

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



ЦИГАНЕНКО БОРИС ВОЛОДИМИРОВИЧ

УДК 621.311.1

**ЕФЕКТИВНІСТЬ РОБОТИ РОЗПОДІЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ
МЕРЕЖ ПРИ ПІДВИЩЕННІ ЇХ КЛАСУ НАПРУГИ**

Спеціальність 05.14.02 – електричні станції, мережі і системи

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ – 2017

Дисертацією є рукопис.

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

Науковий керівник – доктор технічних наук, професор
Кирик Валерій Валентинович, Національний
технічний університет України «Київський
політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,
завідувач кафедри електричних мереж та систем.

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

– кандидат технічних наук, доцент
Гай Олександр Валентинович, Національний
університет біоресурсів і природокористування
України, доцент кафедри електропостачання ім. проф.
В.М. Синькова.

Захист відбудеться « 14 » червня 2017 р. о 15 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 26.002.06 при Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (03056, м. Київ, просп. Перемоги 37, корп. 20, ауд. 3).

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

Автореферат розісланий « 11 » травня 2017 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради



В.О. Шостак

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Розподільні електричні мережі України напругою 0,4...35 кВ представляють кінцеву ланку в системі забезпечення споживачів електричною енергією. Вони перебувають у безпосередній взаємодії як зі споживачем, так і з районними та магістральними електричними мережами. Тому стан та функціонування розподільних електричних мереж впливають на показники надійності, якості і ефективності роботи об'єднаної енергосистеми України. Протяжність електричних мереж таких класів напруги на сьогодні в Україні складає: 0,4 кВ – 449832 км; 6(10) кВ – 332568 км і має тенденцію до щорічного зростання.

В зв'язку із значною кількістю технологічних порушень на об'єктах розподільних електричних мереж електропередавальних організацій, низькими їх експлуатаційними показниками і значними втратами електроенергії в електричних мережах енергосистеми України, які сягають до 12...15 % від загального обсягу виробленої електроенергії, в тому числі у розподільних мережах – 6...9 %, в яких на теперішній час ще експлуатуються мережі напругою 6 кВ, заборонені до використання чинним стандартом ГОСТ 29322 (МЕК 38-83), втрати в яких перевищують 20 %, а напруга в фідерах має наднормативні відхилення, та враховуючи підвищені вимоги до якості надання послуг електропостачання споживачам, які ставить «Національна комісія, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг» (НКРЕКП), необхідним і **актуальним** є підвищення енергоефективності розподільних мереж 6(10) кВ шляхом комплексної реконструкції мереж з переведенням їх на вищий клас напруги 20 кВ при одночасній реконфігурації схеми мережі з наближенням фідерів напругою 20 кВ до споживача для збільшення пропускної спроможності, зниження втрат електроенергії та покращення її показників якості.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертація виконана відповідно до планів наукових досліджень Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», у тому числі господарсько-договірної науково-дослідної роботи «Дослідження можливості переведення електричних мереж СО «Тиврівські ЕМ» ПАТ «Вінницяобленерго» на номінальну напругу 20 кВ» в складі техніко-економічного обґрунтування (ТЕО) «Реконструкція електричних мереж ПАТ «Вінницяобленерго» з переведенням класу напруги 6(10,35) кВ на клас напруги 20 кВ (перший етап реконструкції електричних мереж Гніванського вузла Тиврівського району Вінницької області)» (договір №84-СП/470 від 20 квітня 2016 р.), де здобувач був виконавцем окремих робіт з попереднього аналізу технічного стану електричних мереж 6 кВ на підставі технічної документації та матеріалів періодичних оглядів згідно з ГКД 34.20.661-2003 сумісно з замовником – «Проектно-дослідницький інститут «Енергоінжпроект».

Мета і задачі дослідження. Мета дисертаційної роботи полягає у підвищенні енергоефективності роботи високовольтних розподільних електричних мереж при

переведенні їх з класу напруги 6(10) кВ на напругу 20 кВ шляхом розробки нових методів реконфігурації їх схем з використанням інтелектуальних технологій, які забезпечують зменшення втрат електричної енергії та підвищення її якості.

Відповідно до вказаної мети в роботі вирішуються такі основні задачі:

- узагальнення світового досвіду побудови та розвитку розподільних мереж напругою 20 кВ і аналіз стану та особливостей функціонування високовольтних розподільних мереж в енергосистемі України;
- розроблення методу реконфігурації схеми розподільної мережі в нормальному режимі на основі генетичного алгоритму, що включає математичну модель цільової функції оптимальності реконфігурації розподільної електричної мережі за чотирма критеріями (мінімальною зв'язністю схеми, відхиленням напруги, економічною складовою збитків від недовідпуску електроенергії, втратами активної потужності);
- розроблення методу реконфігурації схеми розподільної мережі на основі синтезу нечіткого логічного контролера для прийняття рішення щодо значення рейтингів вимикачів у резервних перемикачах між двома фідерами з визначенням місць розміщення (активації) резервних комутаційних перемичок при забезпеченні значення мінімальних втрат електроенергії та нормованого режиму за напругою у разі аварійних вимикань фідерів за допустимості післяаварійного режиму;
- розроблення нечіткої математичної моделі для критерію переведення розподільної електричної мережі 6(10) кВ на клас напруги 20 кВ шляхом аналізу параметрів стану мережі.

Об'єктом дослідження є розподільні електричні мережі високої напруги.

Предметом дослідження є математичні методи реконфігурації схем мережі в нормальному і післяаварійному режимах та математичні моделі визначення критерію переведення розподільної мережі 6(10) кВ на напругу 20 кВ.

Методи дослідження. У дисертації для аналізу та розв'язання поставлених задач використані методи математичного моделювання на основі сучасних інтелектуальних технологій, зокрема, нечітких множин, нечіткої логіки та генетичних алгоритмів, які моделюють розумову діяльність людини та біологічну еволюцію; матрична алгебра. Моделювання та аналіз усталених режимів електричної мережі виконувався методами контурних струмів та вузлових напруг із застосуванням методу Ньютона. Перевірка ефективності розроблених методів та алгоритмів проводилася на основі аналізу результатів моделювання на програмних комплексах розрахунку режимів.

Наукова новизна одержаних результатів:

1. Запропоновано новий метод реконфігурації схеми розподільної мережі в нормальному режимі на основі генетичного алгоритму, який, на відміну від існуючих, забезпечує формування оптимальної конфігурації мережі за цільовою функцією, мінімізація якої виконується одночасно за чотирма критеріями (зв'язністю схеми, відхиленням напруги, економічною складовою збитків від недовідпуску електроенергії, втратами активної потужності);

2. Розроблено новий метод реконфігурації схеми розподільної мережі з визначенням місць розміщення (активації) резервних комутаційних перемичок на основі синтезу нечіткого логічного контролера для прийняття рішення щодо значення рейтингів вимикачів у резервних перемичках між двома фідерами за трьома критеріями (відхиленням напруги на найвіддаленішому пункті схеми, значенням коефіцієнта потужності та величиною струму на головній ділянці фідера), що дозволяє забезпечити мінімальне значення втрат електроенергії в післяаварійних режимах;

3. Вперше розроблено нечітку математичну модель для критерію переведення розподільної мережі 6(10) кВ на напругу 20 кВ, яка дає змогу шляхом аналізу параметрів стану мережі визначити пріоритет її переведення на напругу 20 кВ, що дозволить визначити черговості використання інвестицій.

Практичне значення одержаних результатів. Практична цінність роботи полягає в наступному:

1. Виконані узагальнення світового досвіду побудови та розвитку розподільних мереж напругою 20 кВ та аналіз стану і особливостей функціонування високовольтних розподільних мереж в енергосистемі України дали можливість розробити концепцію розподільних мереж 20 кВ для їх впровадження в об'єднану енергосистему (ОЕС) України та визначити підходи до реалізації інвестиційних проектів НКРЕКП (Довідка про впровадження результатів наукової роботи від 17.01.2017 р.);
2. Використання запропонованих методів реконфігурації дало змогу визначити оптимальну конфігурацію схеми Тиврівських електричних мереж ПАТ «Вінницяобленерго» напругою 6 кВ при переведенні їх на напругу 20 кВ з симетруванням навантаження по фідерах у нормальному режимі та визначити місця розміщення резервних перемичок у післяаварійних режимах (Акт впровадження результатів наукової роботи від 14.11. 2016 р.);
3. Результати проведених досліджень дали змогу сформулювати технічні вимоги для актуалізації нормативної бази та розробки нових національних стандартів і технічних регламентів у Відокремлений підрозділ «Науково-проектний центр розвитку Об'єднаної енергетичної системи України» ДП НЕК «Укренерго» (Акт використання результатів наукової роботи від 16.12. 2016 р.);
4. Результати роботи були використані на засіданні секції «Електроенергетики» Науково-технічної ради Міненерговугілля України (від 14.09.2016) при схваленні «Плану розвитку розподільних електричних мереж на 2016-2020 роки» та «Плану розвитку розподільних електричних мереж на 2020-2025 роки», а також при формуванні основних вимог до технічних завдань для розробки «Альбому типових рішень ПЛ-20 кВ», «Альбому типових рішень ПС-20 КВ» та нормативних документів щодо розробки силових трансформаторів на напругу 20 кВ (Довідка про впровадження результатів наукової роботи від 10.01. 2017 р.).

Окремі результати дослідження увійшли в звіт господарсько-договірної науково-дослідної роботи (№84-СП/470 від 20 квітня 2016 року) «Дослідження можливості переведення електричних мереж СО «Тиврівські ЕМ» ПАТ

«Вінницяобленерго» на номінальну напругу 20 кВ» в складі техніко-економічного обґрунтування (ТЕО) «Реконструкція електричних мереж ПАТ «Вінницяобленерго» з переведенням класу напруги 6(10,35) кВ на клас напруги 20 кВ (перший етап реконструкції електричних мереж Гніванського вузла Тиврівського району Вінницької області)».

Особистий внесок здобувача. Основні результати дисертаційної роботи, що виносяться на захист, отримано автором самостійно. У роботах, опублікованих у співавторстві, здобувачеві належать аналіз стану розподільних мереж та режимів їх роботи, формалізація поставлених задач, розробка методів та узагальнення результатів, а саме: [8] – обґрунтовано використання силових кабелів з ізоляцією зі зшитого поліетилену; [2] – на основі розрахунку режимів роботи електричних мереж Тиврівського району ПАТ «Вінницяобленерго» досліджено методи реконфігурації схеми мережі та запропоновано шлях попереднього формування популяції схем конфігурації для еволюційного аналізу; [5] – розроблено модель критерію переведення розподільної мережі на напругу 20 кВ на основі аналізу параметрів стану розподільної мережі; [3] – виконано аналіз роботи розподільних мереж України, розроблено моделі регулювання та висвітлено чинники переведення їх на вищий клас напруги; [10] – обґрунтовано принципи побудови мереж 20 кВ, умови їх реалізації та першочергові заходи по впровадженню мереж середньої напруги класу 20 кВ; [6] – розроблено метод визначення місця встановлення резервних перемичок розподільної електричної мережі в післяаварійному режимі; [9] – виконано аналіз факторів впливу на показники якості електропостачання в мережах середньої напруги;

Апробація результатів дисертації. Основні положення роботи та її головні результати доповідалися та обговорювалися на Міжнародному брифінгу «POWER-GEN International» (EIR CENTER, PennWell, USA, 2014); на III Міжнародній науково-технічній конференції «Оптимальне керування електроустановками – ОКЕУ 2015» (м. Вінниця, 2015); на XIV Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми сучасної електротехніки (ПСЕ-2016)» (м. Київ, 2016 р.); на II Міжнародній науковій та практичній конференції "Topical researches of the World Science" (Dubai, UAE, 2016 р.); на XVI Міжнародній науково-практичній конференції «Відновлювана енергетика XXI століття» (м. Київ, 2016 р.); на I Міжнародній науково-технічній конференції «Smart-технології в енергетиці та електроніці - 2016» (STEE-2016) (сmt. Лазурне Скадовського району Херсонської області, Україна, 2016 р.); на Всеукраїнській науково-практичній конференції ПАТ «Хмельницькобленерго» «Розподільчі мережі 0,4-35 кВ як складова частина локальних електроенергетичних систем майбутнього» (сmt. Ярмолинці, Ярмолинецький р-н, Хмельницька обл., 2016 р.); на XIV Міжнародному форумі «Паливно-енергетичний комплекс України: сьогодення та майбутнє» (м. Київ, 2016 р.);

Публікації. За результатами досліджень опубліковано 10 наукових праць, у тому числі шість статей у наукових фахових виданнях України (одна стаття у виданні України, яке включено до міжнародної наукометричної бази SCOPUS, чотири статті у виданнях України, які включено до міжнародних наукометричних

баз), дві тези доповідей у збірниках за матеріалами міжнародних конференцій та дві статті в інших виданнях.

Обсяг та структура дисертаційної роботи. Дисертаційна робота складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел (161 найменування) і додатків. Основний зміст викладено на 174 сторінках друкованого тексту, містить 29 таблиць, 80 рисунків. Загальний обсяг дисертації – 271 сторінка.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтована актуальність теми дисертаційного дослідження, сформульовані мета та задачі дисертаційної роботи, викладені наукова новизна та практична цінність отриманих результатів, наведені відомості про публікації, апробацію та впровадження основних результатів дисертаційних досліджень.

У **першому розділі** проведено оцінку стану та функціональних параметрів високовольтних розподільних мереж в енергосистемі України. Проаналізовано світовий досвід побудови та розвитку розподільних мереж 20 кВ в енергосистемах різних країн. Виявлено особливості топології розподільних мереж 20 кВ та перспективи їх розвитку.

Установлено, що розвиток розподільних електричних мереж енергосистеми України уповільнений в силу ряду об'єктивних факторів – відсутність інвестицій, щільність існуючої забудови та тривалі процедури узгодження проектних рішень із питань розміщення об'єктів електричних мереж (РП, ТП) і проходження трас, насиченість підземних комунікацій та необхідність координації питань прокладання інженерних комунікацій. Значна кількість технологічних порушень на об'єктах розподільних електричних мереж напругою 6...150 кВ електропередавальних організацій та низькі експлуатаційні показники мереж свідчать про те, що вони є слабкочувливими з недостатнім рівнем використання автоматизованих систем оперативно-диспетчерського управління. В мережах 6(10) кВ спостерігається досить високий рівень аварійності та технологічних порушень. Розподільні мережі середньої напруги перевантажені й інфраструктура мережі не відповідає її завантаженню.

Враховуючи сьогоденні реалії в електричних мережах енергосистеми України, коли втрати електроенергії в сягають 12...15 % від загального обсягу виробленої електроенергії, в тому числі в розподільних мережах – 6...9 % і те, що в розподільних мережах практично у всіх обленерго ще експлуатуються мережі напругою 6 кВ, втрати в яких перевищують 20 % при зношеності електрообладнання на рівні 45...80 %, і вагомому зростанні у великих містах територіальної щільності навантаження, в розподільних мережах нарізла необхідність зміни її топології зі скороченням частки мережі 0,4 кВ та збільшенням пропускної спроможності шляхом переведення високовольтних розподільних мереж з напруги 6(10) кВ на напругу 20 кВ.

Основним чинником впровадження мереж напругою 20 кВ в таких країнах світу як Франція, Німеччина, Австрія, Швеція, Фінляндія, Латвія, Японія, Болгарія, Чехія, Словаччина, США, Сінгапур, Корея, Тайвань, Китай і багато інших, стало збільшення територіальної щільності навантаження і значні втрати електроенергії. В

кінці минулого століття в багатьох розвинених країнах світу територіальна щільність сягнула 5...7 МВт/км². На сьогодні у великих містах Європи, Азії та Америки вона досягає 10...30 МВт/км², а в деяких районах – 100...250 МВт/км². При перевищенні поверхневої щільності навантаження вище 5 МВт/км² у містах та 15...60 кВт/км² (при довжині лінії більше 6 км) у сільській місцевості, вважається економічно доцільним використання мереж напругою 20 кВ.

Проведений аналіз підтверджує, що для підвищення енергоефективності розподільних електричних мереж зі зменшенням втрат електроенергії та забезпеченням нормативних значень її якості необхідна науково обґрунтована комплексна реконструкція мереж напругою 6(10) кВ з переведенням їх на клас напруги 20 кВ, яка потребує розробки концепції мереж такого класу в енергосистемі України зі змінами у підходах до формування топології розподільних мереж на основі розроблення нових методів реконфігурації мереж з використанням сучасних математичних апаратів інтелектуальних технологій.

У другому розділі представлені розробка та дослідження багатокритеріальних методів реконфігурації розподільних мереж на основі математичних апаратів генетичних алгоритмів та нечіткої логіки, які забезпечують обґрунтовані рішення щодо зміни конфігурації розподільної електричної мережі в нормальних та післяаварійних режимах.

На сьогодні для розв'язання задачі визначення оптимальної конфігурації розподільної електричної мережі, зазвичай використовують оціночні моделі, які базуються на порівнянні декількох варіантів побудови електричної мережі. В більшості випадків реконфігурація схеми мережі виконується за одним критерієм при введенні певних обмежень. Класичні оптимізаційні моделі та методи при багатокритеріальній реконфігурації не можуть забезпечити прийняття оптимального рішення щодо зміни конфігурації розподільної мережі через складність цієї задачі, обумовлену багатокритеріальністю постановки в умовах відсутності достовірної формалізованості стану мережі при невизначеному характері інформації про її параметри. Тому для визначення оптимальної конфігурації розподільної електричної мережі в нормальному режимі було використано математичний апарат генетичних алгоритмів.

Для розв'язання задачі реконфігурації робочої схеми розподільної електричної мережі на основі генетичного алгоритму запропоновано цільову функцію (фітнес-функцію), яка дає змогу одночасно за чотирма критеріями (мінімальною зв'язаністю схеми, відхиленням напруги, економічною складовою збитків від недовідпуску електроенергії, втратами активної потужності) забезпечити формування оптимальної конфігурації електричної мережі:

$$\Phi = k_1 \sum_{i=1}^N K_i + k_2 \sum_{i=1}^M |\delta U_i| + k_3 \sum_{i=1}^M \alpha_i P_i Y_i + k_4 \sum_{i=1}^L \Delta P_i \rightarrow \min, \quad (1)$$

де k_1, k_2, k_3, k_4 – вагові коефіцієнти, призначені для поєднання у складі цільової функції неспіввимірних параметрів; K_i – сигнальний коефіцієнт, який дорівнює одиниці у разі, якщо контакти i -го комутаційного апарата замкнено, і нулю, якщо контакти i -го комутаційного апарата розімкнено; N – загальна кількість

комутаційних апаратів, які визначають конфігурацію робочої схеми електричної мережі; δU_i – відхилення робочої напруги i -го пункту схеми за допустимі межі; M – загальна кількість вузлових точок у складі схеми; α_i – ступінь обмеження навантаження i -го пункту робочої схеми у разі виникнення аварійного збурення; P_i – активна потужність навантаження i -го пункту схеми; Y_i – питомі економічні збитки, обумовлені обмеженням навантаження i -го пункту схеми; ΔP_i – втрати активної потужності на i -й ділянці робочої схеми розподільної електричної мережі; L – загальна кількість ділянок у складі робочої схеми.

Очевидно, що цільова функція оптимальності реконфігурації (1) має чотири складових критерії. Перший критерій функції забезпечує мінімальну зв'язність робочої схеми розподільної мережі; другий критерій – якість електричної енергії в точках приєднання абонентів за напругою; третій критерій – якість електропостачання, тобто економічну складову збитків від недовідпуску електроенергії; четвертий – економічність робочого режиму системи за втратами потужності в мережі.

Важливою є задача вибору вагових коефіцієнтів $k_1 - k_4$ критеріїв, які поєднують неспіввимірні параметри у складі цільової функції оптимальності робочої схеми. Така задача є досить складною, вона не має загальновизнаного рішення.

Під час визначення числових значень вагових коефіцієнтів запропоновано приводити всі чотири складові цільової функції до одного порядку, наприклад, до одиниці та враховувати їх взаємний вплив:

а) у разі втрати зв'язності мережі внаслідок надмірного розмикання ділянок робочої схеми, зменшення першого доданку цільової функції має бути скомпенсоване збільшенням суми другого та третього доданків. Математична модель таких випадків має вигляд

$$\begin{cases} k_1 \leq k_2 + k_3 P_{\min} Y; \\ k_1 N \leq k_2 M + k_3 P_{\text{уст}} Y, \end{cases}$$

де P_{\min} – потужність навантаження найменш завантаженої трансформаторної підстанції (ТП) у складі розрахункової схеми; $P_{\text{уст}}$ – встановлена потужність електричної мережі. Тут перше рівняння відповідає втраті живлення однієї ТП, потужність навантаження якого найменша в електричній мережі. Друге рівняння відповідає повному «погашенню» мережі внаслідок розмикання всіх ділянок робочої схеми;

б) можливе збільшення сумарних втрат потужності після розмикання контурів схеми, яка характеризується помірною неоднорідністю, має бути скомпенсоване зменшенням першого доданку цільової функції

$$k_1 \geq k_4 \delta \Delta P$$

де $\delta \Delta P$ – збільшення сумарних втрат активної потужності після розмикання контурів схеми з помірною неоднорідністю.

Зазначеним вимогам відповідають співвідношення числових значень вагових коефіцієнтів, які отримані шляхом зведення окремих показників оптимальності схеми до одиниці:

$$\begin{cases} k_1 = 1/N; \\ k_2 = 1/M; \\ k_3 = \frac{1}{P_{\text{уст}} Y} = \frac{1}{(3,5...4)P_{\text{уст}}}; \\ k_4 = \frac{1}{P_{\text{уст}}} \end{cases}$$

В розробленому методі конфігурація робочої схеми досліджуваної електричної мережі можна подати за допомогою бітового ланцюжка, кожний біт якого містить інформацію про стан відповідної ділянки схеми. Отже, загальний простір пошуку складається з 2^n можливих станів, де n – загальна кількість ділянок схеми електричної мережі.

З метою прискорення роботи, підвищення ефективності генетичних алгоритмів та зниження ймовірності розглядання незв'язних схем електричної мережі, запропоновано штучно обмежувати простір пошуку оптимальної конфігурації мережі шляхом виділення зон безумовних атракторів джерел живлення (рис. 1), які містять ділянки схеми, що забезпечують живлення визначених споживачів за будь-яких поєднань допустимих параметрів режимів, і які не змінюються при формуванні популяції схемних рішень.

Решту частину схеми утворює «погранична» зона, в якій безпосередньо здійснюється пошук місць розміщення резервних перемичок. Виділення безумовних зон атракторів джерел живлення та «пограничної» зони у складі схеми розподільної

електричної мережі дає змогу суттєво скоротити простір пошуку оптимального рішення та підвищити ефективність застосування математичного апарату генетичних алгоритмів до розв'язання оптимізаційної задачі.

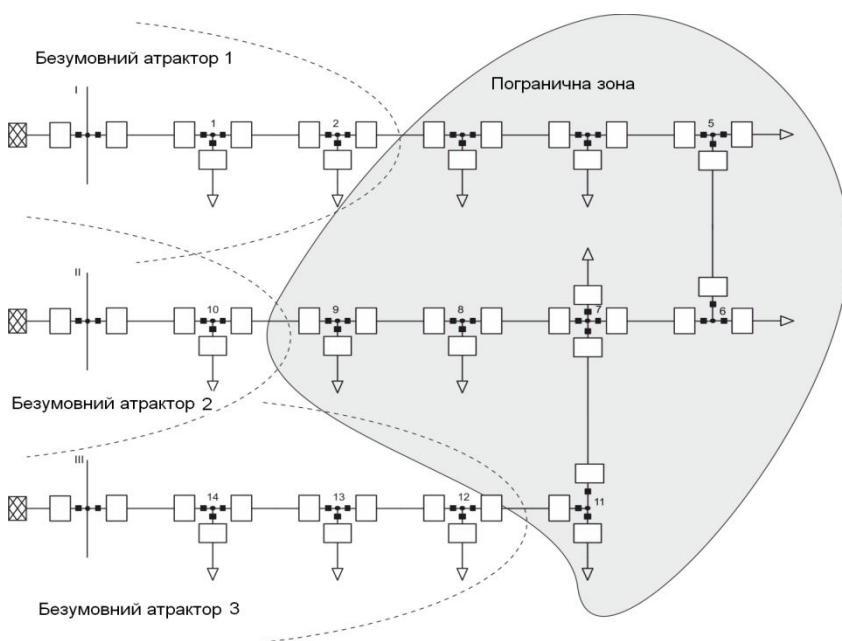


Рис. 1. Безумовні атрактори та «погранична» зона в розподільній електричній мережі

Знаходження оптимальної реконфігурації розподільної електричної мережі з використанням апарата генетичних алгоритмів полягає в виконанні наступних процедур.

1. Проглядають послідовно (попарно) всі джерела живлення розподільної мережі і на основі мінімаксного підходу виділяють зони безумовного атрактора кожного джерела. Для цього максимізують потужності навантажень абонентських підстанцій одного джерела живлення та мінімізують потужності навантажень іншого джерела живлення. Далі за виразом

$$l_x = \frac{\sum_{i=1}^N P_i l_{0i}}{\sum_{i=1}^N P_i},$$

де N – загальна кількість ділянок лінії з двобічним живленням; l_i – довжина i -ї ділянки схеми; P_i – активна потужність навантаження пункту наприкінці i -ї ділянки; l_{0i} – відстань від початку лінії до кінця i -ї ділянки, визначають ділянку схеми, до якої належить електричний центр навантажень. Умовне вилучення цієї ділянки поділяє схему на дві незв'язні частини, одна з яких визначає зону безумовного атрактора поточного джерела живлення. Саме такі операції виконують також для інших джерел живлення. Частина схеми, яка не потрапила до складу жодного безумовного атрактора утворює «пограничну» зону, в якій буде здійснюватись пошук місць розміщення резервних перемичок.

2. Визначають спосіб кодування генетичної інформації про конфігурацію розподільної електричної мережі. Для цього формують бітовий ланцюжок, довжина якого дорівнює кількості ділянок у складі «пограничної» зони. Кожний біт такого ланцюжка визначає стан відповідної ділянки схеми («1» – ділянка знаходиться у роботі; «0» – ділянка є резервною перемичкою).
3. Формують початкову популяцію можливих конфігураційних рішень (схем) розподільної електричної мережі. Обсяг початкової популяції залежить від розмірності «пограничної» зони схеми та перебуває у межах 20-30 особин. Формують фенотипи всіх конфігурацій схем, тобто особин початкової популяції. Одна з таких особин має відповідати вихідній схемі розподільної мережі. Решту фенотипів заповнюють за допомогою генератора випадкових чисел із рівномірним розподілом.
4. Для всіх особин початкової популяції конфігурацій можливих робочих схем обраховують значення цільової функції (1), яка визначає ступінь оптимальності відповідного конфігураційного рішення. Також визначають усереднене значення цільової функції для початкової популяції в цілому.
5. Формують колесо «рулетки» для визначення поточної «батьківської» пари конфігурацій схем розподільної електричної мережі. Для цього умовне колесо поділяють на сектори. Кількість секторів дорівнює кількості особин поточної популяції. Ширина сектора має бути тим більшою, чим менше значення цільової функції для відповідного конфігураційного рішення. Ширину кожного сектора у відносних одиницях визначають за виразами

$$\Phi'_i = \frac{1}{\Phi_i}; \quad \Delta_i = \frac{\Phi'_i}{\sum_{i=1}^N \Phi'_i},$$

де Φ_i - значення цільової функції для схеми поточної популяції; i – індекс поточної схеми (особини) у складі популяції; N – загальна кількість схем у складі популяції; Δ_i – ширина сектору «рулетки», який відповідає i -й схемі популяції у відносних одиницях.

6. За допомогою генератора випадкових чисел з рівномірним розподілом двічі «запускають» колесо «рулетки» та визначають дві особини поточної популяції, генетичний матеріал яких буде використано для формування нового дочірнього технічного рішення.
7. До обраної батьківської пари застосовують генетичний оператор двоточкового кросинговеру, результатом виконання якого буде формування нового дочірнього рішення.
8. За допомогою генератора випадкових чисел із рівномірним розподілом визначають необхідність застосування генетичного оператора мутації до сформованого нового фенотипу і у разі необхідності застосовують такий оператор.
9. Для нового конфігураційного рішення за виразом (1) обчислюють значення цільової функції оптимальності.
10. Формують колесо «рулетки» для визначення особини поточної популяції, яку замінить згенероване нове рішення. У цьому разі ширина секторів колеса має бути тим більшою, чим більше значення цільової функції відповідного фенотипу. Таку ширину у відносних одиницях обчислюють за виразами

$$\Delta_i = \frac{\Phi_i}{\sum_{i=1}^N \Phi_i}$$

За допомогою генератора випадкових чисел із рівномірним розподілом виконують одноразовий «запуск» колеса «рулетки» та визначають особину поточної популяції, яку замінить нове дочірнє конфігураційне рішення. Виконують таке заміщення та перераховують усереднене значення цільової функції для оновленої популяції, тобто множини схем.

11. Перевіряють умови збіжності генетичного алгоритму. Якщо кількість поколінь згенерованих дочірніх рішень досягла граничного значення або всі фенотипи поточної популяції можливих конфігурацій схем електричної мережі збіглися до одного рішення, роботу генетичного алгоритму завершують, а найкраще (з найменшим значенням цільової функції) конфігураційне рішення схем поточної популяції подають як оптимальне. В іншому разі виконують наступний цикл генетичного алгоритму, починаючи з процедури 5.

Для визначення місця встановлення резервних перемичок розподільної електричної мережі в післяаварійному режимі розроблено метод на основі використання лінгвістичних міркувань, які реалізуються нечітким логічним

контролером відповідно до створеної бази правил експертних знань. Метод дає можливість приймати обґрунтовані рішення щодо визначення оптимальної конфігурації схеми розподільної мережі при аварійних відключеннях фідерів на основі формування нечітким логічним контролером (НЛК) рейтингу комутуючих елементів можливих резервних переминок за трьома критеріями (падінням напруги на кінцевій ділянці робочого фідера, значенням струму та коефіцієнта потужності на головній ділянці) з подальшим знаходженням оптимальної перемички за мінімальними втратами електроенергії в мережі для комутуючих елементів з максимальним значенням рейтингу.

На основі розрахунку режимних параметрів мережі (потокорозподілу по ділянках, напруги в пунктах, струму на головній ділянці, коефіцієнту потужності $\cos \varphi$ на головній ділянці, сумарних втратах потужності по фідеру), які розраховані для i конфігурацій схем по кожному фідеру живлення, визначають вхідні лінгвістичні змінні нечіткого логічного контролера. Вихідною лінгвістичною змінною контролера є рейтинг «rating» R_{i1} та R_{i2} активного елемента (вимикача Q_i), тобто НЛК формує множину рейтингів $\{R_{11}, R_{21}, \dots, R_{i1}\}$ вимикачів Q_i у схемі живлення від першого $f1$ фідера та множину рейтингів $\{R_{12}, R_{22}, \dots, R_{i2}\}$ тих же вимикачів у схемі живлення від другого $f2$ фідера. У подальшому визначається максимальний рейтинг на одній та другій множинах:

$$R_{k1} = \max\{R_{11}, R_{21}, \dots, R_{i1}\}, \quad R_{l2} = \max\{R_{12}, R_{22}, \dots, R_{i2}\},$$

де k – номер вимикача з максимальним рейтингом, **при $1 \leq k \leq i$** для одного фідера і l – номер вимикача з максимальним рейтингом **для другого фідера при $1 \leq l \leq i$** .

У випадку, коли вимикач має максимальні рейтинги при живленні від фідерів $f1$ та $f2$, тобто $k = l$, номер вимикача для резервної перемички визначається однозначно.

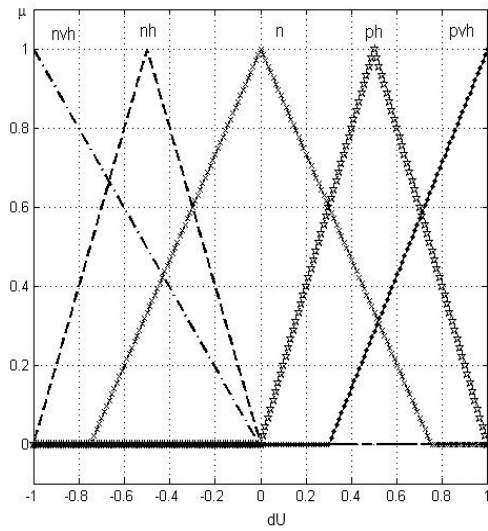
В інших випадках, коли вимикач може мати максимальний рейтинг при живленні схеми від одного фідера, і нижчий максимального при живленні від другого фідера, номер вимикача для резервної перемички визначається шляхом визначення мінімального значення сумарних втрат потужності для конфігурацій схем з перемичками, що реалізовані вимикачами Q_k та Q_l , які мають в одному з варіантів схеми максимальний рейтинг

$$\min[(\Delta S_{\Sigma}^{kf1} + \Delta S_{\Sigma}^{kf2}), (\Delta S_{\Sigma}^{lf1} + \Delta S_{\Sigma}^{lf2})] \Rightarrow (Q_k | Q_l),$$

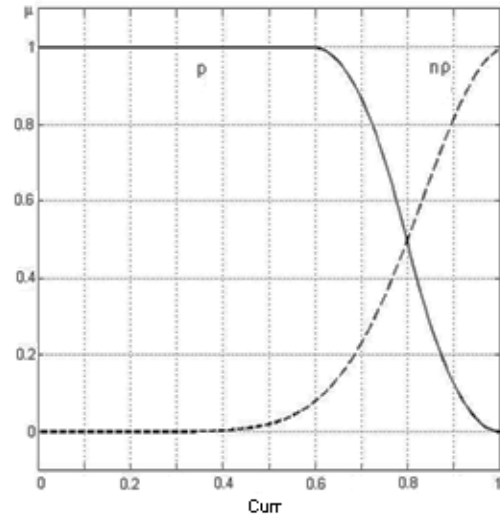
де $\Delta S_{\Sigma}^{kf1}, \Delta S_{\Sigma}^{kf2}$ – сумарні втрати потужності для конфігурації схем з перемичкою, яка реалізована вимикачем Q_k відповідно при живленні від фідерів **$f1$ та $f2$** ; $\Delta S_{\Sigma}^{lf1}, \Delta S_{\Sigma}^{lf2}$ – сумарні втрати потужності для конфігурації схем з перемичкою, яка реалізована вимикачем Q_l відповідно при живленні від фідерів **$f1$ та $f2$** .

На рис. 2 представлено терм-множини лінгвістичних змінних НЛК, а на рис. 3 поверхні відгуку нечіткого логічного контролера.

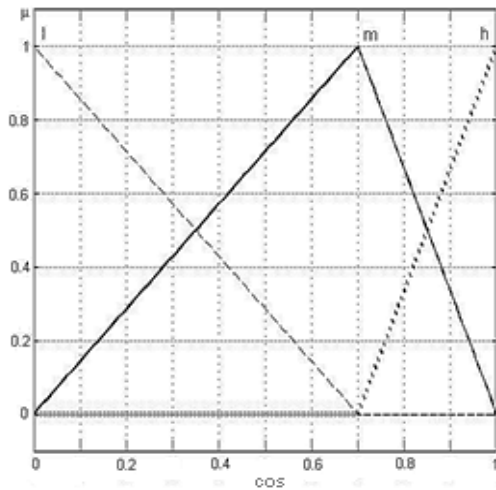
Третій розділ присвячено розробці нечіткої математичної моделі для критерію переведення розподільної мережі 6(10) кВ на напругу 20 кВ.



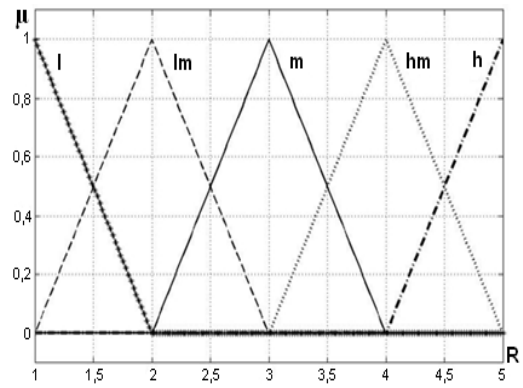
а



б



в



г

Рис. 2. Терм-множини лінгвістичних змінних: а – dU «відхилення напруги»; б – $Curr$ «Струм»; в – \cos «коефіцієнт потужності»; г – R «rating»

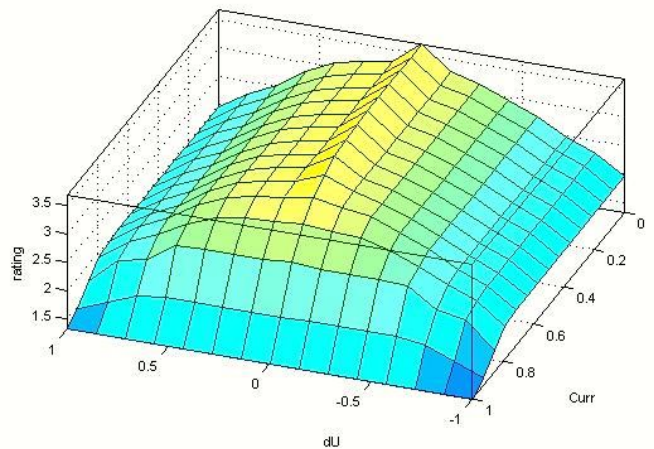
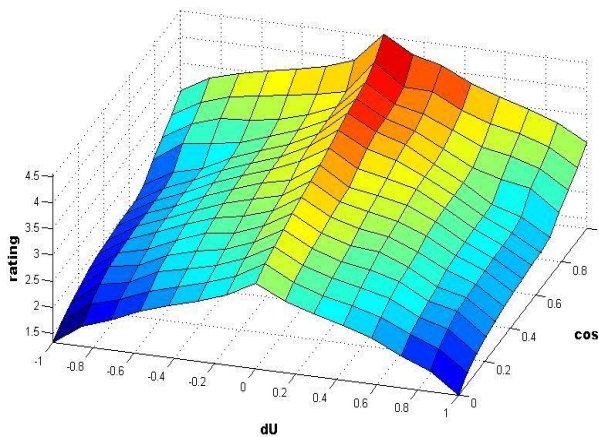


Рис. 3. Залежність рейтингу вимикача резервної перемички від: а – відхилення напруги на найвіддаленому пункті та коефіцієнта потужності на головній ділянці; б – відхилення напруги на найвіддаленому пункті та струму на головній ділянці

Модель дає змогу шляхом аналізу параметрів стану мережі визначити пріоритет її переведення на напругу 20 кВ на основі синтезу нечіткого логічного контролера.

Для аналізу стану мережі S прийнято дев'ять параметрів, які представлено такими відповідними лінгвістичними змінними: сумарна довжина ліній 6 кВ – $line_6kv$; період функціонування – $time_net$; середня довжина фідерів мережі – $length_net$; навантаження – $load$; тенденція зміни навантаження – $tendency$; територіальна щільність навантаження – $density_MW/km2$; індекс середньої тривалості відключень – $SAIDI$; індекс середньої частоти відключень – $SAIFI$; населення району електропостачання – $population$.

Модель критерію переведення мережі на 20 кВ на основі нечіткого логічного рішення представляється як деяка функція F від стану $S = \{line_6kv, time_net, length_net, load, tendency, density, SAIDI, SAIFI, population\}$, яка ставить у відповідність кожному стану мережі деяке дійсне число пріоритету p з діапазону $[0, 10]$, через функцію належності $\mu(p)$ нечіткого логічного висновку:

$$P = F(S): P \rightarrow \{\mu(p)/p\}, p \in [0, 10].$$

Структурну схему нечіткого логічного контролера з базою знань з 47 правил представлено на рис. 4.

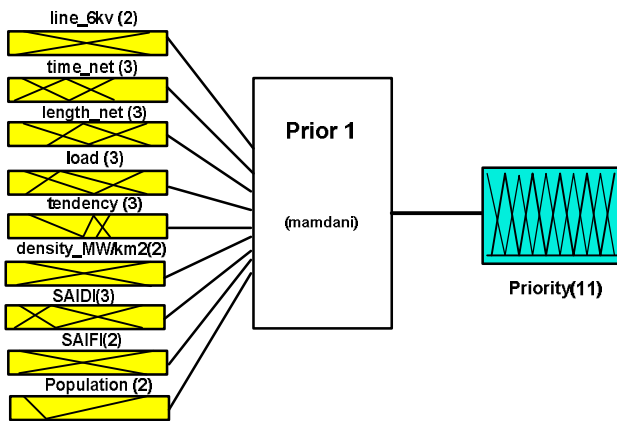


Рис. 4. Структурна схема нечіткого логічного контролера

Нечіткі змінні, які представляють дев'ять лінгвістичних змінних, описані

трапецієподібними

$$\mu(x; a, b, c, d) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ 1, & b \leq x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c}, & c \leq x \leq d \\ 0, & d \leq x \end{cases}, \quad (2)$$

та трикутними функціями належності

$$\mu_{\Delta}(x; a, b, c) = \begin{cases} \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b \leq x \leq c \\ 0, & c \leq x \end{cases}. \quad (3)$$

При формуванні рішення щодо пріоритету, функції належності (ФН) нечітких змінних висновків правил обмежуємо степенями виконання умов, що отримані на етапі об'єднання, і в процесі накопичення результату дії правил шляхом формування максимуму визначається нечітка множина висновку $\{\mu(p)/p\}, p \in [0, 10]$.

Числове значення пріоритету p переведення мережі на напругу 20 кВ визначається за методом центра ваги (centroid, COG).

На рис. 5 та рис. 6 представлені характерні залежності пріоритету від параметрів мережі.

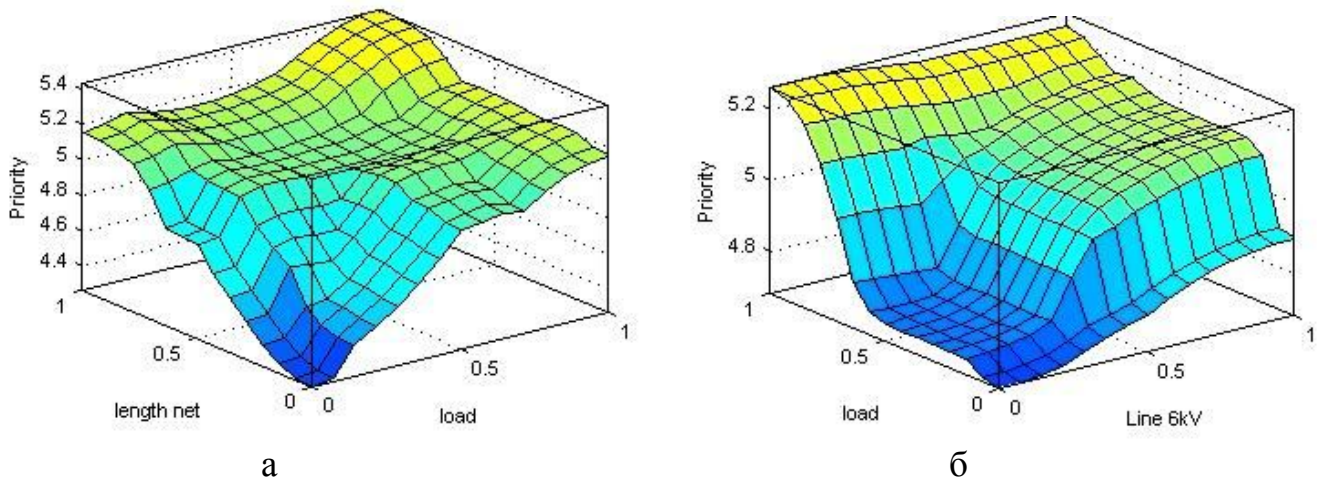


Рис. 5. Поверхні залежності пріоритету *priority* від вхідних параметрів: а – *length_net*, *load*; б – *load*, *line_6kv*

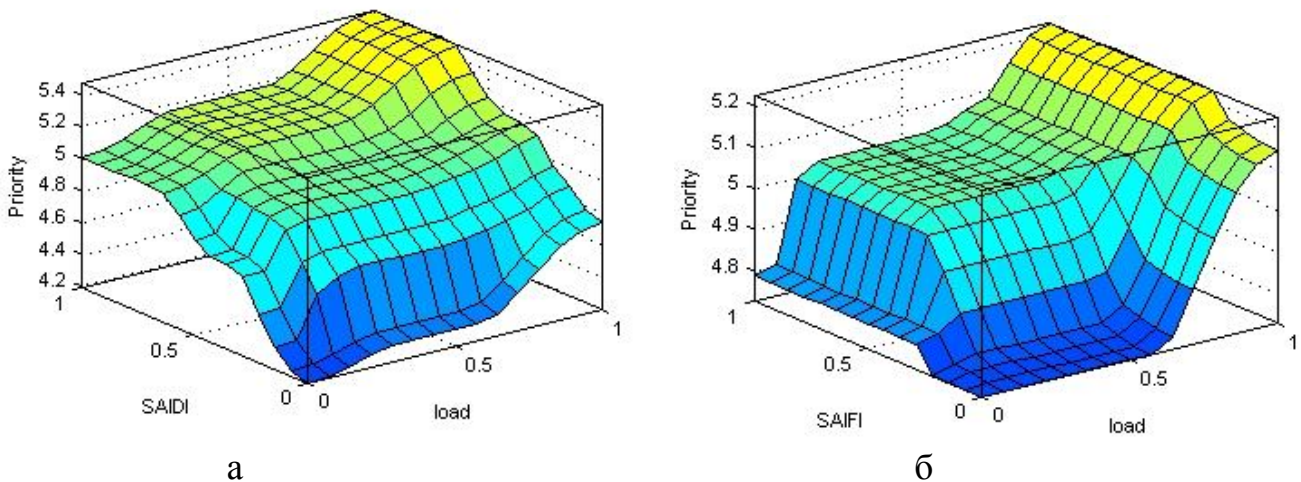


Рис. 6. Поверхні залежності пріоритету *priority* від вхідних параметрів: а – *SAIDI*, *load*; б – *SAIFI*, *load*

Аналіз результатів імітаційного математичного моделювання значень пріоритету мережі дозволив установити критерій щодо переведення мережі на напругу 20 кВ:

- при значенні пріоритету в межах від 0 до 2,3 мережа не підлягає переведенню на напругу 20 кВ;
- при значенні пріоритету в межах від 2,3 до 4,7 мережа підлягає переведенню на 20 кВ за умови техніко-економічного обґрунтування;
- при перевищенні значення пріоритету 4,7 мережа однозначно підлягає переведенню на напругу 20 кВ.

У четвертому розділі представлена практична реалізація розподільної електричної мережі 20 кВ з використанням метода реконфігурації розподільної мережі на основі математичного апарата генетичних алгоритмів при виконанні першого в Україні пілотного проекту переведення електричних мереж напругою 6(10) кВ СО «Тиврівські ЕМ» ПАТ «Вінницяобленерго» на номінальну напругу 20 кВ, який виконувався кафедрою електричних мереж та систем НТУУ «КПІ імені

Ігоря Сікорського» спільно з ТОВ «Проектно-дослідницький інститут «Енергоінжпроект».

Для розподільних електричних мереж напругою 6 кВ Гніванського вузла Тиврівських електричних мереж ПАТ «Вінницяобленерго», який складається з 188 ділянок, було визначено безумовні атрактори та погранична зона з 52 ділянок (рис. 7).

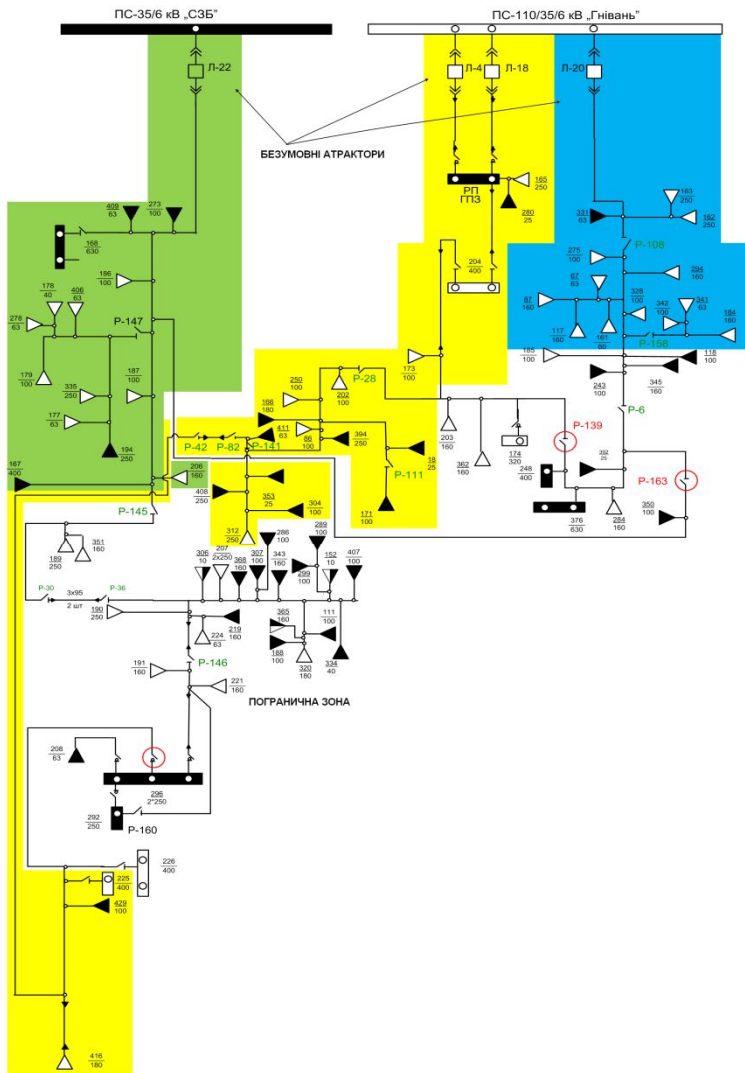


Рис. 7. Безумовні атрактори фідерів (виділено кольором) та «погранична» зона розподільної електричної мережі

Початкова популяція для виконання генетичного алгоритму складалась з 20 схем, одна з яких відповідає конфігурації робочої схеми за поточного положення розімкнених резервних перемичок. Після виконання 30 повних циклів генетичного алгоритму (рис. 8) було досягнуто мінімуму цільової функції та визначено оптимальну конфігурацію схеми мережі.

Застосування запропонованого підходу до визначення зон безумовних атракторів джерел живлення та пограничної зони пошуку оптимального рішення дало змогу скоротити простір пошуку місць розмикання зі 188 ділянок до 52 та відповідно час прийняття рішення з 90 с до 5 с.

Оптимальна реконфігурація розподільних мереж обумовила зниження сумарних втрат активної потужності приблизно до 10 % (з 0,19 до 0,17 МВт) в порівнянні з вихідною схемою 20 кВ.

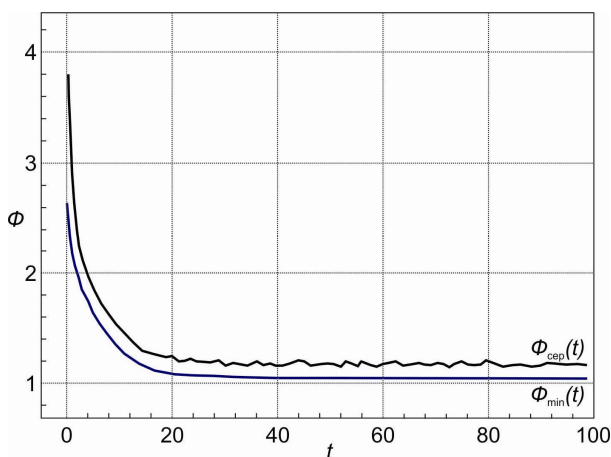


Рис. 8. Динаміка зміни значення цільової функції оптимальності реконфігурації Φ в поколіннях

В додатку приведено дані для налаштування нечіткого контролера, розрахунки режимів мереж та акти впровадження результатів дисертаційної роботи.

ВИСНОВКИ

В роботі отримано нове розв'язання актуальної науково-прикладної задачі розробки нових методів реконфігурації розподільних мереж високої напруги на основі математичних апаратів генетичних алгоритмів та нечіткої логіки, які забезпечують додаткове зменшення втрат електричної енергії та підвищення її якості, при переведенні мереж з класу напруги 6(10) кВ на напругу 20 кВ.

Основні результати дисертаційного дослідження:

1. Аналізом становлення та розвитку розподільних мереж в енергосистемах розвинених країн Європи, Азії та Америки підтверджено, що основним напрямком підвищення ефективності роботи електричних високовольтних розподільних мереж є комплексна їх реконструкція, яка включає не тільки підвищення їх класу напруги, а і формування науково обґрунтованих методів реконфігурації існуючої конфігурації мережі. Узагальнення світового досвіду побудови розподільних мереж напругою 20 кВ і особливостей функціонування мереж напругою 6(10) кВ в енергосистемі України, дали можливість розробити концепцію розподільних мереж 20 кВ для впровадження новітніх підходів до підвищення ефективності роботи розподільних мереж у 25-ти обленерго енергосистеми України.

2. Розроблено новий метод реконфігурації розподільної електричної мережі в нормальному режимі з використанням апарата генетичних алгоритмів, який на основі режимів роботи електричної мережі дає змогу визначити оптимальну конфігурацію схеми таким чином, щоб втрати на транспортування електричної енергії мережею були мінімальними за умови забезпечення нормативної якості електричної енергії за напругою в точках приєднання абонентів та збереження мінімальної зв'язності схеми електричної мережі і мінімальних економічних збитків від недовідпуску електроенергії.

Швидкість прийняття рішення щодо визначення конфігурації схеми мережі забезпечується штучним обмеженням простору пошуку конфігурації схеми шляхом виділення зон безумовних атракторів джерел живлення, які містять ділянки схеми, що забезпечують живлення визначених споживачів за будь-яких поєднань допустимих параметрів режимів (напруг на шинах джерел живлення, потужностей навантаження). Частина схеми, яка не увійшла в безумовний атрактор, утворює «погранична» зона, в якій безпосередньо здійснюється пошук місць розміщення резервних перемичок з метою оптимального секціонування розподільної мережі. Такий підхід дає змогу суттєво (в 18...20 разів) скоротити простір пошуку оптимального рішення та підвищити ефективність застосування математичного апарата генетичних алгоритмів до розв'язання задачі знаходження оптимальної конфігурації мережі.

3. Запропоновано цільову функцію реконфігурації розподільної електричної мережі, яка дозволяє одночасно за чотирма критеріями (мінімальною зв'язністю схеми, відхиленням напруги, економічною складовою збитків від недовідпуску

електроенергії, втратами активної потужності) забезпечити формування оптимальної конфігурації електричної мережі.

4. Розроблено новий метод реконфігурації схеми розподільної мережі з визначенням місць установки або активації резервних комутаційних перемичок шляхом формування значень рейтингів вимикачів резервних перемичок на основі математичного апарата нечітких множин у разі аварійних вимикань фідерів, що забезпечує мінімальні втрати електроенергії в післяаварійних режимах. Синтез нечіткого логічного контролера для прийняття рішення щодо значення рейтингів вимикачів резервних перемичок між двома фідерами виконано з врахуванням втрат напруги на найвіддаленому пункті схеми та значення коефіцієнта потужності на головній ділянці фідера за допустимості післяаварійного режиму.

5. Вперше розроблено модель для критерію переведення розподільної мережі на напругу 20 кВ на основі математичного апарата нечіткої логіки, яка дозволить шляхом аналізу параметрів стану мереж, визначених для реконструкції, установити пріоритет кожної з них щодо переведення на напругу 20 кВ, що дасть змогу визначити черговість фінансування інвестиційних проектів та забезпечити оптимальне використання коштів.

Установлено критерій переведення мережі 6(10) кВ на напругу 20 кВ для всіх можливих варіацій значень параметрів, які прийняті для аналізу стану мережі (сумарної довжини ліній 6 кВ, періоду функціонування мережі 6(10) кВ, середньої довжини фідерів мережі 6(10) кВ, навантаження, тенденції зміни навантаження, територіальної щільності навантаження, індексу середньої тривалості відключень, індексу середньої частоти відключень, населення району електропостачання):

- при значенні пріоритету в межах від 0 до 2,3 мережа не підлягає переведенню на напругу 20 кВ;
- при значенні пріоритету в межах від 2,3 до 4,7 мережа підлягає переведенню на напругу 20 кВ за умови техніко-економічного обґрунтування;
- при перевищенні значення пріоритету 4,7 мережа однозначно підлягає переведенню на напругу 20 кВ.

6. Застосування розроблених методів, які реалізують інтелектуальні підходи до реконфігурації розподільних електричних мереж, дає змогу оптимально виконати реконфігурацію існуючої схеми при переведенні її на клас напруги 20 кВ та знизити втрати електроенергії приблизно на 10 % у порівнянні з вихідною схемою.

Отримані результати впроваджено та використано:

- у структурній одиниці «Тиврівські ЕМ» ПАТ «Вінницяобленерго»;
- у відокремленому підрозділі «Науково-проектний центр розвитку Об'єднаної енергетичної системи України» ДП НЕК «Укренерго»;
- у Національній комісії, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг (НКРЕКП);
- у Міністерстві енергетики та вугільної промисловості України.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. **Tsyganenko B.** Prospects of transition the distribution networks of Ukraine to nominal voltage of 20 кV // Наукові праці ВНТУ.- 2016.-№ 1.- С.1-4. *(Видання входить до наукометричних баз даних Google Scholar, РИНЦ).*
2. Підвищення енергоефективності розподільних мереж з використанням SMART-технологій / **Б.В. Циганенко**, Д.М. Сумський, В.В. Кирик, Т.Л. Кацадзе // Електроніка і зв'язок.— 2016. — №4(93) . — Т.21. — С.58-63. *(Здобувачем на основі розрахунку режимів роботи електричних мереж Тиврівського району ПАТ «Вінницяобленерго» досліджено методи реконфігурації схеми мережі та запропоновано шлях попереднього формування популяції схем конфігурації для еволюційного аналізу. Видання входить до наукометричних баз даних Google Scholar, Index Copernicus International).*
3. **Циганенко Б.В.** Особливості функціонування розподільних мереж середнього класу напруги та їх переведення на напругу 20 кВ / **Б.В. Циганенко**, В.В. Кирик // Гідроенергетика України.— 2016.— №3-4.— С.7-13. *(Здобувачем виконано аналіз роботи розподільних мереж України, розроблено моделі регулювання та висвітлено чинники переведення їх на вищий клас напруги).*
4. **Циганенко Б.В.** Оптимальна реконфігурація розподільної електричної мережі / Б. В. Циганенко // Технічна електродинаміка. — 2016. — №5. — С.55–57. *(Видання входить до наукометричної бази даних Scopus).*
5. **Циганенко Б.В.** Лінгвістична модель критерію переведення розподільної мережі на напругу 20 кВ / **Б.В. Циганенко**, В.В. Кирик // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — 2016. — №5. — С.58-67. *(Здобувачем розроблено модель для критерію переведення розподільної мережі на напругу 20 кВ на основі аналізу параметрів стану розподільної мережі. Видання входить до наукометричної бази даних Google Scholar).*
6. **Циганенко Б.В.** Метод визначення місця встановлення резервних перемичок розподільної електричної мережі / **Б.В. Циганенко**, В.В. Кирик // Енергетика: економіка, технології, екологія. — 2016. — №3. — С.70–76. *(Здобувачем розроблено метод визначення місця встановлення резервних перемичок розподільної електричної мережі в післяаварійному режимі. Видання входить до наукометричної бази даних Google Scholar).*
7. **Циганенко Б.В.** Впровадження електричних мереж напругою 20 кВ в енергосистемі України // Енергетика та електрифікація. — 2015. — №4. — С.10–13.
8. Мировой опыт применения сшитой полиэтиленовой изоляции для производства силовых кабелей разных классов напряжения / **Б.В. Циганенко**, В.В. Кирик, А.А. Щерба, И.Н. Кучерявая // Енергетика та електрифікація. — 2015. — №10. — С.3–11. *(Здобувачем виконано обґрунтування щодо використання силових кабелів з ізоляцією зі зшитого поліетилену).*
9. **Tsyganenko B.** Modernization of power distribution networks in the power system of Ukraine /V. Kyryk , **B.Tsyganenko** // International Scientific and Practical Conference. — Dubai, UAE. — №7(11) , July 2016. — Vol.1. — P.10–12. *(Здобувачем виконано аналіз факторів впливу на показники якості електропостачання в мережах середньої напруги. Видання входить до наукометричної бази даних РИНЦ).*
10. **Циганенко Б.В.** Підвищення показників якості електропостачання в розподільних електричних мережах / **Б.В. Циганенко**, В.В. Кирик // Матеріали XVII міжнародної науково-практичної конференції “Відновлювана енергетика та енергоефективність у ХХІ столітті”, 29 - 30 вересня 2016 р., м. Київ, НТУУ КПІ. —

Київ, 2016. – С.157-162. *(Здобувачем обігрунтовано принципи побудови мереж 20 кВ, умови їх реалізації та першочергові заходи по впровадженню мереж середньої напруги класу 20 кВ).*

АНОТАЦІЇ

Циганенко Б. В. Ефективність роботи розподільних електричних мереж при підвищенні їх класу напруги. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.02 – електричні станції, мережі і системи. – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» МОН України, Київ, 2017.

У дисертаційній роботі представлено нове розв’язання актуальної науково-прикладної задачі розробки нових методів реконфігурації розподільних мереж високої напруги на основі математичних апаратів генетичних алгоритмів та нечіткої логіки, які забезпечують додаткове зменшення втрат електричної енергії та підвищення її якості, при переведенні мереж з класу напруги 6(10) кВ на напругу 20 кВ.

Розроблено новий метод реконфігурації розподільної електричної мережі в нормальному режимі з використанням апарата генетичних алгоритмів, який на основі режимів роботи електричної мережі дає змогу визначити оптимальну конфігурацію схеми таким чином, щоб втрати на транспортування електричної енергії мережею були мінімальними за умови забезпечення нормативної якості електричної енергії за напругою в точках приєднання абонентів та збереження мінімальної зв’язності схеми електричної мережі і мінімальних економічних збитків від недовідпуску електроенергії.

Розроблено новий метод реконфігурації схеми розподільної мережі з визначенням місць установки або активації резервних комутаційних переминок шляхом формування значень рейтингів вимикачів резервних переминок на основі математичного апарата нечітких множин у разі аварійних вимикань фідерів, що забезпечує мінімальні втрати електроенергії в післяаварійних режимах.

Вперше розроблено модель для критерію переведення розподільної мережі на напругу 20 кВ на основі математичного апарата нечіткої логіки, яка дозволить шляхом аналізу параметрів стану мереж, визначених для реконструкції, установити пріоритет кожної з них щодо переведення на напругу 20 кВ, що дасть змогу визначити черговість фінансування інвестиційних проектів та забезпечити оптимальне використання коштів.

Ключові слова: розподільна мережа, напруга 20 кВ, реконфігурація, генетичні алгоритми, нечітка логіка.

Цыганенко Б. В. Эффективность работы распределительных электрических сетей при повышении их класса напряжения. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.14.02 – электрические станции, сети и системы. – Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского» МОН Украины, Киев, 2017.

В диссертационной работе представлено новое решение актуальной научно-прикладной задачи разработки новых методов реконфигурации распределительных сетей

высокого напряжения на основе математических аппаратов генетических алгоритмов и нечеткой логики, которые обеспечивают дополнительное уменьшение потерь электрической энергии и повышения ее качества, при переводе сетей с класса напряжения 6(10) кВ на напряжение 20 кВ.

Разработан новый метод реконфигурации распределительной электрической сети в нормальном режиме с использованием аппарата генетических алгоритмов, который на основе режимов работы электрической сети дает возможность определить оптимальную конфигурацию схемы.

Разработан новый метод реконфигурации схемы распределительной сети с определением места установки или активации резервных коммутационных перемычек путем формирования значений рейтингов выключателей резервных перемычек на основе математического аппарата нечетких множеств в случае аварийных выключений фидеров, что обеспечивает минимальные потери электроэнергии в послеаварийных режимах.

Впервые разработана модель для критерия перевода распределительной сети на напряжение 20 кВ на основе математического аппарата нечеткой логики.

Применение разработанных методов, которые реализуют интеллектуальные подходы к реконфигурации распределительных электрических сетей, дает возможность оптимально выполнить реконфигурацию существующей схемы при переводе их на класс напряжения 20 кВ и дополнительно снизить потери электроэнергии приблизительно на 10 % в сравнении с исходной схемой.

Ключевые слова: распределительная сеть, напряжение 20 кВ, реконфигурация, генетические алгоритмы, нечеткая логика.

Tsyganenko B.V. Efficiency of the power distribution networks under increasing of their voltage class. - The Manuscript.

The dissertation for scientific degree of Candidate in technical sciences on the specialty 05.14.02 – electrical power plants, networks and systems. - National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute” Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2017.

This dissertation presents a new solution to actual scientific and applied task of developing new methods of reconfiguring the high voltage distribution networks based on mathematical devices of genetic algorithms and fuzzy logic, which provides an additional reduction of electricity losses and quality improvements, when increasing 6 (10) kV networks to 20 kV voltage class.

A new method of reconfiguring the power distribution network at normal mode were developed by using of genetic algorithms, which on the basis of power network mode enables determination of an optimal scheme configuration so that losses of power transportation were minimal under conditions that standard quality of electricity of voltage at customers' connection points assured and conservation of a minimum connectedness of power network scheme and minimal economic losses from power underproduction.

A new method of reconfiguration of the power distribution networks were developed specifying a stop or activation point of reserve switching jumpers by forming the rating values of reserve jumpers switches on the basis of mathematical

apparatus of fuzzy multitudes in case of feeders' emergency stop, which ensures a minimum loss of power in post-fault conditions. The fuzzy logic controller for definition of ratings of switches of reserve crosspieces taking into account pressure losses in the most remote site, power factor on the main site is synthesised at a mode admissibility on a current.

A procedure of genetic algorithm for formation of a network scheme configuration with backup jumpers in the operating mode were studied and fuzzy logic controller to find a configuration of network scheme configuration in postaccident mode with minimal loss of electricity at appropriate restrictions on voltage drop in final section, current value and power factor at main section were synthesized.

Developed methods were used for decision making regarding reconfiguration of electricity distribution network of SD Tyvriivskie PS of Vinnitsaoblenergo PJSC in the designing scheme of transferring existing 6 kV networks to 20 kV voltage class.

A model for switching criterion of distribution network to 20 kV voltage on the basis of the mathematical apparatus of fuzzy logic were developed for the first time, which allows by analyzing the network conditions, that defined for reconstruction, to set a priority for each of them with respect to 20 kV switching, which will make an opportunity to find a financing priority of investment projects and ensure an optimum use of funds.

For a basis of the synthesized model of criterion linguistic definition of a priority transfer the distributive network on voltage 20 kV by mathematical reproduction by the fuzzy logic control unit of reasons the expert on the basis of knowledge base presented by linguistic predicates is accepted.

A criterion for 6 (10) kV networks switching to 20 kV voltage for all possible variations of parameter values was fixed. The parameter values were accepted for the analysis of network conditions (total length of 6 kV lines, operational period of 6 (10) kV network, average length of 6 (10) kV feeder, load, tendency to load change, territorial load density, index of average duration of disconnection, index of average disconnection frequency, of power district population):

- the network should not to be switched to 20 kV voltage under the value of priority ranging from 0 to 2.3;
- the network should be switched to 20 kV voltage under the value of priority ranging from 2.3 to 4.7, subject to the feasibility study;
- the network should be uniquely switched into 20 kV voltage under the value of priority exceeds 4.7.

Adaptation of developed methods that implements the intellectual approaches to reconfiguration of power distribution networks enable to perform a reconfiguration of existing scheme when switching to 20 kV voltage class in optimal way and reduce the power loss by approximately 10% compared to the initial scheme.

Keywords: distribution network, 20 kV voltage, reconfiguration, genetic algorithms, fuzzy logic