

ДОСЛІДЖЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СТІЙКОСТІ ПІДСИСТЕМИ ОБМІНУ ІНФОРМАЦІЄЮ ЛОКАЛЬНОЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ СИСТЕМИ З ВІДНОВЛЮВАНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ ЕНЕРГІЇ З ВИКОРИСТАННЯМ ТЕХНОЛОГІЇ SMART GRID

В статті досліджено функціональну стійкість підсистеми обміну інформації локальної електричної системи з відновлюваними джерелами енергії, а також запропоновано закон оптимального керування схемою приєднання інверторів, тобто зміни схеми видачі потужності до електричної мережі. Показано, що запропонована підсистема обміну інформацією забезпечить надійне функціонування відновлюваних джерел енергії оснащених засобами локальної автоматизації керування.

Ключові слова: функціональна стійкість, локальна електрична система, відновлювані джерела енергії, Smart Grid технології.

J.V. MALOHULKO.

I.O. HUNKO

Vinnitsia national technical university, Vinnitsia, Ukraine

THE RESEARCH OF FUNCTIONAL STABILITY OF SUBSYSTEM INFORMATION EXCHANGE IN LOCAL ELECTRICAL SYSTEM WITH RENEWABLE ENERGY SOURCES USING THE SMART GRID TECHNOLOGY

Abstract – the aim of the research - to automate the methods of the renewable energy sources optimization in local electric systems. It will allow us to use them in automation modes of local electrical systems and increase the efficiency of optimizing their functioning.

It was proposed the law of optimal control the scheme inverter accession, like the scheme changes of capacity issue to the electrical network. Algorithmic realization of the proposed law has been used to coordinate schedules of solar power plants with local power consumption in an automatic control system by issuing scheme power of renewable energy.

The article shows that the proposed information of exchange subsystem provides the reliable operation of renewable energy functioning, which equipped the local automation control.

Keywords: functional stability, the local electrical system, renewable energy, Smart Grid technology.

Вступ

Державна підтримка розбудови відновлюваної енергетики стимулює дослідження питань проектування та експлуатації відновлюваних джерел (ВДЕ) з метою підвищення рівня енергетичної безпеки країни та зниження впливу енергетики на довкілля. Забезпечення процесу оптимізації функціонування ВДЕ в локальних електричних системах (ЛЕС) в сучасних умовах, передбачає застосування автоматизованих систем керування в контексті підвищення якості виробництва та розподілу електроенергії з використанням технології та стандартів *Smart Grid* [1]. Це не тільки прискорює та спрощує цей процес, але і створює умови для побудови сучасних інтегрованих систем керування. Таким вимогам найбільше відповідають адаптивні автоматизовані системи керування (АСК), які дозволяють підтримувати належну якість технологічного процесу в умовах неповної або недосконалої початкової інформації щодо його параметрів та впливів навколишнього середовища. Останнє особливо важливе для експлуатації ВДЕ в локальних електричних системах. Використання таких систем потребує вдосконалення і розробки технічного, інформаційного та програмного забезпечення. Саме тому, необхідно автоматизувати розроблені в [2-6] спосіб узгодження графіків генерування сонячних електростанцій та споживачів енергії локальних електричних систем та методи оптимізації функціонування ВДЕ в локальних електричних системах та спосіб, що дозволить використати їх у системі автоматизованого керування (САК) режимами ЛЕС та підвищить ефективність процесу оптимізації їх функціонування.

Експериментальна частина

Для підвищення ефективності функціонування ВДЕ шляхом зменшення втрат електроенергії в електричній мережі [2-6] пропонується вимірювати струм на шинах високої напруги сонячної електростанції та,

в залежності від значення оптимальної потужності, що визначена за алгоритмом оптимізації добових режимів генерування ВДЕ, змінювати кількість інверторів N_B , що підключені на першу або другу систему шин для підтримання напруги на шинах в області допустимих значень так, як це запропоновано в [5].

$$\Delta i(t) = K_1 \left[(I(t) - I_{уст}) - K_2 (U(t) - U_{уст}) \right]$$

$$N_B = \begin{cases} n(t) + 1, & \text{якщо} \begin{cases} \Delta i(t) \leq i_{н.з.}; \\ \Delta i(t - \tau_3) \leq i_{н.з.}; \\ U(t) \leq U_{max}; \\ \frac{dI_{ог}}{dt} \leq 0; \\ n(t) + 1 \leq n_{max}; \end{cases} \\ n(t), & \text{при } i_{н.з.} < \Delta i(t) < i_{в.з.}; \\ n(t) - 1, & \text{якщо} \begin{cases} \Delta i(t) \geq i_{в.з.}; \\ \Delta i(t - \tau_3) \geq i_{в.з.}; \\ U(t) \geq U_{min}; \\ \frac{dI_{ог}}{dt} \geq 0; \\ n(t) - 1 \geq 0; \end{cases} \end{cases} \quad (1)$$

де N_B – кількість інверторів, підключених на регульовану систему шин; $\Delta i(t)$ – відхилення струму від оптимального з урахуванням зміни напруги на шинах ВДЕ; $i_{н.з.}$, $i_{в.з.}$ – межі зони нечутливості, відповідно нижня та верхня зони; $I_{уст}$ – уставка по струму, що відповідає оптимальній потужності ВДЕ та коригується в залежності від параметрів режиму ЛЕС, відпускнуї ціни тощо; $U_{уст}$ – уставка по напрузі на шинах ВДЕ, дорівнює номінальній напрузі, або іншому значенню, якщо ВДЕ приймає участь у регулюванні напруги в ЛЕС; $I(t)$, $U(t)$, $n(t)$ – виміри струму та напруги, а також кількість увімкнених інверторів у момент часу t ; K_1 – коефіцієнт підсилення, що визначає чутливість регулятора до відхилення струму; K_2 – еквівалентна провідність для перерахунку відхилення напруги від уставки в еквівалентне відхилення струму від оптимального, що забезпечує реакцію системи на перевищення напруги у випадку, коли струм відповідає області оптимальності; $I_{ог}$ – огиаюча сумарного струму інверторів $I(t)$; τ_3 – час затримки сигналу; t – момент часу, для якого здійснюється регулювання; n_{max} – максимальна кількість інверторів, що можуть бути увімкнені на регульовану систему шин.

У відповідності з викладеним обґрунтуванням та для реалізації запропонованого способу узгодження графіків генерування СЕС з локальним електроспоживанням закон оптимального керування комутаційними апаратами системи реконфігурації схеми видачі їх потужності має вигляд (1), аналогічно до [7].

Кожен додатковий інвертор буде вмикатися на регульовану систему шин, якщо відхилення струму $\Delta i(t)$ буде нижчим за нижню межу зони нечутливості ($\Delta i(t) = -6A$, а $i_{н.з.} = -5A$), напруга менша за максимальну, кількість ступенів не перевищує максимальне значення, а вимірний струм ВДЕ має тенденцію до зменшення. І навпаки, якщо відхилення струму $\Delta i(t)$ буде вищим за верхню межу зони нечутливості ($\Delta i(t) = +6A$, а $i_{в.з.} = +5A$), напруга вища за максимальну, кількість ступенів не менша мінімального значення, а вимірний струм ВДЕ матиме тенденцію до збільшення, буде виконуватись перемикання інвертора з регульованої на нерегульовану систему шин. Для забезпечення можливості здійснення автоматичного керування конфігурацією схеми видачі потужності ВДЕ та узгодження керувальних впливів з оперативним керуванням розроблено алгоритм функціонування мікропроцесорного пристрою (МП) групового керування інверторами сонячної електричної станції (СЕС) (рис. 1), що працює відповідно до запропонованого вище закону оптимального керування засобами реконфігурації схеми видачі потужності ВДЕ у локальних електричних системах (1).

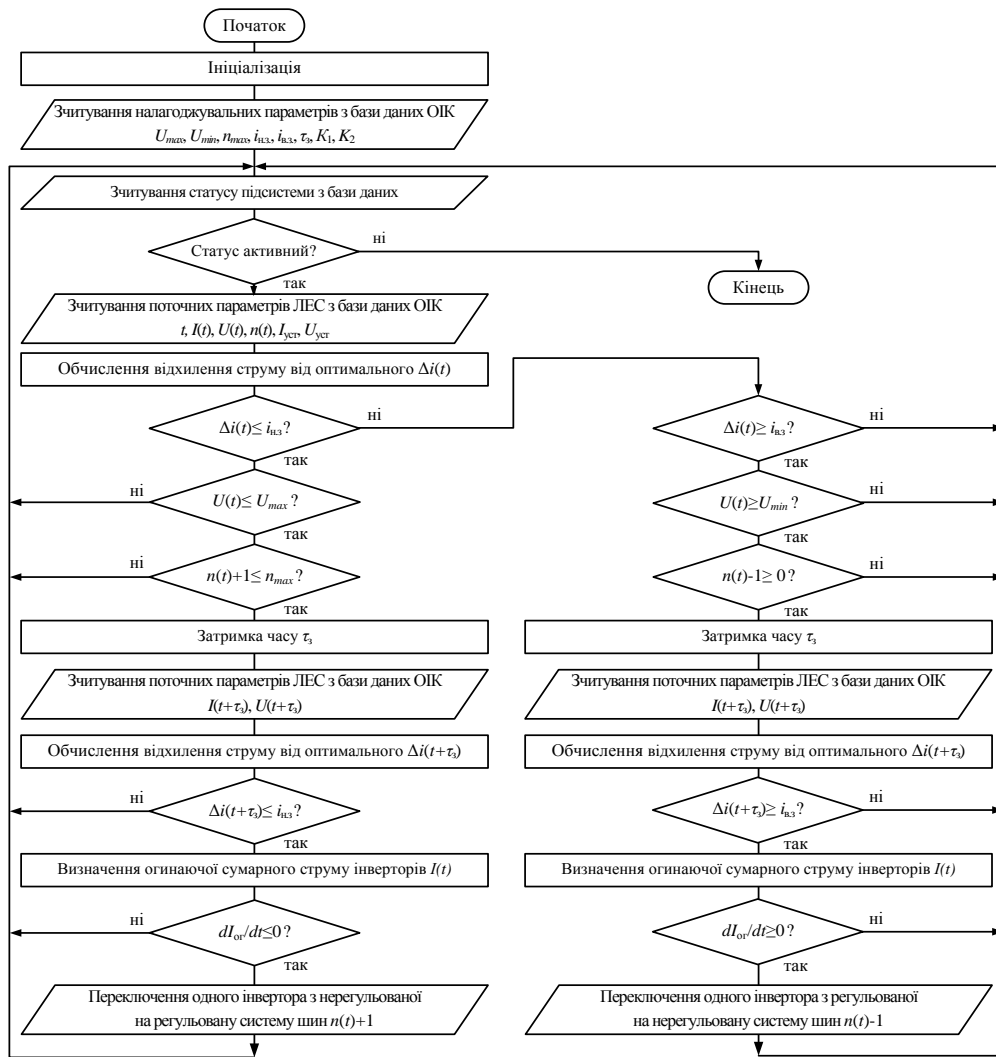


Рис. 1. Алгоритм функціонування мікропроцесорного пристрою

На початку роботи алгоритму відбувається ініціалізація, зчитування та перезапис внутрішніх реєстрів, тестування основних блоків, перевірка зв'язку з ОІК та засобами регулювання.

Зчитування налагоджувальних параметрів виконується з бази даних оперативно-інформаційного комплексу ЛЕС. У якості налагоджувальних параметрів використовуються межі регулювання напруги U_{max} , U_{min} на шинах підстанції ВДЕ, максимальна кількість інверторів регульованої шини n_{max} , межі зони нечутливості $i_{н.з.}$, $i_{в.з.}$, час затримки сигналу τ_s , та вагові коефіцієнти K_1 і K_2 .

Після зчитування налагоджувальних даних з бази даних оперативно-інформаційного комплексу (ОІК) виконується перевірка статусу підсистеми автоматичного керування конфігурацією схеми видачі потужності ВДЕ зчитуванням відповідного прапору з бази даних. У випадку, якщо статус підсистеми активний, то алгоритмом передбачено зчитування параметрів режиму ЛЕС $I(t)$ та $U(t)$ для поточного моменту часу t . Також, з бази даних зчитується кількість інверторів, підключених на регульовану систему шин $n(t)$ та уставок по струму $I_{уст}$ і напрузі $U_{уст}$ для на шин підстанції ВДЕ. В іншому випадку підсистема закінчує свою роботу, а її запуск виконується за запитом оператора.

Наступним етапом виконується розрахунок відхилення струму $\Delta i(t)$ від оптимального. Отримане значення порівнюється із нижньою $i_{н.з.}$ (верхньою $i_{в.з.}$) зоною нечутливості. Якщо відхилення значне, тобто умова виконується, то відбувається перевірка можливості виконання переключення інверторів між шинами та перевірка дотримання поточної напруги у межах норми. Після затримки часу, що рівний часу затримки сигналу τ_s в підсистемі передачі інформації порівнюється відхилення струму від оптимального із межами зони нечутливості. Якщо відхилення перевищує зону нечутливості, то розраховується огинаюча сумарного струму інверторів та її похідна dI_{ov}/dt . В залежності від знаку похідної dI_{ov}/dt подається сигнал про збільшення або зменшення кількості інверторів, підключених до регульованої системи шин СЕС.

Для реалізації комплексу задач оптимального керування ВДЕ в локальних електричних системах необхідною умовою є забезпечення можливості централізованого керування об'єктом у реальному часі. Однак, ця умова не може бути забезпечена через просторову розподіленість об'єкта керування та обмежену надійність

каналів зв'язку між ними та диспетчерським центром [8–10]. Виходячи з цього автоматизована система керування (АСК) з необхідним переліком функцій керування може бути побудована як централізована система оперативного керування з децентралізацією функцій реального часу за рахунок застосування локальних САК.

Враховуючи структурну та апаратну складність такої системи у поєднанні з достатньо жорсткими фінансовими обмеженнями щодо проектування, реалізації та подальшого супроводження, АСК має будуватися на принципах ієрархічної структури керування з виділенням трьох рівнів:

- перший рівень – диспетчерський центр централізованого керування;
- другий рівень – «опорні» керовані ВДЕ, які функціонально підпорядковуються першому рівню та здійснюють керування відновлюваними джерелами третього рівня, ретранслюючи команди, або коригуючи налагоджувальні параметри, що надходять з вищого рівня;
- третій рівень – відновлювані джерела, оснащені засобами локальної автоматизації керування з мінімально-необхідною інтелектуалізацією та максимальною автономністю функціонування, які виконують команди та реалізують закони керування з вищих ієрархічних рівнів, адаптуючи їх до місцевих умов.

Така структура дозволяє зменшити витрати на апаратно-програмну реалізацію АСК.

Відповідно до наведеної вище структури та запропонованого способу узгодження графіків генерування СЕС з локальним електроспоживанням [6] на рис. 2 показано особливості апаратної реалізації автоматизованої системи керування СЕС. На рис. 2 зображено взаємозв'язок підсистеми обміну інформацією розрахунково-диспетчерського центру (РДЦ) локальної електричної системи (перший рівень) та САК сонячною електростанцією (третій рівень) автоматизованої системи керування.

Відповідно до запропонованого способу оперативного коригування схеми видачі потужності до електричної мережі (ЕМ) апаратна реалізація передбачає застосування керованих комутаційних апаратів (контакторів), паспортні дані яких залежать від номінальної потужності інверторів, що встановлені на СЕС.

Керування комутаційними апаратами здійснюється промисловим контролером, який функціонує відповідно до алгоритму наведеному на рис. 1 за законом керування (1). Промисловий контролер порівнює інформацію про поточні значення напруги та струму на шинах СЕС зі значенням оптимальної потужності, розрахованої та збереженої у базі даних ОІК РДЦ. Інформація про поточні значення струму та напруги на керованій системі шин зчитується з бази даних ОІК та комунікаційних виходів інверторів.

Залежно від результатів роботи алгоритму на регульовану систему шин підключається кількість інверторів, що здатні забезпечити споживання у ЛЕС з дотриманням показників якості та мінімальних втрат електроенергії. Надлишок виробленої електроенергії видається на нерегульовану систему шин.

Застосування вказаної апаратної реалізації автоматизованої системи керування дозволить вдосконалити існуючу систему засобами дискретного керування. Це дозволить підвищити ефективність функціонування локальної електричної системи, а також покращити показники якості електроенергії та дасть можливість оперативного керування режимами роботи розосередженого генерування без погіршення їх прибутковості.

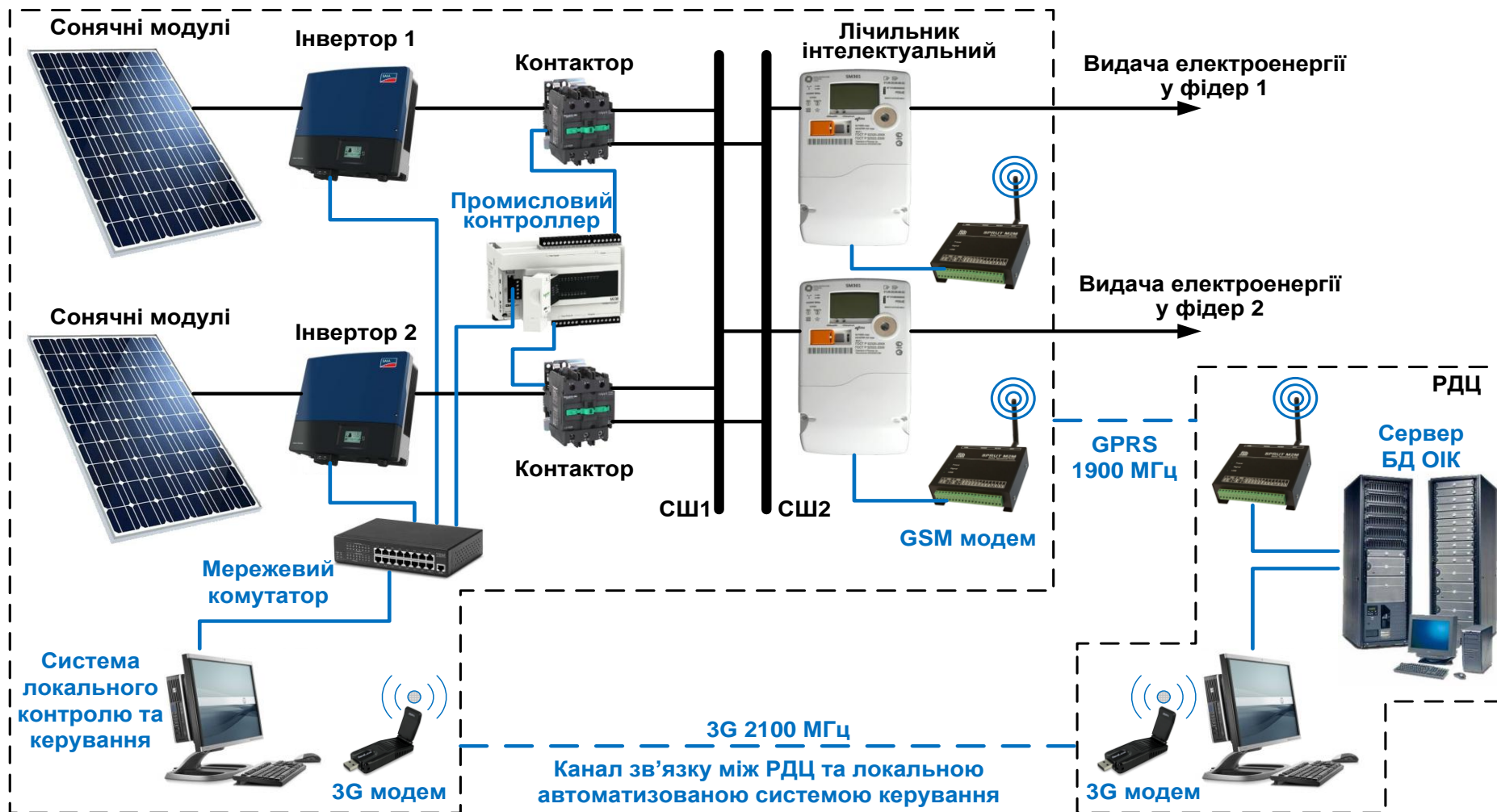


Рис. 2 – Особливості апаратної реалізації АСК схемою видачі потужності ВДЕ

Таким чином, запропонована автоматизована система керування СЕС (рис. 2) базується на принципах функціонування *Smart Grid*, що полягають в значній інтеграції та автоматизації процесів генерування, передачі та споживання. Інформаційні зв'язки з інтелектуальним вимірвальним і керувальним обладнанням, а також базою даних ОІК, що дозволяють на рівні диспетчерського керування враховувати експлуатаційні особливості розосереджених відновлюваних джерел енергії та локальної електричної системи.

Дослідження функціональної стійкості підсистеми обміну інформацією локальної електричної системи

Запропонована на рис. 2 структура апаратної реалізації автоматизованої системи керування схемою видачі потужності ВДЕ в локальних електричних системах складається з сукупності взаємозалежних і узгоджено діючих апаратно-програмних засобів передачі, зберігання та обробки цифрової інформації, сполучених комунікаційними зв'язками і призначених для рішення широкого класу задач контролю та керування режимами роботи ВДЕ.

В сучасних умовах актуальним є забезпечення в автоматизованій системі керування ВДЕ властивості функціональної стійкості підсистеми обміну інформацією. Функціональна стійкість – це властивість складної технічної системи, що характеризує можливість продовжувати виконувати певний обсяг функцій, можливо з погіршенням якості, під час впливу внутрішніх і зовнішніх дестабілізуючих факторів.

Для розв'язання цієї задачі потрібно забезпечити збір, опрацювання й аналіз інформації з автоматичним розпізнанням позаштатної ситуації, що зароджується, і формуванням рекомендацій щодо дій в умовах таких ситуацій. Забезпечення функціональної стійкості будь-якої складної технічної системи здійснюється за рахунок надмірності різних видів: структурної, апаратної, часової, інформаційної, тощо. Заходи, які спрямовані на забезпечення або підвищення рівня функціональної стійкості, в першу чергу, забезпечують поліпшення характеристик відмовостійкості та живучості, але не обов'язково показників надійності окремих комплектуючих елементів і виробів, а також тактико-технічних характеристик системи [11].

Однією з причин функціональної нестійкості складних технічних систем у позаштатних ситуаціях є недостатня готовність обчислювальної системи до розпізнавання та дій у непередбачених умовах. Це проявляється в тому, що в обчислювальній системі не враховується весь набір ситуацій. Однією з ознак може бути перший сприйнятий сигнал про порушення режиму ЛЕС або роботи ВДЕ, або просторово-часової структури конкретних особливих випадків, або відсутності алгоритмів розпізнавання відмови, а також в обмеженні дій при парированні позаштатної ситуації.

Функціонування АСК схемою видачі потужності ВДЕ з метою ідентифікації позаштатної ситуації передбачає виконання наступних операцій.

1. Виявлення невідповідності фактичних параметрів функціонування заданим параметрам;
2. Визначення найбільш імовірної групи, до якої відноситься відмова;
3. Відтворення повного образу передбачуваної відмови;
4. Здійснення активного сприйняття інформації на основі способу-еталона для точного розпізнавання ситуації.

Для цього до системи поставлені вимоги можливості передачі інформації з будь-якого вузла на будь-який інший. Разом з тим, продовження функціонування, можливо зі зменшенням якості, під час впливу дестабілізуючих факторів вимагає виявлення і використання надмірності в структурі системи. Тому доцільно обмежитись дослідженням структури підсистеми обміну інформацією АСК схемою видачі потужності ВДЕ.

Для виявлення надмірності запропоновано виконання зворотної задачі, а саме синтезу надмірної структури із заданими властивостями функціональної стійкості і вартості побудови та експлуатації системи.

Пропонується обчислювати рівень функціональної стійкості для систем передачі даних АСК схемою видачі потужності ВДЕ узагальненим імовірнісним показником $F_{АСК}$, що обраховується як згортка матриці ймовірностей зв'язності:

$$P_{3B} = \begin{bmatrix} 0 & P_{12} & P_{13} & \dots & P_{1n} \\ P_{21} & 0 & P_{23} & \dots & P_{2n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ P_{n1} & P_{n2} & P_{n3} & \dots & 0 \end{bmatrix};$$

$$F_{АСК} = F(P_{3B}) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1, j \neq i}^n w_{ij} \cdot P_{ij}, \quad (2)$$

де n – кількість вузлів комутації в підсистемі обміну інформацією АСК схемою видачі потужності ВДЕ;

w_{ij} – імовірність зв'язності між вузлами v_i та v_j ; w_{ij} – вагові коефіцієнти ліній зв'язку, які залежать від заданої інтенсивності передачі інформації ρ_{ij} між вузлами v_i та v_j :

$$w_{ij} = \begin{cases} 2, & \text{при } \rho_{ij} \geq M[\rho]; \\ 1, & \text{при } 0,1M[\rho] \leq \rho_{ij} < M[\rho]; \\ 1/2, & \text{при } \rho_{ij} < 0,1M[\rho]. \end{cases}$$

Математичне очікування заданої інтенсивності передачі інформації $M[\rho]$ у системі передачі даних АСК схемою видачі потужності ВДЕ визначається на основі наступної залежності:

$$M[\rho] = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1, j \neq i}^n \rho_{ij} \quad (3)$$

Імовірність зв'язності P_{ij} визначається на основі наступних вихідних даних:

1) структури системи передачі даних АСК схемою видачі потужності ВДЕ, що задана матрицею зв'язків A_{3B} ;

2) коефіцієнту готовності передачі інформації K_{rij} по лінії зв'язку l_{ij} .

Таким чином, задачу синтезу функціонально стійкої підсистеми обміну інформацією АСК схемою видачі потужності ВДЕ можна сформулювати таким чином:

Визначити: Оптимальну структуру графа $G_{\xi}(V,E)$, $\xi = 1,2,\dots,N$, що задовольняє вимогам:

$$F_{АСК} = f(P_{ij}) \rightarrow \max, \quad (4)$$

при обмеженнях:

$$C_{\xi} = \sum_i \sum_j C_{ij}(l_{ij}, \rho_{ij}, h_{ij}) \leq C_{ДОП\xi}; \quad i, j = 1,2,\dots,N; \quad (5)$$

$$\chi(G) \geq 2; \quad \lambda(G) \geq 2; \quad G_0(V,E) \subseteq G_{\xi}(V,E).$$

В запропонованому підході до оптимізації структури підсистеми обміну інформацією АСК схемою видачі потужності ВДЕ пропонується оптимізувати за критерієм максимуму показника функціональної стійкості при обмеженнях на вартість системи. Така постановка завдання в практичному сенсі інтерпретується як намагання отримати структуру системи, яка б за рахунок закладеної надмірності могла б максимально чинити опір зовнішнім та внутрішнім дестабілізуючим факторам.

Індекс ξ в (5) припускає знаходження декількох структур для заданої вартості $C_{ДОП}$ для оптимізації та нарощування структури системи.

Для можливості досягнення результату в роботі прийнято рішення стосовно вирішення декількох однокритеріальних оптимізаційних задач із заданими значеннями $C_{ДОП}$, так як обчислення багатокритеріальної задачі на графах є майже недосяжним.

Припущення:

1. Шукані структури $G_{\xi}(V,E)$, $\xi = 1,2,\dots,5$, не повинні мати кратних ребер.
2. Шукані структури не мають заборонених ліній зв'язку. Будемо вважати, що із будь-якого вузла v_i у будь-який вузол v_j можна простягнути лінію зв'язку $e_{ij}(v_i, v_j)$, що має довжину l_{ij} і вартість витрат C_{ij} на капітальні вкладення та експлуатацію лінії зв'язку.
3. Пропускна здатність поодинокого каналу передачі інформації приймається $\rho_{ij} > h_{ij}$, де h_{ij} – інтенсивність інформаційного обміну між вузлами v_i і v_j .
4. Вартість капітальних вкладень і експлуатації будь-якої структури $G_{\xi}(V,E)$ обчислюється на основі відомих емпіричних залежностей.
5. Вагові коефіцієнти w_{ij} у виразі (2) при обчисленні узагальненого показника функціональної стійкості $F_{АСК}$ носять суб'єктивний характер і повинні визначатися на основі методу експертних оцінок після ранжирування різних напрямків передачі даних за важливістю.

Аналіз значень узагальненого показника функціональної стійкості дозволяє порівнювати різні структури систем. Чим вище $F_{АСК}(P_{ij})$, тим більше «захищеною» буде система від різних збоїв, відмов

та ушкоджень за рахунок структурної надмірності. Зниження значень K_r приводить до пом'якшення вимог до фізичних каналів передачі інформації, але вимагає необхідності більш високих витрат на побудову додаткових ліній зв'язку для забезпечення функціональної стійкості розподіленої автоматизованої системи керування.

В свою чергу, показник K_r сам по собі відображає як фізичну природу каналу зв'язку (кабельний, радіо, оптоволоконний тощо), так і комплекс заходів щодо забезпечення необхідної живучості (надійності) цього каналу. Тому іншим напрямком підвищення функціональної стійкості є підвищення значень кожного окремого показника K_r для кожної окремої лінії зв'язку. Очевидно, що комплекс заходів щодо підвищення живучості (надійності) також буде впливати на вартість каналу, що, в остаточному підсумку, приведе до необхідності вирішення нової проблеми вибору раціонального варіанту удосконалення підсистеми обміну інформацією АСК схемою видачі потужності ВДЕ.

Оцінка функціональної стійкості підсистеми обміну інформацією локальної електричної системи

Граф пропонованої підсистеми обміну інформацією АСК схемою видачі потужності ВДЕ у локальній електричній системі представлена на рис. 3, на якому вершини графа позначено: 0 – промисловий контролер; 1 – система локального контролю та керування; 2 – сервер бази даних розрахунково-диспетчерський центр; 3 – маршрутизатор; 4,5 – інвертори; 6,7 – інтелектуальні лічильники; 8 – АРМ диспетчера; 9, 10 – контактори., а ребра графа – лінії зв'язку між ними. Вказана структура відповідає пропонованій вище апаратній реалізації АСК схемою видачі потужності ВДЕ (рис. 2).

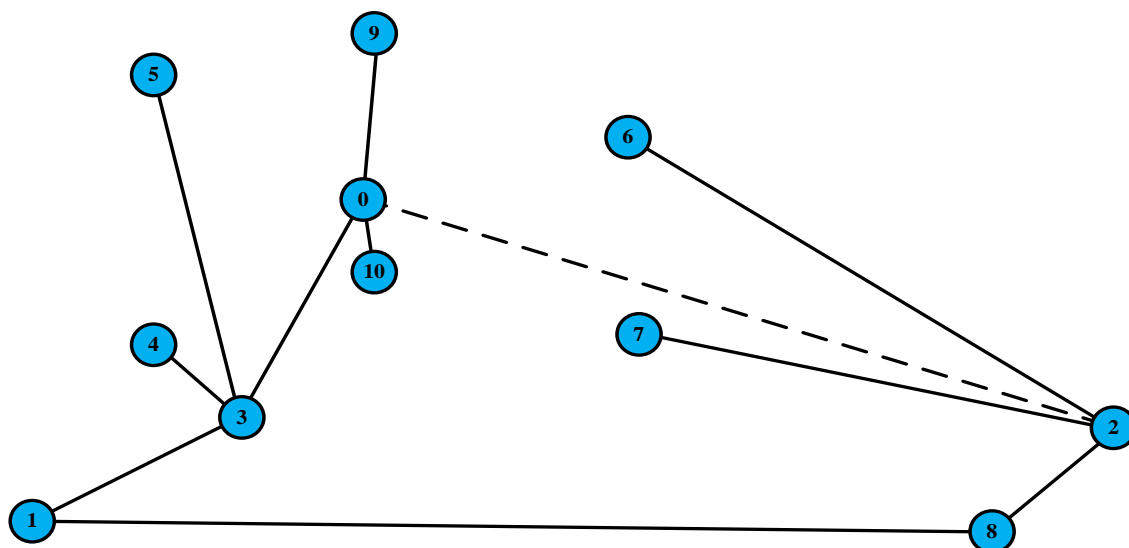


Рис. 3 – Граф пропонованої підсистеми обміну інформацією ЛЕС

З метою дослідження функціональної стійкості підсистеми обміну інформацією пропонованої АСК схемою видачі потужності ВДЕ застосовано метод викладений вище. Досліджуваний граф АСК має $n=11$ ліній зв'язку, та $m=11$ вершин. В процесі розрахунку використано припущення, згідно якого задана інтенсивність передачі інформації ρ_{ij} між вузлами напряму зв'язаними лінією зв'язку приймається рівною пропускну здатності поодинокого каналу передачі інформації. Інтенсивність передачі інформації між вузлами, зв'язаними декількома лініями зв'язку приймається рівною найменшій пропускну здатності поодинокого каналу на шляху між вузлами v_i та v_j .

Відповідно до зроблених припущень прийнято таку інтенсивність передачі інформації лініями зв'язку:

- лінії 0-9 та 0-10 – двох провідні лінії зв'язку $\rho=1$ біт/с;
- лінії 0-3, 3-4, 3-5, 3-1, 8-2 – провідні лінії зв'язку Ethernet 100BASE-T $\rho=100$ Мбіт/с;
- лінія 1-8 – безпроводна лінія зв'язку мережами загального користування 3G $\rho=3,2$ Мбіт/с;
- лінії 7-2, 6-2 – безпроводні лінії зв'язку мережами загального користування GPRS $\rho=21,4$ кбіт/с.

Математичне очікування заданої інтенсивності передачі інформації $M[\rho]$ у системі передачі даних АСК схемою видачі потужності ВДЕ розраховано за виразом:

$$M[\rho] = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1, j \neq i}^n \rho_{ij} = 2,012 * 10^7 \text{ кбіт/с.}$$

Відповідно до розрахованого значення $M[\rho]$ обрано вагові коефіцієнти ліній зв'язку, які залежать від заданої інтенсивності передачі інформації ρ_{ij} між вузлами v_i та v_j .

Імовірність зв'язності P_{ij} двополюсного графа з вершиною-джерелом v_i і вершиною-приймачем v_j розраховано на основі методів теорії надійності як послідовно-паралельне з'єднання елементів, де коефіцієнт готовності передачі інформації між вузлами прийнято $K_r=0,997$ для систем автоматизованого регулювання частоти і потужності [12].

Значення узагальненого показника функціональної стійкості підсистеми обміну інформацією АСК схемою видачі потужності ВДЕ, обчисленого на основі матриці ймовірностей зв'язності з урахуванням вагових коефіцієнтів w_{ij} визначене у відповідності до (2) становить:

$$F_{АСК} = F(P_{ЗВ}) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1, j \neq i}^n w_{ij} \cdot P_{ij} = 45,796 \text{ в.о.}$$

З метою оцінювання якісного значення функціональної стійкості підсистеми обміну інформацією виконано порівняння отриманого результату із значенням функціональної стійкості підсистеми обміну інформацією АСК для ідеальної системи $F_{АСК}^{P=1} = 46$ в.о. з коефіцієнтом готовності передачі інформації між вузлами $K_r = 1$:

$$F_{АСК}^* = F_{АСК} / F_{АСК}^{K_r=1} = 0,9956 \text{ в.о.}$$

Враховуючи властивість показника функціональної стійкості відмови каналів зв'язку та резервування структури передачі інформації проведено аналіз функціональної стійкості пропонованої підсистеми обміну інформацією під час відмови ліній зв'язку. Результати розрахунків приведено у табл. 1.

Таблиця 1

Чутливість показника функціональної стійкості пропонованої підсистеми обміну інформацією АСК ВДЕ до відмови ліній зв'язку

№ лінії	0-3	0-10, 0-9	3-5, 3-4	3-1	1-8	8-2	2-6, 2-7
$F_{АСК}, \text{ в.о.}$	29,88	45,298	33,856	29,88	41,814	39,82	44,799
$F_{АСК}^*, \text{ в.о.}$	0,649	0,985	0,736	0,649	0,909	0,866	0,974

Таким чином, функціональна стійкість пропонованої підсистеми обміну інформацією АСК, не задовольняє вимогам стійкості передачі інформації між вузлами, оскільки за такого значення імовірності передачі інформації системою буде менша нормативного значення коефіцієнта готовності $0,997$ для систем автоматизованого регулювання частоти і потужності [12].

Підвищення показника функціональної стійкості підсистеми обміну інформацією можливе двома шляхами:

1. Підвищення готовності до передачі інформації між вузлами, шляхом покращення параметрів каналів зв'язку;
2. Резервування ліній зв'язку пропонованої підсистеми обміну інформацією ЛЕС для забезпечення надмірності передачі інформації.

За результатами розрахунків встановлено, що $F_{АСК}^* > 0,997$ в.о. для діапазону імовірності передачі інформації $0,998 < K_r < 1$ кожною поодинокую лінією зв'язку. Вартість технічної реалізація та підтримки такої підсистеми обміну інформацією буде значно вища за вартість побудови резервованої схеми передачі інформації.

З метою перевірки можливості забезпечення функціональної стійкості системи передачі інформації шляхом резервування ліній зв'язку запропоновано впровадження додаткової безпроводної лінії зв'язку 0-2, що з'єднує промисловий контролер та сервер бази даних розрахунково-диспетчерського центру та показано на рис.3 пунктирною лінією. У результаті появи паралельного зв'язку значення узагальненого показника функціональної стійкості підсистеми обміну інформацією АСК схемою видачі потужності ВДЕ збільшилось до $F_{АСК} = 53,404$ в.о., що в порівнянні з безвідмовною системою:

$$F_{ACK}^* = F_{ACK} / F_{ACK}^{P=1} = 53,404/53,5 = 0,9982 \text{ в.о.}$$

Таким чином, функціональна стійкість підсистеми обміну інформацією АСК з резервованими зв'язками, задовольняє вимогам стійкості передачі інформації, а відносний показник функціональної стійкості запропонованої підсистеми у випадку найважчої відмови лінії зв'язку набуває значення 0,92 в.о. Пропонована підсистема обміну інформацією у АСК схемою видачі потужності ВДЕ забезпечить надійне функціонування ВДЕ оснащених засобами локальної автоматизації керування, які виконують команди та реалізують закони керування з вищих ієрархічних рівнів, адаптуючи їх до місцевих умов.

Висновки

В статті запропонований закон оптимального керування оптимального керування схемою приєднання інверторів, тобто зміни схеми видачі потужності до ЕМ. Алгоритмічну реалізацію розробленого способу використано для узгодження графіків генерування СЕС з локальним електроспоживанням в АСК схемою видачі потужності ВДЕ. Також, запропоновано варіант апаратної реалізації автоматизованої системи керування схемою видачі потужності ВДЕ у локальних електричних системах. Пропонована автоматизована система керування ВДЕ базується на принципах функціонування *Smart Grid*, що полягають в значній інтеграції та автоматизації процесів генерування, передачі та споживання.

Запропонований підхід щодо визначення показників та критеріїв оцінки функціональної стійкості підсистеми обміну інформацією АСК схемою видачі потужності ВДЕ комплексно використовує принцип декомпозиції процедури забезпечення функціональної стійкості на більш прості етапи і використовує методику розрахунку узагальненого показника функціональної стійкості як згортки матриці зв'язності структури. За використаними показниками та критеріями можна оцінювати та порівнювати різні структури підсистеми обміну інформацією автоматизованої системи керування.

Показано, що функціональна стійкість запропонованої підсистеми обміну інформацією АСК схемою видачі потужності ВДЕ локальної електричної системи забезпечується шляхом резервування каналів зв'язку. Пропонована підсистема буде функціонально стійка навіть за відмови каналу зв'язку з найбільшою інтенсивністю передачі інформації.

Література

1. Кулик В.В. Оптимальне керування розосередженими джерелами електроенергії з асинхронними генераторами засобами Smart Grid [Електронний ресурс] / В.В. Кулик, Т.Є. Магас, Ю.В. Малогулко // Наукові праці ВНТУ. Енергетика та електротехніка. – 2011. – №4. – С. 1-6. Режим доступу: <http://praci.vntu.edu.ua/article/view/1404/999>. – ISSN 2307-5376.
2. Бурикін О.Б. Оптимізація режиму локальних електричних систем з відновлюваними джерелами енергії [Текст] / О.Б. Бурикін, Ю.В. Малогулко // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія «Електротехніка та електротехнології». – 2013. – №2. – Вип. 15 (338). – С. 42-46. – ISSN 2074-2630.
3. Кулик В.В. Оптимізація перетікань активної та реактивної потужностей у розподільних електромережах засобами розосередженого генерування [Текст] / В.В. Кулик, О.Б. Бурикін, Ю.В. Малогулко // Вісник Вінницького політехнічного університету. Енергетика та електротехніка. – 2014. – №1. – С. 90-93. – ISSN: 1997-9274.
4. Лежнюк П.Д. Оптимізація функціонування розосереджених джерел енергії в локальних електричних системах. енергії [Текст] / П.Д. Лежнюк, О.Є. Рубаненко, Ю.В. Малогулко // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – 2014. – №60 (1102). – С. 68-77. – ISSN 2079-4525.
5. Кулик В.В. Дослідження ефективності сумісної експлуатації локальних електричних мереж з ВДЕ та систем централізованого електропостачання [Текст] / В.В. Кулик, О.Б. Бурикін, Ю.В. Малогулко // Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Серія «Гірництво». Електрифікація та автоматизація гірничих робіт». – 2014. – Вип. 25. – С. 113-120. – ISSN 2079-5688.
6. Бурикін О.Б. Спосіб узгодження графіків генерування сонячних електростанцій та споживачів енергії локальних електричних систем / О.Б. Бурикін, Ю.В. Малогулко, О.В. Нікіторович // Відновлювана енергетика XXI століття: XV міжнарод. наук.-техн. конф.: матеріали конференції. – Київ: Інститут відновлювальної енергетики НАН України, 2014. – С. 52-55.
7. Мокин Б. И. Автоматические регуляторы в электрических сетях / Б. И. Мокин, Ю. Ф. Выговский. — К. : Техника, 1985. — 104 с.
8. Воротицкий В.Э., Лежнюк П.Д., Серова И.А. Методика и программа оценки эффективности применения РПН и АРПН в замкнутых электрических сетях // Электрические станции. - 1992. - № 1. - С. 60-66.
9. Астахов Ю.Н., Лежнюк П.Д. Применение критериального метода в электроэнергетике. -

Київ: УМК ВО. - 1989. - 137 с.

10. J. Conejo, J. M. Arroyo, N. Alguacil, and A.L. Guijarro, "Transmission loss allocation: a comparison of different practical algorithms," *Power Systems, IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 17, P. 571–576, Aug. 2002.

11. С. М. Неділько Система показників і критеріїв для формалізації процесів забезпечення функціональної стійкості систем управління повітряним рухом. Інформаційні технології управління. с. 102-105

12. ГКД 34.48.151-2003 (електронний ресурс). Режим доступу: <http://eom.com.ua/index.php?action=downloads;sa=view;down=2298>.

References

1. Kulyk V.V. Optymalne keruvannya rozoseredzhenymy dzherelamy elektroenerhii z asynkronnymy heneratoramy zasobamy Smart Grid [Elektronnyi resurs] / V.V. Kulyk, T.Ie. Mahas, Iu.V. Malohulko // *Naukovi pratsi VNTU. Enerhetyka ta elektrotekhnika*. – 2011. – №4. – S. 1-6. Rezhym dostupu: <http://praci.vntu.edu.ua/article/view/1404/999>. – ISSN 2307-5376.

2. Burykin O.B. Optymizatsiia rezhymu lokalnykh elektrychnykh system z vidnovliuvanymy dzherelamy enerhii [Tekst] / O.B. Burykin, Iu.V. Malohulko // *Naukovi pratsi Donetskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu. Seriiia «Elektrotekhnika ta elektrotekhnolohii»*. – 2013. – №2. □ Vyp. 15 (338). – S. 42-46. – ISSN 2074-2630.

3. Kulyk V.V. Optymizatsiia peretikan aktyvnoi ta reaktyvnoi potuzhnosti u rozpodilnykh elektromerezhakh zasobamy rozoseredzhenoho heneruvannia [Tekst] / V.V. Kulyk, O.B. Burykin, Iu.V. Malohulko // *Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho universytetu. Enerhetyka ta elektrotekhnika*. – 2014. – №1. – S. 90-93. – ISSN: 1997-9274.

4. Lezhniuk P.D. Optymizatsiia funktsionuvannia rozoseredzhenykh dzherel enerhii v lokalnykh elektrychnykh systemakh. enerhii [Tekst] / P.D. Lezhniuk, O.Ie. Rubanenko, Iu.V. Malohulko // *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «Kharkivskiy politekhnichnyi instytut»*. – 2014. – №60 (1102). – S. 68-77. – ISSN 2079-4525.

5. Kulyk V.V. Doslidzhennia efektyvnosti sumisnoi ekspluatatsii lokalnykh elektrychnykh merezh z VDE ta system tsentralizovanoho elektropostachannia [Tekst] / V.V. Kulyk, O.B. Burykin, Iu.V. Malohulko // *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu Ukrainy «Kyivskiy politekhnichnyi instytut»*. Seriiia «Hirnyctvo». *Elektryfikatsiia ta avtomatyzatsiia hirnychyykh robot*. – 2014. – Vyp. 25. – S. 113-120. – ISSN 2079-5688.

6. Burykin O.B. Sposib uzghodzhennia hrifikiv heneruvannia soniachnykh elektrostantsii ta spozhyvachiv enerhii lokalnykh elektrychnykh system / O.B. Burykin, Iu.V. Malohulko, O.V. Nikitorovych // *Vidnovliuvana enerhetyka KhKhI stolittia: KhV mizhnarod. nauk.-tekhn. konf.: materily konferentsii*. – Kyiv: Instytut vidnovliuvainoi enerhe

7. Mokyn B. Y. Avtomatycheskye rehuliatory v elektrycheskykh setiakh / B. Y. Mokyn, Iu. F. Vyhovskiy. — K. : Tekhnika, 1985. — 104 s.

8. Vorotnytskyi V.Э., Lezhniuk P.D., Serova Y.A. Metodyka y prohramma otsenky efektyvnosti prymereniyia RPN y ARPN v zamknutykh elektrycheskykh setiakh // *Элекtrycheskye stantsyy*. - 1992. - № 1. - S. 60-66.

9. Astakhov Iu.N., Lezhniuk P.D. Prymerenye kryteryalnoho metoda v elektroenerhetyke. - Kyev: UMK VO. - 1989. - 137 s.

10. J. Conejo, J. M. Arroyo, N. Alguacil, and A.L. Guijarro, "Transmission loss allocation: a comparison of different practical algorithms," *Power Systems, IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 17, P. 571–576, Aug. 2002.

11. С. М. Неділько Система показників і критеріїв для формалізації процесів забезпечення функціональної стійкості систем управління повітряним рухом. Інформаційні технології управління. с. 102-105

12. ГКД 34.48.151-2003 (електронний ресурс). Режим доступу: <http://eom.com.ua/index.php?action=downloads;sa=view;down=2298>.

Рецензія/Peer review :

Надрукована/Printed :

Рецензент: д.т.н., проф.,
зав. каф. електричних станцій і систем, ВНТУ

Лежнюк П.Д.

Київ: УМК ВО. - 1989. - 137 с.

10. J. Conejo, J. M. Arroyo, N. Alguacil, and A.L. Guijarro, "Transmission loss allocation: a comparison of different practical algorithms," Power Systems, IEEE Trans. Power Syst., vol. 17, P. 571-576, Aug. 2002.

11. С. М. Неділько Система показників і критеріїв для формалізації процесів забезпечення функціональної стійкості систем управління повітряним рухом. Інформаційні технології управління. с. 102-105

12. ГКД 34.48.151-2003 (електронний ресурс). Режим доступу: <http://eom.com.ua/index.php?action=downloads;sa=view;down=2298>.

References

1. Kulyk V.V. Optymalne keruvannya rozoseredzhenymy dzherelamy elektroenerhii z asynkronnymy heneratoramy zasobamy Smart Grid [Elektronnyi resurs] / V.V. Kulyk, T.Ie. Mahas, Iu.V. Malohulko // Naukovi pratsi VNTU. Enerhetyka ta elektrotekhnika. - 2011. - №4. - S. 1-6. Rezhym dostupu: <http://praci.vntu.edu.ua/article/view/1404/999>. - ISSN 2307-5376.
2. Burykin O.B. Optymizatsiia rezhymu lokalnykh elektrychnykh system z vidnovliuvanymy dzherelamy enerhii [Tekst] / O.B. Burykin, Iu.V. Malohulko // Naukovi pratsi Donetskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu. Seria «Elektrotekhnika ta elektrotekhnolohii». - 2013. - №2. Vyp. 15 (338). - S. 42-46. - ISSN 2074-2630.
3. Kulyk V.V. Optymizatsiia peretikan aktyvnoi ta reaktivnoi potuzhnosti u rozpodilnykh elektromrezhakh zasobamy rozoseredzhenoho heneruvannya [Tekst] / V.V. Kulyk, O.B. Burykin, Iu.V. Malohulko // Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho universytetu. Enerhetyka ta elektrotekhnika. - 2014. - №1. - S. 90-93. - ISSN: 1997-9274.
4. Lezhniuk P.D. Optymizatsiia funktsionuvannya rozoseredzhenykh dzherel enerhii v lokalnykh elektrychnykh systemakh enerhii [Tekst] / P.D. Lezhniuk, O.Ie. Rubanenko, Iu.V. Malohulko // Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «Kharkivskiy politekhnichnyi instytut». - 2014. - №60 (1102). - S. 68-77. - ISSN 2079-4525.
5. Kulyk V.V. Doslidzhennia efektyvnosti sumisnoi ekspluatatsii lokalnykh elektrychnykh mrezh z VDF ta system tsentralizovanoho elektropostachannia [Tekst] / V.V. Kulyk, O.B. Burykin, Iu.V. Malohulko // Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu Ukrainy «Kyivskiy politekhnichnyi instytut». Seria «Hirymstvo». Elektrifikatsiia ta avtomatyzatsiia hirnychyykh robot. - 2014. - Vyp. 25. - S. 113-120. - ISSN 2079-5688.
6. Burykin O.B. Sposib uzghodzhennia hrafiky heneruvannya soniachnykh elektrostantsii ta spozhyvachiv enerhii lokalnykh elektrychnykh system / O.B. Burykin, Iu.V. Malohulko, O.V. Nikitorovych // Vidnovliuvana enerhetyka KhKhI stolittia: KhV mizhnarod. nauk.-tekhn. konf.: materiy konferentsii. - Kyiv: Instytut vidnovliuvanoi enerhe
7. Mokyn B. Y. Avtomatycheskye rehuliatory v elektrycheskykh setiakh / B. Y. Mokyn, Iu. F. Vshovskiy. - K. : Tekhnika, 1985. - 104 s.
8. Vorotynskiy V.O., Lezhniuk P.D., Serova Y.A. Metodyka y prohramma otsenky efektyvnosti prymerenya RPN y ARPn v zamknutykh elektrycheskykh setiakh // Elektrycheskye stantsyy. - 1992. - № 1. - S. 60-66.
9. Astakhov Iu.N., Lezhniuk P.D. Prymenenye kryterialnogo metoda v elektroenerhetyke. - Kyev: UMK VO. - 1989. - 137 s.
10. J. Conejo, J. M. Arroyo, N. Alguacil, and A.L. Guijarro, "Transmission loss allocation: a comparison of different practical algorithms," Power Systems, IEEE Trans. Power Syst., vol. 17, P. 571-576, Aug. 2002.
11. С. М. Неділько Система показників і критеріїв для формалізації процесів забезпечення функціональної стійкості систем управління повітряним рухом. Інформаційні технології управління. с. 102-105
12. ГКД 34.48.151-2003 (електронний ресурс). Режим доступу: <http://eom.com.ua/index.php?action=downloads;sa=view;down=2298>.

Рецензія/Peer review :
Надрукована/Printed :

Рецензент: д.т.н., проф.,
зав. каф. електричних станцій і систем, ВНТУ



Лежнюк П. Д.