

**Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет**

ПІРНЯК ВІКТОР МИХАЙЛОВИЧ



УДК 621.316.13

**МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ОПТИМІЗАЦІЇ ПЕРЕТІКАНЬ РЕАКТИВНОЇ
ПОТУЖНОСТІ В РОЗПОДІЛЬНИХ ЕЛЕКТРОМЕРЕЖАХ НА ОСНОВІ
ПРИНЦИПУ ГАМІЛЬТОНА-ОСТРОГРАДСЬКОГО**

05.14.02 – електричні станції, мережі і системи

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Вінниця – 2019

Дисертацією є кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Робота виконана у Вінницькому національному технічному університеті Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Лежнюк Петро Дем'янович,
Вінницький національний технічний університет,
завідувач кафедри електричних станцій та систем.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Саснко Юрій Леонідович,
Державний вищий навчальний заклад
«Приазовський державний технічний університет»,
декан енергетичного факультету, професор кафедри
електрифікації промислових підприємств;

кандидат технічних наук, доцент
Кацадзе Теймураз Луарсабович,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»,
доцент кафедри електричних мереж та систем.

Захист відбудеться «24» травня 2019 р. о 12³⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 05.052.05 у Вінницькому національному технічному університеті за адресою: 21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, ГНК, ауд. 210.

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

Автореферат розісланий «23» квітня 2019 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



О. Б. Бурикін

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Обґрунтування вибору теми дослідження. Оптимізація режимів електричних мереж (ЕМ) з використанням додаткових джерел реактивної потужності (ДРП) об'єктивно є одною з найбільш ефективних технологій енергозбереження та забезпечення належної якості напруги. Тому задачам компенсації реактивної потужності (КРП) в розподільних мережах присвячено значну кількість робіт. Однак, зміни у техніко-економічних умовах експлуатації ЕМ, зумовлюють актуальність досліджень у даному напрямку.

З розвитком інформаційно-обчислювальних засобів стає можливим перехід від сукупності техніко-економічних задач оптимізації окремих етапів впровадження та експлуатації ДРП до комплексної задачі оптимізації перетікань реактивної потужності за інтегральним критерієм. Останній пов'язуючи проблеми втрат та якості електроенергії, а також надійності мереж з окупністю компенсувальних установок (КУ), сприяє формуванню технічних рішень, максимально адаптованих до практичної реалізації.

Зміна структури та параметрів електроспоживання, а також масова розбудова розосереджених джерел енергії (РДЕ) спричиняє загострення проблеми автоматизації керування режимами розподільних мереж. Вдосконалення підходів до автоматизованого та автоматичного керування потоками реактивної потужності в них дозволить підвищити ефективність компенсації завдяки регулюванню напруги та підвищенню пропускної здатності ліній електропередавання. Для визначення та реалізації керувальних впливів щодо ДРП доцільно застосовувати інформаційні можливості та комунікаційні технології *SMART Grid*.

Традиційно для реалізації підходів до керування потоками реактивної потужності в ЕМ та вибору оптимальних технічних рішень, використовуються чисельні методи лінійного і нелінійного програмування. Загальним їх недоліком є те, що вони дають часткові розв'язки. У даній роботі досліджується можливість визначення оптимальних параметрів мереж та побудови систем керування перетіканнями реактивної потужності спираючись на фундаментальний принцип найменшої дії (ПНД) у трактуванні Гамільтона-Остроградського.

Отже, дослідження методів та засобів оптимізації перетікань реактивної потужності в розподільних електромережах з розосередженими джерелами електроенергії на основі принципу найменшої дії, є актуальним науково-прикладним завданням. Його розв'язання дало можливість уточнити формулювання критерію оптимальності вказаної задачі та розробити, на основі моделювання «ідеальних» або економічних режимів ЕМ, методи оптимізації розміщення додаткових джерел реактивної потужності та засоби керування ними.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, грантами.

Дисертація виконана в плані наукових досліджень, проведених кафедрою електричних станцій та систем Вінницького національного технічного університету за держбюджетними темами «Оптимізація режимів

електричних мереж з розподіленими джерелами енергії» (№ держреєстрації 0113U002260С), «Інтелектуалізація електроенергетичних систем з відновлюваними джерелами енергії на основі принципу Гамільтона-Остроградського» (№ держреєстрації 0115U002382). Автор брав участь у виконанні вищевказаних робіт як виконавець.

Мета і завдання дослідження. Метою даної дисертаційної роботи є зменшення втрат та підвищення якості напруги у електричних мережах, шляхом розроблення методів та засобів оптимізації потоків реактивної потужності на основі принципу Гамільтона-Остроградського.

Відповідно до вказаної мети в роботі розв'язано такі **основні завдання**:

- аналіз стану компенсації реактивних навантажень в електричних мережах енергопостачальних компаній та її методичного забезпечення;
- аналіз існуючих методів оптимізації режимів електричних мереж за реактивною потужністю;
- дослідження впливу якості інформаційного забезпечення на результати розв'язання оптимізаційних задач, пов'язаних з регулюванням реактивних перетікань та напруги в розподільних мережах;
- розроблення методу оцінювання обґрунтованого ефекту від компенсації реактивної потужності в розподільних електромережах з урахуванням якості інформаційного забезпечення;
- розвиток методу оптимізації розміщення засобів КРП з імітацією «ідеального» струморозподілу в електромережах за заступною r -схемою шляхом вдосконалення методу визначення та коригування економічних опорів для компенсувальних установок;
- розроблення методу оптимізації розміщення засобів компенсації реактивної потужності за критерієм максимуму рентабельності з урахуванням допустимих відхилень напруги;
- формування умов оптимальності функціонування засобів компенсації реактивної потужності у розподільних мережах;
- розроблення структурної схеми та алгоритмів функціонування системи групової компенсації реактивної потужності в електромережах з використанням локальних систем автоматичного керування КРП.

Об'єктом дослідження дисертаційної роботи є нормальні режими розподільних електричних мереж з розосередженими джерелами електроенергії.

Предметом дослідження є методи і засоби аналізу та оптимізації перетікань реактивної потужності в розподільних електричних мережах з розосередженими джерелами енергії та оптимального керування установками компенсації реактивної потужності.

Методи дослідження. Для аналізу та розв'язання поставлених задач використані принцип найменшої дії у формулюванні Гамільтона-Остроградського, принцип максимуму інтегральних функцій Понтрягіна, узагальнювальні методи теорії моделювання, методи лінійного та нелінійного програмування. Усталені режими ЕМ моделюються і аналізуються на базі методу вузлових напруг та методу середніх навантажень. Для розподілу втрат

електроенергії між окремими трансакціями реактивної потужності використовуються диференційні методи та метод коефіцієнтів розподілу втрат. Для розроблення алгоритмів аналізу перетікань реактивної потужності в розподільних електромережах з РДЕ та формування законів оптимального керування ДРП використовувались матрична алгебра, теорія графів та декомпозиція. Для розроблення систем автоматичного керування використано положення теорії автоматичного керування.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у тому, що показано доцільність використання принципу найменшої дії для визначення та підтримання оптимальних рівнів компенсації реактивної потужності в електричних мережах, а також встановлено залежність оптимальних рівнів КРП від надійності електричних мереж та якості інформаційного забезпечення. Зокрема:

1. Запропоновано новий метод оцінювання обґрунтованої ефективності компенсації реактивної потужності в електричних мережах у вигляді комплексного показника, що на відміну від відомих, враховує надійність мереж, якість напруги у їх вузлах, а також точність визначення корисного відпуску та втрат електроенергії. Це дозволяє обґрунтовано визначати область оптимальності встановлення ДРП з урахуванням ризиків, пов'язаних з відмовами в мережах та відсутністю засобів моніторингу їх режимів.

2. Набув подальшого розвитку метод оптимізації перетікань електроенергії на основі принципу найменшої дії, що проявляється у врахуванні питомих капітальних та експлуатаційних витрат у моделі «ідеального» режиму електричної мережі. Це дозволяє розширити межі застосування методу на задачі техніко-економічної оптимізації і, зокрема, підвищити надійність та швидкодію розв'язання задачі оптимізації розміщення ДРП у електричних мережах за критерієм максимуму рентабельності.

3. Вдосконалено метод оптимізації встановлених потужностей ДРП на основі принципу найменшої дії, що проявляється в урахуванні обмежень на відхилення напруги в електричних мережах та коригуванні оптимальних потужностей джерел за результатами розв'язання допоміжної задачі мінімізації приросту втрат електроенергії. Зведення її до лінійної, використовуючи коефіцієнти розподілу втрат потужності, дозволило підвищити надійність та швидкодію методу оптимізації.

4. На основі принципу найменшої дії отримано аналітичні співвідношення, що описують оптимальні режими джерел реактивної потужності у розподільних мережах за критерієм максимального прибутку від їх встановлення. Це дозволило вдосконалити алгоритми керування компенсувальними установками, а також алгоритми визначення налагоджувальних параметрів систем автоматичного керування ними.

Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що на основі вдосконаленого методу розрахунку оптимальних рівнів компенсації реактивної потужності в розподільних мережах розроблено алгоритм, у якому враховано обмеження за надійністю та якістю електроенергії, що дає можливість обґрунтовано розміщувати ДРП в мережах енергопостачальних

компаній та коригувати їх параметри. Розроблені структурні схеми й алгоритми керування наявними ДРП дозволяють підтримувати оптимальні (за сумарними витратами) перетікання реактивної потужності в ЕМ з урахуванням зміни режимних параметрів, зокрема, під впливом РДЕ.

Отримані в дисертаційній роботі результати наукових досліджень впроваджено в ПАТ "Вінницяобленерго" (акт від 16 жовтня 2018 р.) з метою вдосконалення процесу оптимізації реактивних перетікань в електричних мережах енергопостачальної компанії за критерієм мінімуму втрат електроенергії від них. Результати реалізовано у формі алгоритмів та програм для розрахунку оптимальних рівнів компенсації реактивної потужності, а також для коригування уставок систем автоматичного керування ДРП.

Результати досліджень впроваджено в ТОВ «Подільський енергетичний консалтинг» у вигляді програми для оцінювання обґрунтованого ефекту від розвитку розподільних ЕМ, а також оптимізації розміщення додаткових джерел реактивної потужності в них (довідка від 08 жовтня 2018 р.).

Результати наукових досліджень впроваджено також у навчальному процесі Вінницького національного технічного університету (акт від 12 вересня 2018 р.) у формі вдосконалення лабораторної установки з регулювання потужності конденсаторних батарей для централізованої та групової компенсації реактивних навантажень в ЕМ. Теоретичні результати включено до лекційних, лабораторних і практичних курсів.

Особистий внесок здобувача. Усі результати, які складають основний зміст дисертаційної роботи, отримані автором самостійно.

В роботах, опублікованих у співавторстві автору належать: у [1] – алгоритм визначення економічних еквівалентів реактивної потужності для окремих вузлів ЕМ за відносними спадами напруги; у [2] – розв’язання задачі оптимізації перетікань реактивної енергії у інтегральній постановці за принципом максимуму Понтрягіна, структура автоматизованої системи керування ДРП; у [3] – метод визначення та оперативного коригування економічних опорів ДРП, введення яких у заступну схему ЕМ зводить задачу максимізації рентабельності впровадження компенсуючих установок (КУ) до відтворення низки режимів з мінімальними втратами; у [4] – метод врахування обмежень на відхилення напруги у вузлах ЕМ під час розв’язання задачі оптимізації розміщення ДРП; у [5] – вдосконалення методу оцінювання обґрунтованого ефекту від впровадження ДРП в електромережах з урахуванням неточності вихідної інформації; у [6] – алгоритм оцінювання плати для активного споживача за регулювання напруги, як системної послуги; у [7] – оцінювання адекватності методу визначення економічних еквівалентів реактивної потужності, як коефіцієнтів розподілу втрат; у [8] – оцінювання адекватності визначення економічних еквівалентів реактивної потужності за відносними спадами напруги; у [10] – метод врахування обмежень за напругою, алгоритм та програмна реалізація регулювання напруги в ЕМ у циклі оптимізації розміщення додаткових ДРП; у [11] – вдосконалення методу визначення економічних еквівалентів реактивної потужності у електромережах з РДЕ, висновки; у [12] – алгоритм уточнення економічних еквівалентів

реактивної потужності в ЕМ за відносними спадами напруги; у [13] – алгоритм аналізу чутливості втрат електроенергії в електромережах та визначення областей корекції для декомпозиції задачі оптимального розміщення ДРП.

Результати теоретичних досліджень, що викладені у [1]–[13], були отримані у Вінницькому національному технічному університеті (ВНТУ).

Апробація матеріалів дисертації. Матеріали дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися: на XI Міжнародній науково-технічній конференції «Контроль і управління у складних системах (КУСС-2012)» (м. Вінниця, 2012 р.); на II Міжнародній науково-технічній конференції «Оптимальне керування електроустановками (ОКЕУ–2013)» (м. Вінниця, 2013 р.); на IV Міжнародній науково-технічній конференції «Оптимальне керування електроустановками (ОКЕУ–2017)» (м. Вінниця, 2017 р.); на III Міжнародній науково-технічній конференції «*Intelligent Energy and Power Systems (IEPS-2018)*» (м. Харків, 2018 р.); на XIV Міжнародній науково-технічній конференції «Контроль і управління у складних системах (КУСС-2018)» (м. Вінниця, 2018 р.).

Публікації. За результатами виконаних досліджень опубліковано 13 робіт, з них 6 статей у наукових фахових виданнях, що індексуються у міжнародних наукометричних базах даних, 3 статті у інших журналах, 4 публікації у збірниках матеріалів міжнародних конференцій (з них 1 стаття індексується у наукометричній базі *SCOPUS*).

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел (137 найменувань) і додатків. Основний зміст викладений на 135 сторінках друкованого тексту, містить 27 рисунків, 23 таблиці. Загальний обсяг дисертації – 200 сторінок.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету та задачі дослідження. Зазначено наукову новизну та практичну цінність отриманих результатів. Наведено відомості про апробацію роботи, особистий внесок здобувача та публікації. Зазначено зв'язок роботи з науковими програмами, темами.

У **першому розділі** проаналізовано проблеми оптимізації перетікань реактивної потужності в розподільних електромережах з частковою децентралізацією живлення. За результатами аналізу відомих методів та засобів вирішення проблеми виявлено низку недоліків, які вимагають усунення. Показано, що для визначення оптимальних рівнів компенсації реактивної потужності в ЕМ необхідно враховувати зміни у структурі електроспоживання, надійність електромереж та якість інформаційного забезпечення. Показано можливість визначення оптимальних параметрів та місць приєднання джерел реактивної потужності (ДРП) з використанням принципу Гамільтона-Остроградського (ПНД).

Аналізуючи результати попередніх досліджень встановлено, що часто

причиною неефективності запроваджених заходів зі зменшення втрат у розподільних мережах виявляються неточності постановки задачі, що зумовлені недосконалістю наявного інформаційного забезпечення. Крім того, відсутність у чинних методиках механізмів урахування впливових факторів та схильність до надмірного спрощення задачі, її декомпозиції з нехтуванням взаємозв'язків, призводить до відомих проблем з адекватністю техніко-економічних оцінок та, зрештою, до прийняття малоефективних рішень.

Для вирішення зазначеної проблеми в розподільних мережах запропоновано враховувати при формулюванні задачі оптимізації розміщення ДРП надійність ЕМ, допустимість відхилення напруги та достовірність вихідної інформації (див. розділ 2).

Для розв'язання задач оптимізації перетікань реактивної потужності в ЕМ традиційно використовуються методи нелінійної багатомірної умовної оптимізації. Важливим їх недоліком є залежність надійності отримання розв'язку від обраних початкових наближень. Крім того ситуація може погіршуватися з ускладненням цільової функції та введенням нових залежних змінних. Таким чином, обґрунтовано необхідність застосування нових підходів, особливо таких, що забезпечують аналітичне розв'язання задачі та формування законів керування ДРП.

У низці робіт показано, що застосування принципу Гамільтона-Остроградського для оптимізації енергетичних процесів у електричних мережах дає певні переваги. Зокрема, використовуючи рівняння Ейлера-Лагранжа, було обґрунтовано можливість розрахунку режиму ЕМ з мінімально можливими втратами електроенергії («ідеального» або економічного режиму), використовуючи заступну схему з активними опорами та провідностями (*r*-схему).

Виходячи з цього пошук оптимального режиму ЕМ з використанням ПНД можна звести до визначення її «ідеального» режиму для заданої сукупності незалежних параметрів з подальшим накладанням активних обмежень на параметри «ідеального» режиму \mathbf{x}_e та зведенням його до оптимального з параметрами \mathbf{x}_o з області допустимих значень. Обмеження, природно, спричиняють збільшення втрат електроенергії для оптимальних режимів ЕМ, порівняно з «ідеальними».

Обраний підхід є достатньо ефективним, що неодноразово підтверджено на прикладах розв'язання задач оптимізації режимів магістральних мереж, розподілу навантажень між електричними станціями, формування законів керування тощо.

Однак, застосування принципу Гамільтона-Остроградського, зокрема, моделювання «ідеальних» режимів для розв'язання задач оптимізації перетікань реактивної потужності шляхом розміщення додаткових ДРП та автоматизації оперативного керування ними, потребує вдосконалення відомого та розроблення нового математичного забезпечення.

За результатами аналізу сучасних тенденцій автоматизації розподільних електромереж визначено напрямки вдосконалення систем керування ДРП групової компенсації. Зокрема, обґрунтовано доцільність децентралізації таких систем з використанням локальних систем автоматичного керування (САК).

На підставі проведеного аналізу сформульовано основні завдання наукового дослідження дисертаційної роботи.

У **другому розділі** проаналізовано особливості сучасних розподільних електромереж з огляду на проблему оптимізації перетікання реактивної потужності та показано, що зношеність основного обладнання ЕМ й відсутність засобів моніторингу режимів знижують обґрунтованість технічних рішень. Запропоновано метод формування комплексного показника обґрунтованої ефективності впровадження ДРП. Показано доцільність застосування моделей режимів ЕМ, «ідеальних» за втратами електроенергії, для розв'язання задач оптимізації розміщення ДРП за техніко-економічними критеріями. Запропоновано математичні співвідношення для визначення та коригування економічних опорів ДРП.

Сучасний стан розподільних мереж України та інформаційного забезпечення технологічних задач не дають можливості формувати проектні рішення з високою мірою обґрунтованості. Особливо це стосується багатофакторних задач з комплексним критерієм оптимальності, до яких належить задача оптимізації розміщення ДРП для групової компенсації реактивної потужності.

Для зменшення ризику отримання неефективного рішення щодо місця встановлення та потужності ДРП запропоновано метод формування комплексного показника обґрунтованої ефективності. Показано, що ефект впровадження ДРП з імовірністю 0,95 можна оцінити за виразом:

$$\Delta\Pi_{k\min} = \Delta\Pi_k (1 - \delta_{\Pi});$$

$$\delta_{\Pi} = 2 \left[\frac{\delta_w}{1 + K_{\text{яв}k}} + \frac{\delta_{\Delta W}}{1 + K_{\text{яв}k}^{-1}} \right]; K_{\text{яв}k} = \frac{b_{\Delta W}}{b_{\text{ня}}} d\Delta W_{k*} \cdot dE_{k*}^{-1}, \quad (1)$$

де $\Delta\Pi_k = b_{\text{ня}} W (E_{k*} - E_*) + b_{\Delta W} (\Delta W - \Delta W_k) E'_*$ – додаткові грошові надходження завдяки впровадженню ДРП; δ_{Π} – визначає розмах відхилення величини $\Delta\Pi_k$; $K_{\text{яв}k}$ – коефіцієнт, який характеризує співвідношення ефекту від зменшення втрат та підвищення якості електроенергії завдяки встановленню ДРП на k -тій підстанції; $b_{\text{ня}}$, $b_{\Delta W}$ – відповідно, питома вартість неякісної електроенергії та вартість втрат електроенергії в ЕМ; $d\Delta W_*$ та dE_{k*} – відносні зменшення втрат електроенергії та показника якості функціонування ЕМ, розраховані за математичними сподіваннями:

$$d\Delta W_* = \frac{\Delta W - \Delta W_k}{W}; dE_{k*} = \frac{E_{k*} - E_*}{E'_*}; \quad (2)$$

W , ΔW , ΔW_k – відповідно, корисний відпуск електроенергії споживачам ЕМ та розрахункові втрати електроенергії за розрахунковий період T до й після встановлення ДРП; E'_* , E_* , E_{k*} – відповідно, показник якості функціонування ЕМ у критеріальній формі, визначений без урахування допустимого відхилення напруги, а також показники, визначені до та після встановлення ДРП з урахуванням відхилення напруги.

Значення корисного відпуску W та втрат електроенергії $\Delta W, \Delta W_k$ розраховуються за ретроспективною інформацією з середньоквадратичними відхиленнями δ_w та $\delta_{\Delta W}$, відповідно. Останні можна оцінити за відомими методиками, що подані у роботах Железка Ю.С. Показники якості функціонування ЕМ визначаються на основі теорії марковських процесів та критеріального методу, розробленого на кафедрі ЕЕС ВНТУ.

Аналізуючи вираз (1) та результати обчислювального експерименту на прикладі ЕМ 10 кВ Ямпільського району (рис. 1) було отримано висновки щодо впливу надійності мереж та точності вихідної інформації на оптимальність рішень з КРП. Так, для мереж, які через зношеність основного обладнання мають низьку структурну надійність $E'_k < 0,95$, обґрунтований ефект від зменшення втрат та регулювання напруги завдяки КРП істотно знижується (до 30%). Якщо ефект від впровадження ДРП зумовлений, переважно, підвищенням якості напруги, то особливу увагу слід приділити точності визначення корисного відпуску електроенергії δ_w та розподілу його між підстанціями ЕМ. Адже значення dE_{k*} виявляється істотно вищим за $d\Delta W_*$ і, згідно (1), вплив δ_w на значення обґрунтованого ефекту зростає (рис. 1, а). Якщо мета КРП полягає у зменшенні втрат електроенергії, то основну увагу слід приділити зменшенню похибки їх визначення, оскільки значне відхилення $\delta_{\Delta W}$ може призводити до хибних рішень щодо оптимальної потужності ДРП (рис. 1, б). Встановлено, що для ЕМ, у яких втрати не вдається оцінити з належною точністю ($\delta_{\Delta W} > 0.4$), результати оптимізації КРП виявляються не достовірними.

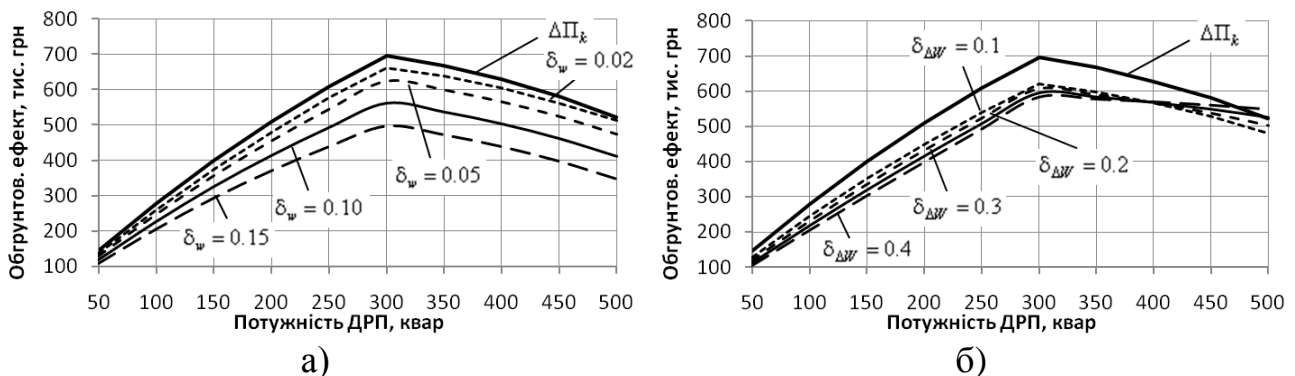


Рисунок 1 – Вплив точності визначення відпуску та втрат електроенергії на ефективність компенсації реактивної потужності

Отже, використання показника (1) як критерію оптимальності дає змогу врахувати у задачі розміщення ДРП, надійність електромережі, якість напруги у її вузлах, а також точність визначення корисного відпуску та втрат електроенергії. Це сприяє вилученню з області пошуку оптимальних рішень фрагментів ЕМ з частими відмовами або без засобів моніторингу режимів. Таким чином, підвищується обґрунтованість рішень щодо впровадження групової компенсації реактивної потужності.

В умовах, коли стан основного обладнання ЕМ та інформаційного забезпечення є задовільним, а отже, впливом відповідних чинників можна знехтувати, то основним критерієм оптимізації розміщення ДРП в електромережах згідно нормативів є рентабельність інвестицій. Виходячи з цього, задача оптимізації може бути подана так:

$$R(Q_i) = \frac{\Pi_p(Q_i) + A_p(Q_i)}{K(Q_i)} \rightarrow \max, i \in [1..n_q], \quad (3)$$

за умов балансу реактивної потужності в системі

$$G = \sum_{i=1}^{n_q} Q_i - \sum Q_n - \Delta Q(Q_i) = 0, i \in [1..n_q], \quad (4)$$

та обмежень на параметри:

$$Q_i^{\max} \geq Q_i \geq Q_i^{\min}, i \in [1..n_q]; \quad (5)$$

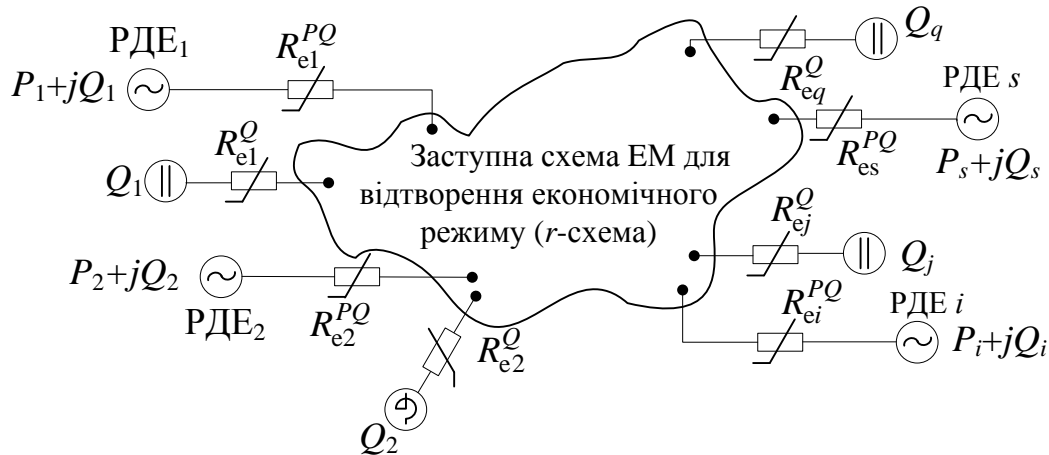
$$U_j^{\max} \geq U_j \geq U_j^{\min}, j \in [1..n], \quad (6)$$

де n , n_q – відповідно кількість вузлів ЕМ, для яких діють обмеження за напругою та кількість потенційних місць встановлення ДРП; $\Pi_p(Q_i)$ – поточний річний прибуток; $A_p(Q_i)$ – додаткові річні амортизаційні відрахування на реновацію; $K(Q_i) = \sum_{i=1}^{n_q} K_i$ – капіталовкладення для впровадження ДРП; $\sum Q_n$ – сумарне навантаження, значення якого є заданим; $\Delta Q(Q_i)$ – втрати реактивної потужності в елементах ЕМ; Q_i^{\min} , Q_i^{\max} – відповідно, мінімальне та максимальне значення потужності ДРП у i -му вузлі ЕМ; U_j , U_j^{\min} , U_j^{\max} – відповідно, розрахункове значення напруги у j -му вузлі ЕМ, а також її мінімальне та максимальне допустимі значення. Для її вирішення у роботі обґрунтовано доцільність використання результатів моделювання «ідеальних» режимів ЕМ, а також вдосконалено відповідне математичне забезпечення.

Використовуючи модель усталеного режиму ЕМ, «ідеального» за втратами електроенергії, задачу багатofакторної нелінійної оптимізації (3-6) було зведено до принципово простішої задачі пошуку екстремального струморозподілу в заступній r -схемі мережі (рис. 2). Застосування такого підходу, на відміну від класичних методів, істотно скорочує тривалість розрахунків та дозволяє отримати розв'язок, наближений до глобального мінімуму технологічних витрат.

Для врахування економічних чинників задачі (3), зокрема вартості ДРП та витрат на їх експлуатацію, до розрахункової схеми ЕМ (рис. 2) вводяться економічні опори ДРП R_e . Встановлені потужності заданих ДРП вносяться до переліку залежних параметрів «ідеального» режиму ЕМ. Це дозволяє з розрахунку усталеного режиму отримати їх значення, що відповідають мінімуму витрат активної потужності в заступній схемі (рис. 2). Коригування економічних опорів ДРП відповідно до постановки задачі дозволяє аналогічно

визначати їх потужності, що відповідають максимуму рентабельності (3) з урахуванням (4), (5).



Рисунк 2 – Заступна схема електричної мережі для розрахунку «ідеального» режиму за економічним критерієм

Для визначення економічних опорів ДРП задачу пошуку максимуму рентабельності (3) зведено до ітеративного пошуку мінімуму функції відносних експлуатаційних витрат в ЕМ з примусовим обмеженням приростів потужностей додаткових ДРП Q_i на окремій ітерації:

$$B_* = V_Q \tau (1 - \alpha_n) \frac{b_{\Delta W}}{K} + \left(\alpha_e + \alpha_{\text{втр}} \sum_{i=1}^{n_q} Q_i \tau \frac{b_{\Delta W}}{K} + \alpha_p \right) (1 - \alpha_n) + \alpha_{\text{кр}} + \alpha_p \rightarrow \min. \quad (7)$$

де V_Q – втрати потужності в режимі максимальних навантажень ЕМ після встановлення додаткових ДРП; τ – час максимальних втрат; α_n – податок на прибуток, в.о.; α_e – річні експлуатаційні видатки для ДРП, в.о.; $\alpha_{\text{втр}}$ – втрати електроенергії в ДРП, кВт/кВАр; Q_i, n_q – відповідно встановлена потужність i -го ДРП та кількість потенційних місць їх встановлення; α_p – амортизаційні відрахування, в.о.; $\alpha_{\text{кр}}$ – річні витрати на обслуговування кредиту, в.о.

Розділивши (7) на умовно постійний коефіцієнт $b_{\text{втр}} = \tau (1 - \alpha_n) \frac{b_{\Delta W}}{K}$ отримано функцію еквівалентних втрат потужності у ЕМ після встановлення ДРП:

$$V_{Q_{\text{екв}}} = V_Q + \alpha_{\text{втр}} \sum_{i=1}^{n_q} Q_i + \sum_{i=1}^{n_q} K_i \frac{(\alpha_e + \alpha_p)(1 - \alpha_n) + (\alpha_{\text{кр}} + \alpha_p)}{\tau b_{\Delta W} (1 - \alpha_n)} \rightarrow \min. \quad (8)$$

Виходячи з (8), оптимальна потужність ДРП визначається зменшенням втрат в ЕМ V_Q завдяки їх встановленню, а також додатковими втратами $V_{\text{дод}} = V_{Q_{\text{екв}}} - V_Q$, вартість яких еквівалентна економічним витратам на встановлення та експлуатацію ДРП протягом року. Виходячи з цього, мінімізація $V_{Q_{\text{екв}}}(Q_i, i \in [1, n_q])$ з урахуванням балансових обмежень та

обмежень на параметри з послідовним уточненням капіталовкладень K дозволяє отримати значення Q_i , близькі до розв'язків задачі максимізації рентабельності (3).

Отже, для розв'язання задачі оптимізації розміщення ДРП (3-5) до схеми «ідеального» режиму (рис. 2) слід внести економічні опори R_{ei}^Q , втрати в яких будуть відповідати додатковим втратам $V_{\text{дод}}$ з (8):

$$V_{Re} = \frac{Q_i^2}{U_i^2} R_{ei}^Q = V_{\text{дод}},$$

де U_i – середній рівень напруги у вузлі встановлення ДРП. Після перетворень вираз для коригування економічного опору ДРП за такої постановки задачі набув вигляду:

$$R_{ei}^Q = \frac{U_i^2}{Q_i} \left[\alpha_{\text{втр}} + \frac{K_i (\alpha_e + \alpha_p)(1 - \alpha_n) + (\alpha_{\text{кр}} + \alpha_p)}{tb_{\Delta W} (1 - \alpha_n)} \right], \quad (9)$$

Співвідношення (9) містить незалежні Q_i та залежні U_i параметри оптимізаційної задачі, а також економічні показники K_i , що змінюються в процесі пошуку розв'язку. Ці опори не є постійними й потребують уточнення на кожній ітерації.

Застосовуючи описаний підхід, отримано аналітичні вирази для коригування економічних опорів ДРП за різних постановок задачі оптимізації та умов їх функціонування в електромережах (табл. 1). Це дало змогу розробити алгоритм розв'язання задачі оптимізації розміщення та потужностей ДРП у багатокритеріальній постановці (рис. 3), коли параметри окремих джерел оптимізуються за різними критеріями.

Після розрахунку «ідеального» режиму ЕМ перехід до оптимального режиму виконується накладанням активних обмежень на незалежні (4), (5) та залежні (6) змінні. Врахування балансових обмежень (4) та обмежень на граничні потужності ДРП (5) не призводить до додаткових проблем і виконується на рівні алгоритму. Однак, задачу врахування активних обмежень (6) не вдається розв'язати алгоритмічно через складний взаємовплив залежних та незалежних параметрів.

Для її вирішення запропоновано метод коригування оптимальних потужностей ДРП. Оскільки таке коригування, пов'язане зі зниженням рентабельності встановлення ДРП через примусове відхилення їх потужностей від «ідеальних», то поправки ΔQ_i необхідно визначати таким чином, щоб виконання обмежень за напругою (6) спричинило мінімальне зниження рентабельності (3):

$$\begin{cases} \Delta R(\Delta Q_i) \rightarrow \min, i \in [1; n_q]; \\ \mathbf{J}_{\phi}^{-1} \Delta \mathbf{Q} = \Delta \mathbf{U}, \end{cases} \quad (10)$$

де \mathbf{J}_{ϕ}^{-1} – фрагмент оберненої матриці Якобі розмірністю $n_n \times n_q$, елементи якого є значеннями похідних $J_{ij} = \partial Q_i / \partial U_j$ та пов'язують відхилення реактивної

потужності у вузлах з ДРП ΔQ_i і відхилення напруги у вузлах ЕМ ΔU_j , $j \in [1; n_n]$, де порушено обмеження (6); $\Delta \mathbf{Q}$ – вектор-стовпець поправок реактивних потужностей у вузлах з ДРП розмірністю n_q ; $\Delta \mathbf{U}$ – вектор-стовпець недопустимих відхилень напруги розмірністю n_n , кожен елемент якого визначається як $\Delta U_j = U_j - U_{j_max}$.

Таблиця 1 – Економічні опори ДРП для різних критеріїв оптимальності

№	Критерій оптимальності для i -го ДРП	Економічний опір i -го ДРП
1	Мінімум втрат електроенергії в ЕМ	$R_{ei}^Q = 0$
2	Мінімум витрат на експлуатацію ДРП	$R_{ei}^Q = \frac{\beta_i(Q_i)U_i^2}{Q_i b_{\Delta W}}$
3	Максимум рентабельності встановлення ДРП	$R_{ei}^Q = \frac{U_i^2}{Q_i} \left[\alpha_{втр} + \frac{K_i (\alpha_e + \alpha_p)(1 - \alpha_n) + (\alpha_{кр} + \alpha_p)}{\tau b_{\Delta W} (1 - \alpha_n)} \right]$
4	Мінімум збитків для джерела енергії через генерування підвищеної реактивної потужності	$R_{ei}^Q = \begin{cases} 0, \text{ якщо } Q_i \leq Q_{i\max}; \\ \frac{\beta_{Pi} P_{нвi}(Q_i)U_i^2}{Q_i^2 b_{\Delta W}}, \text{ якщо } Q_i > Q_{i\max} \end{cases}$
5	Мінімум вартості системних послуг з регулювання напруги	$R_{ei}^{PQ} = \frac{U_i^2}{(P_i^2 + Q_i^2)} \frac{\beta_{Qi} Q_{Ди}}{b_{\Delta W}}$

Примітка. У виразах: $\beta_i(Q_i)$ – питомі витрати на експлуатацію ДРП; β_{Pi} , $P_{нвi}(Q_i)$ – ціна електроенергії i -го джерела та зниження видачі потужності через вимушене надлишкове генерування $Q_i > Q_{i\max}$; β_{Qi} , $Q_{Ди}$ – питома вартість та обсяг видачі додаткової реактивної потужності за вимогою оператора ЕМ.

Враховуючи взаємозв'язок між цільовими функціями (3) та (8), для спрощення розв'язання задачі (10) запропоновано перейти до мінімізації приросту еквівалентних втрат (8) у вигляді:

$$\Delta V_{Q_{екв}}(\Delta Q_i) = \sum_{i=1}^{n_q} \left(\frac{\partial V_Q}{\partial Q_i} + \alpha_{втр} + K_{li} \frac{(\alpha_e + \alpha_p)(1 - \alpha_n) + (\alpha_{кр} + \alpha_p)}{\tau b_{\Delta W} (1 - \alpha_n)} \right) \Delta Q_i \rightarrow \min. \quad (11)$$

Цільову функцію (11), використовуючи коефіцієнти розподілу втрат потужності T_{Qi} , зведено до лінійної:

$$\begin{cases} \Delta V_{Q_{екв}}(\Delta Q_i) = \sum_{i=1}^{n_q} (T_{Qi} + \alpha_{втр} + \alpha_{Ki}) \Delta Q_i \rightarrow \min; \\ \mathbf{J}_\phi^{-1} \Delta \mathbf{Q} = \Delta \mathbf{U}, \end{cases} \quad (12)$$

де $\alpha_{Ki} = K_{li} \frac{(\alpha_e + \alpha_p)(1 - \alpha_n) + (\alpha_{kr} + \alpha_p)}{\tau b_{\Delta W} (1 - \alpha_n)}$ – коефіцієнт зменшення інвестицій та

експлуатаційних видатків через зменшення встановленої потужності ДРП.

Лінійність задачі (12) істотно спрощує її розв'язання. Застосування симплекс-методу дає змогу з переліку оптимізованих змінних ΔQ_i визначити сукупність базових змінних та їх значення, що забезпечують виконання обмежень за напругою (6) з найменшим відхиленням від глобального екстремуму, який визначається за ПНД.

Таким чином, результати проведених досліджень дозволили розширити область застосування підходу, що базується на моделюванні «ідеальних» режимів ЕМ, а також підвищити ефективність проектних рішень щодо групової компенсації реактивної потужності в розподільних мережах.

У **третьому розділі** розроблено алгоритми визначення оптимального рівня групової КРП за критерієм мінімуму втрат електроенергії та максимальної рентабельності інвестицій. Алгоритмічно задачі оптимізації перетікань реактивної потужності в ЕМ за різних критеріїв оптимальності, можуть бути

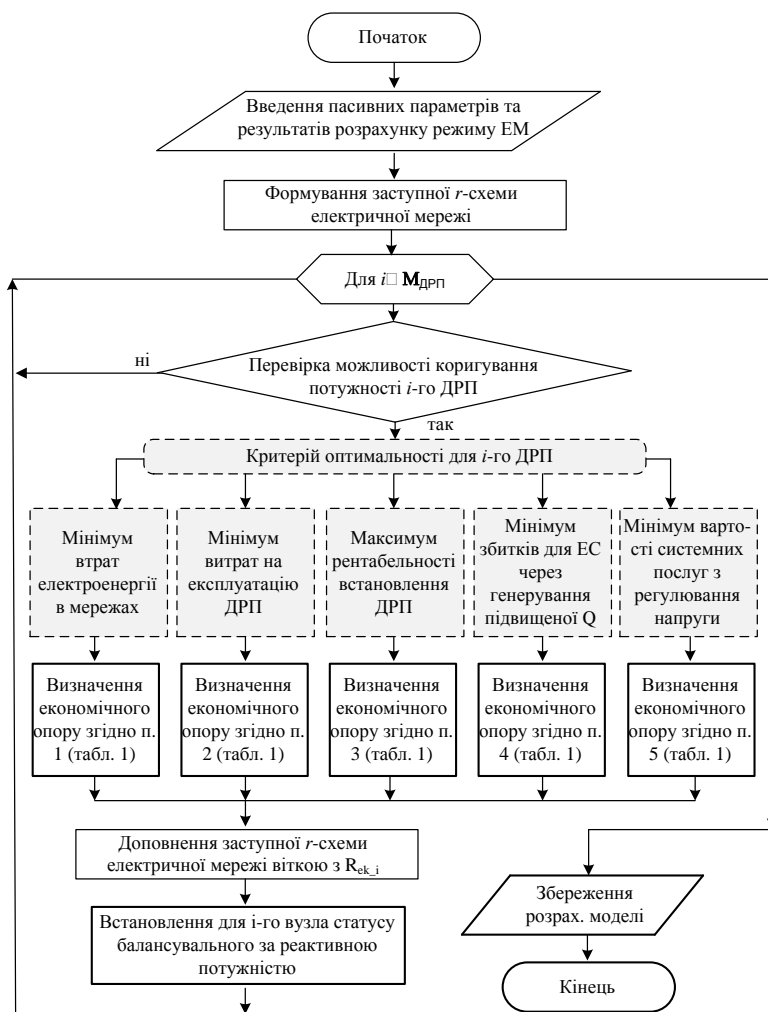


Рисунок 3 – Структурна схема формування моделі «ідеального» режиму ЕМ

зведені до оптимізації режиму її заступної r -схеми за втратами активної потужності. На цій підставі, запропоновано алгоритм багатокритеріальної оптимізації потужностей та розміщення ДРП в електричних мережах. Він дає змогу визначити параметри окремих джерел за «власними» критеріями, що залежать від постановки задачі, їх приналежності та умов експлуатації. Така можливість забезпечується відповідним формуванням моделі «ідеального» режиму (рис. 3).

Врахування обмежень за напругою у вузлах ЕМ здійснюється коригуванням коефіцієнтів трансформації та потужностей ДРП за результатами розв'язання задачі (12).

Для підвищення рівня автоматизації оперативного

керування наявними ДРП у розподільних мережах вдосконалено математичне забезпечення та структурну схему автоматизованої системи керування (АСК). Використовуючи ПНД, отримано умови оптимальності перетікань реактивної потужності в ЕМ за критерієм максимального прибутку від зниження втрат електроенергії з урахуванням зміни тарифу енергоринку $\varrho(t)$, витрат на експлуатацію ДРП та якості напруги. Задача оптимального керування сформульована так:

$$\left\{ \begin{array}{l} \int_{t_0}^{t_k} \left[\varrho(t) \Delta P(Q_{PKj}, Q_i(t)) + \sum_{i=1}^{n_q} (k_i Q_i(t)) \right] dt \rightarrow \min; \\ \varphi(t) = Q_{ЦЖ}(t) + \sum_{j=1}^m Q_{PKj} + \sum_{i=1}^{n_q} Q_i(t) - Q_{нав}(t) = 0; \\ Q_i^{\min} \leq Q_i(t) \leq Q_i^{\max}, i = 1..n_q; \\ U_j^{\min} \leq U_j(t) \leq U_j^{\max}, j = 1..n, \end{array} \right. \quad (13)$$

де n_q, m – відповідно кількість автоматично керованих ДРП та ДРП з ручним керуванням (постійної потужності); ΔP – втрати потужності в розподільній ЕМ, як функція потужностей нерегульованих Q_{PKj} та регульованих $Q_i(t)$ ДРП, що встановлені у її вузлах; k_i – питома вартість використання встановленої потужності i -го керованого ДРП; $Q_{ЦЖ}(t)$ – перетікання реактивної потужності від центру живлення; $Q_{нав}(t)$ – сумарне споживання реактивної потужності.

Використовуючи рівняння Ейлера-Лагранжа у припущенні, що всі залежності в (13), включаючи $Q_{нав}(t)$ та $\varrho(t)$, є неперервними, отримано необхідні умови оптимального розподілу реактивного навантаження між керованими ДРП:

$$\left\{ \begin{array}{l} z^*(t) = \frac{\lambda + k_i + q_i^{\text{ш}}}{\sigma_i^*(t)}, i = 1..n_q; \\ \left\{ \begin{array}{l} z^* = z + z'; \quad \sigma_i^* = \sigma_i + \sigma'_i; \\ z = -\varrho; \quad z' = \frac{d\varrho}{dt}; \quad \sigma_i = \frac{\partial \Delta P}{\partial Q_i}; \quad \sigma'_i = -\frac{d}{dt} \frac{\partial \Delta P}{\partial Q_i}; \quad q_i^{\text{ш}} = \frac{\partial \Pi_i^Q}{\partial Q_i} + \frac{\partial \Pi_i^U}{\partial Q_i}, \end{array} \right. \end{array} \right. \quad (14)$$

де λ – невизначені множники Лагранжа; $\Pi_i^Q(t), \Pi_i^U(t)$ – штрафні функції, введені в цільову функцію (13) для врахування обмежень-нерівностей за реактивною потужністю ДРП та напругою у вузлах ЕМ.

Керування комплексом ДРП згідно умов оптимальності (13) дає змогу зменшити втрати електроенергії в ЕМ. Однак, генерування ДРП буде зростати лише якщо приріст експлуатаційних витрат компенсується зменшенням втрат електроенергії в грошовому еквіваленті з урахуванням штрафу за зниження якості напруги у вузлах ЕМ.

Керування ДРП згідно умов оптимальності (14) здійснюється локальними системами автоматичного керування (САК). Тому розроблено алгоритми

визначення їх налагоджувальних параметрів для забезпечення оптимізації перетікань реактивної потужності в ЕМ. Періодичне коригування цих налаштувань вимагає проведення значної кількості імітаційних розрахунків з урахуванням взаємозв'язків між окремими ДРП. Тому для реалізації системи керування запропоновано двоконтурну схему з децентралізацією функцій автоматичного керування.

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 ДРП в електромережах 110-35 кВ ПАТ «Вінницяобленерго». За результатами досліджень визначено оптимальну послідовність впровадження ДРП, яка характеризується високою рентабельністю інвестицій. Очікувана окупність встановлення 56 ДРП за кумулятивним ефектом не перевищує 6 років (табл. 2).

Таблиця 2 – Результати оцінювання ефекту від впровадження ДРП в електричних мережах ПАТ «Вінницяобленерго»

Рік розрахункового періоду	2018	2020	2022	2024	2025	2027
Повна реалізація оптимального рішення						
Сумарна потужність ДРП, МВАр	62,1	109,8	134,6	134,6	134,6	134,6
Сумарні капіталовкладення, тис грн	27755,8	64154,9	95688,9	95688,9	95688,9	95688,9
Надходж. від зменш. втрат, тис грн	6767,0	14978,3	23700,2	31153,5	35137,2	47730,8
Кумулятивний ефект, тис грн	-22746,5	-40976,0	-39685,5	4543,9	31732,0	101652,3
Обґрунтований ефект, тис грн	-23081,6	-42195,8	-42343,9	-372,7	25229,6	90579,5
Часткова реалізація оптимального рішення (вводяться ДРП, що забезпечують максимальний ефект)						
Сумарна потужність ДРП, МВАр	62,1	62,1	62,1	62,1	62,1	62,1
Сумарні капіталовкладення, тис грн	27755,8	27755,8	27755,8	27755,8	27755,8	27755,8
Надходж. від зменш. втрат, тис грн	6767,0	8694,6	11264,8	15119,9	17176,0	24500,9
Кумулятивний ефект, тис грн	-22746,5	-10353,1	7221,6	29438,0	43190,9	79764,0
Обґрунтований ефект, тис грн	-23081,6	-11714,5	4056,8	23773,4	35879,7	67799,5

Врахування надійності електричних мереж, якості електроенергії та точності інформаційного забезпечення дозволило оцінити обґрунтований ефект. Він виявився нижчим на 12%, що призвело до підвищення терміну окупності до 7 років (табл. 2).

Використовуючи результати аналізу чутливості, визначено перелік ДРП, які мають найбільший вплив на втрати та рівні напруги в ЕМ. Імітаційні розрахунки показали, що введення перших 13 пристроїв з автоматичним керуванням на 7 підстанціях зменшує термін окупності до 4 років. Їх впровадження забезпечує біля 75% ефекту, що може бути отриманий від повної реалізації проекту. При цьому укрупнена вартість становить лише 29% від сукупної вартості проекту.

На прикладі Вінницьких міських електромереж 10 кВ було підтверджено ефективність запропонованого методу оцінювання обґрунтованого ефекту від

ДРП (табл. 3). Показано, що встановлення додаткових ДРП у електричних мережах, які характеризуються високою чутливістю втрат, супроводжується високим додатковим прибутком. Останній не можливо оцінити адекватно без врахування надійності електромереж та якості інформаційного забезпечення.

Таблиця 3 – Оптимальне розміщення ДРП у Вінницьких міських ЕМ 10/0,4 кВ за різними критеріями

Оптимізація за очікуваним ефектом				Оптимізація за обґрунтованим ефектом			
Підстанція 110/10 кВ	Фідер	Підстанція 10/0,4 кВ	$Q_{i \text{ опт.}}$, кВАр	Підстанція 110/10 кВ	Фідер	Підстанція 10/0,4 кВ	$Q_{i \text{ опт.}}$, кВАр
Нова	Ф-113	ТП-496	200	Нова	Ф-113	ТП-496	200
Нова	Ф-111	ТП-292	70	Нова	Ф-111	ТП-292	70
Нова	Ф-106	ТП-297	70	Північна	Ф-204	ТП-429	70
Західна	Ф-167	ТП-260	60	Західна	Ф-167	ТП-260	60
Промислова	Ф-265	ТП-234	60	Нова	Ф-111	ТП-74	60
...
Нова	Ф-113	ТП-205	40	Західна	Ф-167	ТП-369	40
Нова	Ф-113	ТП-587	40	Нова	Ф-106	ТП-113	40
...
Нова	Ф-106	ТП-12	30	Західна	Ф-167	ТП-630	30
Нова	Ф-106	ТП-225	30	Західна	Ф-167	ТП-650	30
...

Так, врахування означених факторів дозволило обґрунтовано зменшити оптимальну встановлену потужність ДРП для окремих фрагментів досліджуваних мереж до 3 разів. Перенесення ДРП на підстанції з нижчим розрахунковим ефектом зменшення втрат, але кращими показниками надійності та якості інформаційного забезпечення, дозволило зменшити ризики реалізації проекту та підвищити обґрунтованість капіталовкладень.

На прикладі ДРП, що експлуатуються у Вінницьких міських електромережах, проведено натурні експерименти з визначення уставок для локальної компенсації реактивної потужності. Показано, що у випадку використання ДРП для групової компенсації через взаємовплив вузлів навантаження ЕМ, уставки по коефіцієнтах потужності необхідно періодично уточнювати протягом доби (рис. 4).

Для визначення періодів актуальності уставок (рис. 4) запропоновано алгоритм, який передбачає аналіз кореляції оптимальних потужностей ДРП з локальним реактивним споживанням.

Для визначення уставок запропоновано алгоритм використання імітаційної моделі САК ДРП. За його допомогою граничні коефіцієнти потужності підбираються за методом найменших квадратів відхилень між оптимальними та імітованими потужностями ДРП. Уставки за часом для САК визначаються з урахуванням швидкості зміни осереднених оптимальних потужностей ДРП.

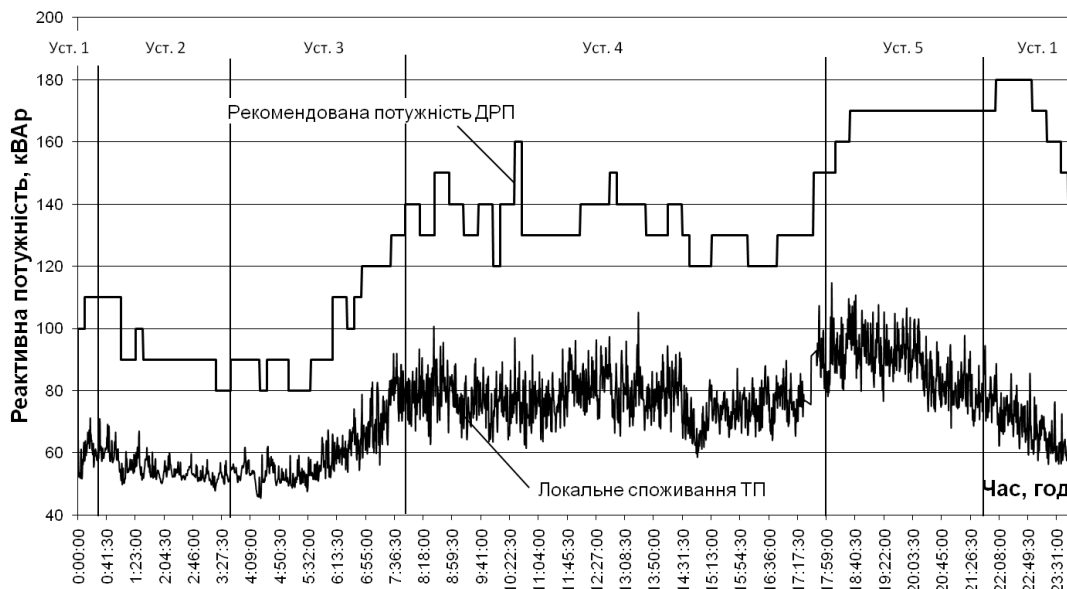


Рисунок 4 – Графік зміни потужності ДРП АУКРМ 0,4-200-10 на ТП-496 під дією локальної САК після оптимізації її налагоджувальних параметрів (Уст.1-Уст.5 – набори уставок САК, що були централізовано сформовані для виконання умов оптимальності (14))

Таким чином, на прикладі реальних електричних мереж 110-35-10 кВ показано адекватність та ефективність запропонованих методів та алгоритмів оптимізації перетікань реактивної потужності в ЕМ. Показано, що їх застосування дає змогу визначати оптимальні схеми приєднання та параметри засобів компенсації реактивної потужності.

ВИСНОВКИ

В роботі отримано нове вирішення актуального науково-прикладного завдання підвищення ефективності керування потоками реактивної потужності у електричних мережах, що полягає у розробленні на основі принципу Гамільтона-Остроградського математичної моделі критерію оптимальності, методів оптимізації розміщення засобів компенсації реактивної потужності в електромережах, а також засобів оптимального керування компенсувальними установками для таких мереж. Їх реалізація дозволяє підвищити ефективність сумісного використання ДРП в електричних мереж енергопостачальних компаній та активних споживачів.

1. Показано, що зі зміною структури електроспоживання та розвитком розосередженого генерування зростає важливість вдосконалення методів та засобів оптимізації режимів електричних мереж енергопостачальних компаній за реактивною потужністю та напругою. Крім того, через зростання складності задачі класичні методи оптимізації виявляються недостатньо ефективними за надійністю та швидкодією.

2. Зношеність основного обладнання розподільних мереж України, а також їх недостатня оснащеність засобами телевимірювань та технічного

моніторингу зумовлює необхідність урахування надійності мереж та якості інформаційного забезпечення під час планування заходів з компенсації реактивної потужності та підвищення якості напруги.

За результатами досліджень запропоновано метод формування показника обґрунтованої ефективності впровадження КРП, який забезпечує її однозначне комплексне оцінювання з урахуванням надійності електромережі, якості напруги у її вузлах, а також точності визначення відпуску та втрат електроенергії. Алгоритми оптимізації розміщення ДРП, що побудовані на основі розробленого методу, дозволяють без втручання в обчислювальний процес фахівця-аналітика вилучити з області пошуку оптимальних розв'язків фрагменти мереж, для яких оцінювання реального ефекту є ускладненим або неможливим через часті відмови та відсутність засобів моніторингу режимів.

3. Обґрунтовано доцільність використання принципу найменшої дії для підвищення надійності та швидкодії розв'язання задачі оптимізації розміщення ДРП в електричних мережах з розосередженими джерелами енергії за критерієм максимуму рентабельності капіталовкладень. Використання моделі «ідеального» режиму ЕМ дозволило звести означену задачу нелінійної оптимізації до задачі пошуку екстремального струморозподілу в заступній r -схемі мережі, що є принципово простішою. Для врахування економічних факторів оптимізаційної задачі заступну r -схемі мережі доповнено економічними опорами джерел реактивної потужності. Метод визначення та коригування останніх отримано шляхом зіставленні питомих капітальних та експлуатаційних витрат з вартістю втрат електроенергії у них. Моделі економічних опорів отримано для різних типових постановок задачі оптимізації розміщення ДРП, а також умов їх функціонування в електричних мережах.

4. Для розв'язання задачі оптимізації розміщення додаткових ДРП доцільно застосовувати метод, що базується на імітації «ідеальних» режимів електричних мереж. Однак, особливістю вирішення даної задачі є істотна залежність рівнів напруги в мережах від потужностей ДРП як змінних, що оптимізуються. Для врахування активних обмежень щодо відхилення напруги в вузлах ЕМ, запропоновано метод коригування оптимальних потужностей ДРП за результатами розв'язання допоміжної оптимізаційної задачі. Завдяки використанню коефіцієнтів розподілу втрат потужності останню вдалося звести до задачі лінійного програмування. Вдосконалення методу дозволило розширити область його застосування та підвищити ефективність проектних рішень.

5. Для забезпечення ефективності функціонування розподільних електричних мереж запропоновано критерії та отримано аналітичні умови оптимальності режимів ДРП з урахуванням витрат на їх експлуатацію та якості електроенергії. Їх практична реалізація у вигляді налагоджувальних параметрів локальних систем автоматичного керування (САК) потребує застосування натурно-імітаційного моделювання поточних та «ідеальних» режимів розподільних мереж, що пов'язане з проблемами інформаційного забезпечення. Оперативне керування потоками реактивної енергії доцільно здійснювати за ієрархічним принципом.

6. Для комплексу просторово розподілених ДРП, що виконують функції оптимізації перетікань реактивної потужності в електричних мережах у реальному часі, необхідно забезпечувати узгоджене керування в умовах неповної або недосконалої поточної інформації щодо параметрів мереж та зовнішніх впливів. Тому, у роботі запропоновано дворівневу адаптивну автоматизовану систему керування з еталонною моделлю та локальними САК. Для підвищення ефективності адаптивного підходу функції керування перетіканнями реактивної потужності було розділено на централізоване формування налагоджувальних параметрів САК за результатами імітаційного моделювання режимів ЕМ і локальну реалізацію цих налаштувань системами керування окремих ДРП за місцевими параметрами.

Для зменшення витрат часу на визначення налагоджувальних параметрів локальних САК запропоновано алгоритм ідентифікації періодів оновлення налагоджувальних параметрів САК за типовими графіками.

7. Працездатність та ефективність запропонованих у роботі методів і алгоритмів перевірена шляхом виконання розрахунків та натурних експериментів з оптимізації розміщення та параметрів засобів компенсації реактивної потужності на прикладі електричних мереж 110(35) кВ та 10 кВ ПАТ «Вінницяобленерго». Результати оптимізації розміщення ДРП впроваджено у розподільних мережах, а розроблені алгоритмічно-програмні засоби передано для дослідно-промислової експлуатації в ПАТ «Вінницяобленерго». Їх впровадження сприятиме обґрунтованому зменшенню втрат електроенергії на 2-5 %.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації:

[1] В. М. Пірняк, П. Д. Лежнюк, О. Д. Демов, та Ю. Ю. Півнюк, "Розрахування економічних еквівалентів реактивної потужності для вузлів електричної мережі," *Наукові праці Вінницького національного технічного університету*. №3, 2013. [online]. Доступно: <https://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/370>.

[2] В. В. Кулик та В. М. Пірняк, "Оптимізація перетікань реактивної енергії в розподільних електричних мережах з використанням принципу найменшої дії," *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, №6, с. 71-79, 2017.

[3] V. Kulyk, O. Burykin, and V. Pirnyak, "Optimization of the placement of reactive power sources in the electric grid based on modeling of its ideal modes," *Technology audit and production reserves*, vol. 40, no. 2/1, pp. 59-65, 2018.

[4] В. В. Кулик та В. М. Пірняк, "Оптимізація розміщення джерел реактивної потужності в електричній мережі з урахуванням активних обмежень," *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*, Том 29(68), Ч. 2, № 5, с. 108-112, 2018.

[5] В.В. Кулик, О.Б. Бурикін, та В.М. Пірняк, "Комплексне оцінювання ефективності встановлення додаткових джерел реактивної потужності у розподільних електричних мережах," *Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. Серія: Технічні науки*, № 4 (124), с. 103-111,

2018.

[6] П.Д. Лежнюк, Ю.В. Грицюк, та В.М. Пірняк, "Регулювання реактивної потужності й напруги в електричних мережах як допоміжна послуга," *Наукові праці Вінницького національного університету*, №2, 2012. [online]. Доступно: <https://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/321>.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

[7] П. Д. Лежнюк, О. В. Слободянюк, та В. М. Пірняк, «Розрахування економічних еквівалентів реактивної потужності на основі коефіцієнтів розподілу втрат,» у *Матеріалах XI Міжнародної науково-технічної конференції «Контроль і управління в складних системах (КУСС-2012)»*, Вінниця, 2012, с. 168.

[8] О. Д. Демов, Ю. Ю. Півнюк, та В. М. Пірняк, «Розрахування економічних еквівалентів реактивної потужності на основі відносних спадів напруги,» у *Матеріалах II Міжнародної науково-технічної конференції «Оптимальне керування електроустановками (ОКЕУ–2013)»*, Вінниця, 2013, с. 34.

[9] В. М. Пірняк, «Оптимізація перетікань реактивної енергії в електричних мережах з використанням принципу найменшої дії,» у *Матеріалах IV Міжнародної науково-технічної конференції «Оптимальне керування електроустановками (ОКЕУ–2017)»*, Вінниця, 2017. [online]. Доступно: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/okey/okey/paper/view/3502/2961>.

[10] Volodymyr Kulyk, Oleksandr Burykin, Malogulko Juliya, and Pirnyak Viktor. «Optimization of reactive energy flows in the electric grid taking into account allowable voltage fluctuations,» in *Proceedings of the 2018 IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*, Kharkiv, 2018, pp. 265-270. (Індексується у SCOPUS).

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

[11] В. М. Пірняк, П. Д. Лежнюк, О. Д. Демов, та О. В. Слободянюк, "Коефіцієнти розподілу втрат, як інструмент для розрахунку економічного еквіваленту реактивної потужності," *Новини енергетики*, №9, с. 34-37, 2012.

[12] О.Д. Демов, Ю.Ю. Півнюк, П.Д. Лежнюк, та В.М. Пірняк, "Економічні еквіваленти реактивної потужності, як відносні спади напруги," *Енергетика та електрифікація*, №8, с. 17-20, 2013.

[13] В.М. Пірняк, О.Д. Демов, О.В. Слободянюк, та О.П. Паламарчук, "Декомпозиція функції зниження втрат при розрахунку компенсації реактивної потужності на основі формули Тейлора," *Енергетика та електрифікація*, № 3, с. 36-39, 2012.

АНОТАЦІЯ

Пірняк В. М. Методи та засоби оптимізації перетікань реактивної потужності в розподільних електромережах на основі принципу Гамільтона-Остроградського. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.02 – електричні станції, мережі і системи. – Вінницький національний технічний університет, Вінниця, 2019.

Роботу присвячено розв'язанню задачі зменшення втрат та підвищення якості напруги у електричних мережах, шляхом розроблення методів та засобів оптимізації потоків реактивної потужності на основі принципу Гамільтона-Остроградського. Розроблено математичну модель критерію оптимальності, методи оптимізації розміщення засобів компенсації реактивної потужності в електричних мережах, а також засоби оптимального керування компенсувальними установками для таких мереж. Зокрема, запропоновано новий метод оцінювання обґрунтованої ефективності компенсації реактивної потужності в електричних мережах. Розвинуто метод оптимізації перетікань електроенергії на основі принципу найменшої дії, що проявляється у врахуванні капітальних та експлуатаційних витрат на джерела реактивної потужності (ДРП) у моделі «ідеального» режиму електричної мережі. Вдосконалено метод врахування обмежень на відхилення напруги в електричних мережах під час оптимізації розміщення ДРП. Їх реалізація дозволяє підвищити ефективність сумісного використання ДРП в електричних мережах енергопостачальних компаній та активних споживачів.

Ключові слова: електрична мережа, перетікання реактивної енергії, багатофакторна оптимізація, оперативне керування, принцип Гамільтона-Остроградського, економічний опір, джерело реактивної потужності.

ABSTRACT

Pirnyak V. M. Methods of the reactive power flows optimization in distribution electric networks on the basis of the Hamilton-Ostrogradsky principle. – Qualification research paper, manuscript copyright.

The dissertation on the receipt of scientific degree of candidate of science (engineering) in speciality 05.14.02 – electric power stations, networks and systems. – Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, 2019.

The work is devoted to the task of reducing losses and improving the quality of voltage in electric grids, by developing methods and means for optimizing of the reactive power flows, based on the Hamilton-Ostrogradsky principle. The mathematical model of optimality criterion for the given problem, methods of optimization of the reactive power compensation facilities placement in power grids, means of optimal control of compensating installations for such networks is developed. In particular, a new method for estimating the guaranteed efficiency of reactive power compensation in electric networks is proposed. The method of optimization of electric power flows has been developed. For this purpose, the capital and operating costs of the sources of reactive power (SRP) were taken into account in

the model of the electric network's "ideal" mode. The method for taking into account the voltage constraints in electrical networks during optimization of the location of the SRP is improved. Their implementation allows to increase the efficiency of the joint use of SRP in the electric grids of the power supply companies and the active consumers.

Keywords: electric network, reactive energy flows, multifactorial optimization, operation control, Hamilton-Ostrogradsky principle, economic resistance, source of reactive power.

АННОТАЦИЯ

Пирняк В. М. Методы и средства оптимизации перетоков реактивной мощности в электросетях на основе принципа Гамильтона-Остроградского. – Квалификационный научный труд на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.02 – электрические станции, сети и системы. – Винницкий национальный технический университет, Винница, 2019.

Работа посвящена решению задачи уменьшения потерь и повышения качества напряжения в электрических сетях (ЭС), путем разработки методов и средств оптимизации потоков реактивной мощности на основе принципа Гамильтона-Остроградского.

Исследованы особенности современных распределительных сетей с точки зрения оптимизации перетоков реактивной мощности. Предложен метод формирования комплексного показателя обоснованной эффективности внедрения источников реактивной мощности (ИРМ). Он учитывает надежность сети, качество напряжения в ее узлах, а также точность определения полезного отпуска и потерь электроэнергии.

Для решения задачи оптимизации размещения ИРМ в электрических сетях по критерию максимума рентабельности инвестиций, обосновано применение модели «идеального» режима ЭС, в соответствии с принципом Гамильтона-Остроградского. Для учета экономических факторов в модель «идеального» режима введены экономические сопротивления ИРМ. Выражения для их определения получены для различных постановок задачи оптимизации, параметров и условий функционирования ИРМ. Для учета активных ограничений на отклонения напряжения в ЭС предложен метод корректировки расчетных мощностей ИРМ по результатам решения вспомогательной линеаризованной задачи оптимизации. Результаты исследований дали возможность расширить область применения моделей «идеального» режима ЭС и повысить эффективность проектных решений.

На основе имитации «идеальных» режимов ЭС разработаны алгоритмы определения оптимального уровня групповой компенсации реактивных нагрузок по критерию максимальной рентабельности, а также алгоритм многокритериальной оптимизации размещения ИРМ в электрических сетях. Используя непрерывный принцип максимума Понтрягина получены условия оптимальности перетоков реактивной мощности с учетом затрат на эксплуатацию ИРМ и качества электроэнергии. Усовершенствована

структурная схема автоматизированной системы оперативного управления ИРМ в распределительных сетях. Разработаны алгоритмы определения настроечных параметров системы автоматического управления (САУ), которые локально обеспечивают оптимизацию реактивных потоков в ЭС.

На примере электрических сетей 110-35-10 кВ ПАО «Винницаоблэнерго» показаны адекватность и эффективность разработанных методов оптимизации потоков реактивной мощности. Усовершенствованный программный комплекс был использован для технико-экономического обоснования внедрения ИРМ в электросетях 110-35 кВ. По результатам исследований определена оптимальная последовательность внедрения ИРМ, которая характеризуется высокой рентабельностью. Используя анализ чувствительности определен перечень ИРМ, имеющих наибольшее влияние на потери и уровни напряжения в ЭС. Показано, что их внедрение обеспечит около 75% эффекта, а укрупненная стоимость составит не более 30% от совокупной стоимости проекта.

На примере Винницких городских сетей 10 кВ показано, что прибыль от установки дополнительных ИРМ невозможно оценить адекватно без учета надежности сетей и качества информационного обеспечения. Учет указанных факторов позволил обоснованно уменьшить оптимальную установленную мощность ИРМ для отдельных фрагментов исследуемых сетей. Перенос ИРМ на подстанции с более высокими показателями надежности и качества информационного обеспечения позволил уменьшить риски, связанные с реализацией проекта, и повысить эффективность инвестиций.

На примере ИРМ, эксплуатируемых в Винницких городских сетях, проведены натурные эксперименты по определению уставок для локальной компенсации реактивной мощности. Показано, что период их актуальности составляет от 1 до 3 месяцев. Если ИРМ используются для групповой компенсации, то их уставки по коэффициентам мощности необходимо многократно корректировать в течение суток. Для определения периодов актуальности уставок предложен алгоритм, который предусматривает анализ корреляции оптимальных мощностей ИРМ с локальным реактивным потреблением.

Для определения уставок предложено использовать имитационную модель САУ источниками реактивной мощности. Коэффициенты мощности подбираются по методу наименьших квадратов отклонений между оптимальными и имитируемыми мощностями ИРМ. Уставки по времени для САК определяются с учетом скорости изменения усредненных оптимальных мощностей ИРМ.

Таким образом, в диссертационной работе получено новое решение актуальной научно-прикладной задачи повышения эффективности управления потоками реактивной мощности в электрических сетях. Оно заключается в разработке на основе принципа Гамильтона-Остроградского математической модели критерия оптимальности, методов оптимизации размещения средств компенсации реактивной мощности в электрических сетях, а также системы оптимального управления компенсирующими устройствами. Их реализация

позволяет повысить эффективность совместного использования ИРМ в электрических сетях энергоснабжающих компаний и активных потребителей.

Ключевые слова: электрическая сеть, перетоки реактивной энергии, многофакторная оптимизация, оперативное управление, принцип Гамильтона-Остроградского, экономические сопротивления, источник реактивной мощности.

Підписано до друку 19.04.2019 р. Формат 29,7×42 ¼

Наклад 100 прим. Зам. № 2019-060.

Віддруковано в інформаційному редакційно-видавничому центрі

Вінницького національного технічного університету

м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95. Тел.: 65-18-06

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи

серія ДК №3516 від 01.07.2009 р.