [15] – наведено оцінку ефективності інноваційних програм енергоменеджменту; [16] – аналіз існуючих програм з керування попитом на електричну енергію та програм енергоменеджменту; [21] – аналіз можливостей програм з керування попитом на електричну енергію в умовах існуючих концепцій енергетичних хабів; [22] – математичні моделі оптимізації режимів функціонування енергетичних хабів; [23] – дорожня карта енергоаудиту та підходи до енергетичного обстеження.

В опублікованих зі співавторами наукових працях, в яких наведені ідеї та результати, що використані в дисертації, особистий внесок здобувача складає 50 – 90 %.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення дисертації було висвітлено на 23 міжнародних науково-технічних та науково-практичних

конференціях: міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми сучасної електротехніки» (Київ, 2016), Міжнародна науково-технічна конференція «Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку» REMS (Київ, 2016 – 2018), Міжнародна науково-практична конференція «Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті (Київ, 2016, 2017), Kyiv Urban Fest 2 (Київ, 2016), міжнародна науково-практична конференція Електрифікація транспорту "Транселектро" (Дніпропетровськ, 2015), «Аспірантські читання пам'яті А.В. Праховника» (Київ, 2016 – 2018), міжнародна науково-практична конференція «Енергозбереження, енергоефективність та енергоаудит в Україні (Київ, 2015), міжнародна науково-практична конференція «Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті» (Київ, 2015–2017), міжнародна науково-технічна конференція «Енергетика. Екологія. Людина», міжнародна конференція «Інтелектуальні енергетичні системи ESS» (Київ, 2017), міжрегіональний інвестиційний форум з питань енергоефективності та енергозбереження (Рівне, 2017), IEEE 18th International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2nd Industrial and Commercial Power Systems Europe (Рига, 2018), семінар Наукової ради з проблеми «Наукові основи електроенергетики» (Київ, 2017–2019).

**Публікації.** За результатами досліджень опубліковано 23 наукові праці, з них 3 у Scopus, у тому числі 8 статей у наукових фахових виданнях (з них 1 стаття у виданнях іноземних держав, 7 у виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз), 2 статті у виданнях іноземних держав, які включені до міжнародних наукометричних баз, 1 авторське свідоцтво, 11 тез доповідей у збірниках матеріалів конференцій, 1 навчальний посібник.

**Структура та обсяг дисертаційної роботи.** Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел з 150 найменувань і 9 додатків. Загальний обсяг роботи становить 185 сторінок, у тому числі 121 сторінки основного тексту, 68 рисунків, 24 таблиці.

## **ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ**

У **вступі** обґрунтовано актуальність роботи, сформульовано мету, наукову новизну та практичну цінність отриманих результатів, а також наведено відомості, апробацію, впровадження та публікації.

У **першому** розділі проведено аналіз сучасних тенденцій розвитку енергетики, у тому числі цілей та пріоритетів розвитку енергетичної системи євросоюзу, якими передбачено: створення єдиної архітектури ринку електроенергії; сприяння успішній ринковій інтеграції електроенергії, що генерується ВДЕ; забезпечення подальшого підвищення енергоефективності європейської економіки. Так, для розв'язання цих проблем Єврокомісією розпочато підготовку до прийняття нового, четвертого енергетичного пакету (winter energy package). Концепція Четвертого енергопакету викладені в доповіді Єврокомісії (Clean Energy for All European, 2018), в якому виділено три основні цілі: досягнення глобального лідерства в сфері ВДЕ, забезпечення кращих умов для споживачів, пріоритетність енергоефективності. Всі цілі передбачають зростання значення ОСР та ВДЕ в мережах СЕП.

е рамках аналізу фундаментальних положень концепцій енергетичного переходу невід'ємною складовою є інтелектуалізація мереж – Smart Grid та тенденція до залучення споживачів та АС як учасників процесів енергосистеми.

У разі аналізу українських СЕП виявлено основні розбіжності між функціональними властивостями енергетичних систем, а саме: одностороння комунікація між елементами або її відсутність, централізована генерація або складно інтегрована розподільна генерація, переважно радіальна топологія, відсутність належної діагностики обладнання, обмеженість контролю за перетоками потужності, відсутність інформації або запізнена інформація про ціну для споживача. Визначено ключові проблеми роботи СЕП, а саме: проблеми енергетичної ефективності, нерівномірності графіків споживання та генерації електричної енергії, якості електропостачання (надійність, стабільність тощо), необхідності модернізації складових систем з врахуванням тенденції до зростання кількості ВДЕ. У розділі проаналізовано еволюцію споживачів до рівня prosumer та способи прямого та непрямого впливу на їх добовий графік електроспоживання в рамках зростання ролі ОСР та ОМСР. Визначення рівнів інтеграції механізмів та систем керування режимами роботи СЕП залежить від обраного механізму керування та рівню інтеграції в загальну систему. Так, для рівня ОСР розрізняють наступні механізми керування: для РГ, ВДЕ та систем акумуляції необхідна централізована система енергетичного менеджменту, для рівня ОМСР необхідні системи організації розподілення електроенергії, розподілена система енергетичного менеджменту, програми та механізми DSM, для рівня споживача – системи енергетичного менеджменту домогосподарств, виробничих та комерційних підприємств, та систем менеджменту електротранспорту.

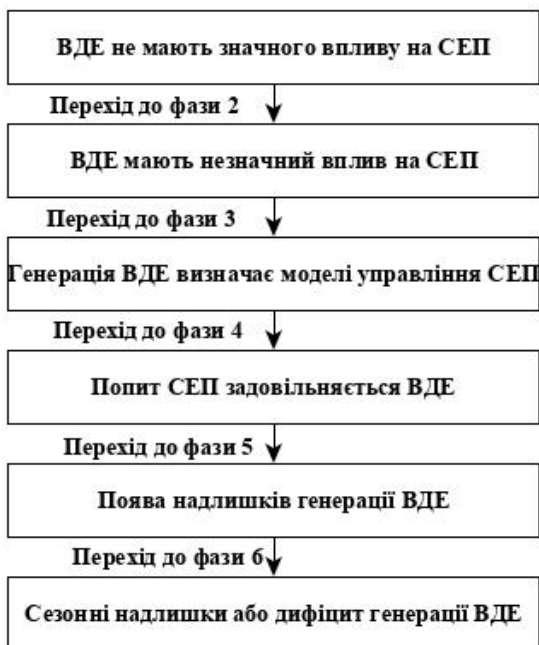


Рис. 1. Еволюція СЕП з ВДЕ

Встановлено, що для забезпечення узгодження роботи та підвищення ефективності процесів генерації, передачі та споживання електричної енергії, необхідне створення механізмів керування, які передбачають інтеграцію ВДЕ та накопичення даних систем, що включає оцінку стану та аналізу ефективності впровадження технічних, технологічних та організаційних механізмів керування у процесі лібералізації ринку електричної енергії.

У результаті аналізу встановлено, що одним із напрямів модернізації енергетичних систем у рамках зазначених концепцій є децентралізація та створення локальних систем електропостачання (ЛСЕП) з залученням ВДЕ та нетрадиційних джерел енергії.

Еволюція СЕП з ВДЕ згідно з прогнозом ІЕА включає шість основних фаз, в кожній з яких відбуваються зміни у моделях керування. Так, для першої фази, коли ВДЕ практично не впливають на СЕП, зміни в структурі керування відсутні, проте впровадження механізмів оптимізації графіків власного споживання може бути



застосоване як спосіб зменшення витрат пов'язаних з оплатою спожитої електроенергії. Для четвертої фази характерною особливістю визначено наявність періодів покриття ВДЕ всього попиту ЛЕС. На цьому етапі доцільним є розгляд механізмів оптимізації графіків споживання з врахуванням можливості накопичення та диверсифікації первинних енергетичних ресурсів. Для заключної шостої фази, в якій прогнозується наявність сезонних надлишків чи дефіциту та планується використання водневих технологій накопичення разом з використанням технологій виробництва та використання синтетичних палив, різко зростає ступінь важливості механізмів оптимізації, прогнозування та керування режимами роботи складових СЕП.

У результаті проведеного аналізу встановлено типові структури зв'язків споживачів, мереж, ОСР та ОМСР у разі інтеграції джерел РГ та НВДЕ в рамках СЕП. Структура інформаційних та технологічних зв'язків, у перетині яких в подальшому будуть розглядатись оптимізаційні процеси для таких СЕП зображена на рис. 2.

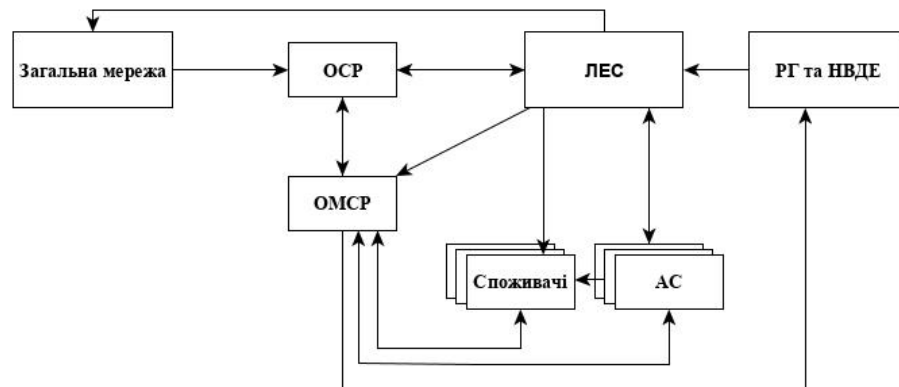


Рис. 2. Інформаційні зв'язки СЕС та ЛЕС з інтеграцією РГ та НВДЕ

У разі керуванні режимами роботи СЕС та ЛЕС щодо зменшення нерівномірності графіка використовується потенціал споживачів та широко застосовуються програми DSM, пов'язані зі зменшенням пікового споживання як засіб узгодження режимів генерації та споживання. Проведено співставний аналіз та класифіковано основні непрямі методи керування споживанням, які задаються у вигляді тарифів на електричну енергію, та прямі методи у вигляді програм для споживачів і можливості їх застосування у разі впровадження окремих інструментів програм DSM, а саме: зменшення пікового навантаження, заповнення провалів, стратегії енергозбереження, побудова навантаження, перенесення навантаження та гнучке моделювання. Кожна з програм DSM має спиратись на комплексне планування між генеруючими компаніями і споживачами з урахуванням потреб на даний момент часу. Результати проведеного співставного аналізу впровадження програм DSM (табл. 1) показують, що вигоду отримують не лише споживачів та комунальні структури, але й суспільство в цілому.

У разі аналізу втрат у мережах виділено необхідні та додаткові втрати, а також показники, що ідентифікують їхню наявність. Для оцінки рівня втрат від нерівномірності споживання електричної енергії та ефективності впровадження програм DSM в СЕС запропоновано використати модифікації потужності

Фризе  $Q_{\phi} = \sqrt{S^2 - P^2}$ , яка у загальному випадку є квадратичною нев'язкою між повною  $S$  та активною  $P$  потужністю та дає змогу оцінити рівень втрат від нерівномірного споживання.

Таблиця 1

## Вигоди від впровадження DSM програм:

	Регіональний	Локальний	Промисловий район	Підприємство/об'єднання	Технологія/дільниця
Економічний ефект	Стимулювання економічного розвитку регіону	Стимулювання економічного розвитку на районному рівні	Стимулювання економічного розвитку на місцевому рівні	Зменшення рахунків за спожиту електроенергію	Скорочення витрат на технічне обслуговування
Риноків перетворення	Стимулювання ринкових перетворень	Збільшення конкурентоспроможності місцевих підприємств	Підвищення кредитної привабливості	Стимулювання до керування режимами роботи	Скорочення витрат на заміну устаткування
Матеріальний ефект	Створювання довгострокових робочих місць	Зниження потреб у будівництві нових великих об'єктів.	Підвищення привабливості РГ та НВДЕ	Додаткові джерела отримання прибутку	Можливості для впровадження нових систем керування
Екологічні переваги	Зменшення міжнародних екологічних проблеми	Зниження забруднення повітря на районному рівні	Підвищення комфорту на місцевому рівні	Створення сприятливих умов праці	Нормалізація мікроклімату
Енергобезпека	Підсилення національної безпеки	Підвищення якості та надійності електрозабезпечення	Зростання кількості джерел РГ та ВДЕ	Зниження ризиків пов'язаних з аварійним відключенням	Загальне зменшення витрат

У другому розділі проаналізовано роботу системи на інтервалі часу  $T_T$  та виділено 4 групи режимів співвідношення між графіками миттєвих значень потужностей генерації  $p_r(t)$  та споживання  $p_n(t)$ :

1)  $p_r(t) = p_n(t)$ ,  $\forall t$ ,  $t \in [0, T_T]$ ;  $P_r = P_n$ ; повне узгодження режимів роботи генератора та навантаження (споживача);

2)  $p_r(t) \neq p_n(t)$ ;  $\frac{1}{T} \int_0^T p_r(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T p_n(t) dt$ ;  $P_r = P_n$ ; має забезпечуватися використанням технічних засобів, у першу чергу систем акумулювання електроенергії, компенсації реактивної потужності, компенсації несинусоїдальності та несиметричності;

3)  $p_r(t) \neq p_n(t)$ ;  $P_r < P_n$ ; має реалізуватися не тільки за рахунок технічних засобів, зокрема, наведених для другої групи режимів, але й у першу чергу за рахунок реалізації DSM програм;

4)  $p_r(t) \neq p_n(t)$ ;  $P_r > P_n$ ; має передбачати не тільки нарощування рівнів споживання електроенергії наявного навантаження, але й можливість підключення додаткових навантажень.

У разі поширення поняття потужності Фризе  $Q_\Phi$  на довільний інтервал часу  $\tau = T_T$  потужність  $Q_{\Phi\tau}$  може використовуватись для ретроспективного, перспективного та аналізу в режимі реального часу з ідентифікацією впливів складових неоптимальності: відхилення напруги  $\Delta U$ , відхилення струму  $\Delta I$ , наявності складових коефіцієнтів гармонік напруги  $k_{nu}$ , струму  $k_{pi}$ , реактивної складової ( $\cos\varphi \neq 1$ ).

Виділивши показник неоптимальності, який характеризує ефективність регулювання та визначає рівень неоптимальності передачі енергії, проведемо аналіз наявних графіків, у яких можливі три основні варіанти: 1) ретроспективний при зменшенні часового проміжку  $\delta$ ; 2) перспективний при аналізі процесів зі збільшенням часового проміжку  $\delta$ ; 3) аналіз у режимі реального часу при  $\delta=0$ .

Застосування  $Q_\Phi$  для оцінки нерівномірності процесів покажемо на прикладі режиму, що характеризується діючими значеннями напруги  $U_i$  та струму  $I_i$ ,  $i=1, \dots, n$ ,  $T_i$  – тривалість  $i$ -го інтервалу, та  $P=U_0 I_0$  де  $U_0$ ,  $I_0$  – усереднені значення напруги та струму. За умови  $\cos\varphi=1$  для інтервалу  $T_\tau > T_r$ , де  $T_r$  – період електромережі, можна записати вираз для потужності Фризе  $Q_\Phi$  у вигляді

$$Q_\Phi = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^n U_i^2 \frac{T_i}{T}\right) \left(\sum_{j=1}^n I_j^2 \frac{T_j}{T}\right) - U_0^2 I_0^2}, \quad (1)$$

який у разі  $\delta_i = T_i / T$ ;  $\sum_{i=1}^n \delta_i = 1$  набуває вигляду:

$$Q_\Phi = \sqrt{\sum_{i=1}^n U_i^2 \delta_i \cdot \sum_{i=1}^n I_i^2 \delta_i - \left(\sum_{i=1}^n U_i I_i \delta_i\right)^2}. \quad (2)$$

Введемо відносний показник  $k_{\Delta opt} = Q_\Phi / P$ .

Проаналізуємо окремі складові впливу факторів неоптимальності на величину втрат:

- 1) вплив відхилення напруги  $\Delta U$ , у разі  $\Delta I = 0$ , тобто  $I_1=I_2$ ;  $U_2 = U_1 + \Delta U$ , отримаємо

$$Q_\Phi = I_1 \Delta U \sqrt{\delta_2 - \delta_2^2};$$

- 2) вплив відхилення струму  $\Delta I$ , приймаючи значення  $\Delta U=0$ ,  $U_1=U_2$ ,  $I_2 = I_1 + \Delta I$ , отримаємо

$$Q_\Phi = U_1 \Delta I \sqrt{\delta_2 - \delta_2^2};$$

- 3) вплив приросту інтервалу часу ( $\delta_2 = \delta_2 + \delta_2^*$ ) отримаємо

$$Q_\Phi = I_1 \sqrt{\Delta U^2 (\delta_2 + \delta_2^*) - 2U_1^2 \delta_2^* - (U_1 \delta_2^* + \Delta U (\delta_2 + \delta_2^*))^2}$$

У разі введення відносних величин для двох інтервалів часу  $\delta_1, \delta_2$  величина  $k_{\Delta opt} = Q_\Phi / P$  визначається співвідношенням

$$k_{\Delta opt} = (1 + \Delta U)^2 (1 + k_{nu}^2) \cdot (1 + k_{pi}^2) (1 + \Delta I)^2 \delta_2^2 \sin^2 \varphi_2 + \\ + 2\delta_1 \delta_2 (1 + k_{nu}^2) (1 + k_{pi}^2) (1 + \Delta U) (1 + \Delta I) (1 - \cos \varphi_1 \cos \varphi_2) \quad ; \quad (3)$$

Оптимізація роботи окремих типів обладнання базується на розгляді функції

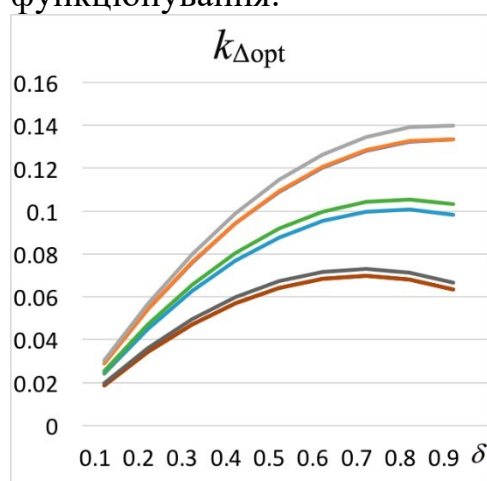
$$Q_\Phi = F_Q(U, I, \cos \varphi, \Delta U, \Delta I, k_{nu}, k_{pi}), \quad (4)$$

і передбачає використання критерію  $k\Delta_{opt} = Q_{\phi} / P \rightarrow \min$  одночасно з реалізацією програми DSM. Оптимізація роботи обладнання передбачає виконання таких кроків:

- 1) Визначаються фактори впливу та формування співвідношення (3):
- 2) Оцінюються зміни величини  $Q_{\phi}$  від зміни абсолютних значень показників факторів впливу, наприклад зміни функції  $Q_{\phi} = F_Q(U, I, \Delta I)$ ;
- 3) Оцінюється кількість зон  $n_{\Delta I}$  змін величини  $Q_{\phi}$  та розраховуються зміни величини  $Q_{\phi, j}$  у разі зміни  $\Delta I_j$ ;  $j=1, \dots, n_{\Delta I}$ ;
- 4) Для  $j$ -ї зони для окремих типів обладнання визначаються керуючі впливи на основі сформованої згідно з застосуванням програм DSM бази множин функціональних залежностей керування режимом роботи кожного типу обладнання, які забезпечують виконання  $k_{\Delta opt} = Q_{\phi} / P \rightarrow \min$ .

Розрахункові результати зміни величини  $k_{\Delta opt}$  відносно зміни показників неоптимальності процесів представлено на рис. 3.

Особливості застосування наведених оптимізаційних процедур у разі керування окремими видами обладнання покажемо на прикладі інтеграції системи акумуляції електричної енергії (САЕ) в ЛЕСП. У випадку роботи САЕ виділимо три варіанти функціонування:



- 1) безпосереднє живлення споживача від мережі  

$$p_{\Gamma}(t) = p_{\text{H}}(t); \Delta t_{1,j}, j = 1, \dots, n_1;$$
  - 2) живлення споживача та системи акумуляції від мережі  

$$p_{\Gamma}(t) = p_{\text{H}}(t) + p_{\text{CAE,H}}(t); \Delta t_{2,j}, j = 1, \dots, n_1;$$
  - 3) живлення споживача від мережі та/або системи акумуляції  

$$p_{\text{H}}(t) = p_{\Gamma}(t) + p_{\text{CAE,\Gamma}}(t); \Delta t_{3,j}, j = 1, \dots, n_3,$$
- де  $p_{\Gamma}(t)$  – миттєва потужність генератора;  $p_{\text{H}}(t)$  – миттєва потужність навантаження;

Рис. 3 Зміна величини  $k_{\Delta opt}$   $p_{\text{CAE,H}}(t)$  – миттєва потужність САЕ в режимі споживання;  $p_{\text{CAE,\Gamma}}(t)$  – потужність САЕ в режимі генерації;  $\Delta t_{i,j}$  – часовий інтервал.

Система акумулювання електроенергії на етапі заряджання має властивості активного споживача, натомість на етапі розряджання її режим роботи може бути представлений як генератор.

У **третьому** розділі визначено особливості використання показників на основі потужності Фризе  $Q_{\phi}$  у разі апроксимації часових інтервалів та аналізу впливів для подальших варіантів аналізу впливу від наступних множин факторів:

- 1) нерівномірність процесів з відхиленням напруги  $\Delta U$ , струму  $\Delta I$  та відсутністю реактивної потужності ( $\cos \phi = 1$ );
- 2) нерівномірність процесів з відхиленням напруги  $\Delta U$ , струму  $\Delta I$ , пульсації струму  $k_{\text{pi}}$ , з врахуванням реактивної потужності ( $\cos \phi < 1$ );

3) нерівномірність процесів з відхиленням напруги  $\Delta U$ , струму  $\Delta I$ , наявністю вищих гармонік струму  $k_{ni}$ , вищих гармонік, несинусоїдальності та наявності реактивної потужності ( $\cos\varphi < 1$ ).

Як приклад аналізу впливу нерівномірності процесів, приймаючи значення  $\cos\varphi=1$ , можливий варіант для падіння напруги та струму,  $U_n=10\text{кВ}$ ,  $I_n=1\text{кА}$ : Діапазон зміни напруги  $\Delta U = [0,5, \dots, 1 \text{ кВ}]$ ,  $\Delta I = [0,1, \dots, 0,8 \text{ кА}]$ . Отримані значення зміни величини  $Q_\Phi$  від впливу зазначених параметрів зображено на рис.4.

$$Q_\Phi = \sqrt{\frac{(U_1^2 t + (U_1 - \Delta U)^2 (T_T - t))(I_1^2 t + (I_1 - \Delta I)^2 (T_T - t_i)) - (U_1 I_1 t + (U_1 - \Delta U)(I_1 - \Delta I)(T_T - t))^2}{T_T^2}},$$

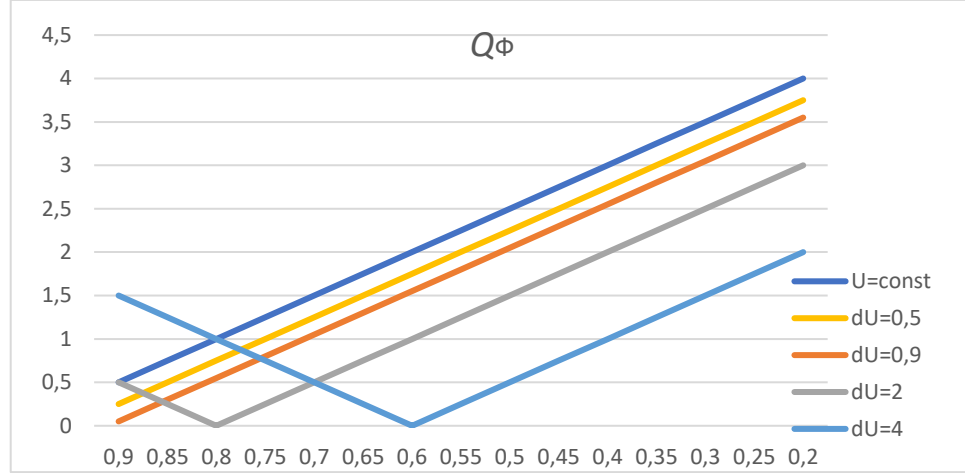


Рис. 4. Зміна величини потужності Фризе  $Q_\Phi$  у разі симетричного зниження напруги та струму

Вплив гармонічних складових на оптимальність процесів можна оцінити як приклад за напруги та струму 3-ї гармоніки із співвідношення

$$Q_{\Phi,1-3}^2 = U_1^2 I_1^2 (1 + k_{ni,3}^2) (1 + k_{ni,3}^2) - (U_1 I_1 \cos(\varphi_1'' - \varphi_1') + U_3 I_3 \cos(\varphi_3'' - \varphi_3'))^2. \quad (5)$$

Запропоновано метод керування попитом на електричну енергію шляхом оптимізації добового графіка споживання електричної енергії з урахуванням обмежень допустимих величин максимальної споживаної потужності, збереження обсягу спожитої електричної енергії та врахування можливостей споживача щодо керування на основі методу Гембікі. Цей метод включає в себе вираз для низки намірів, що пов'язано з безліччю цілей. Таке формулювання завдання допускає, що цілі можуть бути або недо-, або передодсягнутими, та дає можливість чітко встановити вихідні наміри. Відносний ступінь недо- або передодсягнення встановлених цілей контролюється за допомогою вектора зважених коефіцієнтів та представляється як стандартна задача оптимізації. Безпосередні розрахунки виконувались в пакеті програм MatLab. Отримані оптимізовані форми графіка електроспоживання відповідають критеріям максимізації коефіцієнта заповнення графіка  $k_3$  та зменшення вартості спожитої енергії  $C$ .

$$k_3 = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^J P_{(i,j)} t_j}{\sum_{j=1}^J t_j \sum_{i=1}^N P_{(i,j)}} \rightarrow \max; \quad (6)$$

$$C = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^J P_{(i,j)} \cdot t_{(j)} \cdot ce_{(i,j)} \rightarrow \min. \quad (7)$$

Потенціал споживача враховується введеним коефіцієнтом гнучкості попиту  $k_T$ . Цей коефіцієнт характеризує можливості встановленого обладнання до зміни режимів споживання у разі впровадження окремих програм з керування попитом на електричну енергію.

Обмеження оптимізаційної задачі виражаються як

$$P_{new}(i) = P_{old}(i) \forall t_o \rightarrow t_k, t_h \rightarrow T_D; \quad (8)$$

тобто загальний обсяг потужності  $P$  на інтервалі часу  $T_D$  залишається незмінним і на кожному інтервалі має відповідати обмеженням:

$$P_{new}(i) \leq P_{(value1)} \forall t_k \rightarrow t_h; \quad (9)$$

$$P_{new}(i) \geq P_{(value2)} \forall t_k \rightarrow t_h, \quad (10)$$

проте пікове споживання з інтервалу часу  $(t_k; t_h)$  рівномірно переноситься на інтервали часу  $(t_o; t_k) \cup (t_h; T_D)$ , що відображено на рис. 5. У разі встановлення нових значень потужності має місце

$$P_{(value2)} \leq P_{(value1)}. \quad (11)$$

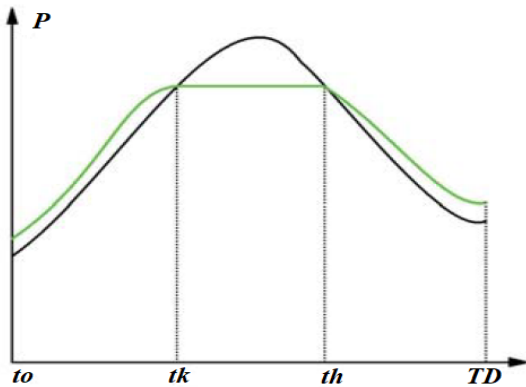


Рис. 5. Графічна інтерпретація перенесення навантаження зі збереженням балансу спожитої електричної енергії

Обмеження оптимізаційної задачі стосуються необхідності збереження сумарної за розрахунковий період спожитої потужності:

$P_{new,i} = P_{old}$  і обмеження допустимих величин максимальної споживаної потужності:  $P_{new,i} < P_{max}$ , що впливають з граничних можливостей мережі та електроенергетичної системи (наприклад, обмежена потужність генеруючого устаткування електроенергетичних систем, обмеження на пропускну здатність розподільної мережі, трансформаторів тощо).

Результати оптимізації графіка споживання наведено у табл. 2. Варто зазначити, що для обраної ЛСЕП групи побутових домогосподарств результати оптимізації корелюються зі зниженням показника  $Q_\phi$ , особливо за максимізації коефіцієнта заповнення графіка, що відповідає зменшенню загальної нерівномірності добового графіка електроспоживання в СЕП.

Таблиця 2

Ефект від оптимізації добового графіка електроспоживання

	Зміна $C$ , %	Зміна $Q_\phi$ , %
Min $C$ , грн	7,8	22,25
	Зміна $K_3$ , %	Зміна $Q_\phi$ , %
Max $k_3$ , в.о.	29,63	46,1

Отримані результати оптимізації дають змогу визначити можливості споживачів щодо коригування власних добових графіків споживання електричної енергії, враховуючи поставлені цілі: економію грошових коштів на оплату спожитої

електричної енергії для споживачів та потенціальну вигоду ОСР від впровадження конкретної програми DSM.

Розроблений математично-програмний апарат використано для оптимізації функціонування АС з наявністю когенераційної установки (як енергетичного хабу) на прикладі ЛСЕП житлового комплексу. Процедура оптимізації проводилася для двох режимів роботи: з накопиченням енергії та без накопичення. У двох випадках ціна на спожиту електричну енергію змінювалася залежно від тарифних коефіцієнтів нічного періоду з 23:00 до 07:00 години у межах  $T_{Kn} = [0,5, \dots, 1]$ , з 07:00 до 23:00 години в діапазоні  $T_{Kd} = [1, \dots, 1,3]$ .

Навантаження під час роботи АС як енергетичного хабу без зберігання зі зміною профілю споживання електричної енергії внаслідок використання тарифних коефіцієнтів наведено в табл. 4 та на рис. 6, 7, з накопиченням енергії п в табл. 6. Без зміни профілю споживання  $T_{Kn} = 1$  можна використовувати власну потужність СЕС протягом 4 годин.

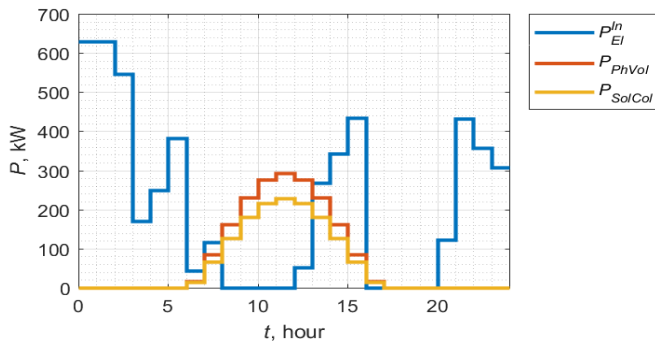


Рис. 6. Енергетичні потоки у разі  $T_{Kn} = 1$  з накопиченням

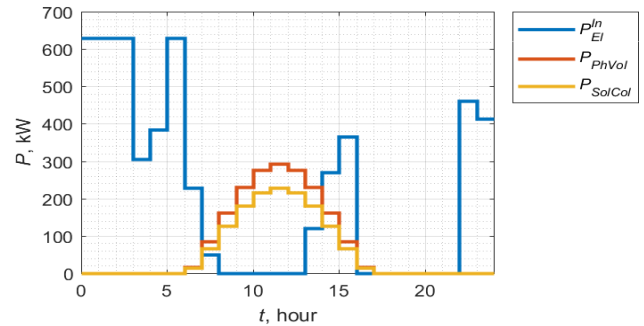


Рис. 7. Енергетичні потоки у разі  $T_{Kn} = 0,5$  з накопиченням

Як результат, зміна профілю споживання електричної енергії під дією  $T_{Kn} = 0,5$  за допомогою СЕС забезпечує покриття власного попиту до 6 годин, але взаємодія АС з мережею триває протягом дня.

Таблиця 3

Результат моделювання без накопичення енергії

Витрати на первинні енергетичні ресурси, грн	Тарифний коефіцієнт нічного споживання $T_{Kn}, \%$	Дохід від продажу електричної енергії, грн	Прибуток, грн
18372	100	18687	315
18341	90	19072	731
18094	70	19560	1467
17602	50	19212	1611

Використовуючи можливості накопичення (рис. 6 та 7) і змінюючи профіль споживання, можна відмовитися від купівлі електроенергії з мережі та покрити попит власними джерелами. Витрати для підтримання енергосистеми при  $T_{Kn} = 0,5$  та використання приладів акумулювання енергії зменшуються на 10–12% для заданих умов функціонування.

Результати оптимізації підтверджують, що функціонування АС вимагає використання засобів DSM. Отримані результати при зміні тарифу споживачів на



електроенергію, дають змогу їм покривати попит власними джерелами та знижувати витрати на придбання енергії з мережі залежно від власних потреб.

Таблиця 5

Результат оптимізації з накопиченням енергії

Витрати	Тарифний коефіцієнт	Дохід від продажу	Прибуток
16259	1,00	18687	2428
16236	0,90	19072	2836
16054	0,70	19560	3507
15694	0,50	19212	3518

В четвертому розділі розглянуто застосування методів оптимізації графіків

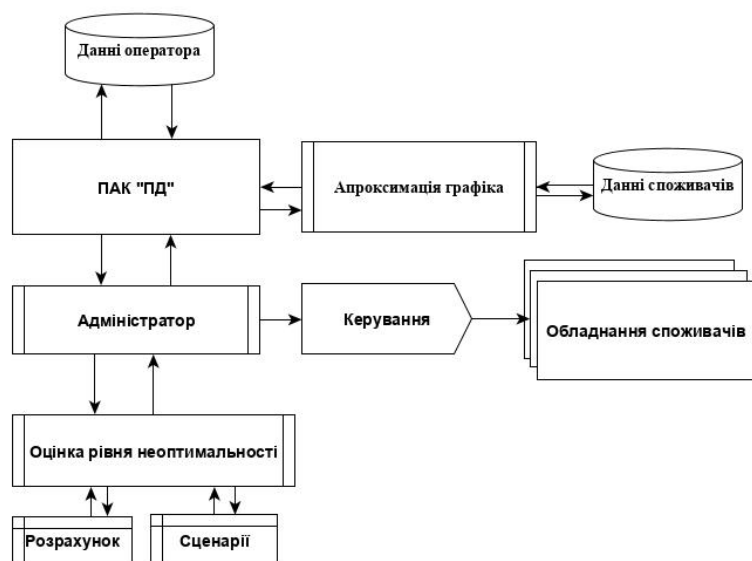


Рис. 8 Складові ПАС «Помічник диспетчера»

споживання та генерації електричної енергії, оцінки оптимальності процесів генерації та споживання електричної енергії для конкретних СЕП з використанням програмно-алгоритмічного комплексу «Помічник диспетчера» складові якого зображено на рис. 8. ПАС «Помічник диспетчера» призначений для автоматичного аналізу отриманих даних з приладів обліку електричної енергії, зберігання даних і надання

користувачеві системи зручного інтерфейсу для аналізу, діагностики та складання звітів про фактичний рівень нерівномірності та ефективності функціонування програм DSM. Крім цього, ПАС «Помічник диспетчера» надає можливість для взаємодії з іншими програмним забезпеченням за допомогою обміну файлами з використанням поширених протоколів та надає доступу до даних.

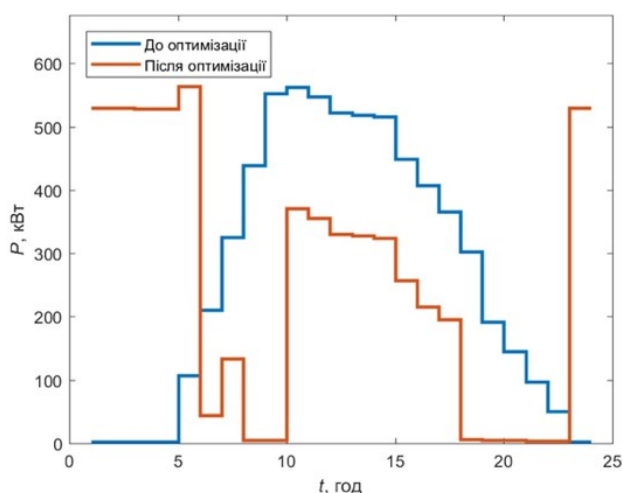


Рис. 9. Оптимізовані графіки

Для підприємства поліграфічної промисловості, а саме ТОВ «Принт Маркет» м. Рівне, оцінено можливість, зменшення витрат на оплату спожитої електроенергії у разі процесу оптимізації добових графіків споживання, та зменшення рівня втрат від нерівномірності добового споживання у системі електропостачання за допомогою використання ПАС «Помічник диспетчера».



У разі оптимізації процесу електроспоживання для СЕП поліграфічного підприємства (рис. 9) отримано за умови тризонного тарифу економію електричної енергії на 53.31% (до оптимізації – 15946,7 грн/день, після оптимізації 7445,13 грн/день), такої економії достатньо для того, щоб підвищити зарплату працівникам за рахунок нічної зміни та перевести підприємство на новий режим роботи. В результаті величина реактивної потужності Фризе зменшилася на 31,7%, що підтверджує позитивні зміни.

Результати дисертаційної роботи передано до використання:

- ТОВ «Принт Маркет», (акт впровадження від 15.05.2017): отримані оптимізовані форми графіків споживання електричної енергії, які дозволяють змінити режим роботи підприємства ТОВ «Принт Маркет» додавши третю (нічну) зміну як економічно обґрунтовану;

- Національній комісії, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг, (акт впровадження від 12.04.2018): методи оцінки рівня нерівномірності споживання електроенергії в локальній системі електропостачання у програмному комплексі «Помічник диспетчера» неоптимальності режимів електропостачання; новий алгоритм застосування принципу керування попитом на електричну енергію за оптимізації режимів функціонування енергетичного хабу;

- ПАТ «Київенерго» Центр приєднань. (акт впровадження (передачі) наукових досліджень від 12.04.2018): запропоновано метод оптимізації режимів генерації та споживання енергії активним споживачем у системі електропостачання, що враховує можливості зміни графіків споживання електричної енергії у разі застосування адресних механізмів керування попитом; метод оцінки доцільності впровадження програм DSM окремими групами споживачів;

- ПрАТ «ДТЕК Київські Електромережі» технічний департамент, (акт впровадження від 16.04.2018): метод оптимізації режимів електроспоживання для побудови ідеалізованих графіків генерації та споживання з врахуванням складових реактивної потужності Фризе; метод оцінки потенціалу споживачів щодо видозміни власного графіка;

- КПІ ім. Ігоря Сікорського. (акт впровадження результатів дисертаційної роботи від 14.02.2019). Методи аналізу неоптимальності та оптимізації добового графіка споживання електроенергії, що враховують існуючі програми DSM.

## **ВИСНОВКИ**

Дисертаційна робота містить нові науково обґрунтовані результати застосування та подальшого розвитку методів і засобів оцінювання ефективності керування попитом на електричну енергію в СЕП з АС. У процесі виконання роботи отримано такі науково-практичні результати:

1. Проведений детальний аналіз особливостей функціонування СЕП з АС, на основі якого зроблено висновок про необхідність створення механізмів оцінки впливу нерівномірності добового графіка споживання електричної енергії для аналізу ефективності впровадження DSM окремими енергетичними компаніями та ОСР в умовах лібералізації ринку електричної енергії. Оцінено основні відмінності

між існуючими СЕП та на базі концепції Smart Grid, характеристики ОСР та ОМСР, механізми оцінки нерівномірності добового графіка електроспоживання, механізми впливу та ефекти від впровадження програм DSM, що дало змогу як критерій оптимізації витрат вибрати мінімізацію реактивної потужності Фризе  $Q_{\Phi}$ .

2. Запропоновано метод оцінки впливу нерівномірності споживання електричної енергії на рівень втрат у СЕП в якому на відміну від існуючих використано модифіковані показники декомпозиції потужності Фризе  $Q_{\Phi}$  та поширені визначення потужності Фризе на довільний інтервал часу, який враховує вплив інтервалів та рівнів нерівномірного споживання електричної енергії на рівень втрат, а також  $k\Delta_{opt}$ , що характеризує ефективність регулювання та визначає рівень неоптимальності передачі енергії з точки зору усунення її втрат.

3. Розширено систему показників енергоефективності за критерієм втрат потужності Фризе  $Q_{\Phi}$  шляхом оцінки впливу факторів нерівномірності споживання електричної енергії та режимів функціонування СЕП за певний інтервалі часу. Отримані значення для розрахунку втрат від нерівномірності режимів генерації та споживання електричної енергії використовуються у випадку ретроспективного, перспективного та аналізу в режимі реального часу та зміни  $\cos\phi$ , відхилень напруги, впливу вищих гармонічних складових.

4. Запропоновано методологію оптимізації графіків електроспоживання з використанням декомпозиції потужності  $Q_{\Phi}$  у разі адресного керування режимом електроспоживання та впровадженні програм з керування попитом на електричну енергію яку реалізовано в якості відповідного програмно-алгоритмічного забезпечення, зокрема, створено програмний комплекс для детального аналізу режимів роботи ЛСЕП за певний період  $T_{реж}$ , для коригування режимів генерації, передачі, накопичення та споживання з боку системного оператора розподілу.

5. Вдосконалено метод оптимізації добового графіка електроспоживання на прикладі житлового комплексу з можливістю акумуляції енергії, зокрема сформовано оптимізаційну задачу, для мінімізації витрат на оплату енергетичних ресурсів з врахуванням обмежень та можливостей адресного впливу і взаємного обміну згенерованою та накопиченою електричною енергією у разі керування режимами акумулювання. Оптимізація процесів енергоспоживання СЕП житлового комплексу у програмі MatLab, показує, що за оптимізації режимів генерації, споживання та накопичення в умовах тарифного коефіцієнта  $T_{Kn} = 0,5$  дозволяє збільшити прибуток від 1611 грн/добу до 3518 грн/добу, при  $T_{Kn} = 1$  від 315 грн/добу до 2428 грн/добу (в 2,2 та 7,7 раз відповідно).

6. Розроблено математичну модель оптимізації добового графіка АС, що враховує значення коефіцієнтів гнучкості обладнання  $k_2$  та режими його функціонування. Результат оптимізації добового графіка електроспоживання для групи домогосподарств за критеріями максимізації коефіцієнта заповнення графіка навантаження  $k_3$  дав змогу покращити цей показник на 29,63% при зменшенні показнику  $\Delta Q_{\Phi}$  на 46,1% та мінімізації витрат коштів  $C$  на 7,8% що становить 14,8 тис. грн./добу для групи домогосподарств.

7. Достовірність результатів ПАК «Помічник диспетчера» показано на прикладі оптимізації графіку роботи поліграфічного підприємства ТОВ «Принт Маркет» м. Рівне, що дозволило отримати економію електричної енергії у розмірі

8501,57 грн/день (до оптимізації – 15946,7 грн/день, після оптимізації 7445,13 грн/день) та зміні показнику  $Q_{\Phi}$  з 35882,62 кВАр до 11377,51 кВАр за умови переходу до тризонного тарифу, що підтверджує ефективність впровадження програм DSM.

8. Отримані результати роботи знайшли використання за виконання НДР №0117U004285 №0118U100552 №0117U003825, у ПрАТ «ДТЕК Київські електромережі» м. Київ, Національній комісії, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг, м. Київ, ПАТ «Київенерго», м. Київ, ТОВ «Принт Маркет», м. Рівне та у навчальному процесі на кафедрі електропостачання КПІ ім. Ігоря Сікорського.

### **СПИСОК ОСНОВНИХ ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

1. Денисюк С.П., Опришко В.П. Інтеграція показників енергоефективності в процес оцінки енергоефективності в секторі транспорту. *Електрифікація транспорту*. 2015. № 9. С. 24–30. Автором запропонована класифікація показників енергоефективності для сектору транспорту.

2. Денисюк С.П., Опришко В.П. Дослідження програм з керування попиту на електроенергію та аналіз ефективності їх використання. *Technology Audit & Production Reserves*. 2016. том 3 (29). С. 69–73. Автором проведено аналіз ефективності програм з керування попиту споживачів.

3. Опришко В.П. Регулювання режимів електропостачання в локальних системах microgrid. *Технічна електродинаміка*. 2016. № 4. С.77–79. Автором запропонований механізм регулювання режимів електропостачання.

4. Denysiuk S., Strzelecki R., Opryshko V. The smart grid concept implementation by expanding the use of demand side management and modern power electronic installations. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2016. №4(46). С.7–17. Автором створено класифікації особливостей застосування програм з керування попитом на електричну енергію та особливості застосування у сучасних силових установках включено до переліку наукових фахових видань України, наукометричних баз Open Academic Journal Index (OAJI), WorldCat, BASE;

5. Denysiuk S., Kotsar O., Opryshko V. Increasing the energy efficiency of warehouses using demand-side management mechanisms. *Technology Audit & Production Reserves*. 2017. № 2/1 (34). С.39–45. Автором розроблено механізм оцінки нерівномірності споживання та генерації електричної енергії в локальних електроенергетичних системах.

6. Опришко В.П. Механізми реалізації програм керування попиту на електричну енергію у світовій практиці. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2019. №(4) С. 44–55 Автором проведено аналіз світової практики впровадження та ефективності програм з керування попитом.

7. Денисюк С.П., Опришко В.П. Аналіз можливостей оптимізації добового графіку споживання електричної енергії. *Вісник КНУТД*. 2019. №6 (128). С. 20–28. Автором розроблено метод оптимізації добового графіка електроспоживання.

8. Veremiichuk Y., Prytyskach I., Yarmoliuk O., Opryshko V. Energy Hub Function Optimization Models During Ukrainian Energy Resources Market

Liberalization. *Power and Electrical Engineering*. 2017. № 34 P. 49–52 (іноземне видання). Автором наведені оптимізаційні моделі графіків споживання електричної енергії.

9. Prokopenko V., Opryshko V., *Energy Audit. Resilience Management and Renewable Energy Processes*. 2016. № 38. P. 101–117 (іноземне видання) Автором запропонована дорожня карта та методологія проведення енергоаудиту;

10. Denysiuk S., Opryshko V. Assessment of energy sector companies innovation management effectiveness. *Promising problems of economics and management*. 2015. P. 71–74. Автором проведена оцінка ефективності інноваційних програм енергоменеджменту.

11. Денисюк С.П., Опришко В.П. А. С. №77262 Україна. Оцінка рівню нерівномірності споживання електроенергії в локальній системі електропостачання у програмному комплексі «Помічник диспетчера». Структура алгоритму зменшення нерівномірності споживання. Заявка №78178 від 19.02.2018. Дата реєстрації 03.03.2018. (Автору належить розробка програмного забезпечення, методу та алгоритму визначення нерівномірності).

12. Денисюк С.П., Базюк Т.М., Опришко В.П. Класифікація активних споживачів відповідно до ступеня їх залученості та наявного потенціалу. *Зб. праць конференції «Енергозбереження на залізничному транспорті та в промисловості»*. 11-14 червня 2014 р. смт. Воловець, Закарпатської обл. 2014. С. 55–56. (Автором класифіковано ступені залучення активних споживачів.

13. Денисюк С.П., Опришко В.П. Локальні інтелектуальні енергетичні системи з розподіленими системами енергетичного менеджменту. *Зб. тез допов. міжнар. наук.-практ. конф. «Відновлювана енергетика та енергоефективність у ХХІ столітті»*. 28–29 травня 2015 р. Інститут відновлюваної енергетики НАН України. 2015. С. 142–145. (Автором представлено характеристики локальних інтелектуальних енергетичних систем.

14. Денисюк С.П., Опришко В.П. Основні програми реалізації DSM. *Зб. тез допов. міжнар. наук.-практ. конф. «Електрифікація транспорту»*. Одеса. Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна 2015. С. 27–28. Автором створена представлена класифікація основних методів керування попитом на електричну енергію.

15. Денисюк С.П., Опришко В.П. Мультиагентний підхід до керування попитом на електроенергію. *Зб. Тез допов. міжнар. наук.-практ. конф. «Електрифікація транспорту»*. 2015. С. 28–29. Автором проведена оцінка ефективності інноваційних програм енергоменеджменту.

16. Денисюк С.П., Опришко В.П. Основні програми та методи керування попитом. *Зб. тез допов. міжнар. наук.-практ. та навч. метод. конф. «Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку»*. 19-21 травня 2015 р. НТУУ «КПІ». 2015. С. 23–24. Автором наведений аналіз існуючих програм енергоменеджменту та керування попитом.

17. Опришко В.П. Особливості інтеграції основних програм і методів з керування попитом споживання електроенергії. *Зб. тез допов. міжнар. наук.-практ. та навч. метод конф. «Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку»*. 30 травня- 01 червня 2016 р. НТУУ «КПІ». 2016. С. 88–90. Автором

*проведено аналіз особливості інтеграції основних програм і методів з керування попитом споживання електроенергії.*

18. Опришко В.П. Аналіз оптимальності функціонування систем акумуляції електроенергії в локальних системах електропостачання. *Зб. тез допов. міжнар. наук.-практ. та навч. метод конф. «Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку»*. 25–27 квітня 2017 р. КПІ ім. Ігоря Сікорського. 2017. С. 51–53. *Автором розроблено показник оцінки оптимальності функціонування систем акумуляції електроенергії в локальних системах електропостачання.*

19. Опришко В.П. Аналіз ефективності керування попитом на електричну енергію. *Зб. тез допов. міжнар. наук.-техн. «Енергетика. Екологія. Людина»* 25-26 травня 2017 р. КПІ ім. Ігоря Сікорського. 2017. С. 98–102. *Автором проведені дослідження щодо ефективності керування попитом на електричну енергію*

20. Опришко В.П. Аналіз оптимальності функціонування систем акумуляції електроенергії в локальних системах електропостачання. *Зб. Тез допов. міжнар. наук.-практ. та навч. метод конф. «Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку»*. 25–27 квітня 2017 р. КПІ ім. Ігоря Сікорського. 2017. С. 51–52. *Автором проведено аналіз оптимальності функціонування систем акумуляції електроенергії.*

21. Прокопенко В.В., Опришко В.П. Становлення концепції енергетичних хабів для господарств з використанням систем керування попитом. *Зб. тез допов. міжнар. наук.-практ. та навч. метод конф. «Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку»*. 17–19 квітня 2018 р. КПІ ім. Ігоря Сікорського. 2018. С. 97–98. *Автором проведено аналіз існуючих енергетичних хабів та методів керування їх попитом.*

22. Veremiichuk Y., Prytyskach I., Yarmoliuk O., Opryshko V. Modeling energy hub operating modes with demand side management usage. International Conference and Exposition on Electrical And Power Engineering (EPE). 2018. P. 972–976. *Автором розроблені моделі енергетичних хабів.*

23. Прокопенко В.В., Опришко В.П. Енергетичний аудит: навч. посіб.: КПІ ім. Ігоря Сікорського.: Політехніка. Київ, 2017. 160 с. *Автором розроблена дорожня карта енергоаудиту та підходи до енергетичного обстеження.*

## **АНОТАЦІЯ**

**Опришко В.П. Оцінювання ефективності керування попитом в системах електропостачання з активним споживачем. – На правах рукопису.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.01 – енергетичні системи та комплекси – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, 2019.

Дисертація присвячена науково-прикладній проблемі – пошуку методів оцінки та особливостей керування попитом на електричну енергію.

Обґрунтовано використання запропонованих методів оцінки впливу нерівномірності споживання електричної енергії на рівень втрат у системі електропостачання на основі потужності Фризе  $Q_F$  та оптимізації режимів роботи активних споживачів в локальній системі електропостачання, що враховує

можливості зміни графіків споживання електричної енергії у разі застосування адресних механізмів керування попитом.

Запропоновані підходи та механізми оптимізації добового графіка електроспоживання на прикладі житлового комплексу з можливістю акумуляції енергії.

*Ключові слова:* керування попитом, енергоефективність, локальні системи електропостачання, інтелектуальні електроенергетичні системи, методи оптимізації, електропостачання, графік електроспоживання, мінімізація витрат.

### ABSTRACT

**Opryshko V.P. Demand side management efficiency assessment in power supply systems with a prosumer. – Manuscript.**

Thesis for the candidate of technical sciences degree in the specialty 05.14.01 – Energy Systems and Complexes. – National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, 2019.

The urgency of the topic, where the expediency of assessment methods development and peculiarities of electricity demand management is given. The aim, scientific task, object, subject and methods of research are formed, scientific novelty and practical value of the obtained results are determined, data on approbation and publications are given, personal contribution of the applicant is indicated, acts of thesis results implementation are given.

One of power supply systems within the framework of the Smart Grid concept modernization areas is the introduction of new control systems: organization of power distribution, power consumption, protection, automated control and data collection and others.

In order to implement the functioning of the energy system, coordinate the work and increase the efficiency of generation, transmission and consumption of electric energy processes, there is a task to create management mechanisms that provide integration of self-organizing systems of electricity and heat supply built on the multi-agent principle on an intellectual basis, monitoring and accumulation of these systems, including the assessment of the status and analysis of technical, technological and organizational management mechanisms implementation effectiveness.

In most developed countries, demand-side management programmes are widely used as a means of harmonizing generation and consumption regimes in the electricity supply system. It has been proven that not only consumers and utilities, but also society as a whole benefit from the introduction of electricity demand management programmes. The power supply system should be considered as a single complex, and the optimization of modes in the system is carried out not only considering power losses for transmission, but also considering changes in power consumption in case of voltage deviation.

Efficiency increase in the power supply system can be achieved by intellectual control over compliance introduction with the established optimized power consumption schedules based on the flexibility of the technological process and installed equipment operating modes.

Considering the sharply variable nature of electricity consumption during the day, an important aspect of assessing the optimality of local power supply systems operation

is the quantitative difference between the current level of electricity consumption relative to the optimal level at a controlled level of non-optimality of consumption. It has been suggested that indicators based on Frize power  $Q_{\Phi}$  to be used. In general, the Frize power  $Q_{\Phi}$  is a quadratic incoherence between full and active power and allows us to estimate the level of losses from non-uniform consumption. Received characteristics allow to estimate the influence of irregularity of generation and consumption processes of electric energy on electric energy quality, level of reactive energy and losses in a network.

The method of electricity demand management by optimizing the daily schedule of electricity consumption considering the limitations of maximum power consumption, maintaining the volume of electricity consumed and considering the capabilities of the consumer to control is proposed. Obtained optimized forms of the energy consumption schedule meet the criteria of maximizing the graph filling ratio and reducing the cost of consumed energy. The consumer potential is considered by the coefficient of demand flexibility. This coefficient characterizes the capabilities of the installed equipment to change modes of consumption when implementing individual programs for managing demand for electricity. The obtained results of modeling for a group of household households are correlated with a decrease in the indicator  $Q_{\Phi}$ , especially when maximizing the graph filling ratio, which corresponds to a decrease in the overall irregularity of the daily electricity consumption schedule.

In general, the optimization results allow to determine the consumers possibilities to adjust their own daily consumption schedules considering the goals set: saving money on consumed electricity, and the potential benefit of the energy supplying organization from the implementation of a specific program of demand management.

The results were transferred to the National Commission for State Regulation in the Energy and Public Utilities Sector, PAT “Kyivenergo”, PrAT “DTEK Kyiv Electric Grids” and National Technical University of Ukraine Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute (Igor Sikorsky KPI) for use, as well as in the educational process of Igor Sikorsky KPI at the power supply department.

**Keywords:** local grids, smart systems, demand management, energy efficiency, optimization, power supply, power consumption schedule, cost minimization.