

## **ВІДГУК**

### **офіційного опонента по дисертаційній роботі ПІРНЯКА Віктора Михайловича**

“Методи та засоби оптимізації перетікань реактивної потужності в розподільних електричних мережах на основі принципу Гамільтона-Остроградського”,  
подану на здобуття наукового ступеню кандидата технічних наук  
за спеціальністю 05.14.02 – електричні станції, мережі і системи

#### **Актуальність теми дисертаційного дослідження, її зв'язок з науковими програмами і планами**

Оптимізація режиму електричної мережі та мінімізація втрат активної потужності шляхом перерозподілу потоків реактивної потужності є однією з традиційних задач електроенергетики. Вступ в дію найближчим часом нової моделі ринку електричної енергії в Україні загострює актуальність цієї проблеми як складової загальної задачі забезпечення прийняттого, конкурентоспроможного балансу між доходами енергопостачальних компаній від реалізації електричної енергії та витратами на її передачу та розподіл.

Слід зазначити, що застосування традиційних моделей та методів оптимізації режимів розподільних електричних мереж України на сьогодні ускладнено активним розвитком розподіленої генерації, що докорінно змінює потоки енергії відповідно не тільки до режиму приймачів електричної енергії, але також до добового «циркадного» ритму та поточних погодних умов.

Наведені міркування визначають постановку задачі оптимального перерозподілу потоків реактивної потужності в розподільних мережах з децентралізованим живленням, розв'язанню якої присвячено дисертаційне дослідження В. М. Пірняка.

Підтвердженням важливості та необхідності проведення наукових досліджень, результати яких представлено у дисертаційній роботі є те, що вони проводились протягом останніх років за науковим напрямом кафедри електричних станцій і систем Вінницького національного технічного університету за держбюджетними темами “Оптимізація режимів електричних мереж з розподіленими джерелами енергії” (№ держреєстрації 0113U00260), “Інтелектуалізація електроенергетичних систем з відновлювальними джерелами енергії на основі принципу Гамільтона-Остроградського” (№ держреєстрації 0115U002382).

#### **Оцінка змісту дисертаційної роботи і його відповідність меті та поставленим завданням досліджень**

Структурно дисертаційна робота В. М. Пірняка складається зі вступу, чотирьох розділів, висновку, списку використаної літератури та додатків. Загальний обсяг дисертації – 200 сторінок. Основний зміст викладений на 135 сторінках друкованого тексту, містить 27 рисунків, 23 таблиці.

У *вступі* обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету та задачі дослідження. Зазначено наукову новизну та практичну цінність отриманих результатів, викладено основні положення, які виносяться на захист та наведені відомості про апробацію та публікацію основних результатів роботи.

У *першому розділі* проаналізовано проблеми оптимізації перетікань реактивної потужності в розподільних мережах з частковою децентралізацією живлення. Показано, що для підвищення адекватності визначення оптимальних рівнів компенсації реактивної потужності необхідно враховувати зміни у структурі електроспоживання, надійність мереж та якість інформаційного забезпечення. Крім того, важливим фактором є вплив розподіленої генерації на режими електричних мереж. Показано можливість визначення оптимальних параметрів та місць приєднання джерел реактивної потужності з використанням принципу Гамільтона-Остроградського. Визначено напрямки вдосконалення систем керування джерел реактивної потужності групової компенсації. Зокрема, обґрунтовано доцільність децентралізації таких систем з використанням локальних систем автоматичного керування.

У *другому розділі* проаналізовано особливості сучасних розподільних електричних мереж з огляду на проблему оптимізації режимів реактивної потужності. Показано, що значна зношеність основного устаткування розподільних мереж України та недостатня оснащеність засобами моніторингу негативно впливають на ефективність планування заходів щодо зменшення втрат та підвищення якості напруги. За результатами досліджень запропоновано метод формування комплексного показника обґрунтованої ефективності впровадження джерел реактивної потужності, який забезпечує врахування надійності мережі, якості напруги у її вузлах, а також точності визначення корисного відпуску та втрат електроенергії. Це дозволяє вилучати з області пошуку оптимальних місць встановлення пристроїв компенсації реактивної потужності фрагменти мереж з частими відмовами або без засобів моніторингу режимів, що підвищує обґрунтованість рішень щодо впровадження групової компенсації реактивної потужності.

За результатами досліджень обґрунтовано доцільність використання принципу Гамільтона-Остроградського для підвищення надійності та швидкодії розв'язання задачі оптимізації розміщення джерел реактивної потужності в електричних мережах за критерієм максимуму рентабельності капіталовкладень. Використовуючи модель економічного поточкорозподілу в мережі задачу нелінійної оптимізації зведено до принципово простішої задачі пошуку екстремального струморозподілу в заступній  $r$ -схемі. Для врахування економічних факторів оптимізаційної задачі схему «ідеального» режиму доповнено економічними опорами джерел реактивної потужності, призначені для моделювання економічних чинників, зокрема витрат на експлуатацію устаткування пристроїв компенсації реактивної потужності.

Для врахування активних обмежень, зокрема обмежень на відхилення напруги в розподільних мережах, запропоновано метод коригування оптимальної потужності джерел реактивної потужності, який передбачає розв'язання

допоміжної лінеаризованої задачі оптимізації. Результати досліджень дозволили розширити область застосування підходу, що базується на моделюванні «ідеальних» режимів електричних мереж, а також підвищити ефективність проектних рішень.

У *третьому розділі* на основі імітації режимів економічного поточкорозподілу розроблено алгоритми визначення оптимального рівня групової компенсації реактивних навантажень за критерієм максимальної рентабельності. Запропоновано алгоритм багатокритеріальної оптимізації потужностей та розміщення пристроїв компенсації реактивної потужності в електричних мережах. Показано, що алгоритмічно задачі оптимізації перетікань реактивної потужності незалежно від критерію оптимальності, можуть бути зведені до оптимізації режиму певної фіктивної електромережі за втратами активної потужності. Виходячи з цього, оптимальне навантаження джерела реактивної потужності можна визначати з результатів розрахунку усталеного режиму мережі за її заступною  $r$ -схемою. Для забезпечення обмежень за напругою у вузлах мережі значення потужностей джерел реактивної потужності та коефіцієнтів трансформації уточнюються за результатами розрахунку економічного струморозподілу.

Для підвищення ступеню автоматизації оперативного керування джерел реактивної потужності у розподільних мережах вдосконалено структурну схему системи керування. Отримано умови оптимальності перетікань реактивної потужності з урахуванням витрат на експлуатацію джерел реактивної потужності та якості електроенергії. Для цього використано метод оптимізації інтегральних функцій Понтрягіна. Розроблено алгоритми визначення налагоджувальних параметрів системи автоматичного керування, які локально забезпечують оптимізацію реактивних перетікань у мережах. Періодичне коригування їх налаштувань вимагає проведення значної кількості імітаційних розрахунків з урахуванням взаємозв'язків між окремими джерелами. Для реалізації системи керування запропоновано двоконтурну схему з децентралізацією функцій автоматичного керування, що забезпечує високу надійність та ефективність системи.

У *четвертому розділі* на прикладі реальних електричних мереж 110/35/10 кВ ПАТ «Вінницяобленерго» показано адекватність та ефективність методу оптимізації перетікань реактивної потужності, який базується на визначенні та реалізації «ідеального» струморозподілу в електричних мережах. Так, вдосконалений програмний засіб було використано для техніко-економічного обґрунтування впровадження джерел реактивної потужності в мережах 110-35 кВ ПАТ «Вінницяобленерго». За результатами досліджень визначено оптимальну послідовність впровадження пристроїв компенсації реактивної потужності, яка характеризується високою рентабельністю. Використовуючи аналіз чутливості визначено перелік джерел реактивної потужності, що мають найбільший вплив на втрати та режим напруги в електричній мережі.

На прикладі моделювання режимів Вінницьких міських електричних мереж напругою 10 кВ було підтверджено ефективність запропонованого методу

оцінювання обґрунтованого ефекту від компенсації реактивної потужності. На прикладі джерел реактивної потужності, що експлуатуються у Вінницьких міських мережах, проведено натурні експерименти з визначення уставок для локальної компенсації реактивної потужності. Показано, що період їх актуальності становить від 1 до 3 місяців. У випадку використання джерел реактивної потужності для групової компенсації через взаємовплив вузлів навантаження електричної мережі, уставки по коефіцієнтах потужності необхідно періодично уточнювати протягом доби.

Для визначення уставок у межах періоду актуальності запропоновано використовувати імітаційну модель системи автоматичного керування, за допомогою якої граничні коефіцієнти потужності підбираються за методом найменших квадратів відхилень між оптимальними та імітованими потужностями джерел реактивної потужності. Уставки по часу для системи автоматичного керування визначаються з урахуванням швидкості зміни осереднених оптимальних потужностей у межах періоду актуальності.

Загальні *висновки* по дисертації є коректними та відображають наукові та практичні результати, отримані автором.

*Список використаних джерел* із 137 найменувань охоплює сучасні вітчизняні та зарубіжні публікації за темою дисертаційних досліджень.

В *додатках* до дисертаційної роботи міститься інформація про техніко-економічні параметри електричних мереж 110/35 кВ ПАТ «Вінницяобленерго», результати розрахунку технічних втрат електроенергії та визначення ефективності приєднання додаткових джерел реактивної потужності для фрагменту Вінницьких міських електричних мереж 10 кВ, а також інформацію про впровадження результатів наукових досліджень.

*Автореферат* повною мірою передає зміст дисертаційного дослідження і не містить положень та висновків, які відсутні у дисертації.

Оформлення дисертаційної роботи та автореферату відповідає вимогам чинних стандартів.

### **Ступінь обґрунтованості наукових результатів, висновків і рекомендацій**

Достовірність отриманих наукових результатів підтверджується коректними постановкою завдання і прийнятими припущеннями щодо особливостей режимів розподільних електричних мереж, які містять у своєму складі джерела розподіленої генерації, застосованими в роботі математичними апаратами принципів Гамільтона-Остроградського, максимуму інтегральних функцій Понтрягіна, методів лінійного та нелінійного програмування, теорії режимів електричних систем, теорії подібності та моделювання, матричної алгебри, теорії графів та декомпозиції, теорії автоматичного керування.

Методи та засоби досліджень відповідають поставленим задачам, що забезпечило ефективність їх розв'язання та досягання мети дисертаційної роботи.

Основні результати дослідження достатньо апробовані. Вони доповідались здобувачем та обговорювались на п'яти міжнародних наукових та науково-

технічних конференціях і опубліковані у 13 наукових роботах, серед яких 6 статей у фахових виданнях, які індексуються в міжнародних наукометричних базах даних, 4 публікації у збірниках матеріалів міжнародних конференцій та 3 статті в інших наукових виданнях.

### **Наукова новизна результатів дисертаційного дослідження**

Результати виконання дисертаційного дослідження містять елементи наукової новизни, зокрема

- вперше запропоновано застосування комплексного критерію ефективності впровадження компенсації реактивної потужності, який враховує структурну надійність електричних мереж, якість електричної енергії за відхиленнями напруги та точність визначення корисного відпуску та втрат електричної енергії;

- розвинуто метод оптимізації режиму перетоків реактивної потужності в електричній мережі на основі принципу найменшої дії шляхом введення до складу розрахункової схеми фіктивних економічних опорів, що забезпечило трансферінг задачі з економічної області максимізації економічного ефекту від впровадження джерел реактивної потужності в технічну задачу мінімізації втрат активної потужності в розрахунковій схемі мережі;

- вдосконалено метод оптимізації встановлених потужностей джерел реактивної потужності з урахуванням технологічних обмежень щодо якості електричної енергії в мережі;

- отримано аналітичні вирази оптимальності режиму джерел реактивної потужності, що дозволило вдосконалити алгоритм системи автоматичного керування установкам компенсації.

### **Практична цінність отриманих результатів**

Практичним результатом дисертаційного дослідження є розробка методу та алгоритму розрахунку оптимальних обсягів компенсації реактивної потужності в розподільних електричних мережах, що надає можливість обґрунтовано розміщувати пристрої компенсації реактивної потужності в мережах енергопостачальних компаній та корегувати їх параметри відповідно до поточних режимів джерел розподіленої генерації та мережі в цілому.

Практичну цінність отриманих результатів підтверджує наявна інформація про впровадження розроблених алгоритмів та програм оптимізації компенсації реактивної потужності в ПАТ «Вінницяобленерго» та ТОВ «Подільський енергетичний консалтинг».

Також результати наукових досліджень впроваджено у навчальному процесі Вінницького національного технічного університету для вдосконалення лабораторної установки регулювання потужності конденсаторної батареї для централізованої та групової компенсації реактивної потужності в електричній мережі.

## Зауваження по роботі

1. Визначення «ідеального» режиму електричної системи в дисертаційній роботі базується на розрахунку економічного поточкорозподілу потужностей за, так званою,  $r$ -схемою мережі. Такий підхід використовують для розв'язання задач оптимізації режиму замкненої електричної мережі. Проте в роботі розглядаються розподільні електричні мережі, які експлуатуються, в основному, за розімкненими схемами, що ускладнює застосування традиційного апарату розрахунку «ідеального» режиму.

2. Розрахунок «ідеального» режиму електричної мережі з економічними опорами здобувач в своєму дослідженні виконує за середніми потужностями навантажень. Проте, відповідно до вимог забезпечення точності моделювання економічних чинників, такі розрахунки правильніше виконувати за середньоквадратичними навантаженнями.

Водночас, контроль забезпечення якості електричної енергії за відхиленням напруги слід здійснювати для режимів максимальних та мінімальних навантажень, а в мережах із розосередженою генерацією – додатково для режимів денного зниження навантажень за максимальної потужності СЕС та нічного мінімуму за максимальної потужності ВЕС.

3. Економічний критерій рентабельності капіталовкладень розглянутий в роботі зокрема відповідно до виразу (2.18) на стор. 74 стосується стаціонарної економічної задачі коли капіталовкладення здійснюються за один етап, а щорічні витрати на експлуатацію устаткування та прибуток є незмінними протягом певного періоду часу. Проте, з практики експлуатації розподільних електричних мереж відомо, що протягом останніх років має місце постійне стале зростання навантаження споживачів, що зумовлює з одного боку щорічне збільшення надходжень від реалізації електричної енергії, а з іншого – збільшення витрат на покриття втрат електричної енергії на її транспортування.

4. В підрозділі 2.3.2 на стор. 74 показано, що економічні опори є нелінійними, проте оптимізація режиму реактивної потужності з урахуванням обмежень за режимом напруги за допомогою матриць коефіцієнтів струморозподілу та із застосуванням симплекс-методу передбачає лінеаризацію розрахункової схеми електричної системи, що зумовлює викривлення результатів обчислень через похибку моделювання. Тому бажано було б оцінити таку похибку та показати її допустимість.

5. Розроблений алгоритм функціонування системи автоматичного керування джерелами реактивної потужності базується на моделюванні усталених режимів електричної системи за умови сталості процесів в межах певного періоду часу, про що йдеться на стор. 119 дисертації. Разом з тим в роботі бракує досліджень динамічних режимів, обумовлених, наприклад, зміною навантаження відновлювальних джерел енергії.

6. Перелік умовних позначень містить ряд скорочень, які зустрічаються в тексті дисертації тільки один раз в оглядовій частині (АЗПС, NSGA II, NSPSO, PV-DGS, SDP, SMGSO, VSI), а відповідні терміни не мають безпосереднього відношення до змісту дисертаційного дослідження. Разом з тим у переліку



відсутні такі позначення, як РЕМ (розподільна електрична мережа) та ЕЕС (електроенергетична система), які багаторазово зустрічаються у тексті дисертації.

7. В роботі наведено багато розрахункових прикладів які ілюструють застосування розроблених моделей та методів оптимізації компенсації реактивної потужності в розподільних електричних мережах проте ці приклади не проілюстровано жодною схемою електричних мереж що ускладнює сприйняття викладеного матеріалу.

Крім перерахованих зауважень, що відносяться до змістовної частини дисертаційної роботи, необхідно відзначити деякі недоліки, пов'язані з описками, вживанням стилістично неузгоджених речень, незначними орфографічними та граматичними помилками, на стор. 30, 35, 53, 55, 86, 99 тощо.

Наведені зауваження не стосуються принципів положень і результатів дисертації, тому не знижують її наукову і практичну цінність.

### Висновки

Дисертація Пірняка Віктора Михайловича на тему «Методи та засоби оптимізації перетікань реактивної потужності в розподільних електромережах на основі принципу Гамільтона-Остроградського» є завершеним науковим дослідженням, в якому вирішено актуальну наукову задачу з теорії режимів електроенергетичних систем, пов'язану з оптимізацією компенсації реактивної потужності в розподільних електричних мережах, які містять джерела розподіленої генерації.

За змістом і отриманими результатами дисертаційна робота відповідає вимогам пп. 9, 11, 12 «Порядку присудження наукових ступенів» щодо кандидатських дисертацій. Дисертація відповідає паспорту спеціальності 05.14.02 – електричні станції, мережі і системи, а її автор – **Піряк Віктор Михайлович**, заслуговує присудження вченого ступеня кандидата технічних наук.

Офіційний опонент, кандидат технічних наук,  
доцент кафедри електричних мереж та систем  
Національного технічного університету України  
«Київський політехнічний інститут  
імені Ігоря Сікорського»

