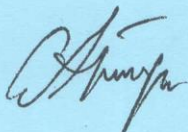


МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
“ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”

ТИМЧУК СЕРГІЙ ОЛЕКСАНДРОВИЧ



УДК 621.316.1.05:519.85

**МЕТОДИ ТА АЛГОРИТМІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ  
ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ З ОПТИМІЗАЦІЇ СТРУКТУРИ  
СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯМ  
В УМОВАХ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ**

Спеціальність 05.13.03 – системи та процеси керування

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук

Харків – 2015

Дисертацією є рукопис  
Роботу виконано на кафедрі автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка Міністерства освіти і науки України.

**Науковий консультант:** доктор технічних наук, професор  
**Фурман Ілля Олександрович**,  
Харківський національний технічний університет сільського господарства ім. Петра Василенка, завідувач кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій.

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**Казак Василь Миколайович**,  
Національний авіаційний університет, м. Київ, професор кафедри автоматизації та енергоменеджменту;

доктор технічних наук, професор  
**Тімофєєв Володимир Олександрович**,  
Харківський національний університет радіоелектроніки, завідувач кафедри економічної кібернетики та управління економічною безпекою;

доктор технічних наук, професор  
**Сіра Оксана Володимирівна**,  
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри комп'ютерного моніторингу і логістики.

Захист відбудеться «11» червня 2015 р. О 14<sup>30</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.14 у Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут», за адресою: 61002, Україна, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, Україна, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

Автореферат розісланий «06» 05 2015 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради



Ліберг І.Г.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Проблема синтезу оптимальної структури системи керування (СК) електропостачанням значною мірою відзначається тим, що елементи системи вбудовуються в розсереджене по великій території технологічне обладнання розподільчих електромереж (РЕМ) і синтез структури СК є невід’ємною складовою синтезу структури РЕМ. Важливість цієї проблеми обумовлена її тісним зв’язком з радикальним підвищенням ефективності процесів електропостачання, одним з напрямків розв’язання якого згідно Енергетичної стратегії України на період до 2030 року є удосконалення структури РЕМ.

Прийняття оптимальних рішень щодо структури СК РЕМ потребує обґрунтованих формальних методик, які базуються на методах багатокритеріальної оптимізації в умовах невизначеності вихідної інформації. Значний внесок у розвиток методів багатокритеріальної оптимізації СК РЕМ внесли: Т. Б. Лещинська, Н. І. Воропай, Л. М. Лук’яненко, А. О. Селюк, П. П. Фещенко, А. П. Заболотний, Д. В. Федоша, П. Д. Лежнюк, В. А. Попов, Г. Є. Поспелов та ін. Здебільше ці методи не враховують невизначеність вихідної інформації. У розвиток нечітких методів оптимізації зробили внесок: Р. Беллман, Л. Заде, С. А. Орловський, В. А. Веніков, І. А. Будзко, А. В. Піскляров, В. З. Манусов, П. Я. Екель, Л. Г. Раскін, А. В. Могиленко та ін. Але ці методи потребують адаптації до задач пошуку оптимальної структури СК РЕМ. Для розв’язання надскладних задач набув розвиток еволюційних алгоритмів в основному у роботах закордонних авторів: E. G. Carrano, R. H. C. Takahashi, Y. Fukuyama, I. Watanabe, M. Nodu, H.-D. Chiang, Miu K. Nan, S. Toune, H. Fudo, T. Genji, Y. Nakanishi.

Тим не менш, прийняття рішень щодо оптимальної структури СК РЕМ в умовах невизначеності та неповноти вихідної інформації на практиці здійснюється за допомогою спрощених підходів і суб’єктивних оцінок, а деякі задачі внаслідок своєї складності на формальному рівні потребують подальшого дослідження. Це обумовлено гострим дефіцитом сучасних всебічно обґрунтованих рекомендацій та методик.

У зв’язку з вказаним розробка нових методів та алгоритмів підтримки прийняття рішень щодо оптимальної структури СК РЕМ на базі техніко – економічних моделей в умовах невизначеності вихідної інформації та багатокритеріальності є актуальною науково-прикладною проблемою, яка визначила напрямок досліджень дисертаційної роботи.

**Зв’язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційну роботу виконано на кафедрі автоматизації та комп’ютерно – інтегрованих технологій Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка згідно плану держбюджетних НДР Мінагрополітики і продовольства України за темами: «Розробка систем енергетичного менеджменту та методів підвищення ефективності експлуатації електрообладнання АПК» (ДР № 0104U004600), «Розробка методів і засобів підвищення ефективності керування режимами та транспортуванням електричної енергії у електричних мережах» (ДР № 0104U004594), «Розробка методів і засобів підвищення ефективності керування режимами та транспортуванням електричної

енергії у електричних мережах» (ДР № 0110U002506), «Дослідження та розробка енергоощадних автоматизованих систем керування технологічними процесами та агрегатами в АПК» (ДР № 0104U005150), «Розробка мікроконтролерних систем релейного захисту на основі ПЛІС – контролерів паралельної дії» (ДР № 0110U000672), у яких здобувач був виконавцем окремих етапів.

**Мета і задачі дослідження.** *Метою дослідження є розвиток наукових основ і дослідження методів, алгоритмічного забезпечення підтримки прийняття рішень з оптимізації структури систем керування розподільчих електричних мереж в умовах невизначеності вихідної інформації та багатокритеріальності.*

Для досягнення мети поставлені наступні задачі:

1. Розробка математичної моделі оцінки техніко – економічних показників ефективності СК РЕМ у нечіткій формі.
2. Адаптація задачі прийняття оптимального рішення при нечітко заданих функціях цілі до задачі пошуку структури СК РЕМ.
3. Розробка і теоретичне обґрунтування методів та алгоритмічного забезпечення підтримки прийняття раціональних рішень щодо структури СК РЕМ в нечіткій формі і на їх основі розробка прикладних комп'ютерних програм.
4. Отримання оптимальних структурних параметрів СК ділянок РЕМ, що проектуються чи реконструюються при чітко та нечітко заданих характеристиках електроспоживання на передпроектних стадіях.
5. Дослідження залежності рішень, що приймаються за підтримки розробленого алгоритмічного забезпечення, від параметрів електроспоживання при різних степенях нечіткості інформації про дані параметри.
6. Оцінка ефективності розробленого алгоритмічного забезпечення на основі порівняльного аналізу рішень, що отримуються, з існуючими варіантами структур СК РЕМ промислових підприємств. Синтез варіантів оптимальної реконструкції структури СК РЕМ промислового підприємства в умовах невизначеності.
7. Отримання рішення щодо оптимальної структури СК розгалуженої секціонованої РЕМ, що включає як побудову топологічної схеми, так і схемно - конструктивне виконання елементів системи на передпроектних стадіях в умовах невизначеності.
8. Розробка алгоритмічного забезпечення підсистеми прийняття рішень з оптимального симетрування навантажень як складової частини системи керування якістю електропостачання споживачів.
9. Розробка алгоритмічного забезпечення підсистеми прийняття рішень з планування заходів щодо енергозбереження на основі довгострокового прогнозування електроспоживання підприємства в умовах невизначеності.

*Об'єктом дослідження є процес прийняття рішень щодо оптимальної структури системи керування розподільчих електричних мереж в умовах невизначеності.*

*Предметом дослідження є методи і алгоритми підтримки прийняття рішень на основі процедур оптимізації при виборі структури системи керування розподільчих електричних мереж в умовах невизначеності.*



**Методи дослідження.** У роботі використано: методи системного аналізу, теорії математичного моделювання, теорія нечітких множин та нечіткий аналіз при розробці математичної моделі оцінки техніко – економічних показників ефективності РЕМ; методи чіткого та нечіткого математичного програмування при розробці методів і алгоритмів пошуку оптимальних структурних рішень СК РЕМ; методи прикладного програмування при реалізації математичних моделей і методів оптимізації СК РЕМ; теорія прийняття рішень при обґрунтуванні відношення переваги в нечіткій формі.

**Наукова новизна отриманих результатів:**

1. Вперше запропоновано визначення степені суміщення трикутних нечітких чисел на основі їх перетину. Це дозволило сформулювати критерій, який паритетно враховує степінь суміщення і степінь невизначеності опису, і удосконалити нечіткий регресійний аналіз при отриманні залежностей, які входять у математичні моделі оцінки техніко – економічних показників ефективності СК РЕМ.

2. Вперше отримано значення параметрів СК РЕМ у вигляді трикутних нечітких чисел і регресійних залежностей, що дозволило сформулювати математичну модель оцінки техніко - економічних показників ефективності СК РЕМ у нечіткій формі, розкривши тим самим невизначеність вихідної інформації.

3. Вперше реалізовано урахування в процесі вибору раціональних рішень як функції наближення до цілі, так і функції віддалення від цілі, що дозволило підвищити селективність методу нечіткої стратифікації цільових функцій при пошуку раціональних рішень щодо структури СК РЕМ.

4. Вперше розроблено метод вибору єдиного рішення з множини Парето, заснований на введенні нечіткої цільової функції еліпсоїдного виду, що дозволило здійснити вибір єдиного паритетного рішення та/або рішення з пріоритетом будь – якої функції цілі за один огляд множини. На основі запропонованого алгоритму деформації нечіткої цільової функції еліпсоїдного виду реалізовано пошук підмножини рішень, що не домінуються, на повній множині альтернатив.

5. Удосконалено генетичний алгоритм оптимізації структури розгалуженої секціонованої СК РЕМ введенням нової системи ранжування та відсіву «особин», що базується на уведених поняттях віку та терміну життя «особин». Це дозволило реалізувати механізм регулювання швидкості пошуку рішення, який автоматично настроює процес пошуку на розрахункові можливості конкретного комп'ютера, підвищити повноту отриманої множини Парето.

6. Вперше запропоновано метод комплексної оптимізації розгалуженої секціонованої СК РЕМ, що враховує взаємний зв'язок топології мережі і схемно - конструктивного виконання елементів без внесення спрощень у математичні моделі і методи при невизначеності вихідної інформації, що дозволяє підвищити інформативність і обґрунтованість проектних рішень.

**Практичне значення одержаних результатів** полягає в наступному:

1. Програмна реалізація розробленого алгоритмічного забезпечення забезпечує ефективне розв'язання не тільки типових оптимізаційних задач на до-проектних стадіях, при проектуванні та реконструкції СК РЕМ в умовах невизначеності вихідної інформації, а і таких, що внаслідок своєї складності на фо-

рмальному рівні не розглядалися.

2. Запропоновані методики, що пов'язані з урахуванням невизначеності вихідної інформації, дозволяють перетворити існуючі детерміновані математичні моделі у нечіткі і тим самим підвищити їх адекватність і, як наслідок, обґрунтованість рішень, що приймаються на їх основі.

3. Результати дисертації у вигляді методик та результатів розрахункових досліджень впроваджено: у проектних розробках НДІ «Укрмережпроект» (м. Харків); при реконструкції СК РЕМ Харківського приладобудівного заводу ім. Т.Г. Шевченка; при реконструкції локальних СК РЕМ у Харківському метрополітені; у навчальному процесі Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка.

**Особистий внесок здобувача.** Наукові положення, що увійшли до дисертаційної роботи, отримані здобувачем самостійно. Серед них: розробка для систем керування математичних моделей оцінки техніко-економічних показників ефективності в нечіткій і детермінованій формі; методика отримання нечітких значень вихідних даних для розрахунку техніко – економічних показників ефективності СК РЕМ, база вихідних даних у нечіткій формі; удосконалення нечіткого регресійного аналізу; адаптація задачі нечіткої оптимізації до прийняття рішень щодо структури СК РЕМ; розробка і удосконалення лінійки методів пошуку оптимальних рішень щодо структури СК РЕМ, обґрунтування раціонального застосування розроблених і удосконалених алгоритмів в залежності від складності задач прийняття рішень; результати чисельних експериментальних досліджень залежності множини раціональних рішень щодо структури СК РЕМ від величини і степені нечіткості вихідних даних; результати розв'язання задач пошуку оптимального рішення щодо структури СК РЕМ і їх аналіз.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення дисертації доповідались та були схвалені на: Міжнародних науково - практичних конференціях «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК» (Харків, 2004 - 2014 рр.); 6, 7 Всеросійських науково – технічних конференціях «Энергетика, управление, качество и эффективность использования энергоресурсов» (Благовещенськ, Росія, 2011, 2013 р.); 3-му Регіональному науково – практичному семінарі «Системы Process Automation: применение в учебном процессе и производстве» (Харків, 2011 р.); Міжнародній науково – технічній конференції «Информационные системы и технологии в энергетике и жилищно – коммунальной сфере ИСТЭ 2011» (Ялта, 2011 р.); Першій Міжнародній науково – технічній конференції «Обчислювальний інтелект – 2011» (Черкаси, 2011 р.); Міжнародних наукових конференціях «Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-24, ММТТ-25» (Саратов, Росія - Київ, 2011 р., Саратов, Росія - Харків, 2012 р.); Міжнародній науково - технічній конференції «Автоматика 2012» (Київ, 2012 р.); 2-й Всеукраїнській науково – практичній конференції «Автоматизация та комп'ютерно – інтегровані технології АКІТ – 2012» (Київ, 2012 р.); Науково - практичних конференціях «Наукові підсумки 2012 р.» і «Наукові підсумки 2013 р.» (Харків, 2012 р., 2013 р.); IX mezinárodní vědecko-praktická conference «Aktuální vymoženosti vědy - 2013» (Прага, Чехія, 2013 р.); IX mezinárodní vědecko-praktická conference «Aktuální vědecké novinky – 2013» (Прага, Чехія,

2013 р.); Семінарі Наукової Ради з проблеми «Наукові основи електроенергетики», тема семінару: «Підвищення якості та ефективності використання електричної енергії» (Київ, 2014 р.); «Global Science and Innovation» - II International Scientific Conference.- (Chicago, USA, 2014 р.).

**Публікації.** Основні наукові положення за матеріалами дисертаційної роботи опубліковані у 38 друкованих працях, з них: 2 монографії (1 – у Німеччині), 22 статті у наукових фахових виданнях України (6 – у виданнях, включених до міжнародних наукометричних баз), 14 - у матеріалах конференцій та семінарів.

**Структура та обсяг дисертаційної роботи.** Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг дисертації складає 386 сторінки, серед них 66 рисунків по тексту, 10 рисунків на 11 окремих сторінках, 26 таблиць по тексту, 5 таблиць на 14 окремих сторінках, список використаних джерел містить 188 найменувань на 23 сторінках, 3 додатки на 76 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність та доцільність дисертації, сформульовано її мету і задачі, визначено об'єкт, предмет і методи дослідження, наукову новизну та практичну значущість роботи.

У **першому розділі** дана загальна характеристика стану проблеми пошуку оптимальних рішень щодо структури СК РЕМ.

На основі аналізу науково-технічної інформації систематизовано підходи до прийняття оптимальних рішень за напрямками: передпроектні роботи, проектування та реконструкція СК РЕМ; організація якісної експлуатації СК РЕМ; ефективне керування режимами РЕМ; забезпечення якості електроенергії; ефективне використання електроенергії. Розв'язання цих задач ускладнюється проблемою невизначеності у двох аспектах: невизначеність вихідної інформації і багатокритеріальність. Тому доцільним стає розробка методів і алгоритмічного забезпечення систем підтримки прийняття рішень, що розкривають невизначеність.

У формальному вигляді задача прийняття рішень характеризується кортежем  $\langle A, E, S, T \rangle$ , де  $A$  – множина альтернатив,  $E$  – середовище задачі,  $S$  – система переваг особи, що приймає рішення (ОПР),  $T$  – дії над множиною альтернатив.

Проведений аналіз та дослідження показали, що відношення переваги при порівнянні альтернатив традиційно будується на основі функцій цілі, у якості яких фігурують техніко – економічні показники ефективності. Для оцінки ефективності системи керування електропостачанням доцільно обрати техніко-економічні показники ефективності РЕМ: інтегральний річний недовідпуск електроенергії внаслідок неполадок та аварій, приведені витрати на будівництво та обслуговування, технологічні втрати потужності. Здебільше математичні моделі оцінки цих показників детерміновані та спрощені. Рідко вони стохастичні, але розрахунки на їх основі зводяться до детермінованих операцій над ма-

тематичними очікуваннями параметрів, оскільки показники носять інтегральний характер і тому слабо пов'язані з поточною випадковістю появи подій. Розглянуто доцільність застосування теорії нечітких множин при розкритті невизначеності вихідних даних для розрахунку функцій цілі. Такий спосіб представлення функцій цілі дозволяє зробити модель в певному сенсі більш адекватною реальності і придатною для формування нечіткого відношення переваги. Також показано, що при формуванні відношення переваги для задач прийняття рішень щодо оптимальної структури на передпроектних стадіях створення СК РЕМ доречно користуватись мінімаксним критерієм.

Відношення переваги традиційно реалізується методами математичного програмування. Аналіз застосування таких методів показав, що на передпроектних стадіях створення СК РЕМ в умовах невизначеності слід віддати перевагу методам багатокритеріальної оптимізації з пошуком множини альтернатив, що не домінуються, яка дає можливість обгрунтовано приймати рішення компетентними особами з залученням неформалізованих процедур і критеріїв. Вибір конкретного методу: детермінованого, нечіткого або методу з елементами штучного інтелекту, - залежить від складності структури об'єкту керування.

Наразі процес прийняття рішень щодо структури СК РЕМ ускладнює фактор суб'єктивної точки зору, який є наслідком дефіциту науково обгрунтованих рекомендацій і методик, що знижує ефективність рішень.

На підставі проведеного аналізу стану вирішення проблеми підтримки прийняття рішень щодо оптимальної структури СК РЕМ в умовах невизначеності вихідної інформації та багатокритеріальності сформульовані перспективні напрямки її розв'язання. Має перспективу розкриття невизначеності вихідної інформації при розробці залежностей для техніко-економічних показників ефективності РЕМ із застосуванням теорії нечітких множин. Також має перспективу розробка нових і удосконалення існуючих методів багатокритеріальної оптимізації і побудова на їх основі лінійки алгоритмів підтримки прийняття оптимальних рішень щодо структури СК РЕМ для об'єктів різного рівня складності.

**У другому розділі** удосконалено і обгрунтовано вид математичних залежностей розрахунку техніко – економічних показників ефективності РЕМ.

Загальний вигляд залежностей для розрахунку техніко-економічних показників ефективності РЕМ:

$$W = T \cdot P, \quad Z = E_q \cdot K + I, \quad N = \beta \cdot \Delta W, \quad (1)$$

де  $W$  - інтегральний річний недовідпуск електроенергії внаслідок аварій та пошкоджень;  $Z$  - приведені витрати на спорудження та експлуатацію РЕМ;  $N$  - річні технологічні втрати електроенергії в РЕМ;  $T$  – сумарний час відключення споживачів за рік;  $P$  – середньорічна сумарна потужність технологічного обладнання, що відключається;  $K$  – капітальні витрати на спорудження РЕМ;  $I$  – експлуатаційні витрати;  $E_q$  – дисконтні відрахування;  $\beta$  - вартість однієї кіловат-години електроенергії;  $\Delta W$  - втрати електроенергії за рік.

Алгоритм застосування цих залежностей в рамках математичної моделі ви-



значається структурою СК РЕМ. Шляхом декомпозиції отримано потрібний рівень деталізації системи і виділено елементарну ділянку, на основі якої формується структура СК РЕМ будь-якої складності. Елементарна ділянка складається з послідовно з'єднаних секціонуючого апарату (СА), лінії електропередачі (ЛЕП), комутуючого апарату на вході до трансформаторної підстанції (КА) і самої трансформаторної підстанції (ТП). У межах ділянки техніко-економічні показники її складових підпорядковуються принципу суперпозиції.

Конкретний вид розрахункових формул залежить від схемних рішень кожного з елементів ділянки.

Для одноланцюгової повітряної (ПЛ), а також кабельної лінії (КЛ) залежності (1) приймають вид:

$$\begin{aligned} W_{ЛЕП} &= (\omega_{ЛЕП} \cdot t_{вЛЕП} \cdot L_{ЛЕП} / 100 + \alpha \cdot k_{нЛЕП}) \cdot P_{ЛЕП}, \\ Z_{ЛЕП} &= K_{ЛЕП} \cdot L_{ЛЕП} \cdot (1 + \alpha_{еЛЕП}), \\ \alpha_{еЛЕП} &= \alpha_{аЛЕП} + \alpha_{рЛЕП} + \alpha_{оЛЕП}, \\ N_{ЛЕП} &= k_{\Delta W} \frac{P_{ЛЕП}^2 \cdot L_{ЛЕП}}{U_{ЛЕП}^2 \cdot F_{ЛЕП}}, \end{aligned} \quad (2)$$

де  $\omega$  - параметр потоку відмов;  $t_v$  - середній час відновлення елемента;  $k_n$  - коефіцієнт планових відключень електропостачання;  $\alpha$  - коефіцієнт, що враховує зменшення недовідпуску електроенергії при планових відключеннях;  $\alpha$  з індексами  $a, p, o$  - щорічні відрахунки на амортизацію, поточний ремонт, обслуговування.

Для дволанцюгової ПЛ не враховується вихід з ладу і капітальний ремонт одночасно двох ланцюгів:  $k_n = 0$ . Для ЛЕП, що резервується з введенням резерву черговим, оперативно-виїздною бригадою чи автоматично (АВР), час відновлення визначається часом введення резерву ( $t_p$ ), потік відмов прийнято простішим.

Для комутуючих і секціонуючих апаратів залежності (1) мають вид:

$$\begin{aligned} W_{КА/СА} &= (\omega_{КА/СА} \cdot t_{вКА/СА} + \alpha \cdot k_{нКА/СА}) \cdot P_{ЛЕП}, \\ Z_{КА/СА} &= K_{КА/СА} (1 + \alpha_{еКА/СА}), \end{aligned} \quad (3)$$

де при наявності резервування  $k_n = 0$ ,  $t_v = t_p$ .

Для трансформаторних підстанцій залежності (1) мають вид:

$$W_{ТП} = W_T + W_{Кн} + W_{Шн}, Z_{ТП} = K_{КТП} (1 + \alpha_{еТП}), N_{ТП} = N_T, \quad (4)$$

де  $W_T, W_{Кн}, W_{Шн}$  - відповідно інтегральний річний недовідпуск електроенергії внаслідок пошкодження силового трансформатора, комутуючого апарата на боці нижньої напруги, збірних шин;  $K_{КТП}$  - приведені капітальні витрати на комплектну трансформаторну підстанцію;  $N_T$  - втрати електроенергії в трансформаторі;

$$W_T = (\omega_T \cdot t_{вТ} + \alpha \cdot k_{nТ}) \cdot P_{ЛЕП}, \quad W_{Кн} = (\omega_{Кн} \cdot t_{вКн} + \alpha \cdot k_{nКн}) \cdot P_{ЛЕП},$$

$$W_{Шн} = (\omega_{Шн} \cdot t_{вШн} + \alpha \cdot k_{nШн}) \cdot P_{ЛЕП}, \quad N_T = k_{\Delta WT} \cdot \frac{R \cdot P^2}{U^2}. \quad (5)$$

При розгалуженій топології РЕМ містить секціоновані і несекціоновані ланцюги. Порядок розрахунку техніко-економічних показників ефективності залежить від конкретної топології РЕМ. Для врахування цього введено два вектора (номерів початків ділянок і номерів кінців ділянок):  $H = (h_1, h_2, \dots, h_{ny})^T$ ;  $K = (k_1, k_2, \dots, k_{ny})^T$ , де  $ny$  – кількість ділянок РЕМ. Математична модель розрахунку техніко-економічних показників розгалуженої секціонованої РЕМ має вид:

$$W_{вс} = \sum_{i=1}^{k_1} T_{h_i, k_i} \cdot P_{в} + \sum_{j=1}^{nc} (P_{вj} \cdot \sum_{i=k_j}^{k_{j+1}} T_{h_i, k_i}),$$

$$Z_{вс} = \sum_{i=1}^{ny} Z_{СА_{h_i, k_i}} + Z_{ЛЭП_{h_i, k_i}} + Z_{КА_{h_i, k_i}} + Z_{ТП_{h_i, k_i}},$$

$$N_{вс} = 3 \cdot \rho \cdot \beta \cdot [(8760 - \sum_{i=1}^{k_1} T_{h_i, k_i}) \cdot \sum_{i=1}^{k_1} \frac{P_{h_i, k_i}^2 \cdot L_{ЛЭП_{h_i, k_i}}}{U_{ЛЭП_{h_i}}^2 \cdot F_{ЛЭП_{h_i, k_i}}} +$$

$$+ \sum_{j=1}^{nc} (8760 - \sum_{i=k_j}^{k_{j+1}} T_{h_i, k_i}) \cdot \sum_{i=k_j}^{k_{j+1}} \frac{P_{h_i, k_i}^2 \cdot L_{ЛЭП_{h_i, k_i}}}{U_{ЛЭП_{h_i}}^2 \cdot F_{ЛЭП_{h_i, k_i}}}] +$$

$$+ 3 \cdot \beta \cdot [(8760 - \sum_{i=1}^{k_1} T_{h_i, k_i}) \cdot \sum_{i=1}^{k_1} \frac{P_{Тк_i}^2 \cdot R_{к_i}}{U_{ЛЭП_{h_i}}^2} +$$

$$+ \sum_{j=1}^{nc} (8760 - \sum_{i=k_j}^{k_{j+1}} T_{h_i, k_i}) \cdot \sum_{i=k_j}^{k_{j+1}} \frac{P_{Тк_i}^2 \cdot R_{к_i}}{U_{ЛЭП_{h_i}}^2}], \quad (6)$$

де  $P_{в} = \sum_{i=1}^{ny} P_{ЛЭП_{h_i, k_i}}$ ,  $P_{вj} = \sum_{i=k_j}^{ny} P_{ЛЭП_{h_i, k_i}}$ ,  $P_{h_i, k_i} = \sum_{j=i}^{ny} P_{ЛЕП_{h_j, k_j}}$ ,  $i = 1, \dots, ny$ .

Залежності (1)-(5) використовуються у (6) при розрахунку складових техніко-економічних показників на кожній ділянці. Відповідно, розроблено алгоритм розрахунку математичної моделі СК РЕМ, що є невід'ємною її складовою.

Таким чином, залежності (1) – (6) складають математичну модель розрахунку техніко - економічних показників ефективності СК РЕМ при всьому різноманітті елементного складу, схемних рішень елементів і топології РЕМ. Параметри моделі містять невизначеність, яка пов'язана зі складністю об'єкту керу-

вання і неможливістю точного визначення вихідних даних на передпроектних стадіях його створення. Невизначеність вихідних даних зведено до типу нечіткості оскільки на рівні інтегральних значень параметрів моделі, що характерно для передпроектних досліджень, апарат теорії нечітких множин коректно описує такі типи невизначеності, як неоднозначність, інтервальність, випадковість, лінгвістичну невизначеність, тощо.

У **третьому розділі** запропоновано методику отримання вихідних даних для математичної моделі СК РЕМ у формі нечітких чисел, удосконалено нечіткий регресійний аналіз, отримано вихідні дані для моделі розрахунку техніко – економічних показників ефективності СК РЕМ у вигляді нечітких трикутних чисел та регресійних залежностей.

У роботі використано нечіткі числа  $(L-R)$  - типу з трикутними функціями приналежності. Трикутне нечітке число зручно представляти у виді кортежу  $A_{\Delta} = \langle a, \alpha, \beta \rangle_{\Delta}$ , де  $a$  — модальне значення,  $\alpha$  і  $\beta$  – лівий та правий коефіцієнти нечіткості. Параметри трикутного нечіткого числа однозначно зв'язані з параметрами трикутної функції приналежності  $f_{\Delta}(x; a, b, c)$ . А саме,  $a=b$ ,  $\alpha=b-a$ ,  $\beta=c-b$ .

Кожний параметр, що входить до складу вихідних даних для математичної моделі СК РЕМ, як правило, представлений множиною значень, кожне з яких характеризується степінню приналежності, яку запропоновано визначати степінню довіри до джерела інформації. Пропонується перетворити ці множини у нечіткі наступним чином:

$$a = p_{\min} = \min_i p_i, \quad c = p_{\max} = \max_i p_i, \quad i = \overline{1, n}, \quad b = p_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n \mu_i \cdot p_i}{\sum_{i=1}^n \mu_i}, \quad (7)$$

де  $p_i$ ,  $\mu_i$ ,  $n$  – відповідно значення, функція приналежності та кількість значень нечіткого числа.

На основі обробки всієї доступної інформації отримано базу даних, що складає 326 нечітких значень параметрів для розрахунку моделі (1) – (6) при різних рівнях узагальнення, які відповідають певним рівням декомпозиції системи, що дозволяє їх використовувати для широкого кола передпроектних задач.

Деякі з нечітких даних зручніше представляти у функціональному виді із застосуванням нечіткого регресійного аналізу. Існуючий апарат нечіткого регресійного аналізу використовує два критерія для оцінки якості підбору коефіцієнтів регресії: степінь співпадіння та степінь нечіткості опису. Ці критерії протирічать один одному тому один з них зазвичай беруть у якості критерія, а другий – у якості обмеження, а пошук коефіцієнтів регресії здійснюється методами лінійного програмування. Враховуючи особливості функцій приналежності кожного з чисел запропоновано удосконалення нечіткого регресійного аналізу.

Степінь співпадіння трикутного нечіткого числа  $u$  та його оцінки  $y_l$  можна оцінити за величиною їх перетину  $S = y_l \cap u$ . Перетин трикутних нечітких чисел відображує площа фігури під функцією приналежності перетину

$S_{\cap} = S_{\Delta} \cap S_{\Delta i}$ . Якщо є  $n$  значень параметра  $y$  при різних значеннях  $x$ , то степінь співпадіння регресії до вихідних даних відображує величина  $S_{\cap} = \sum_{i=1}^n S_{\cap i}$ . В цьому контексті степінь нечіткості можна охарактеризувати величиною  $S_{\cap} = \sum_{i=1}^n (S_{\Delta i} - S_{\cap i})$ . Для врахування паритетного впливу обох критеріїв на пошук коефіцієнтів регресії запропоновано адаптоване до мінімізації аддитивне згортання критеріїв

$$S = \sum_{i=1}^n (S_{\Delta i} - S_{\cap i}) + \sum_{i=1}^n (S_{\Delta i} - S_{\cap i}). \quad (8)$$

Удосконалений варіант нечіткого регресійного аналізу може бути застосовано і до задачі прогнозування на основі статистичної інформації. У цьому випадку (8) виглядає наступним чином

$$S = \sum_{i=1}^n (y_{1maxi} - y_{1mini}) / y_i + \sum_{i=1}^n (1 - \mu_{y_1}(y_i)), \quad (9)$$

де  $\mu_{y_1}(y)$  - значення функції приналежності оцінки параметра  $y$ .

При розробці прогнозних регресійних моделей традиційно точність прогнозу оцінюється за відносною середньомодульною похибкою (*MAPE*). В роботі аналітично встановлено зв'язок степені співпадіння і *MAPE* у вигляді

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (1 - \mu_{y_{1i}}) y_{Ti} / y_{cpi}, \quad (10)$$

де  $y_{Ti} = \begin{cases} (y_{1i} - y_{1mini}), & \text{при } y_i < y_{1i}, \\ (y_{1maxi} - y_{1i}), & \text{при } y_i > y_{1i}. \end{cases}$

Коефіцієнти регресійних залежностей отримуються методом просторової сітки зі змінним кроком.

За допомогою удосконаленого нечіткого регресійного аналізу отримано ряд нечітких квадратичних залежностей для розрахунку капітальних витрат на спорудження ЛЕП:  $K_{ЛЕП} = \alpha \cdot F^2 + \beta F + \gamma$ , на спорудження ТП:  $K_{ТП} = \alpha \cdot P_T^2 + \beta P_T + \gamma$ , де коефіцієнти  $\alpha, \beta, \gamma$  – трикутні нечіткі числа. Всього розроблено 27 нечітких регресійних залежностей для різних рівнів конкретизації інформації щодо конструктивного виконання елементів СК РЕМ, в тому числі для випадку повної її відсутності.

Застосування нечіткого регресійного аналізу дозволило також отримати залежність втрат потужності у силових трансформаторах від номінальної потужності трансформатора на основі паспортних даних силових трансформаторів (втрати при холостому ході та короткому замиканні)

$$P_{sm} = \alpha \cdot P_T^2 + \beta P_T + \gamma,$$

де  $\alpha = \langle 0,0, -1,4059E-06, -4,78414E-06 \rangle$ ,  $\beta = \langle 0,0014, 0,0079, 0,0179 \rangle$ ,  
 $\gamma = \langle 0,06, 0,1335, 0,22085 \rangle$ .

Отримані значення параметрів, що входять у математичну модель оцінки техніко-економічних показників ефективності СК РЕМ, у виді трикутних нечітких чисел, нечітких регресійних залежностей дозволили перетворити детерміновану математичну модель (1) – (6) у нечітку, розкривши тим самим невизначеність вихідної інформації.

Розроблено також нечітке обмеження за напругою в кінці ділянки. Для цього введено нечітке поняття «допустима напруга в кінці ділянки» РЕМ у вигляді нечіткого числа, що задається кортежем  $\langle U_{min}^u, U_{cp}^u, U_{max}^u \rangle$ . Напруга в кінці ділянки, що розрахована за допомогою математичної моделі, також є нечітким числом  $\langle U_{min}^k, U_{cp}^k, U_{max}^k \rangle$ .

Степінь відповідності напруги в кінці ділянки РЕМ номінальній оцінюється по перетину цих нечітких чисел, що відображує мода результату, яка визначається із наступних співвідношень:

$$h = \max(0, \min(h^+, h^-)),$$

$$h^+ = \mu_h(U^+), \quad U^+ : \frac{U^+ - U_{min}^u}{U^u - U_{min}^u} = \frac{U_{max}^k - U^+}{U_{max}^k - U_{cp}^k}; \quad (11)$$

$$h^- = \mu_h(U^-), \quad U^- : \frac{U^- - U_{min}^k}{U_{cp}^k - U_{min}^k} = \frac{U_{max}^u - U^-}{U_{max}^u - U^u}.$$

Додавання цього співвідношення до нечіткої математичної моделі техніко-економічних показників ефективності РЕМ за допомогою операції кон'юнкції дозволяє автоматично враховувати обмеження за напругою при оптимізації структури РЕМ, контролюючи функцію приналежності результату.

**У четвертому розділі** адаптовано постановку задачі багатокритеріальної оптимізації при нечітко заданих цілях до задачі прийняття рішень щодо структури СК РЕМ, розроблено та досліджено ряд методів та алгоритмів прийняття рішень, визначено межі їх раціонального застосування в залежності від складності об'єкту керування.

Задача пошуку множини рішень, що не домінуються при нечітко заданих цільових функціях може бути розв'язана як у рамках чіткого, так і в рамках нечіткого математичного програмування. До того ж різноманітність за складністю задач пошуку оптимальної структури СК РЕМ вочевидь потребує низки алгоритмів для її розв'язання.

Метод попарного порівняння альтернатив є одним з надійніших методів пошуку множини рішень, що не домінуються. Для нечітко заданих цільових функцій порівняння альтернатив пропонується зробити згідно мінімаксному критерію. Для трикутних нечітких чисел це порівняння трансформується у:

для максимізації  $f_1 \geq f_2$ , якщо  $f_{1\min} \geq f_{2\min}$ ,

для мінімізації  $f_1 \leq f_2$ , якщо  $f_{1\max} \leq f_{2\max}$ , (12)

де  $f_1 = \langle f_{1\min}, f_{1cp}, f_{1\max} \rangle$ ,  $f_2 = \langle f_{2\min}, f_{2cp}, f_{2\max} \rangle$ .

Необхідність обрахунку повної множини альтернатив не дозволяє використовувати цей метод при ускладненні об'єкту керування оскільки суттєво затягує процес пошуку. Одним з виходів із цієї ситуації є застосування нечіткого математичного програмування.

Для формулювання нечіткого варіанту задачі оптимізації проведено узагальнення відомого одномірного формулювання на  $n$  – мірний:

$$f_i(x) \tilde{\geq} Z_{0i}, \quad \varphi_i(x) \leq 0, \quad x \in X, \quad (13)$$

де хвиляста лінія – символ нечіткості нерівняння,  $Z_{0i}$  - значення  $i$  - ї цільової функції, досягнення якого вважається достатнім для досягнення цілі. Відхиленням  $f_i(x)$  від цієї величини приписуються різні степені допустимості:

$$\mu_{f_i}(x) = \begin{cases} 0, & \text{якщо } f_i(x) \leq Z_{0i} - a; \\ \mu_i(x, a), & \text{якщо } Z_{0i} - a < f_i(x) \leq Z_{0i}; \\ 1, & \text{якщо } f_i(x) \geq Z_{0i}. \end{cases} \quad (14)$$

де  $i = 1, \dots, n$ ,  $\mu_{f_i}(x) \rightarrow [0,1]$  – функція, що описує степінь виконання відповідних нерівностей з точки зору особи, що приймає рішення.

Функції приналежності  $\mu_i$  виділяють нечіткі підмножини з множин значень  $f_i(x)$ , які містять близькі до оптимуму значення функцій цілі. Для декількох функцій цілі основну роль відіграє оптимальне сполучення близьких до оптимуму значень функцій. Тобто якщо  $X_{0i} \subset X, i = 1, \dots, n$ . - множини альтернатив, що дають раціональні рішення для кожної з функцій  $f_i(x)$ , то загальна множина раціональних рішень буде  $X_0 = \bigcap_{i=1}^n X_{0i}$ . І, якщо  $X_0 \neq \emptyset$ , то рішення задачі існує. З множини  $X_0$  у якості єдиного рішення обирається альтернатива

$$x_0 \in X_0 : \sup_{X_0} \min_{x \in X_0} (\mu_{f_1}(x), \dots, \mu_{f_n}(x)). \quad (15)$$

У випадку цільових функцій, що протирічать одна одній, в загальному випадку  $X_0 = \emptyset$  і задача розв'язується пошуком множини альтернатив, що не домінуються.

У зв'язку з цим удосконалено метод нечіткої стратифікації. Формулювання задачі переписується у наступному виді:



$$f_i^r(x) \geq \tilde{Z}_{0i}^r, \quad \varphi_i(x) \leq 0, \quad x \in X,$$

$$\mu_{f_i^r}(x) = \begin{cases} \max(0, \min(1, \frac{c_i^r - f_i(x)}{c_i^r - b_i^r})), & \text{якщо } r=1, \\ \max(0, \min(\frac{f_i(x) - a_i^r}{b_i^r - a_i^r}, \frac{c_i^r - f_i(x)}{c_i^r - b_i^r})), & \text{якщо } 1 < r < d, \\ \max(0, \min(\frac{f_i(x) - a_i^r}{b_i^r - a_i^r}, 1)), & \text{якщо } r=d. \end{cases} \quad (16)$$

Введено також матрицю відношень переваги  $E$  розміром  $d \times d \times \dots \times d$  (рис. 1), яка задає оцінку кожного варіанту сполучень рівнів (страт) функцій  $f_i(x)$ :

$$E = \|e_{m,l,\dots,k}\|; e_{m,l,\dots,k} = u; u = 1, 2, \dots, d; m, l, \dots, k = 1, 2, \dots, d;$$

$$\mu_{e_{m,l,\dots,k}}(x) = \min(\mu_{f_1^m}(x), \mu_{f_2^l}(x), \dots, \mu_{f_n^k}(x)); \mu_{E_u}(x) = \max_{e_{m,l,\dots,k}=u}(\mu_{e_{m,l,\dots,k}}(x)). \quad (17)$$

Для підвищення селективності метода запропоновано враховувати нечіткі рівні не тільки функції цілі, а і функції антицілі (віддалення від оптимуму).

$f_1^4$	3	2	2	1
$f_1^3$	3	3	2	2
$f_1^2$	4	3	3	2
$f_1^1$	4	4	3	3
	$f_2^1$	$f_2^2$	$f_2^3$	$f_2^4$

Рисунок 1 - Вид матриці  $E$  (при  $d=4$ ,  $n=2$ )

Тоді досить просто для оцінки  $u=d$  отримується альтернатива  $x_0$ , що не домінується. При зміні  $d$  у загальному випадку знаходиться інша альтернатива, що не домінується. Продовжуючи цей процес до певного  $d_{max}$ , при якому відсутнє рішення для оцінки  $u=d$ , отримується підмножина множини Парето  $X_p \subset X_0$ .

Алгоритм реалізації цього методу ефективний і дозволяє отримати множину  $X_p$  за один прохід множини альтернатив.

Проведене дослідження щодо найкращих результатів пошуку  $X_p$  показало, що вид функцій  $\mu_{f_i^r}(x)$  має бути таким, як на рис. 2, а принцип призначення

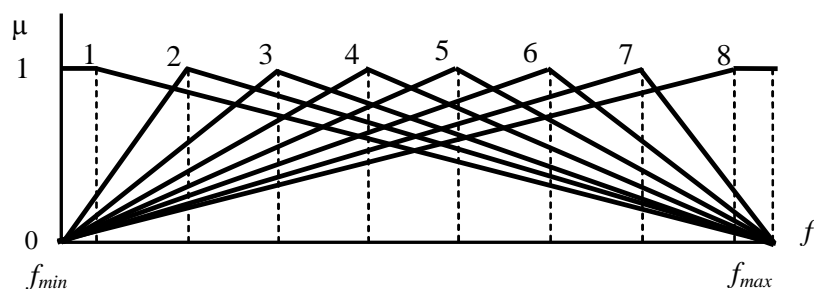


Рисунок 2 - Вид функцій приналежності рівнів оцінки цільових функцій (при  $d=8$ )

оцінок сполучень нечітких рівнів функцій цілі проілюстровано на рис. 1.

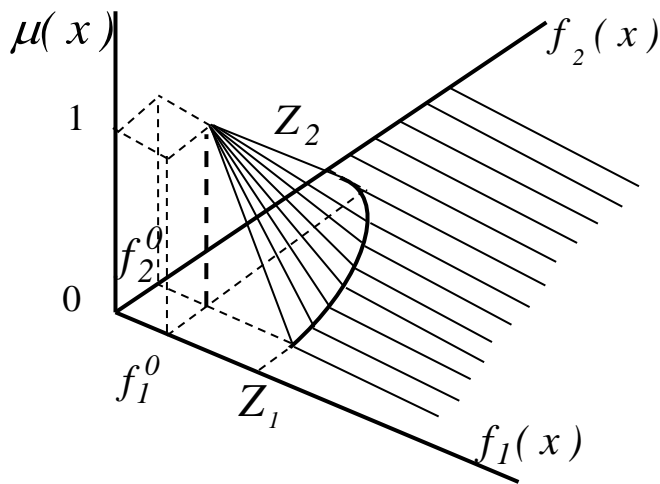
Доведено стійкість отриманих рішень в залежності від параметрів математичної моделі.

Для випадку, коли множина Парето за ро-

зміром настільки велика, що виникають труднощі у ОПР з вибором єдиного рішення, розроблено формальний метод його отримання. Задача вибору єдиного рішення формулюється у вигляді:

$$\begin{aligned} f_i(x) &\lesssim Z_i, \quad \varphi_i(x) \leq 0, \quad x \in X_p, \\ \mu(x) &= \max(0, 1 - \sqrt{R(x)}), \\ R(x) &= \sum_{i=1}^n \frac{(f_i(x) - f_i^0)^2}{\lambda_i^2 (Z_i - f_i^0)^2}, \quad n = 1, \dots, n, \end{aligned} \quad (18)$$

де  $f_1^0, \dots, f_n^0$  - оптимальні значення цільових функцій, що у загальному випадку досягаються при різних  $x \in X_p$ ,



$\lambda_i$  – вагові коефіцієнти для введення пріоритету між цільовими функціями.

Функція приналежності  $\mu(x)$  характеризує степінь близькості рішень до ідеального оптимуму (рис. 3). Еліпсоїд

$$\sum_{i=1}^n \frac{(f_i - f_i^0)^2}{\lambda_i^2 (Z_i - f_i^0)^2} = 1$$

Рисунок 3 - Вид функції приналежності в задачі (19) для випадку двох цільових функцій

обмежує область вибору єдиного рішення.  $Z_i$  – одночасно визначають полувісі еліпсоїду. Єдине рішення задачі (18) повинно за-

довільняти умові

$$\mu(x_0) = \max_{X_p} (\mu(x)). \quad (19)$$

Таким чином, запропонований метод і алгоритм дозволяє здійснити вибір єдиного паритетного рішення і/або рішення з пріоритетом будь-якої функції цілі за один прохід множини Парето.

Логічним розвитком цього методу є метод пошуку підмножини множини Парето на основі нечіткого згортання цільових функцій еліпсоїдного виду при постановці задачі (18) на повній множині альтернатив.

Повторюючи процедуру пошуку єдиного рішення за умовою (19) на множині альтернатив при різних сполученнях значень  $\lambda_i$  отримується множина рішень, що не домінуються. Геометрично зміна значень  $\lambda_i$  призводить до зміни форми еліпсоїду  $R(x)$ , тому цей метод названо методом деформації еліпсоїда. Кількість рішень, що отримується таким методом залежить від кількості дефо-

рмацій еліпсоїду. Рішення локалізуються у паритетній області навколо ідеального оптимуму.

Велика розмірність множини альтернатив може стати перешкодою для ефективного застосування наведених методів. Для реалізації скорочення множини альтернатив обгрунтовано наступний метод. Нехай СК РЕМ можна розбити на  $n$  підсистем, що не мають відображених у моделі перехресних зв'язків між собою. Множина функцій цілі  $F$  задає відношення переваги як на загальній множині альтернатив  $X$ , так і на множинах альтернатив для кожної підсистеми  $X_i$ . Нехай функції цілі адитивні відносно підсистем СК РЕМ:

$$f_k(x) = \sum_{i=1}^n f_k^i(x_i), \quad \forall f_k(x) \in F. \quad (20)$$

В даному випадку при розрахунку функцій цілі для  $i$  – ї підсистеми приймають участь тільки її параметри, тоді правомірний запис  $f_j^i(x) = f_j(x_i)$ . Таким чином, задачу (13) можна розділити на  $n$  задач пошуку множин рішень, що не домінуються  $R_i$ , для кожної підсистеми:

$$\text{знайти } R_i \subset X_i : F(r_i) \rightarrow \max, \varphi(r_i) \leq 0. \quad (21)$$

На наступному етапі формується нова множина альтернатив для системи в цілому  $R \subset X$ , елементами якої є всі можливі сполучення елементів множин  $R_1, \dots, R_n$ . Число елементів  $V_R = \prod_{i=1}^n v_{R_i}$ .

Далі розв'язується задача отримання множини альтернатив, що не домінуються  $X_p$ , на множині  $R$ :

$$\text{знайти } X_p \subset R : F(x_p) \rightarrow \max, \varphi(x_p) \leq 0. \quad (22)$$

Коли розмірність множини альтернатив така, що розрахунок функцій цілі на всій множині стає технічно неможливим, розроблено варіант генетичного алгоритму, який має наступні особливості. Особиною є варіант побудови СК РЕМ. Генами особи є варіанти побудови ділянок СК РЕМ. Згідно структури математичної моделі (1) – (6) ген особи однозначно визначається варіантом СА ( $n_{CA}$ ), типом ЛЕП ( $n_{ЛЕП}$ ), варіантом КА ( $n_{КА}$ ), варіантом ТП ( $n_{ТП}$ ), перетином проводів ( $n_F$ ).

Тобто особина описується наступним чином:

$$G = [N, \Psi] = (g_j), \quad j = \overline{1, n_u},$$

де  $n_u$  – число ділянок РЕМ.

Фенотип  $N$  особи описується виразом:

$$\begin{aligned}
N &= (n_j); n_j = (n_{CA}^j, n_{ЛЭП}^j, n_{КА}^j, n_{ТП}^j, n_F^j), j = \overline{1, n_u}, n_{CA}^j = (n_{CAi_{CA}}), \\
i_{CA} &= \overline{0, k_{CA}}, n_{ЛЭП}^j = (n_{ЛЭПi_{ЛЭП}}), i_{ЛЭП} = \overline{0, k_{ЛЭП}}, n_{КА}^j = (n_{КАi_{КА}}), \\
i_{КА} &= \overline{1, k_{КА}}, n_{ТП}^j = (n_{CAi_{ТП}}), i_{ТП} = \overline{0, k_{ТП}}, n_F^j = (n_{CAi_F}), i_F = \overline{0, k_F}.
\end{aligned}$$

Оператори прямого та зворотнього перетворення фенотипа до генотипу і навпаки (кодування-декодування) мають вигляд:

$$\begin{aligned}
\Psi : g_j &= (g_j^1, g_j^2, g_j^3, g_j^4, g_j^5) = (i_{CAj}, i_{ЛЭПj}, i_{КАj}, i_{ТПj}, i_{Fj}), \\
\Psi^{-1} : n_j &= (n_{CAi_{CAj}}, n_{ЛЭПi_{ЛЭПj}}, n_{КАi_{КАj}}, n_{ТПi_{ТПj}}, n_{Fi_{Fj}}), j = \overline{1, n_u}.
\end{aligned}$$

Генетичний алгоритм складається з наступних процедур.

1. Формування початкової популяції заданого об'єму  $N_{oc}$ . Для кожної особи генеруються коди генів наступним чином:

$$g_j^i = \text{int}(r \cdot (g_{j_{max}}^i - g_{j_{min}}^i + 1) + 1), \quad j = \overline{1, n_u}, i = \overline{1, 5}, \quad (23)$$

де  $r = (0, 1)$  - псевдовипадкове число,  $\text{int}$  - функція виділення цілої частини числа.

Якості особин (життєздатність) визначаються величинами цільових функцій.

2. Схрещування. В основі алгоритму схрещування лежить процедура обміну генами між двома особинами. Оператор схрещування має вид:

$$G^D = \text{Cross}(G^{P_1}, G^{P_2}), \quad P_1 = \overline{1, N_{oc}}, P_2 = \text{int}(r \cdot (N_{oc} - P_1) + 1), \quad (24)$$

де  $P_1, P_2$  – номери батьківських особин в популяції,  $D$  – особина дитини.

$$\begin{cases} g_j^{iD} = g_j^{iP_1}, & \text{при } j \neq k, \\ g_j^{iD} = g_j^{iP_2}, & \text{при } j = k, \end{cases}$$

$$k = \text{int}(r \cdot n_u + 1).$$

Якщо життєздатність дитини не гірша за батьків, вона додається до тимчасової множини дітей. Після завершення даної процедури множина дітей додається до популяції.

3. Мутація. Процедура мутації полягає у випадковій зміні випадково обраних генів всіх особин. Оператор мутації має вид:

$$G^m = mut(G): \begin{cases} g_j^{im} = g_j^i, & \text{npu } j \neq k, i \neq l, \\ g_j^{im} = \text{int}(r \cdot (g_{jmax}^i - g_{jmin}^i + 1) + 1), & \text{npu } j = k, i = l, \end{cases} \quad (25)$$

$$k = \text{int}(r \cdot n_u + 1), l = \text{int}(r \cdot 5 + 1), \quad j = \overline{1, n_u}, i = \overline{1, 5}.$$

Життєздатний мутант замінює особину у популяції. Процедура мутації в певному сенсі протилежна процедурі схрещування. Взаємодія даних двох процедур знижує ризик отримання локального оптимуму.

4. Формування множини елітарних особин. Для кожного покоління з популяції виділяються найбільш життєздатні особини, в термінах математичного програмування – це множина рішень, що не домінуються. Для цього використано вбудовану процедуру алгоритму попарних порівнянь. Отримані особини додаються до множини елітарних особин. У складі цієї множини з покоління у покоління накопичуються рішення, які складають множину Парето.

5. Ранжування. У багатокритеріальному випадку класичне ранжування майже не можливо реалізувати. Тому класичну процедуру ранжування замінено на принципово іншу. Введено вік, що змінюється з числом поколінь, та термін життя особин. В процесі зміни поколінь відсіюються особини, чий вік перевищив термін життя. Термін життя може змінюватись в залежності від ресурсів ареалу. У якості ресурсу ареалу неявно виступає продуктивність комп'ютера. Таким чином, ця процедура налаштовує швидкодію алгоритму на продуктивність комп'ютера.

6. Умовою зупинки пошуку є відсутність нових поповнень множини елітарних особин на протязі заданого числа поколінь.

Для побудови оптимальної топологічної схеми РЕМ розроблено метод, що реалізується комбінованим алгоритмом, який складається з наступних етапів.

1. Формування топологічної схеми, що з'єднає між собою всі ТП. На даному етапі використано метод динамічного програмування. Критерієм під'єднання вільної ТП до мережі є:

$$f = l_i + l_{ij} \rightarrow \min, \quad i = \overline{0, k}, \quad j = \overline{k + 1, n}, \quad (26)$$

де  $l_i$  – довжина маршруту від ТП <sub>$i$</sub>  до ТП живлення,  $l_{ij}$  – дистанція між ТП <sub>$i$</sub>  та непід'єднаною ТП <sub>$j$</sub> ,  $k$  – число під'єднаних ТП,  $n$  – загальне число ТП.

Для пошуку множини локальних оптимумів процедура повторюється при різних початкових умовах.

2. Формування топологічної схеми РЕМ з точками відгалужень. Для визначення точок відгалужень спочатку методом регресійного аналізу будується крива, що згладжує ломану лінію на кожній вітці РЕМ, на ній обираються точки відгалуження за критерієм мінімуму дистанції до відповідної ТП, за величиною цієї дистанції приймається рішення щодо доцільності утворення відгалуження.

3. Визначення доцільності утворення точки розгалуження мережі за межами ТП. Таку точку доцільно вводити, коли сума дистанцій від неї до сусідніх ТП менше, ніж сума дистанцій між цими ж ТП без додаткової точки.

Вся множина варіантів топологічних схем використовується в подальших розрахунках задля отримання оптимальних структурних параметрів РЕМ.

Всі розроблені методи та алгоритми реалізовано у вигляді обчислювальних програм в середовищі Microsoft Excel Visual Basic і досліджено щодо їх раціонального застосування. Для порівняння ефективності методів оптимізації СК РЕМ запропоновано критерій виду

$$T_n = \tau_m \cdot F_{CPU} / n_{уч}, \quad (27)$$

де  $\tau_m$  - час пошуку множини Парето, доба;  $F_{CPU}$  – тактова частота процесора, ГГц;  $n_{уч}$  – число ділянок РЕМ.

Результати досліджень (рис. 4) показали, що при розмірності множини альтернатив  $<10^4$  параметр ефективності метода попарних порівнянь альтернатив не гірше, ніж у інших методів і для даних умов раціонально застосовувати даний метод. В діапазоні розмірів множини альтернатив  $10^4 – 10^5$  параметр ефективності найкращий у методів нечіткої стратифікації та деформації еліпсоїда. В діапазоні  $10^5 – 10^7$  ефективніший метод скорочення множини альтернатив, а для задач більшої розмірності ефективніше застосування генетичного алгоритму.

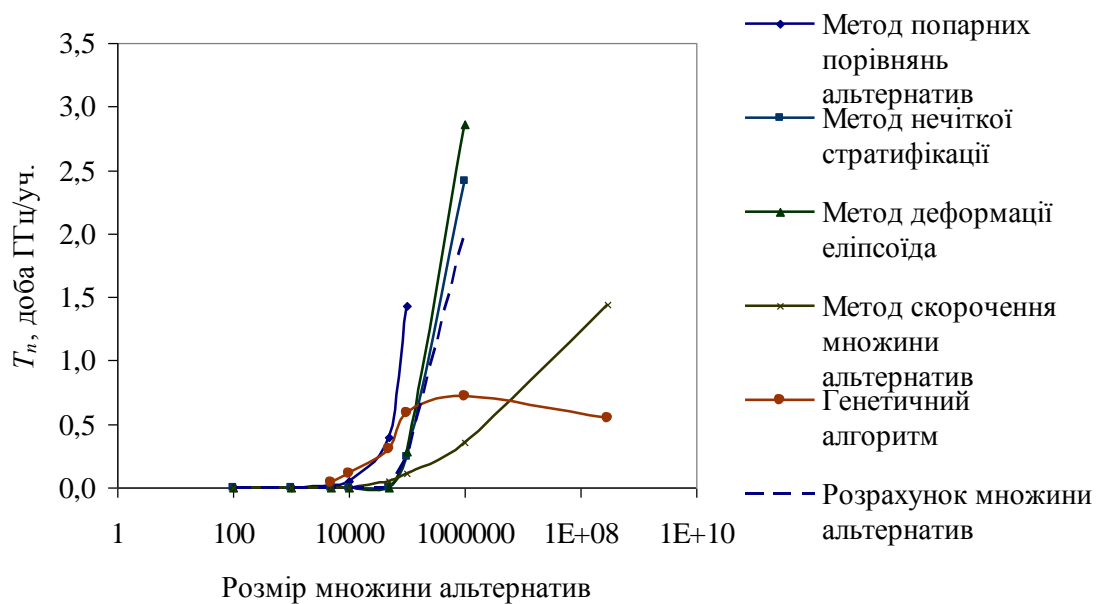


Рисунок 4 - Результат порівняння ефективності розроблених методів оптимізації РЕМ

Раціонально комбінуючи розроблені методи і алгоритми пошуку множини рішень, що не домінуються, і пошуку єдиного рішення, можна розв'язати задачу практично необмеженої розмірності множини альтернатив і за прийнятний час без суттєвих спрощень моделей і умов розв'язання задач.

У п'ятому розділі здійснено дослідження ефективності розроблених методів та алгоритмічного забезпечення підтримки прийняття рішень з оптимізації структури СК РЕМ в контексті розв'язання конкретних задач.



Здійснено пошук оптимального рішення щодо структури СК ділянки РЕМ 10 кВ. Множина альтернатив містить 660 елементів. Відсутня інформація про тип опор ЛЕП, тип і конструктивні особливості автоматики ТП. Використано математичну модель (1)-(6). Для отримання множини Парето застосовано алгоритм, що реалізує метод попарного порівняння альтернатив, (12) і алгоритм, що реалізує метод еліпсоїда (18, 19), для виділення паритетного єдиного рішення та рішень з пріоритетом кожної цільової функції. Проведено дослідження залежності єдиного паритетного рішення та рішень з пріоритетом по кожній цільовій функції від зовнішніх для СК РЕМ параметрів: довжини ділянки ( $L_{ЛЕП}$ ) та середньорічної потужності електроспоживання на ділянці ( $P_{ЛЕП}$ ) при чіткому визначенні цих параметрів. В результаті доведено, що множина раціональних рішень для СК ділянки РЕМ практично не змінюється при різних значеннях  $L_{ЛЕП}$  і  $P_{ЛЕП}$ . Єдине рішення залежить від вказаних параметрів незначно.

Проведено дослідження стійкості отриманих рішень при зміні степені нечіткості зовнішніх для СК ділянки РЕМ параметрів ( $L_{ЛЕП}$  і  $P_{ЛЕП}$ ). Показано, що склад множини рішень, що не домінуються, не залежить від степені нечіткості  $L_{ЛЕП}$  і  $P_{ЛЕП}$ . Змінюються лише степені нечіткості цільових функцій. Єдине паритетне рішення незначно конкретизується при чіткому заданні  $L_{ЛЕП}$ . Така стійкість рішення дозволяє робити висновки щодо раціональної структури СК ділянки РЕМ на допроектних стадіях, коли невизначеність зовнішньої інформації найбільша.

Також здійснено пошуку оптимального рішення щодо структури СК ділянок РЕМ з двома рівнями напруги при різній степені нечіткості вихідних даних.

Вихідні дані: довжини ділянок з різними напругами, середньорічні потужності електроспоживання, перетини проводів на цих ділянках ( $L_{110/35}$ ,  $P_{110/35}$ ,  $L_{10}$ ,  $P_{10}$ ,  $F$ ). Ділянки можуть мати резервне живлення. Задача розв'язувалась при різних комбінаціях нечіткості у вихідних даних. Досліджено декілька варіантів сполучення чіткості та нечіткості завдання вихідних даних.

Варіант 1. Усі вихідні параметри у вигляді нечітких чисел. Загальне число альтернатив складає 3456. Для отримання множини Парето застосовано метод нечіткої стратифікації і для отримання єдиного паритетного рішення і рішень з різними пріоритетами – метод деформації еліпсоїда.

Варіант 2. Як у варіанті 1, але чітко задаються значення параметру  $P_{110/35}$  з допустимого інтервалу. Інші параметри задаються у вигляді нечітких чисел. Результат показав, що для  $P_{110/35} > 1000$  кВт паритетне рішення таке ж, як і для варіанта 1. А для  $P_{110/35} < 1000$  кВт, що не є характерним для такого класу напруг, отримано нове рішення.

Варіант 3. Як і для варіанту 2, але додатково чітко задається значення  $L_{110/35}$ . Інші – у вигляді нечітких чисел. Виконане дослідження показало, що результат розрахунків по варіанту 2 доповнився ще одним паритетним рішенням для  $P_{110/35} < 1000$  кВт і  $L_{110/35} > 30$  км.

Варіант 4. Як і для варіанту 3, але до параметрів, що задаються чітко, додано  $P_{10}$ . Інші – у вигляді нечітких чисел. Аналізуючи результати, відмічено, що для  $P_{110/35} > 30000$  кВт при будь-яких  $L_{110/35}$  і  $P_{10}$  справедливе рішення, що отримане у варіантах 1, 2, 3. При  $P_{110/35} < 10000$  кВт рішення суттєво залежить

від  $L_{110/35}$  і  $P_{10}$ . Це область неочевидних рішень, де розроблене алгоритмічне забезпечення може допомогти ОПР обґрунтувати рішення.

Варіант 5. Дослідження аналогічне варіанту 4, але до параметрів, що задаються чітко, додано  $L_{10}$ . Інші – у вигляді нечітких чисел. Результат у цілому схожий на результат, отриманий у варіанті 4. Особливо багато різноманітних варіантів оптимальних рішень знаходиться в діапазоні  $P_{110/35} < 10000$  кВт/год і  $L_{110/35} \geq 24$  км. Саме тут може бути найбільший зиск від застосування розробленого алгоритмічного забезпечення, оскільки в даній області оптимальне рішення найменш очевидно.

Варіант 6. Дослідження аналогічне варіанту 5, але до параметрів, що задаються чітко, додано  $F$ . Загальне число альтернатив складає 65472. Застосовано метод деформації еліпсоїда. Для отриманого результату справедливі тіж самі висновки, що і для попереднього варіанту. Але є і винятки саме в області неочевидних рішень.

В цілому результати проведеного дослідження показують, що по мірі конкретизації вихідних для СК РЕМ параметрів деталізуються і рішення, що отримуються. Але рішення, що отримане при повній невизначеності вихідних параметрів, присутнє і у випадку повної їх визначеності. Область його застосування у просторі вихідних параметрів звужується по мірі конкретизації задачі. Це дозволило виділити у просторі вихідних параметрів області, де конкретизація вихідних параметрів суттєво впливає на рішення, що приймається, несуттєво впливає, зовсім не впливає. Відповідно, ці області показують, для розробки структури систем керування яких мереж розроблене алгоритмічне забезпечення найбільш необхідне і ефективне.

Здійснено оцінку розроблених методів і алгоритмічного забезпечення шляхом порівняння техніко-економічних показників наявної СК РЕМ, що проектувалася традиційними методами, і оптимальної СК РЕМ, отриманої з застосуванням розроблених і удосконалених в даній роботі методів і алгоритмів. Множина альтернатив за попереднім підрахунком складається з більш ніж  $7,9 \cdot 10^{28}$  елементів. Для розв'язання задачі застосовано генетичний алгоритм (23) – (25). За 22 години отримано множину Парето, що містить 4937 альтернатив. Методом еліпсоїда (18), (19) отримано єдине паритетне рішення та рішення з пріоритетом за кожною цільовою функцією. У порівнянні з існуючою оптимальна за паритетним рішенням РЕМ має на 31% нижче інтегральний річний недовідпуск електроенергії ( $W$ ), на 14% нижчі приведені витрати ( $Z$ ) та на 11% нижчі річні технологічні втрати ( $N$ ). Рішення з пріоритетом  $W$  дозволило б знизити інтегральний річний недовідпуск електроенергії в середньому на 63%, з пріоритетом  $N$  – знизити технологічні втрати в середньому на 35%, а з пріоритетом  $Z$  – знизити приведені витрати в середньому на 41%. Це свідчить про ефективність запропонованих методів і алгоритмів.

Отримано рекомендації щодо реконструкції СК РЕМ промислового підприємства при зміні електроспоживання технологічного обладнання. В результаті оптимізаційних розрахунків отримано три варіанти реконструкції СК РЕМ (табл. 1). Негативні значення приведених витрат у табл. 1 означають, що за рахунок продажу частини обладнання можна отримати прибуток.

Перший варіант – повна реконструкція РЕМ, що дозволить знизити інтегральний річний недовідпуску електроенергії в середньому на 39% (<39%, 38%, 52%>), технологічні втрати за рік в середньому на 36% (<36%, 19%, 39%>) при цьому капітальні витрати з урахуванням продажу обладнання, що замінюється мінімальні. Другий варіант – реконструкція тільки трансформаторів, що дозволяє знизити технологічні втрати – в середньому на 44% (<44%, 24%, 49%>) ціною підвищення інтегрального річного недовідпуску електроенергії в середньому на 31% (<31%, 30%, 41%>) при цьому реалізація старих трансформаторів дозволяє покрити витрати на реконструкцію. Третій варіант – реконструкція без додаткових капітальних витрат за рахунок оптимальної перестановки трансформаторів, що дозволить знизити технологічні втрати в середньому на 21% (<21%, 12%, 24%>) ціною підвищення інтегрального річного недовідпуску електроенергії в середньому на 31% (<31%, 30%, 41%>). Нечіткі значення техніко – економічних показників (табл. 2) дозволяють оцінити можливі ризики рішень що приймаються.

Таблиця 1 - Чисельні значення техніко-економічних показників РЕМ

$W_{cp}$ , кВт год/рік	$W_{min}$ , кВт год/рік	$W_{max}$ , кВт год/рік	$Z_{cp}$ , тис. у.о.	$Z_{min}$ , тис. у.о.	$Z_{max}$ , тис. у.о.	$N_{cp}$ , тис. у.о./ рік	$N_{min}$ , тис. у.о./ рік	$N_{max}$ , тис. у.о./ рік
Оптимальний варіант реконструкції РЕМ (варіант 1)								
134068,9	31138,7	312147,6	60,3	-14,7	341,9	6,6	2,4	14,5
Оптимізація трансформаторів (варіант 2)								
295804,2	91490,7	678340,9	-17,1	-95,9	68,2	5,5	1,8	12,4
Перерозподіл існуючих трансформаторів (варіант 3)								
295804,2	91490,7	678340,9	-51,0	-79,5	-33,3	7,8	2,1	18,6

Проведено пошук рішення щодо оптимальної структури СК розгалуженої несекціонованої РЕМ з визначеною топологічною схемою. Число альтернатив складає  $>1,25 \cdot 10^{15}$  елементів. Застосовано метод зменшення числа альтернатив. Розрахунок цільових функцій на множині альтернатив зайняв майже 4 години. В даному випадку до моделі (1) - (6) додано обмеження (11). Далі методом нечіткої стратифікації (16), (17) за 1,5 хв. отримано множину Парето, що складає 22 рішення. Для виділення паритетного єдиного рішення та рішень з пріоритетом за кожною цільовою функцією застосовано метод еліпсоїда (18), (19).

Розв'язано задачу структурної оптимізації СК розгалуженої секціонованої РЕМ з невизначеною топологічною схемою, тобто найбільш складний узагальнений випадок. Априорі визначені місця розташування ТП 10/0,4 кВ координатами  $X, Y$  на місцевості. Для кожної ТП задано середньорічну потужність електроспоживання. Введено наступні обмеження на структурні параметри СК РЕМ: односторонній підвід живлення; розглядаються варіанти тільки повітряних ліній електропередачі; перетин проводів наступної за ходом подачі електроенергії ділянки не перевищує перетина проводів попередньої ділянки; у якос-



$$\Delta W(V) = |W_A(V) - W_B(V)| + |W_A(V) - W_C(V)| + |W_B(V) - W_C(V)|, \quad (28)$$

$$W_A(V) = \sum_{j=1}^n W_A^j(v_j); \quad W_B(V) = \sum_{j=1}^n W_B^j(v_j); \quad W_C(V) = \sum_{j=1}^n W_C^j(v_j),$$

де  $W_A, W_B, W_C$ , – суммарні дані лічильників електроенергії споживачів за місяць відповідно за фазами А, В і С;  $W_A^j, W_B^j, W_C^j$  – дані лічильників електроенергії  $j$ -го споживача за місяць відповідно за фазами;  $V$  – вектор варіантів підключень споживачів до фаз;  $n$  – число споживачів у РЕМ.

Уведено ще одну цільову функцію, що відображує число перепідключень оскільки від цього залежать витрати на їх виконання

$$K(V) = \sum_{j=1}^n k_j(v_j), \quad (29)$$

де  $k_j = 1$ , коли варіант підключення споживача  $j$  відрізняється від вихідного, і  $k_j = 0$  у протилежному випадку.

Множину альтернатив складають можливі сполучення варіантів підключень споживачів. Число елементів цієї множини є  $3^n$ . Для практичної апробації обрано реальну РЕМ населеного пункту, що живить 65 споживачів. Моделювання системи у Simulink показало, що для вихідного варіанту підключення споживачів при рівнях струмів, що відповідають їх середньомісячному електроспоживанню:  $I_A = 30,6$  А,  $I_B = 14,3$  А,  $I_C = 24,2$  А, а струм у нульовому проводі складає  $I_N = 14,1$  А, що свідчить про наявність асиметрії.

Для оптимізації такої системи застосовано генетичний алгоритм і протягом 2,5 годин отримано множину Парето, що складається з 10 рішень. Методом еліпсоїда отримано єдине паритетне рішення, що дозволяє симетрувати навантаження за фазами за рахунок перепідключення 22 споживачів. Моделювання у Simulink показало, що для оптимального рішення  $I_A = 23,09$  А,  $I_B = 23,11$  А,  $I_C = 23,04$  А,  $I_N = 0,07$  А.

Розроблено алгоритмічне забезпечення підсистеми прийняття рішень з планування заходів щодо енергозбереження на основі довгострокового прогнозування електроспоживання підприємства в умовах невизначеності за допомогою удосконаленого методу нечіткого регресійного аналізу.

Вихідними даними є результати вимірів електроспоживання автоматизованою системою контролю та обліку електроспоживання (АСКОЕ) підприємства за 2012 рік. В результаті обробки даних отримана регресійна залежність електроспоживання від номера дня року у наступному вигляді.

При  $t_1 < t < t_2$

$$W = < -55,454; -30,124; 4,147 > t^2 + < 58,131; 35,894; -0,400 > t + < 6,846; 20,547; 42,012 > \cdot \cos(2 \cdot \pi / 365 \cdot (d - < 8,441; 7,871; 9,317 > )) + < 10,760; 11,609; 12,722 >, \\ \text{а при } t_1 > t, t > t_2$$

(30)

$$\begin{aligned}
 W = & \langle 48,953; 18,449; 12,510 \rangle t^2 + \langle -53,501; -19,125; -10,373 \rangle t + \\
 & + \langle 10,023; 10,490; 12,132 \rangle \cdot \cos(2 \cdot \pi / 365 \cdot (d - \\
 & - \langle 10,433; 11,987; 22,797 \rangle)) + \langle 41,241; 47,199; 57,251 \rangle, \\
 t_1 = & 0,0518 \cos(2\pi/365(d-353,462)) + 0,276, \\
 t_2 = & 0,1044 \cos(2\pi/365(d-175,431)) + 0,77,
 \end{aligned}$$

де  $W$  – електроспоживання, кВт год;  $t$  – поточний час протягом доби, доба;  $t_1, t_2$  – відповідно час сходу та заходу сонця, доба;  $d$  – номер дня у році.

Степінь співпадіння регресії для обробленого масиву даних 0,5291, степінь нечіткості 0,6445. При цьому 91,2% даних потрапило в інтервал невизначеності нечіткого прогнозу. Для обробленого масиву даних  $MAPE = 11,67\%$ . Перевірку прогнозних властивостей моделі проведено на масиві даних, що не оброблявся. Для даних за 2011 рік степінь співпадіння склала 0,4462, степінь нечіткості 0,6964,  $MAPE = 13,34\%$ . За три перші місяці 2013 року степінь співпадіння склала 0,5968, степінь нечіткості 0,6212,  $MAPE = 8,11\%$ . Результат свідчить, що принаймі на наступний рік точність прогнозу суттєво не змінюється.

У **додатках** наведено вихідні дані для отримання бази нечітких значень параметрів моделі оцінки техніко-економічних показників ефективності СК РЕМ; база нечітких значень цих параметрів; акти використання і впровадження результатів дисертаційної роботи у ДПВНДІ «Укрмережпроект», у Харківському метрополітені, на Харківському приладобудівному заводі ім. Т.Г.Шевченка, у ХНТУСГ ім. Петра Василенка.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі набули розвиток теоретичні основи та практичні аспекти прийняття рішень з оптимізації структури систем керування розподільчих електричних мереж на допроектний стадіях, при їх проектуванні, реконструкції та експлуатації в умовах невизначеності вихідної інформації та багатокритеріальності. Отримані результати у сукупності представляють собою теоретичні основи розв'язання важливої науково-прикладної проблеми підвищення ефективності технологічного процесу електропостачання шляхом синтезу оптимальної структури системи керування розподільчими електромережами.

1. Розроблено математичні моделі оцінки техніко – економічних показників ефективності СК РЕМ у нечіткій формі, при цьому:

- на основі системного підходу обґрунтовано структуру показників ефективності СК РЕМ; удосконалено систему показників для випадку розгалуженої секціонованої РЕМ;

- отримано значення параметрів у вигляді трикутних нечітких чисел, а також нечітких регресійних залежностей, що дозволило перетворити детерміновану математичну модель в нечітку, розкривши тим самим невизначеність вихідної інформації;

- отримано залежності для нечіткої оцінки степені порушення обмежень за напругою і поєднано їх з нечіткою математичною моделлю оцінки техніко-



економічних показників, що дозволило спростити врахування обмежень при оптимізаційних розрахунках;

- удосконалено метод нечіткого регресійного аналізу шляхом введення розробленого критерію, який паритетно враховує степінь суміщення і степінь невизначеності опису, що дозволило отримувати нечіткі регресійні залежності для математичної моделі розрахунку техніко – економічних показників ефективності СК РЕМ.

2. Адаптовано задачу прийняття оптимальних рішень при нечітко заданих функціях цілі до пошуку структури СК РЕМ. При цьому:

- узагальнено на  $n$  – мірний випадок і формалізовано задачу пошуку множини рішень, що не домінуються, при нечітко заданих цільових функціях щодо задачі структурної оптимізації СК РЕМ;

- на основі мінімаксного критерію обґрунтовано відношення переваги для нечітких функцій цілі при пошуку оптимальних рішень щодо структури СК РЕМ.

3. Розроблено і теоретично обґрунтовано низку методів і алгоритмів підтримки прийняття раціональних рішень щодо структури СК РЕМ в нечіткій формі, при цьому:

- удосконалено метод нечіткої стратифікації цільових функцій, алгоритм реалізації якого при розмірі множини альтернатив  $10^4 - 10^5$  по показнику швидкодії в  $1,6 \cdot 10^2$  рази ефективніше алгоритму попарного порівняння альтернатив; обґрунтовано оптимальні параметри налаштування алгоритму для оптимізації СК РЕМ; доведено стійкість рішень, що отримуються;

- розроблено метод і алгоритм вибору єдиного рішення з множини Парето, що базується на введенні нечіткої цільової функції еліпсоїдного виду, що дозволило здійснювати вибір єдиного паритетного рішення та/або рішення з пріоритетом будь-якої функції цілі за один огляд множини;

- розроблено метод нечіткого пошуку підмножини Парето, який базується на деформації нечіткої цільової функції еліпсоїдної форми, алгоритмічна реалізація якого при розмірності множини альтернатив  $10^4 - 10^5$  за показником швидкодії в  $1,3 \cdot 10^2$  рази ефективніше алгоритму попарного порівняння альтернатив;

- розроблено метод скорочення множини допустимих альтернатив, який у спрощеній формі реалізує ідеї методу аналізу ієрархій для випадку аддитивних цільових функцій і за показником швидкодії в  $5 \cdot 10^2$  рази ефективніше алгоритму попарного порівняння альтернатив і в 6 разів ефективніше алгоритму нечіткої стратифікації при розмірності множини альтернатив  $10^5 - 10^7$ ;

- удосконалено генетичний алгоритм пошуку підмножини Парето введенням нової системи ранжування та відсіву особин на основі введеного поняття віку та терміну життя особини, що дозволило реалізувати механізм регулювання швидкості пошуку рішення і автоматично налаштовувати процес пошуку на розрахункові можливості конкретного комп'ютера; отриманий алгоритм при розмірності множини альтернатив  $> 10^7$  за показником швидкодії в  $2 \cdot 10^7$  разів ефективніше алгоритму попарного порівняння альтернатив, у  $4,5 \cdot 10^2$  разів ефективніше алгоритму нечіткої стратифікації і більш ніж втричі ефективніше ме-

тоду скорочення множини допустимих альтернатив;

- розроблено метод отримання множини варіантів топологічної схеми РЕМ, який базується на комбінації методів динамічного програмування при різних початкових умовах і регресійного аналізу;

- отримано області ефективного застосування розроблених методів і алгоритмів оптимізації СК РЕМ; показано, що при розмірності множини альтернатив  $< 10^4$  ефективно застосування методу попарних порівнянь альтернатив; при розмірності множини альтернатив  $10^4 - 10^5$  ефективно застосування алгоритмів на основі методу нечіткої стратифікації та деформації еліпсоїда; при розмірності множини альтернатив  $10^5 - 10^7$  і при виконанні умов аддитивності цільових функцій раціонально застосовувати метод скорочення множини альтернатив; при розмірності множини альтернатив  $> 10^7$  доцільно застосовувати генетичний алгоритм;

- розроблено тестове програмне забезпечення для перевірки розроблених алгоритмів в умовах розв'язання прикладних задач.

4. Розв'язано задачу отримання оптимальних структурних параметрів СК ділянок РЕМ що проектуються чи реконструюються при чітко і нечітко заданих характеристиках електроспоживання, при цьому:

- розв'язано задачу визначення структурних параметрів СК ділянок РЕМ з одним (10 кВ) чи двома рівнями напруг (110/35 кВ і 10 кВ) єдиної розподільчої електричної мережі;

- доведено, що отримані рішення стійкі по відношенню до степені нечіткості вихідних для СК РЕМ даних, що дозволяє робити висновки про раціональну структуру системи керування розподільчої мережі на ранніх стадіях проектування при різних степенях невизначеності вихідної інформації.

5. Досліджено залежність оптимальної структури СК РЕМ від параметрів електроспоживання при різних степенях нечіткості інформації щодо цих параметрів, при цьому:

- визначено області оптимальних значень структурних параметрів СК РЕМ у залежності від таких характеристик, як середньорічна потужність електроспоживання і довжина ділянки ЛЕП, що дозволяє оцінити параметри системи на передпроектних стадіях;

- визначено сполучення діапазонів значень параметрів електроспоживання, при яких оптимальне рішення відносно постійне і при яких оптимальне рішення не очевидне і ефект від застосування розроблених моделей і методів максимальний.

6. Проведено оцінку ефективності розробленого алгоритмічного забезпечення, при цьому:

- показано, що застосування розробленого алгоритмічного забезпечення дозволяє досягти кращих показників ефективності СК РЕМ у порівнянні з існуючою, а саме: інтегральний річний недовідпуск електроенергії в середньому нижче на 31% - 63%, приведені витрати - на 14% - 41%, технологічні втрати електроенергії за рік - на 11% - 35%;

- запропоновано варіанти реконструкції СК РЕМ підприємства, які розраховані на різні об'єми капітальних витрат і дозволяють знизити інтегральний

річний недовідпуск електроенергії на 38% - 52% та технологічні втрати на 19% - 39% при прийнятних капітальних вкладеннях за рахунок комплексної реконструкції; або знизити технологічні втрати на 24% - 49%, підвищивши інтегральний річний недовідпуск електроенергії на 30% - 41% за рахунок реконструкції тільки силових трансформаторів; або знизити технологічні втрати на 12% - 24%, підвищивши інтегральний річний недовідпуск електроенергії на 30% - 41% за рахунок оптимальної перестановки силових трансформаторів без капітальних витрат.

7. Розв'язано задачу отримання оптимальної структури СК розгалуженої секціонованої РЕМ, що поєднує як побудову оптимальної топологічної схеми, так і схемно – конструктивне виконання елементів системи на передпроектних стадіях в умовах невизначеності, при цьому:

- реалізовано пошук не тільки множини Парето, а і рішень з паритетним врахуванням всіх цільових функцій і рішень з пріоритетом кожної цільової функції, що підвищує інформативність і обґрунтованість рішень;

- розв'язано задачу вибору структурних параметрів СК розгалуженої несекціонованої РЕМ 10 кВ при заданій топологічній схемі; отримано підмножину Парето і оптимальне рішення без внесення спрощень у математичні моделі при розмірності множини альтернатив  $< 10^{16}$ ; витрати процесорного часу не перевищили 7,5 годин;

- розв'язано задачу вибору структурних параметрів СК розгалуженої секціонованої РЕМ 10 кВ і отримано комплексне оптимальне рішення, що враховує як топологічну схему, так і схемно - конструктивне виконання елементів системи без внесення спрощень у математичні моделі і методи при розмірності множини альтернатив  $> 10^{50}$  з витратами процесорного часу близько 10 діб.

8. Розроблено алгоритмічне забезпечення прийняття рішень системи керування якістю електропостачання в частині оптимального симетрування пофазних навантажень; ефективність його підтверджено розрахунком для конкретної мережі, так при кількості споживачів  $> 60$  менш ніж за 2,5 години отримано оптимальне рішення, що суттєво підвищує оперативність, інформативність і обґрунтованість рішень, що приймаються.

9. Розроблено алгоритмічне забезпечення прийняття рішень з планування заходів щодо енергозбереження в частині довготермінового прогнозування електроспоживання технологічним обладнанням підприємства в умовах невизначеності на основі удосконаленого нечіткого регресійного аналізу; ефективність його підтверджено отриманими для конкретного підприємства прогнозними залежностями електроспоживання на рік вперед з характеристиками: степінь співпадіння 0,5291, степінь нечіткості 0,6445, що відповідає середньомодульній відносній похибці  $MAPE = 11,67\%$ .

## ОСНОВНІ ПУБЛІКАЦІЇ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Тимчук С. А. Модели и методы поиска оптимальной структуры сети электроснабжения при нечетко заданных целях [Текст]: монография / С.А. Тимчук. - Харьков: Факт, 2010.-219 с.-39 ил. – ISBN 978-966-637-688-9.

2. Мирошник А. А. Несимметричные режимы в сельских электросетях: анализ и моделирование [Текст]: монография / А. А. Мирошник, С. А. Тимчук. – Saarbruken, Germany: LAMBERT Academic Publising, 2014.-132 с.-55 ил. – ISBN 978-3-659-31564-0.

*Здобувачем здійснено математичну постановку задачі оптимального симетрування навантаження між фазами, адаптовано генетичний алгоритм до її розв'язання, отримано результат оптимізаційних розрахунків, запропоновано підхід до нечіткої оцінки якості електроенергії.*

3. Тимчук С. О. Комбінований алгоритм вирішення задачі вибору оптимальних параметрів трансформатора нагрівання [Текст] / С. О. Тимчук, І. П. Білаш, О. А. Савченко // Вісник ХДТУСГ. Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України. – Харків: ХДТУСГ, 2004. – вип. 27. – т. 1. – С. 43 – 50.

*Здобувачем запропоновано комбінований алгоритм двокритеріальної оптимізації параметрів трансформатора нагрівання.*

4. Тимчук С. О. Векторна оптимізація системи електропостачання (РЕМ) в нечіткій постановці [Текст] / С. О. Тимчук, М. М. Черемісін, М. С. Тимчук // Вісник ХНТУСГ. Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України. – Харків: ХНТУСГ, 2005. – вип. 37. – т. 1. – С. 8 – 12.

*Здобувачем обгрунтовано систему чітких та нечітких критеріїв отримання оптимального рішення, запропоновано варіант алгоритму, що реалізує метод нечіткої стратифікації.*

5. Тимчук С. О. Застосування методики векторної оптимізації системи електропостачання (РЕМ) в нечіткій постановці [Текст] / С. О. Тимчук // Вісник ХНТУСГ. Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України. – Харків: ХНТУСГ, 2006. – вип. 43. – т. 1. – С. 66 – 70.

6. Тимчук С. А. Методика прийняття рішення при виборі і аналізі структури розподільчих мереж при нечітко заданій цілі [Текст] / С. А. Тимчук, Н. М. Черемисин, М. С. Грабовская // Енергетика та електрифікація. – 2007. - №8. – С. 45 – 51.

*Здобувачем обгрунтовано вид матриці згортання нечітких критеріїв отримання оптимального рішення, а також вид функцій приналежності рівнів стратифікації цільових функцій методу нечіткої стратифікації, запропоновано врахування критерію віддалення від цілі для підвищення селективності методу.*

7. Тимчук С. О. Методика пошуку оптимальних заходів по зниженню втрат електричної енергії в розподільчих мережах на базі імітаційної моделі та Парето-метода [Текст] / С. О. Тимчук, М. М. Черемісін, О. О. Мірошник // Вісник ХНТУСГ. Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України. – Харків: ХНТУСГ, 2007. – Вип. 57. – Т. 1. – С. 11 – 15.

*Здобувачем запропоновано підхід до врахування обмеження за напругою у нечіткій формі на основі перетину нечітких чисел.*

8. Тимчук С. О. Метод пошуку єдиного рішення у множині Парето в нечіткій формі [Текст] / С. О. Тимчук, М. С. Грабовська // Вісник ХНТУСГ. Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України. – Харків: ХНТУСГ, 2008. – Вип. 73. – Т. 2. – С. 39 – 40.

*Здобувачем висуното ідею метода пошуку єдиного рішення в множині Парето за рахунок введення нечіткого критерію еліпсоїдної форми.*

9. Тимчук С. О. Методика побудови математичної моделі системи електропостачання в нечіткій формі [Текст] / С. О. Тимчук, М. С. Грабовська // Вісник ХНТУСГ. Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України. – Харків: ХНТУСГ, 2009. – вип. 87. – С. 81 – 83.

*Здобувачем запропоновано методику отримання вихідних даних для розрахунку техніко-економічних показників ефективності РЕМ в нечіткій формі, отримано результати застосування цієї методики.*

10. Тимчук С. О. Метод пошуку множини Парето в нечіткій формі [Текст] / С. О. Тимчук, Д. С. Тимчук // Вісник ХНТУСГ. Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України. – Харків: ХНТУСГ, 2010. – Вип. 102. – С. 97 – 99.

*Здобувачем здійснено постановку оптимізаційної задачі в нечіткій формі, запропоновано ідею метода деформації еліпсоїду.*

11. Тимчук С. О. Векторна структурна оптимізація розгалуженої розподільчої мережі 10 кВ за допомогою генетичного алгоритму [Текст] / С. О. Тимчук // Вісник ХНТУСГ. Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України. – Харків: ХНТУСГ, 2011. – Вип. 117. – С. 44 – 46.

12. Тимчук С. О. Прогнозування електроспоживання на основі нечіткого регресійного аналізу [Текст] / С. О. Тимчук, І. А. Катюха // Вісник ХНТУСГ. Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України. – Харків: ХНТУСГ, 2012. – Вип. 130. – С. 36 – 38.

*Здобувачем запропоновано удосконалення нечіткого регресійного аналізу уведенням нового критерію степені співпадіння на основі перетину нечітких чисел, здійснено математичне обґрунтування критерію.*

13. Тимчук С. А. Структурная оптимизация разветвленной секционированной сети электроснабжения в условиях многокритериальности и неопределенности исходной информации [Текст] / С. А. Тимчук, И. А. Фурман, М. А. Сиротенко // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. – Мелітополь: ТДАТУ, 2012. – Вип. 12. – Т. 4. – С. 265 – 274.

*Здобувачем здійснено адаптацію генетичного алгоритму до задачі отримання раціональних рішень щодо структури РЕМ в умовах невизначеності, отримано множину рішень, що недомінуються для конкретної РЕМ.*

14. Тимчук С. А. Нечеткая математическая модель расчета недоотпуска электроэнергии в разветвленной секционированной электрической сети 10 кВ [Текст] / С. А. Тимчук, М. А. Сиротенко, И. А. Фурман // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. - 2013. - №1. - С. 54-57.

*Здобувачем запропоновано ідею розрахунку недовідпуску електроенергії у*

*матричній формі з урахуванням невизначеності вихідної інформації.*

15. Тимчук С.О. Рівномірне розподілення навантажень в мережі 0,38/0,22 кВ з використанням генетичних алгоритмів [Текст] / С. О. Тимчук, О. О. Мірошник // Технічна електродинаміка. - 2013. - №4.- С. 67-73.

*Здобувачем здійснено математичну постановку задачі оптимального симетрування навантаження між фазами, адаптовано генетичний алгоритм до її розв'язання, отримано результат оптимізаційних розрахунків.*

16. Тимчук С.О. Використання нечіткого регресійного аналізу для прогнозування електроспоживання на підприємстві [Текст] / В. В.Овчаров, І. А. Катюха, С. О. Тимчук // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. – Мелітополь: ТДАТУ, 2013. – Вип. 13. – Т. 2. – С. 29 – 36.

*Здобувачем здійснено математичне обґрунтування застосування удосконаленого нечіткого регресійного аналізу до задачі довготермінового прогнозу електроспоживання на підприємстві.*

17. Тимчук С.О. Довгостроковий прогноз електроспоживання з використанням нечіткого регресійного аналізу на підприємстві [Текст] / В. В.Овчаров, І. А. Катюха, С. О. Тимчук // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: «Обчислювальна техніка та автоматизація». – Донецьк, 2013. - № 1(24). – С. 139 – 145.

*Здобувачем здійснено розрахунки для отримання довготермінових прогнозних моделей електроспоживання на підприємстві на основі даних АСКОЕ.*

18. Тимчук С. А. Совершенствование методологии поиска рациональных решений в условиях многокритериальности и неопределенности исходной информации на примере системы электроснабжения [Текст] / С. А. Тимчук, Н. М. Черемисин // Энергетика та електрифікація. – 2013. - №4. – С. 53 – 60.

*Здобувачем розроблено математичну модель техніко-економічних показників ефективності розгалуженої секціонованої РЕМ, методика її фазифікації, обґрунтовано умови недомінованості альтернатив для нечітких цільових функцій, удосконалено генетичний алгоритм уведенням нової процедури ранжування, отримано результат оптимізації найбільш складного варіанту структури РЕМ.*

19. Тимчук С. А. Оптимизация системы электроснабжения промышленного предприятия при ее реконструкции [Текст] / С. А. Тимчук, Н. С. Деренько // Східно-європейський журнал передових технологій. – 2013. - № 4/8 (64) – С. 4 - 8.

*Здобувачем застосовано розроблені математичні моделі техніко-економічних показників ефективності РЕМ, удосконалений генетичний алгоритм для задачі реконструкції РЕМ конкретного підприємства, отримано низку варіантів її реконструкції.*

20. Тимчук С.А. Математическая модель потерь мощности в силовых трансформаторах 10/0,4 кВ в нечеткой форме [Текст] / С. А. Тимчук, А. А. Мирошник // Вісник Чернігівського державного технологічного університету. Серія «Технічні науки» : науковий збірник. - Чернігів: Черніг. держ. технол. ун-т, 2013. – № 1 (63). – С. 188 – 192.

*Здобувачем розроблено математичну модель втрат потужності в трансформаторах в нечіткій формі шляхом нечіткого регресійного аналізу паспо-*

рtnих даних.

21. Кузнецов В. Г. Методика оценки качества электроэнергии в нечеткой форме [Текст] / В. Г. Кузнецов, Ю. И. Тугай, С. А. Тимчук, Н. М. Черемисин // Вісник ХНТУСГ. Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України. – Харків: ХНТУСГ, 2013. – Вип. 141. – С. 41 – 44.

*Здобувачем запропоновано ідею оцінки якості електроенергії через перетин фазифікованих показників і норм якості, запропоновано принцип формування узагальненого показника якості у нечіткій формі для застосування у системі підтримки рішень щодо забезпечення якості електроенергії.*

22. Тимчук С. О. Нечітка оцінка несиметричних режимів роботи сільських мереж 0,38/0,22 кВ [Текст] / С. О. Тимчук, О. О. Мірошник, Ю. Ф. Свергун, А. Є. Авраменко // Вісник ХНТУСГ. Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України. – Харків: ХНТУСГ, 2013. – Вип. 142. – С. 42 – 44.

*Здобувачем запропоновано підхід до нечіткої оцінки якості електроенергії взагалі і несиметрії навантажень особливо на основі перетину нечітких чисел.*

23. Тимчук С. А. Разработка критерия качества подбора коэффициентов регрессии в задачах прогнозирования электропотребления [Текст] / С. А. Тимчук, И. А. Катюха // Східно-європейський журнал передових технологій. – 2014. - № 5/8 (71). – С. 16 - 20.

*Здобувачем запропоновано використання згортання критеріїв (степені співпадіння і степені нечіткості) для отримання коефіцієнтів нечіткої регресії в задачах довготермінового прогнозу електроспоживання.*

24. Тимчук С. А. Методика формирования нечеткой прогнозной регрессионной модели электропотребления [Текст] / С. А. Тимчук, И. А. Катюха // Вісник ХНТУСГ. Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України. – Х: ХНТУСГ, 2014. – Вип. 154. – С. 51 – 53.

*Здобувачем запропоновано підхід до формування нечіткої регресійної прогновної моделі у вигляді кусково-безперервної нечіткої функції і застосування її для довго і короткострокового прогнозування.*

25. Тимчук С. А. Метод поиска множества Парето в нечеткой форме [Текст]: труды XXIV Междунар. науч. конф. / С. А. Тимчук // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-24: в 10 т. - Саратов, 2011. - Т. 2. - С. 15.

26. Тимчук С. А. Метод поиска множества недоминируемых решений в нечеткой форме [Текст]: матеріали 1-ї Міжнар. наук. - техн. конф. 10-13 травня 2011 р.: тези доп. / С. А. Тимчук // Обчислювальний інтелект (результати, проблеми, перспективи). - Черкаси: Маклаут, 2011.- С. 129.

27. Тимчук С. А. Применение нечеткой многокритериальной оптимизации при проектировании распределительной электросети 10 кВ [Текст]: тези доп. 3 - го регіонального наук. – практ. семінару 12-13 квітня 2011 р. / С. А. Тимчук // Process Automation (застосування в навчальному процесі і виробництві) - Харків: ХДТУСА, 2011. - С. 15 - 19.

28. Тимчук С. А. Получение регрессионных зависимостей для данных, представленных в виде треугольных нечетких чисел [Текст]: сб. трудов XXV Междунар. Науч. Конф./ С. А. Тимчук // Математические методы в технике и

технологиях – ММТТ-25: в 10 т. - Саратов, 2012. - Т. 2. – С. 25 – 26.

29. Тимчук С. А. Векторная структурная оптимизация разветвленной распределительной сети 10 кВ с помощью генетического алгоритма специального вида [Текст]: тезисы док. междунар. науч.-тех. конф. / С. А. Тимчук, Н. М. Черемисин // Информационные системы и технологии в энергетике и жилищно-коммунальной сфере. - Харків: НТМТ, 2011. - С. 19-20.

*Здобувачем розроблено генетичний алгоритм структурної оптимізації РЕМ.*

30. Тимчук С. О. Пошук оптимальної схеми розміщення секціонуючих апаратів у мережі 10 кВ [Текст]: матеріали другої Всеукр. наук. - техн. конф. (АКІТ-2012) / С. О. Тимчук, М. О. Сиротенко // Автоматизація та комп'ютерно - інтегровані технології.- К.: НТУУ «КПІ», 2012.- С. 8 - 9.

*Здобувачем запропоновано математичну модель розрахунку двох техніко-економічних показників в оптимізаційній задачі.*

31. Тимчук С.О. Метод оперативного пошуку оптимального рішення в умовах багатокритеріальності та невизначеності [Текст] : матеріали конференції / С. О. Тимчук // Автоматика/Automatics - 2012.-Київ: НУХТ, 2012.-С.67-68.

32. Тимчук С.О. Структурна оптимізація розподільчих електромереж в умовах невизначеності [Текст] / С. О. Тимчук // Технологічний аудит та резерви виробництва. - 2012. - №6/1(8). - С.37-38.

33. Тимчук С. О. Розкриття невизначеності інформації в енергетиці [Текст] / С. О. Тимчук // Технологічний аудит та резерви виробництва. - 2013. – № 6/5(14). – С. 33 – 35.

34. Тимчук С. А. Выбор методов и алгоритмов структурной оптимизации систем электроснабжения [Текст] / С. А. Тимчук // Materiály IX mezinárodní vědecko-praktická konference. Aktuální vymoženosti vědy-2013: Technické vědy Zemědělství. – Praha: Publishing House «Education and Science», 2013. - Díl. 18. – С. 33 – 36.

35. Тимчук С. А. Оптимальная реконструкция системы электроснабжения промышленного предприятия [Текст] / С. А. Тимчук, Н. С. Деренько // Materiály IX mezinárodní vědecko-praktická konference. Aktuální vědecké novinky - 2013: Technické vědy. – Praha: Publishing House «Education and Science», 2013. - Díl. 14. – С. 58 – 61.

*Здобувачем застосовано розроблені математичні моделі техніко-економічних показників ефективності РЕМ, удосконалений генетичний алгоритм для задачі реконструкції РЕМ конкретного підприємства, отримано низку варіантів її реконструкції.*

36. Тимчук С. А. Метод сокращения множества допустимых альтернатив в оптимизационных задачах проектирования и реконструкции разветвленной распределительной электросети при нечетко заданных целях [Текст]: сб. трудов 6 – й Всерос. науч.-тех. конф./ С. А. Тимчук, Н. М. Черемисин // Энергетика: управление, качество и эффективность использования энергоресурсов. - Благовещенск: АмГУ, 2011. – Т. 1. - С. 167-171.

*Зобувачем математично обгрунтовано метод скорочення множини допустимих альтернатив.*



37. Тимчук С. А. Нечёткая математическая модель расчёта недоотпуска электроэнергии в нерезервируемой разветвленной электрической сети 10 КВ [Текст]: сб. трудов 7-й Всеросс. науч.-тех. конф. / С. А. Тимчук, М. А. Сиротенко, А. В. Мирошник // Энергетика: управление, качество и эффективность использования энергоресурсов. - Благовещенск: АмГУ, 2013.-С. 298 – 302.

*Здобувачем запропоновано ідею розрахунку недовідпуску електроенергії у матричній формі з урахуванням невизначеності вихідної інформації і розгалуження мережі.*

38. Tymchuk S. A. Quality assessment of power distribution networks 0,38/0,22 kV in the fuzzy form [Текст] / S. A. Tymchuk, A. A. Miroshnyk // Global Science and Innovation: materials of the II International Scientific Conference.- USA, Chicago: Publishing office Accent Graphics communications, 2014.-Vol II.-p. 288-299.

*Здобувачем запропоновано теоретичне обґрунтування застосування нечітких оцінок якості електроенергії для оцінки додаткових втрат електроенергії в умовах невизначеності.*

## АНОТАЦІЇ

**Тимчук С. О. Методи та алгоритмічне забезпечення підтримки прийняття рішень з оптимізації структури системи керування електропостачанням в умовах невизначеності.** На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.13.03 – системи і процеси керування. – Харківський національний технічний університет сільського господарства імені Петра Василенка, Харків, 2015.

Дисертаційна робота присвячена розв'язанню актуальної науково-прикладної проблеми прийняття рішень з оптимізації структури системи керування розподільчих електричних мереж в умовах невизначеності вихідної інформації та багатокритеріальності.

Розроблено і вдосконалено ряд методів і алгоритмів оптимізації структури системи керування розподільчих електромереж, обґрунтовано межі їх ефективного застосування в залежності від складності електромереж. Удосконалено математичну модель оцінки техніко – економічних показників ефективності системи в нечіткій формі, сформовано систему нечітких критеріїв отримання оптимальних рішень. Сформовано базу даних вихідної інформації у нечіткій формі. Досліджено залежність оптимальних рішень від параметрів електроспоживання при різних степенях нечіткості інформації. Отримані в роботі наукові та практичні результати забезпечують обґрунтованість та ефективне розв'язання не тільки типових задач на допроектних стадіях, при проектуванні, реконструкції та експлуатації систем керування розподільчих електромереж, а і таких, що внаслідок своєї складності на формальному рівні не розглядалися.

**Ключові слова:** система керування, синтез структури, методи оптимізації, багатокритеріальність, невизначеність, алгоритмічне забезпечення, розподільча електрична мережа.

**Тимчук С. А. Методы и алгоритмическое обеспечение поддержки принятия решений по оптимизации структуры системы управления электроснабжением в условиях неопределенности.** На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.13.03 – системы и процессы управления. – Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства имени Петра Василенко, Харьков, 2015.

Диссертация посвящена решению актуальной научно-прикладной проблемы принятия решений по оптимизации структуры системы управления распределительных электросетей в условиях неопределенности с целью повышения эффективности электроснабжения.

Разработана математическая модель оценки технико-экономических показателей эффективности системы управления разветвленных секционированных сетей электроснабжения в нечеткой форме, используемая в формировании отношения предпочтения при принятии рациональных решений в условиях неопределенности. Впервые сформирована база данных параметров, входящих в указанную модель, в нечеткой форме. Усовершенствован метод нечеткого регрессионного анализа для получения входящих в модель нечетких зависимостей. Для этого разработан новый критерий степени совместимости на основе пересечения нечетких чисел. Для паритетного учета степени совместимости и степени нечеткости описания предложена алгебраическая свертка данных критериев при определении коэффициентов регрессии.

Разработан и усовершенствован ряд методов и алгоритмов поиска рациональных решений в условиях многокритериальности при нечетких целевых функциях. Усовершенствован метод нечеткой стратификации целевых функций путем учета в процессе выбора рациональных решений как функции приближения к цели, так и функции удаления от цели, что позволило повысить селективность метода при нечетком сравнении альтернатив. Впервые разработан метод выбора единственного решения из множества Парето, основанный на вводе нечеткой целевой функции эллипсоидного вида, позволяющий осуществить выбор единственного паритетного решения и/или решения с приоритетом по какой – либо функции цели за один просмотр множества, на основе которого впервые разработан метод нечеткого поиска подмножества Парето путем деформации нечеткой целевой функции эллипсоидной формы, реализуемый быстродействующим алгоритмом. Усовершенствован генетический алгоритм оптимизации структуры системы управления разветвленной секционированной электросети за счет ввода новой системы ранжирования и отсева «особей», основанной на введенном понятии возраста и срока жизни «особи», что позволило реализовать механизм регулирования скорости поиска решения, автоматически настраивая процесс поиска на вычислительные возможности конкретного компьютера, повысить полноту определения множества Парето. Впервые предложен метод комплексной оптимизации структуры системы управления разветвленной секционированной электросети, учитывающий взаимную связь топологии сети и схемно - конструктивное исполнение элементов без внесения упрощений в математические модели и методы при неопределенности исход-

ной информации, что позволило повысить информативность и обоснованность принимаемых решений.

Проведено исследование, в результате которого определены области рационального применения разработанных алгоритмов в зависимости от сложности задачи. Показано, что при размерности множества альтернатив  $< 10^4$  рационально применение метода попарных сравнений альтернатив; при размерности множества альтернатив  $10^4 - 10^5$  эффективнее применение алгоритмов на основе метода нечеткой стратификации и деформации эллипсоида; при размерности множества альтернатив  $10^5 - 10^7$  и при выполнении условий аддитивности целевых функций рационально применять метод сокращения множества альтернатив; при размерности множества альтернатив  $> 10^7$  целесообразно применять генетический алгоритм.

Эффективность разработанных методов и алгоритмов доказана на примерах решения конкретных задач принятия решений по оптимальной структуре системы управления электросети на допроектных стадиях, при проектировании, реконструкции и эксплуатации распределительных электросетей различного уровня сложности при разных степенях неопределенности исходной информации. Доказано, что применение разработанных методов и алгоритмов позволяет получить структуру системы управления электросети с лучшими показателями эффективности, а именно: интегральный годовой недоотпуск электроэнергии в среднем ниже на 31% - 63%, приведенные затраты - на 14% - 41%, технологические потери электроэнергии за год - на 11% - 35%. Доказана устойчивость полученных решений относительно степени неопределенности исходной информации.

Показана эффективность применения разработанных методов для решения некоторых эксплуатационных задач. Разработанное алгоритмическое обеспечение системы управления качеством электроснабжения в части оптимального симметрирования нагрузок между фазами. Разработано алгоритмическое обеспечение принятия решений по планированию мероприятий по энергосбережению в части долгосрочного прогнозирования электропотребления технологическим оборудованием предприятия в условиях неопределенности.

Основные результаты диссертации нашли практическое применение при проектировании и реконструкции систем управления конкретными распределительными электрическими сетями.

**Ключевые слова:** система управления, синтез структуры, методы оптимизации, многокритериальность, неопределенность, алгоритмическое обеспечение, распределительная электрическая сеть.

**Tymchuk S. A. Methods and algorithmic support of a decision support to optimize the structure of the system power supply control under uncertainty. Manuscript.**

Dissertation for scientific degree of doctor of technical sciences, specialty 05.13.03 - management systems and processes. - Kharkiv national technical University of agriculture named after Peter Vasilenko, Kharkiv, 2015.

The thesis is devoted to the resolution of the actual scientific and technical

problems of decision-making structure optimization of electrical distribution network control system under uncertainty to improve the efficiency of electricity consumers.

Developed and improved a number of methods and algorithms for deciding on the structure of power distribution control system in uncertainty of the initial information and multicriteriality reasonably ranges of effective application depending on the complexity of electric power. Improved mathematical model of techno - economic performance power distribution control system in fuzzy form, based on these criteria fuzzy system formed to obtain optimal solutions. Formed the basis of the original information in the fuzzy form for their calculation. The dependence of optimal solutions on the parameters of power consumption at different degree of fuzziness of information. Obtained in the scientific and practical results provide validity and effective solution not only typical problems of decision making in pre-project stage, the design, renovation and operation of electric power distribution control system in uncertainty of the initial information, but also those which, because of its complexity and action not considered.

**Keywords:** system control, synthesis of structure, optimization methods, multicriteriality, uncertainty, algorithmic support, electrical distribution network.

