

Міністерство освіти і науки України  
Вінницький національний технічний університет

ГУНЬКО ІРИНА ОЛЕКСАНДРІВНА

УДК 621.316.1

**ОПТИМАЛЬНЕ КЕРУВАННЯ РЕЖИМАМИ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ  
З ВІДНОВЛЮВАНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ ЕНЕРГІЇ З ВИКОРИСТАННЯМ  
SMART GRID ТЕХНОЛОГІЙ**

Спеціальність 05.14.02 – Електричні станції, мережі і системи

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Вінниця – 2017

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Вінницькому національному технічному університеті,  
Міністерство 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, старший науковий співробітник  
**Тугай Юрій Іванович,**  
Інститут електродинаміки НАН України,  
завідувач відділу оптимізації систем електропостачання;

кандидат технічних наук, доцент  
**Баженов Володимир Андрійович,**  
Національний технічний університет України «Київський  
політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,  
доцент кафедри електричних мереж і систем.

Захист відбудеться “ 17 ” березня 2017 р. о 10:00 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 ознайомитися у бібліотеці Вінницького національного технічного університету за адресою: 21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95.

Автореферат розісланий “ 16 ” лютого 2017 р.

Учений секретар  
спеціалізованої вченої ради

В. В. Кулик

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Розподільні електричні мережі функціонально були призначені для транспортування і розподілення електроенергії, виробленої централізовано на крупних електростанціях. З розбудовою в них нетрадиційних і відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) вони набувають рис локальної електроенергетичної системи (ЛЕС). В зв'язку з цим виникають нові задачі: узгодження графіків навантаження споживачів і генерування ВДЕ з врахуванням їх нестабільності, оптимальне керування потоками потужності з метою зменшення втрат електроенергії і покращання її якості, забезпечення балансової надійності електроенергії в ЛЕС, що формується централізованим і місцевим генеруванням, тощо.

Особливістю розподіленого генерування є те, що воно складається з відносно невеликих за потужністю електричних станцій, розосереджених по всій електроенергетичній системі (ЕЕС), але сконцентрованих в більшості в розподільних електричних мережах (РЕМ). В основному це електростанції, які використовують відновлювані джерела електричної енергії. Це сонячні (СЕС), вітрові (ВЕС) електростанції та малі гідроелектростанції, генерування яких є нестабільним оскільки залежить від природних умов. Вони постачають електроенергію найближчим споживачам, а в разі надлишків енергії можуть її передавати в мережі централізованого електропостачання. Отже, розподільні мережі енергопостачальних компаній мають забезпечувати перетікання електроенергії від розподільних підстанцій до споживачів, а також від розосереджених в них джерел електроенергії (РДЕ) через підстанції до ЕЕС.

На сьогодні актуальним є оптимальне інтегрування ВДЕ в електричні мережі енергосистем. Створення сприятливих умов для розбудови ВДЕ вимагає розв'язання низки технічних та організаційних задач. Ними активно займаються в Інституті електродинаміки НАНУ, Інституті відновлюваної енергетики НАНУ, НТУУ «Київський політехнічний інститут ім. І. Сікорського», Вінницькому національному технічному університеті (ВНТУ), Національному університеті біоресурсів та природокористування, Київському національному університеті технологій і дизайну та ін.

Серед багатьох інших, до таких задач відноситься узгодження місць оптимального секціонування РЕМ, які експлуатуються як радіальні. Введення в них електростанцій, які використовують ВДЕ, переводить частину ліній електропередачі в режим роботи з двостороннім живленням. Це змінює потекорозподіл в мережі, що може призвести до збільшення втрат електроенергії в ній, якщо не оптимізувати місця під'єднання РДЕ та їх потужність. Для зменшення втрат електроенергії під час її транспортування також необхідно коригувати потоки потужності, що відповідають місцям секціонування РЕМ, які раніше були вибрані тільки з умов забезпечення нормативів по надійності електропостачання. Тому оптимізація потоків потужності в ЛЕС з ВДЕ є актуальним завданням, покликаним забезпечити зменшення втрат електроенергії в електричних мережах, підтримувати балансну надійність і покращити якість електропостачання.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертація виконана в плані наукових досліджень, проведених кафедрою електричних станцій та систем ВНТУ за держбюджетними темами: «Оптимізація функціонування електричних мереж енергосистем в умовах зростання навантаження споживачів та децентралізації їх живлення» (№ держреєстрації 0110U002161) та «Інтелектуалізація електроенергетичних систем з відновлювальними джерелами енергії на основі принципу Гамільтона-Остроградського» (№ держреєстрації 0113U003138). Автор брала участь у виконанні вищевказаних робіт як виконавець.

**Мета і задачі дослідження.** Метою дисертаційної роботи є зменшення втрат електроенергії в локальних електричних системах шляхом узгодженого керування генеруванням сонячних електростанцій та малих гідроелектростанцій.

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

- аналіз особливостей експлуатації локальних електричних систем;
- дослідження пошкоджуваності обладнання локальних електричних систем та впливу СЕС на ці пошкодження;
- розроблення математичної моделі втрат активної потужності в локальній електричній системі з ГЕС та СЕС для дослідження впливу останніх на режим електричних мереж та умови, за яких втрати в них мінімальні;
- розроблення методу коригування поточкорозподілу в ЛЕС з різнотипними РДЕ шляхом зміни потужності генерування ГЕС для зменшення втрат електроенергії;
- подальший розвиток методу визначення раціонального місця секціонування електричної мережі ЛЕС з врахуванням технічного стану електрообладнання;
- розроблення комп'ютерної моделі ЛЕС у програмному забезпеченні *PS CAD* з декількома СЕС для дослідження усталених та перехідних процесів в ЛЕС з інверторами, які працюють за ПІ законами керування;
- розроблення алгоритму визначення оптимальної потужності ГЕС в ЛЕС для коригування поточної точки поточкорозподілу в місце фактичного розташування комутаційного апарату секціонування ЛЕС;
- розроблення алгоритму визначення зони нечутливості втрат активної потужності в ЛЕП до поточної потужності ГЕС;
- вдосконалення автоматизованої системи керування (АСК) ВДЕ в ЛЕС з застосуванням *Smart Grid* технологій.

**Об'єктом дослідження** є локальні електричні системи з сонячними електростанціями та малими гідроелектростанціями.

**Предмет дослідження** – методи та засоби оптимального керування потоками потужності в розподільній електричній мережі з урахуванням її секціонування.

**Методи дослідження.** Для аналізу та розв'язання поставлених задач використані статистичні методи обробки даних, узагальнювальні методи теорії подібності і моделювання, лінійного та нелінійного програмування. Усталені режими моделюються та аналізуються на базі методу вузлових напруг. Для розроблення алгоритмів і програм аналізу режимів РДЕ та їх впливу на режими

роботи ЛЕС використовувалися матрична алгебра, декомпозиція та об'єктно-орієнтований аналіз. Для вдосконалення АСК РДЕ використано положення теорії автоматичного керування та теорії мікропроцесорних систем.

**Наукова новизна одержаних результатів** полягає в тому, що:

– вперше розроблено метод коригування потоків потужності в локальній електричній системі з різнотипними відновлюваними джерелами електроенергії шляхом оптимального керування потужністю генерування малих гідроелектростанцій, що дозволяє визначити умови для наближення поточкорозподілу в секціонованій електричній мережі до оптимального за втратами електроенергії в ній;

– розвинуто математичну модель нормального режиму локальної електричної системи з сонячними електростанціями і гідроелектростанціями для оцінювання впливу останніх на втрати активної потужності в електричній мережі, що дозволяє визначити зони нечутливості систем автоматичного керування джерел живлення і встановити порядок коригування ними поточкорозподілу в електричній мережі;

– отримав подальший розвиток метод визначення раціонального місця секціонування розподільних електричних мереж, який дозволяє оцінити і врахувати неможливість транспортування електроенергії розосереджених джерел генерування в разі пошкоджень в електричній мережі та дозволяє визначити техніко-економічний ефект від встановлення додаткових комутаційних апаратів секціонування мережі.

**Практичне значення одержаних результатів.** Практична цінність роботи полягає в тому, що розроблено алгоритми і програми коригування потоків потужності в секціонованій за умов надійності розподільній електричній мережі шляхом зміни генерування потужності керованих РДЕ, в першу чергу малих гідроелектростанцій і, в перспективі, сонячних електростанцій. Відповідним чином вдосконалено структурну схему автоматизованої системи керування станціями, які використовують ВДЕ, що дозволяє узгоджувати графіки видачі потужності та її споживання.

На основі отриманих у роботі результатів – умов оптимальності, методів та алгоритмів, вдосконалено комплекс програм інтелектуальної підтримки роботи диспетчера розподільних електричних мереж, який передано для дослідної експлуатації до ПАТ «Вінницяобленерго» (акт впровадження від 28.10.2016 р.). Результати роботи впроваджено також у навчальний процес Вінницького національного технічного університету (акт впровадження від 1.11.2016 р.).

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

У роботах, опублікованих у співавторстві, автору належать: [1] – подальший розвиток методу обчислення допусків зони нечутливості ГЕС; в [2, 5, 12] – моделювання нормальних режимів ЛЕС в *PS CAD*; в [3] – вибір точки поточкорозділу за найменшою вузловою напругою; в [4] – визначення вузлових напруг та втрат активної потужності методами матричної алгебри, з урахування потужностей генерованих різнотипними РДЕ; в [6] – метод визначення економічної доцільності встановлення комутаційного апарату секціонування мережі ЛЕС; в

[7] – визначення впливу потужності генерування РДЕ на поточкорозподіл та втрати активної потужності в ЛЕС; в [8] – використання коефіцієнту співвідношення потужності генерування центра живлення до потужності генерування кожною СЕС; в [10, 11] – аналіз методів визначення планового значення технічних втрат потужності та використання цього значення (нормативу) в умовах неповноти початкових даних; в [13] – метод коригування потоків потужності в ЛЕС з різнотипними ВДЕ; в [14] – врахування потужності генерування ВДЕ під час секціонування розподільної електричної мережі; в [9, 15, 16] – аналіз технічного стану обладнання ЛЕС та врахування його під час оптимального керування її режимами.

Результати теоретичних досліджень, що викладені у [1–16], були отримані у Вінницькому національному технічному університеті.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення роботи та її результати доповідались, обговорювались та були схвалені на таких науково-технічних конференціях та семінарах: на науково-технічному семінарі “Електричні мережі енергосистем з нетрадиційними і відновлювальними джерелами енергії” НАН України «Наукові основи електроенергетики» (м. Вінниця 2014, 2015, 2016 р.р.); на XVII Міжнародній науково-практичній конференції “Відновлювальна енергетика та енергоефективність у XXI столітті” (м. Київ, 2016 р.); на III міжнародній науково – технічній конференції «Оптимальне керування електроустановками ОКЕУ-2015» (м. Вінниця, 2015); на XII міжнародній конференції «Контроль і управління в складних системах (м. Вінниця, 2014, 2016 р.р.); на V, VI міжнародних науково - технічних конференціях «Підвищення рівня ефективності енергоспоживання в електротехнічних пристроях і системах». (м. Луцьк, 2014, 2016 р.р.); на Міжнародній науково-практичній конференції «Розподільчі мережі 0,4-35 кВ як складова частина локальних електроенергетичних систем майбутнього» (м. Хмельницький, 2016 р.); X міжнародній науково-практичній конференції «*Moderní vymoženosti vědy – 2014*». (м. Прага, Чехія, 2014 р.);

**Публікації.** За результатами виконаних досліджень опубліковано 16 наукових праць: 7 статей у фахових наукових виданнях, які входять до переліку ДАК, стаття в періодичному іноземному виданні, 7 в інших виданнях, патент України на корисну модель.

**Структура й обсяг роботи.** Дисертаційна робота складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел (100 найменувань) і 6 додатків. Основний зміст викладений на 127 сторінках друкованого тексту, містить 42 рисунки, 16 таблиць. Загальний обсяг роботи – 177 сторінки.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність роботи, сформульовано мету і задачі. Наведено наукову новизну і практичну цінність отриманих результатів, а також подано відомості щодо апробації роботи, особистого внеску здобувача та публікацій. Зазначено зв’язок роботи з науковими програмами та темами.

У **першому розділі** проведено аналіз факторів, які сприяють впровадженню відновлюваних джерел енергії та утворенню локальних електричних систем,

серед яких екологічна привабливість, підвищення надійності електропостачання, можливість регулювання вузлових напруг, керування потоками потужності в ЛЕС для зменшення в них втрат електроенергії. Уточнено задачі наукового дослідження.

Розбудова в розподільних електричних мережах розосереджених джерел електроенергії, а в основному це електростанції, що використовують ВДЕ, спонукає до дослідження особливостей експлуатації РЕМ в нових умовах, а також створення умов для ВДЕ, які б сприяли їх ефективному використанню в мережах за поступового зменшення «зелених тарифів» і переходу до квотного принципу генерування або генерування за заданим графіком. Необхідно досліджувати і створювати умови для оптимального інтегрування ВДЕ в електричні мережі енергосистем. Наслідком розбудови ВДЕ має бути підвищення енергоефективності як системи електропостачання, так і самих ВДЕ як елементів цієї системи.

Особливістю РЕМ, в яких споруджуються РДЕ, є те, що вони секціоновані за вимогами надійності і в нормальному режимі експлуатації є за структурою радіальними. Спорудження РДЕ переводить ЛЕП, на якій воно знаходиться, в режим з двостороннім живленням. Порушується попередній поточкорозподіл, що може призвести як до зменшення, так і до збільшення втрат електроенергії і погіршення якості електроенергії. Разом з тим, якщо генерування РДЕ є керованим, то за певного оснащення РДЕ, переважно малі ГЕС або СЕС, можуть використовуватися для оптимального керування потоками активної і реактивної потужності в ЛЕС і зменшення в ній втрат електроенергії. Для цього необхідно розробити математичну модель локальної електричної системи з СЕС і ГЕС для оцінювання впливу останніх на втрати активної потужності в РЕМ, що дозволить визначити зони нечутливості систем автоматичного керування джерел живлення і встановити порядок корегування ними поточкорозподілу в електричній мережі.

Розосереджені джерела електроенергії розбудовуються в мережах, де електрообладнання (трансформатори, комутаційні апарати, ЛЕП) мають високу міру зношеності. РДЕ, надто електростанції, що використовують ВДЕ, через їх нестабільність генерування впливають на режими роботи РЕМ таким чином, що її елементи можуть в певних режимах перевантажуватися та піддаватися перенапругам. З однієї сторони це призводить до погіршення стану електрообладнання РЕМ, а з іншої – змушує накладати обмеження на роботу РДЕ. Отже, при плануванні оптимальних режимів ЛЕС і РДЕ необхідно враховувати їх взаємовплив. Це стосується і визначення раціонального місця секціонування РЕМ. Необхідно аналізувати, оцінювати і враховувати неможливість транспортування потужності РДЕ в разі пошкоджень в електричній мережі. Результати такого аналізу можуть показати, наприклад, необхідність встановлення додаткових комутаційних апаратів секціонування мережі.

Реалізовувати задачі оптимального і не суперечного використання РДЕ в ЛЕС доцільно на основі сучасних *Smart Grid* технологій в рамках діючої автоматизованої системи керування. В такій електричній мережі появляються або розвиваються функціональні властивості, які не характерні для мереж, побудованих на інших принципах. До них відносяться в першу чергу: двосторонні ко-

мунікації між всіма елементами мережі, включно і електроспоживачами; розподілене генерування з резервуванням від електроенергетичної системи; зміна топології від радіальної до замкненої і ліній електропередачі з двостороннім живленням; автоматизація керування режимами електричних мереж з метою їх самоорганізації; дистанційний моніторинг та діагностика технічного стану обладнання, що дозволяє формувати дії на попередження аварій; адаптивне виділення фрагментів мережі і автоматичне відновлення електропостачання. Серед задекларованих функцій РЕМ, в якій реалізовані принципи *Smart Grid*, є керування потоками потужності з метою зменшення втрат електроенергії і покращання її якості. Для практичної реалізації цієї функції необхідно доповнити АСК розосередженим генеруванням в ЛЕС блоками оцінювання впливу РДЕ на режим РЕМ, визначення технічного стану електрообладнання та формування коригувальних дій на потоки потужності через зміну генерування РДЕ.

У **другому розділі** розроблено математичні моделі для визначення впливу режимів роботи ВДЕ (на прикладі СЕС) на режими РЕМ та на технічний стан їх обладнання, зокрема на трансформатори напруги, муфти кабельних ліній та розрядники. Показано, що в електричній мережі, розімкненій згідно вимог надійності, можливо забезпечити потоки потужності, які забезпечують зменшення втрат електроенергії в ній. Впливати на потоки потужності можливо, змінюючи генерування малих ГЕС і СЕС.

Для того, щоб враховувати під час керування режимами електричної мережі з ВДЕ пошкоджуваність електрообладнання, проаналізовано вплив на технічний стан електрообладнання мережі СЕС з інверторами. Для дослідження впливу СЕС побудована математична модель функціонування СЕС в мережі у вигляді системи рівнянь в операторній формі. Отримано вирази для розрахунку струмів в елементах мережі. Математична модель реалізована в програмному комплексі *Wolfram Mathematica*, а комп'ютерна модель – в програмному комплексі *PS CAD*. Для заступної схеми СЕС з інверторами *PCS-9563* отримано значення струмів в індуктивних елементах схеми. Наприклад, на рис. 1 наведено залежність струму в первинній обмотці трансформатора напруги (ТН) під час вмикання СЕС в мережу.

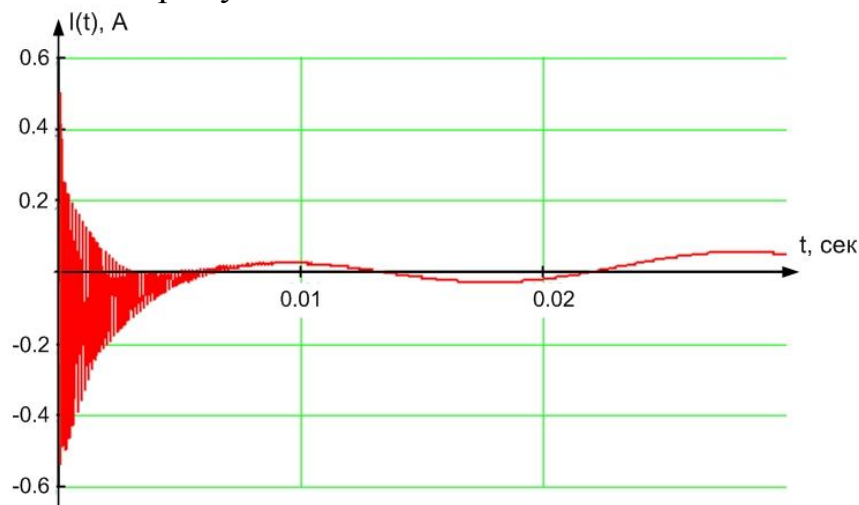


Рисунок 1 – Залежність струму  $i(t)$  в первинній обмотці ТН під час увімкнення СЕС до мережі



Результати дослідження струмів в обмотках високої напруги вимірювальних трансформаторів напруги свідчать про те, що зменшення частоти гармонійних складових у напругах 6–35 кВ особливо під час ферорезонансів та під час комутаційних перенапруг, викликаних почерговим увімкненням або вимкненням декількох інверторів СЕС, призводить до значного зростання струмів у обмотках високої напруги цих трансформаторів та пошкодження ізоляції. У кабельних муфтах зростання частоти струмів через опір ізоляції, зумовлене появою в фазних напругах гармонійних складових 150, 300, 450 Гц, що призводить до зростання ємнісного струму, перегріву та пошкодження кабельних муфт. Перенапруги викликають часті спрацювання розрядників та швидке спрацювання комутаційного ресурсу. Отже, під час експлуатації СЕС і планування режимів РЕМ необхідно враховувати їх вплив на електрообладнання.

Схеми РЕМ формуються у відповідності з методичними рекомендаціями «Побудова схем секціонування розподільної електричної мережі наругою 6-10 кВ. Методичні рекомендації» для забезпечення надійності електропостачання. Проте відомо, що розмикання замкненої мережі часто призводить до зростання втрат електроенергії в ній. Задачі забезпечення якості електроенергії, забезпечення безаварійної експлуатації, зменшення втрат електроенергії ускладнюються, коли в таких мережах з'являються джерела розподіленого генерування. Тому в роботі пропонується додатково до існуючої методики враховувати потужності генерування РДЕ при визначенні місць секціонування електричної мережі.

Для розрахунку усталеного режиму РЕМ з РДЕ математична модель за методом вузлових напруг адаптована до форми вихідних даних таких мереж, а також до задач, що розв'язуються. Метод і відповідний алгоритм дозволяють розраховувати режими, коли схема мережі замкнена і розімкнена, але частина ліній (ті, що з ВДЕ) є лініями з двостороннім живленням. Причому окремі ЛЕП можуть об'єднувати декілька різнотипних РДЕ.

Математична модель у матричному вигляді в залежності від вихідних даних використовується у формі

$$\mathbf{Y}_y \dot{\mathbf{U}} = \hat{\mathbf{U}}_d^{-1} \hat{\mathbf{S}} - \mathbf{Y}_\sigma \mathbf{U}_\sigma \quad \text{або} \quad \mathbf{Y}_y \dot{\mathbf{U}} = \mathbf{J} - \mathbf{Y}_\sigma \mathbf{U}_\sigma, \quad (1)$$

де  $\mathbf{Y}_y$  – матриця вузлових провідностей,  $\mathbf{Y}_\sigma$  – матриця-стовпець вузлових провідностей відносно балансувального вузла з наругою  $\mathbf{U}_\sigma$ ,  $\hat{\mathbf{S}}$  – вектор спряжених комплексних потужностей вузлів,  $\hat{\mathbf{U}}_d^{-1}$  – обернена діагональна матриця комплексів вузлових напруг,  $\mathbf{J}$  – вектор вузлових струмів.

Потужності або струми у вузлах подаються як сума вузлових навантажень та генерування ВДЕ (ГЕС та СЕС):

$$\dot{\mathbf{S}} = \dot{\mathbf{S}}_H - \dot{\mathbf{S}}_{Г ГЕС} - \dot{\mathbf{S}}_{Г СЕС} \quad \text{або} \quad \mathbf{J} = \mathbf{J}_H - \mathbf{J}_{Г ГЕС} - \mathbf{J}_{Г СЕС}. \quad (2)$$

Для дослідження впливу потужності генерування ВДЕ на втрати потужності в РЕМ і в її виділених фрагментах використовується алгоритм, в основу якого покладено матрицю розподілу втрат потужності по вітках схеми в залежності від потужності у її вузлах:

$$\Delta \dot{\mathbf{S}}_B = \dot{\mathbf{T}} \cdot \dot{\mathbf{S}}, \quad (3)$$

де  $\Delta \dot{\mathbf{S}}_B$  – вектор втрат у вітках схеми, які визначаються потужностями  $\dot{\mathbf{S}}_H$ ,  $\dot{\mathbf{S}}_{ГГЕС}$  і  $\dot{\mathbf{S}}_{ГСЕС}$ .

Кожний рядок матриці  $\dot{\mathbf{T}}$  визначається як

$$\dot{\mathbf{T}}_i = (\dot{\mathbf{U}}_i \mathbf{M}_i) \hat{\mathbf{C}}_i \dot{\mathbf{U}}_d^{-1}, \quad (4)$$

де  $\mathbf{M}$  – матриця з'єднань віток у вузлах,  $\hat{\mathbf{C}}_i$  – і-й рядок матриці розподілу струмів у вузлах  $\mathbf{J}_H - \mathbf{J}_{ГГЕС} - \mathbf{J}_{ГСЕС}$  по вітках схеми.

Для фрагмента мережі з виділеними ГЕС вираз (3) перетворюється в

$$\Delta \mathbf{S}_{B\phi} = \dot{\mathbf{T}}_\phi \cdot \dot{\mathbf{S}}_{ГГЕС}, \quad (5)$$

де  $\dot{\mathbf{T}}_\phi = \mathbf{T}_{\phi a} + j\mathbf{T}_{\phi p}$  – матриця розподілу втрат потужності у фрагменті мережі.

Як правило, цікавить залежність втрат активної потужності та електроенергії від генерування ГЕС. Якщо на шинах ГЕС потужність збалансована таким чином, що вона не споживає і не генерує в мережу реактивну потужність, то вираз (5) для аналізу впливу ГЕС на втрати суттєво спрощується:

$$\Delta \mathbf{P}_B = \mathbf{T}_{\phi a} \mathbf{P}_{ГГЕС}. \quad (6)$$

Вирази (1)÷(6) є математичною моделлю режимів ЛЕС, яка дозволяє досліджувати вплив потужностей ГЕС та СЕС на втрати потужності в них та визначати оптимальні за критерієм втрат генеровані потужності з урахуванням обмежень по напрузі, пропускної здатності ЛЕП та встановленої потужності ГЕС.

Отримав подальший розвиток алгоритм визначення чутливості втрат активної потужності до зміни керуючих параметрів, а саме потужності генерування ГЕС, критеріальним методом. При використанні критеріального методу основою алгоритму оцінки чутливості оптимальних рішень (мінімальних втрат активної потужності в ЛЕС) є критеріальна форма цільової функції, що в нашому випадку апроксимується у вигляді двочленного полинома:

$$\Delta P^*_{j}(P_{ГГЕС}^*) = a_j P_{ГГЕС}^{\alpha_j} + b_j P_{ГГЕС}^{\beta_j}, \quad (7)$$

де  $\Delta P^*_{j}(P_{ГГЕС}^*)$  – значення цільової функції (мінімальних втрат активної потужності в мережі або її частині) у відносних одиницях, в.о.;  $P_{ГГЕС}^*_{j} = P_{ГГЕС j} / P_{ГГЕС j0}$  – потужності генерування ГЕС, за допомогою яких оптимізуються режими ЛЕС, в.о. (за базисні приймаються оптимальні значення потужностей генерування ГЕС);  $a_j, b_j, \alpha_j, \beta_j$  – постійні коефіцієнти, що відображають характер залежності і ступінь впливу генерування ГЕС на значення  $\Delta P^*_{j}$ .

Тоді вирази для граничних значень зони нечутливості потужності генерування ГЕС мають вигляд:

$$P_{ГЕС}^- * j = \left( \frac{\alpha_j - \beta_j}{-\beta_j} \frac{a_j}{I + \delta P^*} \right)^{-1/\alpha}, \quad P_{ГЕС}^+ * j = \left( \frac{\alpha_j - \beta_j}{\alpha_j} \frac{b_j}{I + \delta P^*} \right)^{-1/\beta}, \quad (8)$$

де  $\delta P^*$  – допустиме відхилення втрат від оптимального значення.

Отримана в такий спосіб область  $\delta M_p$  допустимих відхилень змінних  $P_{ГЕС}$  від своїх оптимальних значень по суті містить множину можливих із заданою точністю рівно-економічних варіантів генерування ГЕС. Область  $\delta M_p$  використовується для прийняття рішень по реалізації оптимальних режимів за допомогою ГЕС.

У **третьому розділі** розроблено алгоритм визначення такої потужності генерування ГЕС, що поточкорозподіл наближається до оптимального і забезпечується зменшення втрат потужності в електричній мережі. Показано, що з розбудовою РДЕ в електричній мережі необхідно переглядати місця секціонування, а використовувати малі ГЕС або СЕС для оптимізації поточкорозподілу доцільно за результатами аналізу чутливості втрат потужності до генерованої ними потужності.

Розроблено алгоритм і програму для системи підтримки прийняття обґрунтованого рішення щодо місця розмикання магістральних ЛЕП розподільних електричних мереж з використанням наявних комутаційних апаратів. Застосування алгоритму проілюстровано на прикладі фрагменту схеми Ямпільських районних електричних мереж енергопостачальної компанії ПАТ «Вінниця-обленерго» напругою 10 кВ, схема якого наведена на рис. 2. Визначено місця розмикання електричної мережі відповідно до вимог методики щодо забезпечення надійності електропостачання (показано на рис. 2).

Втрати потужності та електроенергії в результаті розмикання мережі можуть збільшитися або зменшитися в порівнянні з режимом в замкненій мережі. Це залежить від міри її неоднорідності. Якщо втрати збільшуються, як це відбулося в прикладі, який розглядається, то, за наявності технічних засобів, необхідно коригувати поточкорозподіл.

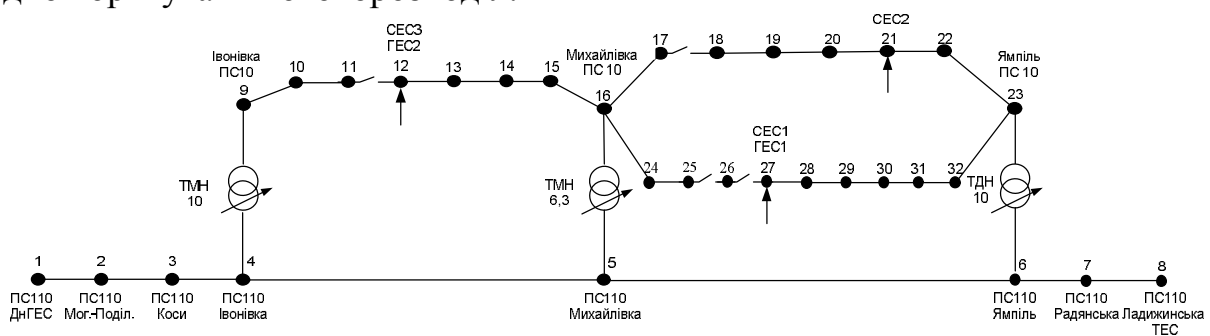


Рисунок 2 – Схема електричної мережі 110/10 кВ

Алгоритм програми розрахунку потужності ГЕС, якою коригується поточкорозподіл в ЛЕС наведено на рис. 3. Вона входить у програмне забезпечення АСК ГЕС.

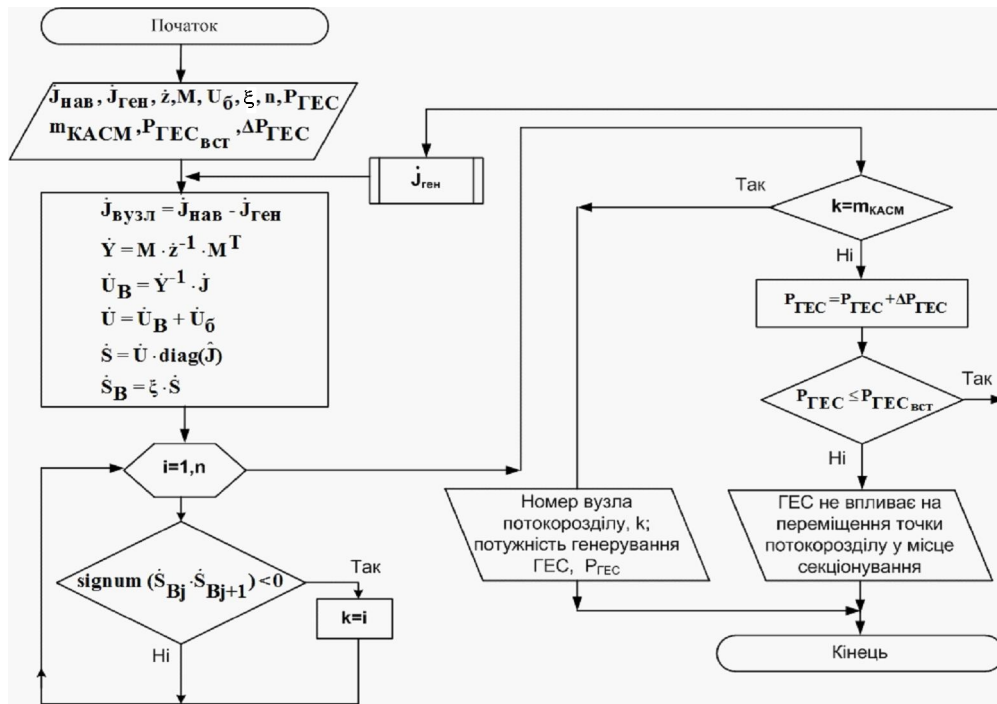


Рисунок 3 – Блок-схема алгоритму визначення потужності ГЕС, що забезпечує зсув точки поточкорозділу у вузол секціонування

Відповідно до алгоритму, приведенного на рис.3, визначаються потужності ГЕС, якими розрахункова точка поточкорозділу переміщається у вузол секціонування. В результаті визначаються оптимальні потоки потужності у вітках схеми РЕМ і відповідні втрати потужності. Для цього спочатку вводяться поточні значення струмів вузлових навантажень  $J_{\text{нав}}$ , струмів генерування  $J_{\text{ген}}$  ГЕС і СЕС,  $\xi$  – матриця взаємозв'язку вузлових потужностей і перетоків потужності в системі, а також розрахункова схема мережі з параметрами її елементів. Задається також допустимий діапазон регулювання потужності ГЕС з врахуванням ресурсів води. Результатами розрахунку є значення напруг у вузлах та оптимальні втрати, а також значення потужностей ГЕС, реалізація яких змінює поточкорозподіл в мережі і забезпечує зменшення втрат електроенергії.

Оскільки в електричній мережі постійно змінюються навантаження і потужність генерування СЕС, то необхідно відповідно коригувати потужність ГЕС. Тому розроблено алгоритм і програму визначення області оптимальності режимів РЕМ, яка перераховується в зону нечутливості для АСК, якою здійснюється регулювання потужності ГЕС. Якщо в мережі є декілька ГЕС, то вони ранжуються відповідно до міри впливу їх на потоки потужності і втрати і встановлюється черговість їх дії по введенню втрат в область оптимальності. На рис. 4 у відносних одиницях наведено приклад залежностей втрат потужності в ЛЕС від генерованої потужності ГЕС<sub>1</sub> та ГЕС<sub>2</sub>

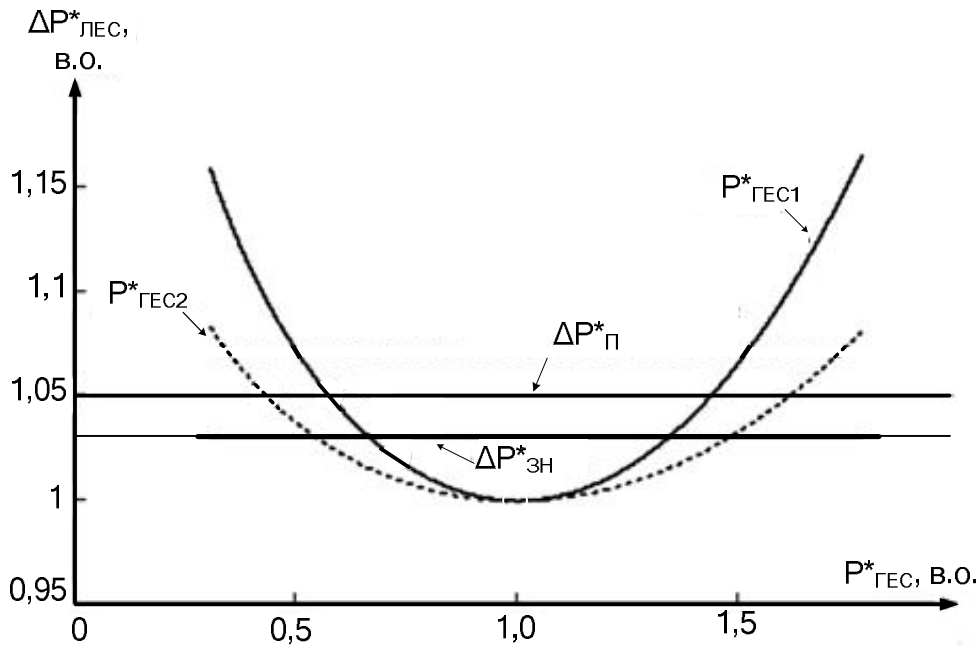


Рисунок 4 – Залежності втрат потужності в ЛЕС від генерованої потужності ГЕС<sub>1</sub> та ГЕС<sub>2</sub>

З рис. 4 видно, що втрати в ЛЕС більш чутливі до генерування ГЕС<sub>1</sub>. Відповідно нею в першу чергу повинні здійснюватися оптимізуючі впливи на потоки потужності. Технічно в АСК це реалізується заданими граничними значеннями зони нечутливості. Для ГЕС<sub>1</sub> вона повинна бути меншою ніж для ГЕС<sub>2</sub>.

У **четвертому розділі** показано ефективність використання розроблених математичних моделей та алгоритмів шляхом обчислювальних експериментів. Підтверджена доцільність використання малих ГЕС для коригування потоків потужності секціонованої електричної мережі для зменшення в ній втрат електроенергії. Вдосконалено працюючу АСК блоками оцінювання впливу ВДЕ на втрати в мережі і коригування в ній потоків потужності.

В якості прикладу взято реальний фрагмент схеми Ямпільської РЕМ з СЕС і малими ГЕС (див. рис. 2). Розглянуто режим, коли Гальжбіївська ГЕС і Слобода-Бушанська (на схемі ГЕС<sub>1</sub> і ГЕС<sub>2</sub>) не працюють. Мережу секціоновано згідно вимог надійності електропостачання як показано на рис. 2. В замкнутій схемі розрахункові втрати склали 0,543 МВт (0,363 МВт в мережі 10 кВ і 0,180 МВт в мережі 110 кВ). Після розмикання контурів втрати в мережі 10 кВ зменшилися до 0,354 МВт. Після вмикання ГЕС і оптимізації їх генерування втрати в мережі 10 кВ зменшилися на 92 кВт або на 16%.

Для схеми, що розглядається, розглянута можливість підвищення надійності і зменшення втрат за рахунок додаткового секціонування вітки 27-28 і встановлення в цій точці реклоузера. Зміщення місця секціонування не погіршило надійність, але за рахунок зменшення втрат електроенергії отримано додатковий техніко-економічний ефект. Після встановлення реклоузера покращуються умови видачі в мережу потужності СЕС<sub>1</sub> і ГЕС<sub>1</sub>. За середньої потужності на протязі року СЕС<sub>1</sub> 500 кВт та ГЕС<sub>1</sub> 350 кВт і за «зеленого» тарифу на

електроенергію, який діє в даний час, термін окупності реклоузера не перевищує двох років.

З метою дослідження процесів, що виникають в електричній мережі з різнотипними РДЕ розроблено комп'ютерну модель в програмному середовищі *PS CAD*. Комп'ютерну модель ЛЕС напругою 110/10/0,4 кВ в програмному середовищі *PS CAD* показано на рис. 5. В якості джерел електричної енергії, використовуються: енергосистема, яка приєднана до шин 110 кВ ЛЕС, СЕС<sub>1</sub> та СЕС<sub>2</sub> (потужність їх приймалася в межах від 0,5 до 1 МВт). Також на схемі показані батарея статичних конденсаторів (БСК) для компенсації реактивної потужності, понижувальні трансформатори (110/10 кВ та 10/0,4 кВ) та підвищувальні трансформатори (0,4/10 кВ) на підстанціях СЕС, а також дві лінії 10 кВ для живлення споживачів (під час моделювання потужність навантаження змінювалась в межах від 0,3 МВт до 1,23 МВт). На СЕС використовується контролер інвертора, що реалізує *PI* закон керування в *dq* системі координат.

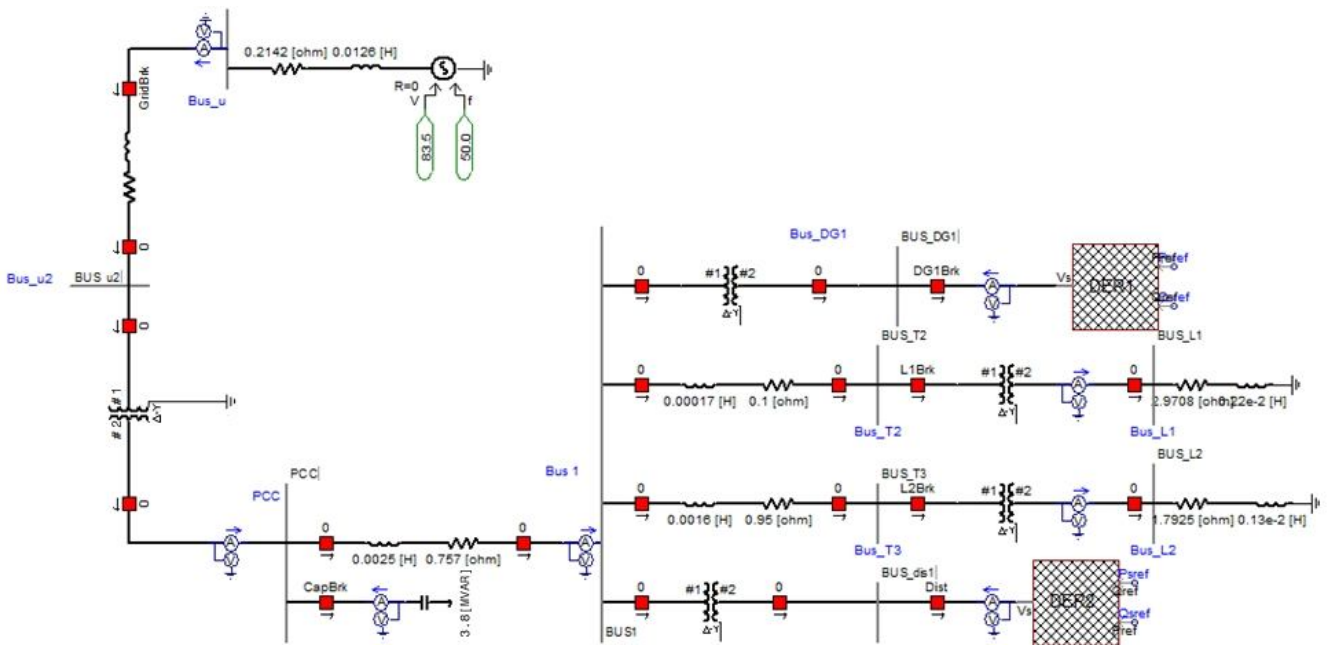


Рисунок 5 – Схема моделі ЛЕС напругою 110/10/0,4 кВ в програмному середовищі *PS CAD*

Наявність в програмі *PSCAD* такого елемента як *On-Line Frequency Scanner* дає можливість проаналізувати гармонійні складові в напругах та струмах на шинах РЕМ при різних режимах роботи. На рис. 6 показані результати досліджень гармонійних складових в нарузі на шинах СЕС, які використовують контролери інверторів, що працюють за різними законами керування.

На рис. 6 показані гармонійні складові в нарузі на шинах СЕС за умови використання на СЕС: а) *PI* контролера, в якому застосовується перетворення в *dq* систему координат; б) *PR* контролера, в якому застосовується перетворення в  $\alpha\beta$  систему координат; в) *PI* контролера, в якому застосовується перетворення в *abc* систему координат; г) використання *DB* контролера, в якому застосовується перетворення в *abc* систему координат.

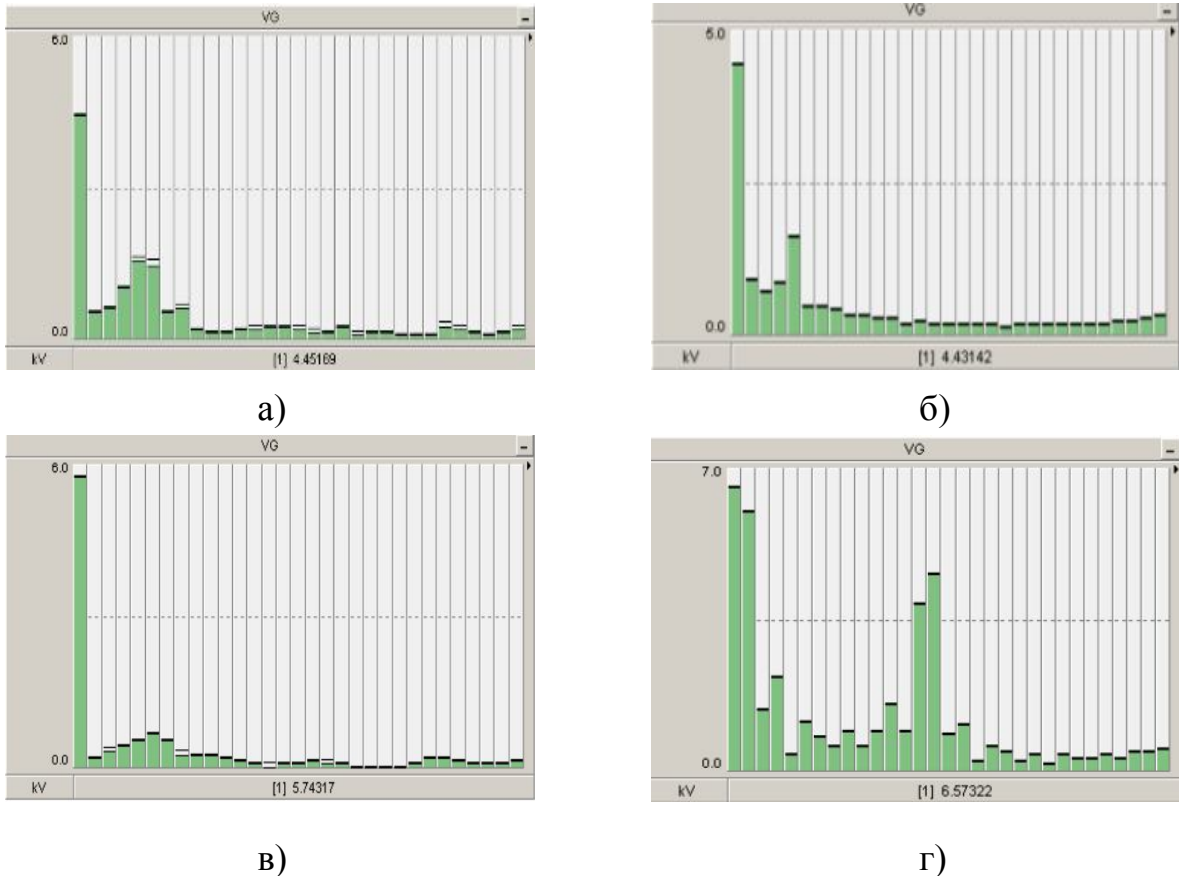
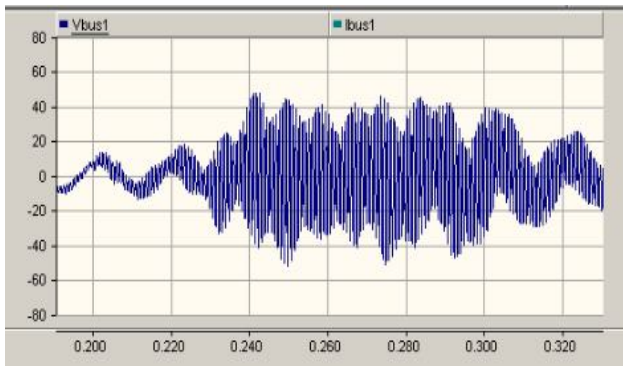


Рисунок 6 – Спектр гармонійних складових в напрузі на шинах СЕС

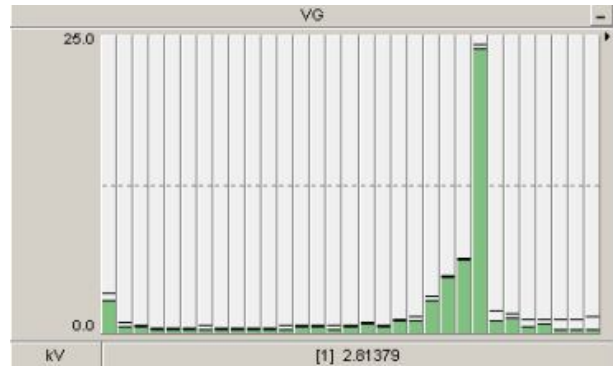
Встановлено, що найменше гармонійне спотворення синусоїди напруги буде при використанні *PI* контролера, що реалізує перетворення в *abc* систему координат, а використання *PR* контролера, що реалізує перетворення в *αβ* систему координат дасть найбільше гармонійне спотворення на виході інвертора. В подальший дослідженнях використовувались *PI* контролери на обох СЕС. Результати комп'ютерного моделювання свідчать про те, що найбільші спотворення форми синусоїди напруг та струмів на виході СЕС викликають перехідні процеси, пов'язані з увімкненням та вимкненням потужних споживачів, самих СЕС, потужної БСК і т. п. Особливо значні спотворення виникають в режимі увімкнення різних СЕС та потужних споживачів з малим інтервалом часу між ними (наприклад, у разі успішного АПВ на різних ділянках РЕМ). Результати досліджень наведені на рис.7 та рис. 8.

Як видно з рис. 7 та рис. 8 в мережах з РДЕ виникає явище резонансу. На спотворення синусоїди напруги впливають як потужності навантажень, так і параметри самих інверторів СЕС.

Для визначення раціонального місця секціонування електричної мережі з РДЕ розроблено програму, яка дає змогу визначити яким з наявних комутаційних апаратів (КА) доцільно розмикати контури в ЛЕС з урахуванням пошкоджуваності електрообладнання. В ній також встановлюються можливості зсуву точки поточкорозділу у вузол, де встановлені КА, та для зменшення втрат потужності шляхом зміни потужності генерування ГЕС.

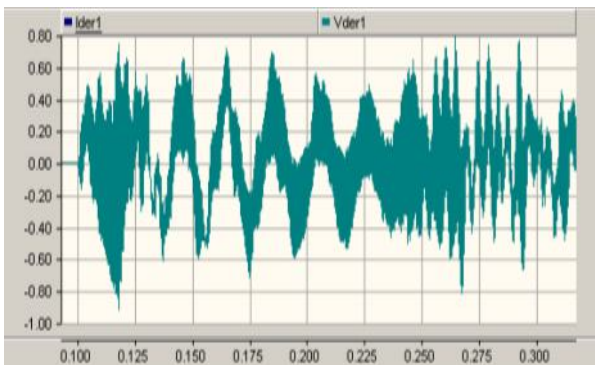


а)

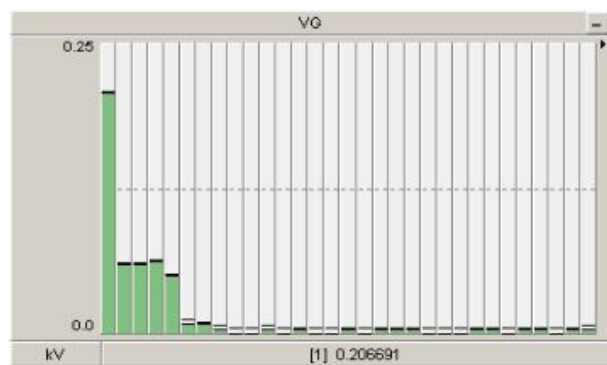


б)

Рисунок 7 – Почергове увімкнення СЕС<sub>1</sub> і СЕС<sub>2</sub> та потужного споживача:  
а) спотворення синусоїди напруги на шинах ПС 10кВ; б) спектр гармонійних складових напруги на ПС 10кВ



а)



б)

Рисунок 8 – Одночасне ввімкнення СЕС<sub>1</sub> і СЕС<sub>2</sub> та потужного споживача (при успішному АПВ):

а) спотворення синусоїди напруги на шинах СЕС1 0,4кВ; б) спектр гармонійних складових напруги на СЕС1 0,4кВ

В програмі також передбачено можливість завантаження заздалегідь підготовлених файлів в форматі, зручному для редагування та використання в інших програмах з розрахунку режимів електричних мереж енергосистеми. Програма інтегрована в АСК генеруванням потужності ГЕС, структурна схема якої приведена на рис. 9. До існуючої АСК добавлено блоки «Оцінка впливу РДЕ на режими ЕМ» та «Коригування потужності РДЕ»



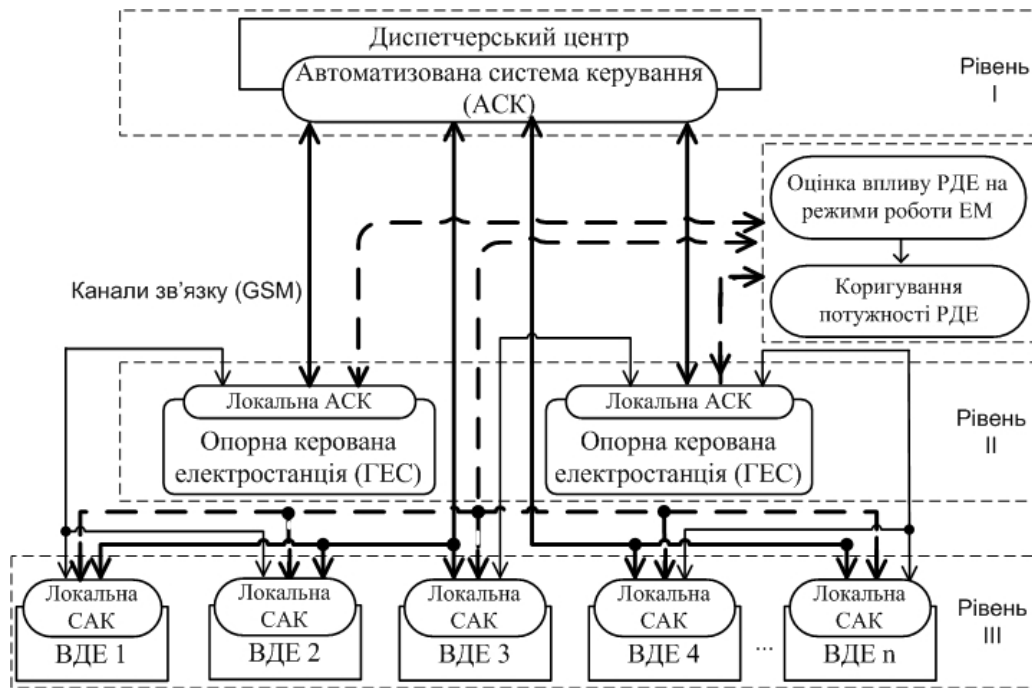


Рисунок 9 – Структурна схема АСК генерованою потужністю ГЕС

## ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

В роботі отримано нове вирішення актуальної науково-прикладної задачі оптимізації функціонування відновлюваних джерел енергії в локальних електричних системах, що полягає в узгодженому керуванні генеруванням сонячних електростанцій та малих гідроелектростанцій для оптимізації потоків потужності і зменшення втрат електроенергії.

Проведені дослідження дозволили отримати такі результати:

1. Показано, що в розподільних електричних мережах з розосередженим генеруванням, секціонованих у відповідності до вимог надійності, можливо і доцільно побудувати систему керування потоками потужності для зменшення втрат електроенергії під час її транспортування. Для цього доцільно залучати керовані відновлювані джерела електроенергії. В першу чергу це малі ГЕС, а також сонячні електростанції з груповим інвертором і накопичувачем електроенергії.

2. Розроблено метод оптимального керування потоками потужності в локальній електричній системі з різномісними відновлюваними джерелами. Вплив на перерозподіл потоків потужності здійснюється зміною генерування потужності малих ГЕС. Для зменшення втрат електроенергії потужність ГЕС розраховується так, щоб потоки потужності в секціонованій електричній мережі наближалися до оптимальних, визначених з розрахунків режимів замкнутої мережі.

3. Розроблено математичну модель локальної електричної системи з сонячними електростанціями і гідроелектростанціями для оцінювання впливу останніх на втрати активної потужності в ній. Показано, що розосереджені джерела електроенергії в межах допустимого для них діапазону генерування потужності

по різному впливають на значення втрат потужності й електроенергії в ЛЕС. Тому для більш раціонального використання їх бажано ранжувати за мірою впливу на критерій оптимальності.

4. Для визначення ролі і місця керованих ВДЕ в оптимальному керуванні потоками потужності вдосконалено метод оцінювання чутливості втрат потужності в ЛЕС до потужності генерування ними. Показано, що визначені в результаті аналізу чутливості критеріальні залежності та області оптимальності потужності ВДЕ, зокрема малих ГЕС, можуть бути використані для визначення зон нечутливості систем автоматичного керування джерелами живлення і встановити порядок корегування ними потокорозподілу в ЛЕС.

5. Розвинуто метод визначення раціонального місця секціонування розподільних електричних мереж з врахуванням неможливості транспортування потужності від розосереджених джерел генерування, коли є пошкодження в електричній мережі або існують обмеження щодо використання електрообладнання через їх технічний стан, це стосується, в першу чергу, комутаційних апаратів. Метод дозволяє визначити техніко-економічний ефект від встановлення додаткових комутаційних апаратів секціонування мережі та використання ВДЕ для зменшення втрат електроенергії в електричній мережі.

6. Встановлено, що під час почергового увімкнення та вимкнення РДЕ, зокрема сонячних електростанцій, виникають гармонійні складові у вузлових напругах та в струмах віток. Аналіз пошкоджуваності обладнання ЛЕС свідчать про вплив СЕС на ці пошкодження. Особливо це стосується кабельних муфт, вимірювальних трансформаторів напруги та розрядників. Запропоновано комп'ютерну модель ЛЕС у програмному забезпеченні *PS CAD*, як дозволяє досліджувати параметри усталених та перехідних процесів в ЛЕС з інверторами СЕС, які працюють за ПІ законами керування.

7. Вдосконалено автоматизовану систему керування роботою ВДЕ в локальній електричній системі. Зокрема працюючу АСК розширено блоками «Оцінка впливу РДЕ на режим РЕМ» та «Коригування потужності РДЕ». Це дозволяє під час оптимального керування режимами ЛЕС враховувати технічний стан електрообладнання, підвищувати надійність та якість електропостачання, зменшувати втрати електроенергії під час її транспортування.

8. Працездатність та ефективність запропонованих у роботі методів і алгоритмів підтверджена обчислювальними експериментами з оптимізації та керування режимами ЛЕС з відновлюваними джерелами електроенергії. На основі отриманих у роботі умов оптимальності, методів та алгоритмів вдосконалено комплекс програм інтелектуальної підтримки роботи диспетчера ЛЕС, який передано для дослідної експлуатації до ПАТ «Вінницяобленерго». Матеріали дисертаційного дослідження використовуються також в навчальному процесі.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Лежнюк П. Д. Оптимізація потужності гідроелектростанцій в локальній електричній системі з урахуванням чутливості втрат потужності в ній [Текст] / П. Д. Лежнюк, І. О. Гунько, О. Є. Рубаненко, О. І. Казьмірук // *Sciences*

*of Europe. Technical science (Praha)*. – 2016. – №. 6 (6) – С. 28-38.

2. Лежнюк П. Д. Вплив сонячних електричних станцій на напругу споживачів 0,4 кВ [Текст] / П.Д. Лежнюк, О.Є. Рубаненко, І.О. Гунько // *Енергетика: економіка технології, екологія*. – 2015. – № 3(51). – С.7-13. – ISSN 1813-5420.

3. Лежнюк П. Д. Вплив розосереджених джерел енергії на оптимальний поточкорозподіл в електричних мережах [Текст] / П. Д. Лежнюк, І. О. Гунько // *Вісник національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – 2016. – № 18 (1190). – С. 86-91. – ISSN 2224-0349.

4. Лежнюк П. Д. Дослідження впливу ВДЕ та секціонування на режими роботи локальних електричних систем [Електронний ресурс] / П. Д. Лежнюк, І. О. Гунько // *Наукові праці Вінницького національного технічного університету*. – 2016. – № 2. – ISSN 2307 – 5376.

Режим доступу: [praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/470](http://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/470).

5. Лежнюк П.Д. Вплив інверторів СЕС на показники якості електричної енергії в ЛЕС [Текст] / П.Д. Лежнюк, О.Є. Рубаненко, І.О. Гунько // *Вісник Хмельницького національного університету*. Серія: Технічні науки. – 2015. – №2. – С. 134-145. – ISSN 2307-5732.

6. Лежнюк П. Д. Оптимізація секціонування в локальних електричних мережах з різнотипними розподіленими джерелами енергії [Текст] / П. Д. Лежнюк, І. О. Гунько, О. Є. Рубаненко, Ю. В. Малогулко // *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. – 2016. – № 3 (95). – С. 199 - 205.

7. Лежнюк, П. Д. Оптимізація секціонування в локальних електричних системах за критерієм втрат електричної потужності з урахуванням відмов [Текст] / П. Д. Лежнюк, І. О. Гунько, О.Є. Рубаненко // *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. – 2016. – № 2 (94). – С. 90 - 98.

8. Лежнюк П. Д. Вплив ВДЕ на втрати активної потужності в ЛЕС [Текст] / П. Д. Лежнюк, О. О. Рубаненко, І.О. Гунько // *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. – 2015. – №3 (92). – С. 84-90.

9. Лежнюк П.Д. Забезпечення оптимального керування нормальними режимами ЕЕС шляхом підвищення надійності високовольтних вводів [Текст] / П. Д. Лежнюк, І. О. Гунько // *Вісник національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут»*. Серія: Гірництво. – 2014. – №.25. – С. 92-100.

10. Рубаненко О. О. Нормування технічних втрат електроенергії в ЕЕС при оптимальному керуванні їх режимами з використанням критеріального програмування і нейронечіткого моделювання [Текст] / О. О. Рубаненко, І. О. Гунько // *Вісник Хмельницького національного університету*. Серія: Технічні науки. – 2013. – № 6. – С. 249-253.

11. Лежнюк П. Д. Оптимальное управление нормальными режимами электроэнергетических систем с учётом нормативного значения потерь электроэнергии и  $tg \varphi$  [Текст] / П. Д. Лежнюк, О. О. Рубаненко, І. О. Гунько // *Moderní využitosti vědy* – 2014: X Міжнарод. наук.-практ. конф.: матеріали конференції. – Прага, 2014. – С. 87–92.

12. Лежнюк П.Д. Вплив інверторів СЕС на показники якості електричної енергії в ЛЕС [Електронний ресурс] / П.Д. Лежнюк, І.О. Гунько // Оптимальне керування електроустановками (ОКЕУ-2015): III Міжнарод. наук.-практ. конф.: матеріали конференції. – Вінниця, 2015.

Режим доступу: [http://conf.vntu.edu.ua/energo/2015/Abstr\\_OCEI-2015.pdf](http://conf.vntu.edu.ua/energo/2015/Abstr_OCEI-2015.pdf).

13. Лежнюк П.Д. Оптимальне керування малими ГЕС потоків потужності в електричних мережах з розосередженим генеруванням [Текст] / П.Д. Лежнюк, О. А. Ковальчук, І.О. Гунько // Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті: XVII Міжнарод. наук.-практ. конф.: матеріали конференції. – Київ, 2016. – С. 430–434.

14. Лежнюк П.Д. Оптимізація місць секціонування в локальних електричних системах енергопостачальних компаній [Текст] / П.Д. Лежнюк, І.О. Гунько // Контроль і управління в складних системах (КУСС-2016): XIII Міжнарод. наук.-техн. конф.: тези доповіді. – Вінниця, 2016. – С. 191–193.

15. Лежнюк П.Д. Дослідження стану обладнання локальних електричних систем [Текст] / П.Д. Лежнюк, І.О. Гунько // Контроль і управління в складних системах (КУСС-2014): XII Міжнарод. наук.-техн. конф.: тези доповіді. – Вінниця, 2014. – С. 137.

16. Спосіб оптимального керування режимами роботи електроенергетичної системи. Пат. №76464 Україна, МПК H02J23/00. / Лежнюк П. Д., Лесько В.О., Рубаненко О. О., Рубаненко І. О. –№2012 058664. Заявлено 14.05.2012. Опубл. 10.01.2013, Бюл. №1. –10 с.

## АНОТАЦІЇ

**Гунько І.О. Оптимальне керування режимами електричних мереж з відновлюваними джерелами енергії з використанням Smart Grid технологій.** – 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, 2017.

Дисертаційну роботу присвячено зменшенню втрат електроенергії в локальних електричних системах шляхом узгодженого керування різнотипними розосередженими джерелами енергії, що експлуатуються в ній.

З цією метою в роботі розроблено метод коригування потоків потужності в локальній електричній системі з різнотипними відновлюваними джерелами електроенергії шляхом оптимального керування потужністю генерування малих гідроелектростанцій, що дозволяє визначити умови для наближення поточкорозподілу в секціонованій електричній мережі до оптимального за втратами електроенергії в ній. Розроблено алгоритми і програми коригування потоків потужності в секціонованій за умов надійності розподільній електричній мережі шляхом зміни генерування потужності керованих РДЕ, в першу чергу малих гідроелектростанцій і, в перспективі, сонячних електростанцій. Відповідним чином вдосконалено структурну схему автоматизованої системи керування станціями, які використовують ВДЕ, що дозволяє узгоджувати графіки видачі електроене-

ргії та її споживання.

Ключові слова: розподільна електрична мережа, локальна електрична система, сонячні і гідроелектростанції, пошкодженість обладнання, втрати електроенергії, оптимальний потікорозподіл, система автоматичного керування.

**Gunko I.O. Optimal control of the modes of electric grids with renewable sources of energy, using Smart Grid technologies. – Manuscript.**

Dissertation for the scientific Degree of Candidate of Science (Engineering) on speciality 05.14.02 – Electric stations and systems. – Vinnytsia National Technical University. – Vinnytsia, 2017.

Dissertation research is devoted to the reduction of electric energy losses in local electric systems by means of coordinated control of different-type distributed sources of energy (DES), operating in it.

For this purpose, the method of power flows correction in local electric system with different types of renewable sources of electric energy (RSE) by means of optimal control of power generation of small hydropower stations that enables to determine the conditions for approaching of flow distribution in sectionalized electric grid to the optimal distribution by electric energy losses in it is developed in the research. Algorithms and programs of power flows correction in sectionalized on conditions of reliability, distributed electric grid by means of power generation change of controlled DES; first of all, small hydroelectric stations and eventually, solar electric plants are developed. Structural scheme of automated control systems of power stations control that use RSE is improved, that enables to coordinate the schedules of power supply and its consumption.

Key words: distributed electric grid, local electric system, solar and hydroelectric stations, damage rate of the equipment, power losses, optimal flow distribution, automatic control system.

**Гунько И.А. Оптимальное управление режимами электрических сетей с возобновляемыми источниками энергии с использованием Smart Grid технологий. – 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, 2017.

В диссертационной работе получено новое решение актуальной научно-прикладной задачи оптимизации функционирования возобновляемых источников энергии в локальных электрических системах, состоящее в согласованном управлении генерированием солнечных электростанций и малых гидроэлектростанций для оптимизации потоков мощности и уменьшения потерь электроэнергии.

Распределительные электрические сети функционально были предназначены для транспорта и распределения электроэнергии, производимой централизованно на крупных электростанциях. С развитием в них нетрадиционных и возобновляемых источников энергии (ВИЭ) они приобретают черты локальной

электроэнергетической системы (ЛЭС). В связи с этим возникают новые задачи: согласование графиков нагрузки потребителей и генерирования ВИЭ с учетом их нестабильности, оптимальное управление потоками мощности с целью уменьшения потерь электроэнергии и улучшения ее качества, обеспечение балансовой надежности электроэнергии в ЛЭС, которая формируется централизованным и местным генерированием и др.

Целью диссертационной работы является уменьшение потерь электроэнергии в локальных электрических системах путем согласованного управления генерированием солнечных электростанций и малых гидроэлектростанций. Объектом исследования являются локальные электрические системы с солнечными электростанциями и малыми гидроэлектростанциями. Предмет исследования – методы и средства оптимального управления потоками мощности в распределительной электрической сети с учетом ее секционирования.

Впервые разработан метод корректировки потоков мощности в локальной электрической системе с разнотипными возобновляемыми источниками электроэнергии путем оптимального управления мощностью генерации малых гидроэлектростанций, который позволяет определить условия для приближения потокораспределения в секционированных электрических сетях к оптимальному по потерям электроэнергии. Получила развитие математическая модель нормального режима локальной электрической системы с солнечными электростанциями и гидроэлектростанциями для оценки влияния последних на потери активной мощности в электрической сети, что позволяет определить зоны нечувствительности систем автоматического управления источников питания и установить порядок корректировки ими потокораспределения в электрической сети. Получил дальнейшее развитие метод определения рационального места секционирования распределительных электрических сетей, который позволяет оценить и учесть невозможность транспортировки электроэнергии рассредоточенных источников генерирования в случае повреждений в электрической сети и позволяет определить технико-экономический эффект от установки дополнительных коммутационных аппаратов секционирования сети.

Показано, что в распределительных электрических сетях с рассредоточенным генерированием, секционированных в соответствии с требованиями по надежности, возможно и целесообразно построить систему управления потоками мощности для уменьшения потерь электроэнергии при ее транспортировке. Для этого целесообразно привлекать управляемые возобновляемые источники электроэнергии. В первую очередь это малые ГЭС, а также солнечные электростанции с групповым инвертором и накопителем электроэнергии. Для определения роли и места управляемых ВИЭ в оптимальном управлении потоками мощности усовершенствован метод оценки чувствительности потерь мощности в ЛЭС к мощности их генерирования. Показано, что определенные в результате анализа чувствительности критериальные зависимости и области оптимальности мощности ВИЭ, в частности малых ГЭС, могут быть использованы для определения зон нечувствительности систем автоматического управления источниками питания и установления порядка корректировки ими потокораспределения в ЛЭС. Установлено, что во время поочередного включения и выключе-

ния РИЭ, в частности солнечных электростанций, возникают гармонические составляющие в узловых напряжениях и в токах ветвей. Анализ повреждаемости оборудования ЛЭС свидетельствуют о влиянии СЭС на эти повреждения. Особенно это касается кабельных муфт, измерительных трансформаторов напряжения и разрядников. Предложена компьютерная модель ЛЭС в программном обеспечении *PS CAD*, которая позволяет исследовать параметры установившихся и переходных процессов в ЛЭС с инверторами СЭС, работающими по ПИ законам управления. Усовершенствована автоматизированная система управления работой ВИЭ в локальной электрической системе. В частности существующая АСК дополнена блоками «Оценка воздействия РИЭ на режим РЭС» и «Корректировка мощности РИЭ». Это позволяет во время оптимального управления режимами ЛЭС учитывать техническое состояние электрооборудования, повышать надежность и качество электроснабжения, уменьшать потери электроэнергии при ее транспортировке. Работоспособность и эффективность предложенных в работе методов и алгоритмов подтверждена вычислительными экспериментами по оптимизации и управлению режимами ЛЭС с возобновляемыми источниками электроэнергии. На основе полученных в работе результатов – условий оптимальности, методов и алгоритмов, усовершенствован комплекс программ интеллектуальной поддержки работы диспетчера распределительных электрических сетей, который передан для опытной эксплуатации в ПАО «Винницаоблэнерго».

Ключевые слова: распределительная электрическая сеть, локальная электрическая система, солнечные и гидроэлектростанции, повреждаемость оборудования, потери электроэнергии, оптимальное потокораспределение, система автоматического управления.

Підписано до друку 13.02.2017 р. Формат 29.7 × 42 ¼

Наклад 100 прим. Зам. № 2017-023

Віддруковано в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі

Вінницького національного технічного університету.

м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95. Тел.: 59-87-38

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи

серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р