

ВДОСКОНАЛЕННЯ МАТЕМАТИЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМ ОПТИМІЗАЦІЇ РЕЖИМІВ ЛОКАЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМ З ВІДНОВЛЮВАЛЬНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ ЕНЕРГІЇ

Показано необхідність вдосконалення математичного забезпечення комп'ютерних систем (КС) керування режимами роботи відновлювальних джерел електроенергії (ВДЕ) у локальних електричних системах (ЛЕС) з метою покращення показників якості електричної енергії та ефективності їх використання. Запропоновано метод визначення оптимальної потужності та місць приєднання ВДЕ у ЛЕС, покладений в основу алгоритму програмного забезпечення комп'ютерних систем оптимізації їх режимів. За результатами моделювання на розробленій цифровій моделі реальної ЛЕС доведено ефективність запропонованих методів визначення оптимальних потужностей та місць підключення ВДЕ у ЛЕС.

It is shown the necessity of improving the mathematical software of computing systems (CS) of control modes of renewable energy sources (RES) in local electrical systems (LES) for the purpose of improving the indicators of quality of electricity energy quality and efficiency. It was proposed the method of determining the optimal power and placement connection of RES to LES. This method is the basis of the software computer systems algorithm of optimization their regimes. As a result of simulation models using digital model of a real LES was shown the effectiveness of the proposed methods for determining the optimal capacity and the optimal placement connection of RES to LES.

Вступ

Сучасні тенденції розвитку світової енергетики спрямовані на модернізацію електричних мереж. Більшість промислово розвинених країн світу розуміють необхідність підвищення енергетичної ефективності стимулюючи розвиток альтернативної та відновлювальної енергетики, підвищення рівня автоматичної оптимізації та контролю електричних мереж, широкого впровадження комп'ютерних систем та їх високоефективного програмного забезпечення. Ця задача є однією з головних на всіх етапах реформування енергетичної галузі: на етапі наукових досліджень, розробки, проектування енергетичного обладнання, виробництва, транспортування, розподілу і споживання електричної енергії.

Розвиток енергетики поставив питання про поступовий перехід від традиційних технологій, що передбачають використання централізованого генерування електричних мереж, до принципово нового рішення, яке орієнтоване на широке застосування розосереджених джерел енергії, та активних мереж, які здатні ефектив-

но працювати за умови високоефективного обміну інформацією між усіма суб'єктами енергоринку, що потребує впровадження сучасних комп'ютерних технологій.

Активні електричні мережі, за підтримки таких технологій, здатні швидко адаптуватися до мінливих потреб зацікавлених сторін - власників, споживачів, продавців. Вони розглядаються як ключовий елемент інфраструктури «розумних» енергосистем майбутнього [1]. На сьогоднішній день усі аспекти створення подібних «розумних» енергосистем розглядаються в концепції Smart Grid в енергетиці, найбільш відомій концепції модернізації електричних мереж [1].

Така концепція характеризується двосторонніми потоками електроенергії та інформації для створення автоматизованої, широко розгалуженої розподільної мережі. Обмін інформацією в ній відбувається між комунікаційними доменами генерування, передачі, розподілу та споживання електроенергії, які фізично представлені комп'ютерними системами автоматизації та управління виробництвом кожного із доменів.

Слід підкреслити, що Smart Grid - це не тільки нові енергетичні технології, але також і сучасні комп'ютерні інформаційні та комунікаційні технології білінгу, електронної комерції, управління доступом та адміністрування в мережах різного масштабу, моделювання та зберігання даних, віртуалізації, комп'ютерної безпеки, розподілених обчислень, збору, обробки і передачі інформації в реальному часі.

Сучасні реалізації елементів Smart Grid в умовах широкого впровадження в енергетичну галузь комп'ютерних систем у багатьох країнах дають можливість стверджувати, що апаратно і технологічно такі системи створюють передумови для високоефективного використання ВДЕ для розв'язання як локальних (забезпечення максимального прибутку від їх експлуатації), так і загальносистемних (підвищення якості функціонування розподільних електричних мереж) задач.

Відповідно до концепції Smart Grid, усі учасники та організатори процесу енергообміну в ЕЕС можуть бути розподілені між сферами діяльності, або так званими доменами.

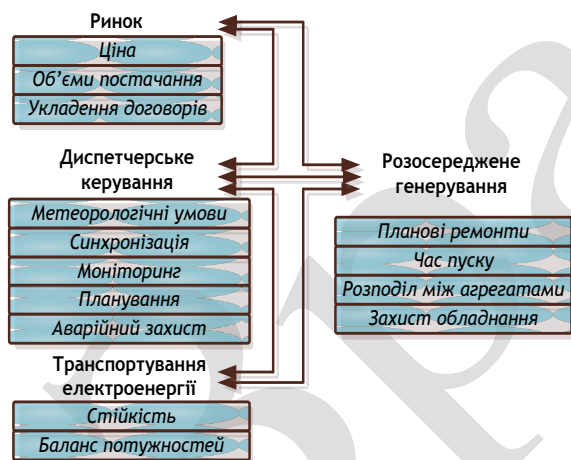


Рис. 1. Основні функції окремих доменів Smart Grid пов'язаних з генеруванням електроенергії за рахунок розосереджених джерел

Домен «Розосереджене генерування» об'єднує електричні станції, у тому числі РДЕ різних типів, наприклад, відновлювальні джерела енергії, що видають електроенергію у розподільні електричні мережі. Його основним завданням є підвищення ефективності виробництва електроенергії такими джерелами. Особливі складності виникають на шляху оптимізації функціонування вітрових та сонячних електричних станцій, оскільки їх режими визначаються

стохастичним впливом навколишнього середовища, й при цьому практично неможливо запасати первинну енергію (як, наприклад, у випадку малих ГЕС).

З розвитком розосередженого генерування змінюються економічні умови функціонування електроенергетики як галузі, зокрема перехід до нової конкурентної моделі оптового ринку електроенергії. У випадку реалізації електропостачання за двосторонніми договорами за участі ВДЕ, коли останні видають потужність в електричну мережу, постає необхідність узгодження їх роботи з енергосистемою, від якої здійснюється централізоване живлення.

В зв'язку із збільшенням частки розосередженого генерування в локальних електричних системах виникає необхідність вдосконалення існуючих методів та моделей, програмна реалізація яких в сучасних КС дозволила б визначати оптимальну потужність ВДЕ з метою отримання максимального прибутку від їх експлуатації за умови зменшення втрат електроенергії та покращення її якості в ЛЕС [2, 3].

Постановка задач

Серед комплексу задач, що виникають в процесі впровадження програмного забезпечення комп'ютерних систем оптимального керування режимами (ОКР) ВДЕ, доцільно вивчати і розв'язувати в першу чергу ті, які безпосередньо впливають на ефективність узгодженого використання ВДЕ і навантажень в межах ЛЕС та обґрунтовану мотивацію у інвесторів, власників ВДЕ, енергопостачальних компаній, споживачів та щодо розбудови ВДЕ, оснащених сучасними КС ОКР ВДЕ в Україні [4].

На сьогодні за рахунок розвитку комунікаційних доменів SmartGrid, а також їх програмного забезпечення стало можливим розв'язання задач, що виникають в процесі впровадження ВДЕ, оснащених сучасними КС. Вхідними даними для розрахунків, які виконуються під час розв'язку таких задач, є телевиміри параметрів поточних режимів енергосистем, які формуються в комп'ютерну базу даних оперативно-інформаційного комплексу. Практично в усіх цих програмах особливістю аналізу є те, що зміна навантажень на деяку величину потребує повного циклу повторних розрахунків, включаючи формування математичної моделі ЛЕС.

Отже, у випадку аналізу та коригування режимів ЛЕС в темпі реальних процесів за допомогою КС, є необхідність подальшого вдоско-

налення програмно-інформаційного супроводу за рахунок поліпшення характеристик програмного забезпечення та насичення його новими актуальними задачами.

Стаття присвячена аналізу доцільності застосування методу визначення оптимальної потужності ВДЕ, а також розробці на цій підставі методу, алгоритму та вдосконалення програмного забезпечення КС, що дозволять розв'язувати подібні задачі в темпі процесу на основі даних комунікаційних доменів SmartGrid.

Метод визначення оптимальної потужності ВДЕ, керованих КС, в ЛЕС

Враховуючи специфіку забезпечення рентабельності ЛЕС, доцільно розв'язувати комплексну задачу оптимізації режиму умовно-керованих відновлювальних джерел енергії P_j^{BDE} , $j = 1, 2, \dots, n$ для забезпечення максимальних надходжень від реалізації їх електроенергії за умов багатоступеневого тарифу енергоринку u_j та умов зменшення втрат електроенергії, покращення її якості в ЛЕС, а також підвищення надійності електропостачання.

Вираз для визначення сумарного прибутку від експлуатації ВДЕ приєднаних на паралельну роботу у ЛЕС можна записати таким чином [5]:

$$\Pi^{BDE} = \sum_{j=1}^n u_j \cdot P_j^{BDE} \cdot k_{e_j} \cdot T \quad (1)$$

де P_j^{BDE} – встановлена потужність j -го ВДЕ, кВт;

u_j – тариф на виробництво електроенергії j -м ВДЕ («зелений тариф»), коп./кВт*год;

k_{e_j} – коефіцієнт використання встановленої потужності j -го ВДЕ;

T – тривалість графіка навантажень, год.

Цільову функцію задачі оптимізації потужності відновлювальних джерел енергії в ЛЕС пропонується представити так:

$$\Pi = \Pi^{BDE} \cdot e^{-(1-k_1 \cdot \bar{P}(Uy, T))} \cdot e^{-(1-k_2 \cdot \bar{P}(\Delta W_n, T))} \rightarrow \max \quad (2)$$

де $\bar{P}(Uy, T)$ – імовірність забезпечення нормативного відхилення напруги для заданого звітного періоду;

$\bar{P}(\Delta W_n, T)$ – імовірність забезпечення нормативних втрат електроенергії;

k_1, k_2 – вагові коефіцієнти, використання яких дозволяє змінювати вплив показників якості напруги на результати оптимізації.

За обмежень:

$$\left. \begin{aligned} \sum_{j=1}^n P_j^{BDE} - \sum_{g=1}^m P_{ng} \leq P_{cp} &\rightarrow 0 \\ \sum_{j=1}^n P_j^{BDE} - \sum_{g=1}^m P_{ng} > P_{cp} &\rightarrow V_{рек} \end{aligned} \right\};$$

$$\left. \begin{aligned} \sum_{j=1}^n P_j^{BDE} \leq \sum_{g=1}^m P_{ng} &\rightarrow 0 \\ \sum_{j=1}^n P_j^{BDE} > \sum_{g=1}^m P_{ng} &\rightarrow B_{\Delta W} \end{aligned} \right\}, \quad (3)$$

де $\Pi_{P_{cp}}, \Pi_{P_n}$ – штрафні функції, введені в цільову функцію Π для врахування обмежень типу нерівностей за втратами активної потужності та пропускну здатністю ЛЕС;

P_{ng} – потужність навантаження g -го вузла споживання, $g = 1, 2, \dots, m$;

P_{cp} – пропускна здатність ЛЕС, що обмежується найбільш слабкою ділянкою мережі;

$V_{рек}$ – витрати на реконструкцію ЛЕС для забезпечення працездатності у разі перевищення граничної потужності;

$B_{\Delta W}$ – витрати на додаткові втрати електроенергії, у разі якщо сумарна потужність ВДЕ перевищить сумарну потужність навантаження.

Розв'язком задачі оптимізації (2) буде значення оптимальної потужності ВДЕ за місцем експлуатації за умов багатоступеневого тарифу енергоринку u_j , за умов зменшення втрат електроенергії та покращення її якості в ЛЕС.

Для розв'язку цієї задачі існують відомі методи [5], які вже широко застосовуються у традиційній електроенергетиці [6] і призначені для знаходження чисельних розв'язків оптимізаційних задач, що відповідають заданій сукупності вхідних даних (поточному вектору стану системи) та є достатнім з практичних цілей.

Врахування показників якості електроенергії для визначення оптимальної потужності відновлювальних джерел енергії ЛЕС з ВДЕ

У цільовій функції (2) пропонується використання показників якості електроенергії у вигляді ймовірностей забезпечення нормативного відхилення напруги та забезпечення нормативних втрат електроенергії для заданого звітного періоду. Застосування вказаних показників під час розв'язання задач оптимізації дозволяє враховувати показники ефективності роботи ЛЕС, що створює умови для комплексного розв'язку поставленої задачі оптимізації. Тобто розв'язком задачі оптимізації буде оптимальна потужність ВДЕ з огляду на показники роботи електричної мережі.

Відхилення напруги у електричній мережі характеризується показником усталеного відхилення напруги δU_y . Воно являється наслідком добових, сезонних і технологічних змін електричних навантажень споживачів, а також потужності компенсуючих пристроїв, регулювання напруги генераторами електростанцій і на підстанціях енергосистем, зміни схеми електричних мереж.

Відхилення напруги δU – це різниця між фактичним U_i та номінальним U_n значеннями напруги:

$$\delta U_y = U - U_{ном}$$

або у відсотках:

$$\delta U_y = \frac{U - U_{ном}}{U_{ном}} \cdot 100 \quad (4)$$

Якість електричної енергії відповідає вимогам стандарту, якщо всі значення усталеного відхилення напруги, що виміряні протягом 24 год. знаходяться в інтервалі, обмеженому гранично допустимими значеннями, а не менше 95% вимірювань за цей період знаходяться в інтервалі обмеженому нормально допустимими значеннями.

Статистична оцінка ймовірності забезпечення нормативного відхилення напруги пропонується визначати за формулою для визначення статистичної оцінки ймовірності безвідмовної роботи технічних засобів:

$$\bar{P}(t) = \frac{[N_0 - n(t)]}{N_0}$$

де $n(t)$ – кількість технічних засобів, що відмовили за час t ;

N_0 – загальна кількість технічних засобів, що підлягають випробуванням.

Проектуючи вираз (4) до значення усередненої напруги U_y яка знаходиться в межах нор-

мативного відхилення отримаємо ймовірність забезпечення нормативного відхилення напруги:

$$\bar{P}(U_y, T) = t(U_{y \pm 5\%}) / T \quad (5)$$

де $t(U_{y \pm 5\%})$ – час коли значення усередненої напруги знаходилось у допустимих межах.

Для визначення ймовірності забезпечення нормативного відхилення втрат електроенергії використаємо вираз подібний до (5):

$$\bar{P}(\Delta W_n, T) = t(\Delta W_{\pm 5\%}) / T \quad (6)$$

де $t(\Delta W_{\pm 5\%})$ – час коли значення втрат електроенергії знаходилось у допустимих межах.

Таким чином, використання ймовірностей забезпечення нормативного відхилення напруги та забезпечення нормативного відхилення втрат електроенергії, у якості змінної в цільовій функції (1) та (2), дозволить враховувати показники ЛЕС під час розрахунку оптимального значення сумарного прибутку від експлуатації та комп'ютерного керування ВДЕ приєднаними на паралельну роботу у розподільній мережі.

Алгоритм та програмна реалізація застосування методу визначення оптимальної потужності ВДЕ, керованих КС

З метою ефективного впровадження пропонуваного вище методу розроблено алгоритм програмного забезпечення КС оптимального керування потужністю ВДЕ, який враховує показники якості електричної енергії у цільовій функції та дозволяє підвищити ефективність функціонування локальних електричних систем. Блок-схему пропонуваного алгоритму фрагменту програми визначення оптимальної потужності ВДЕ за місцем експлуатації показана на рис. 2.

Розроблений алгоритм дозволяє автоматизувати процес визначення оптимальної потужності ВДЕ в ЛЕС. Базуючись на представлений блок-схемі розроблено програмну реалізацію пропонуваного алгоритму, що є додатковим програмним модулем програмного комплексу розрахунку втрат потужності розподільних електричних мереж “Втрати” розробленого на кафедрі “Електричних станцій та систем” Вінницького національного технічного університету (рис. 3).

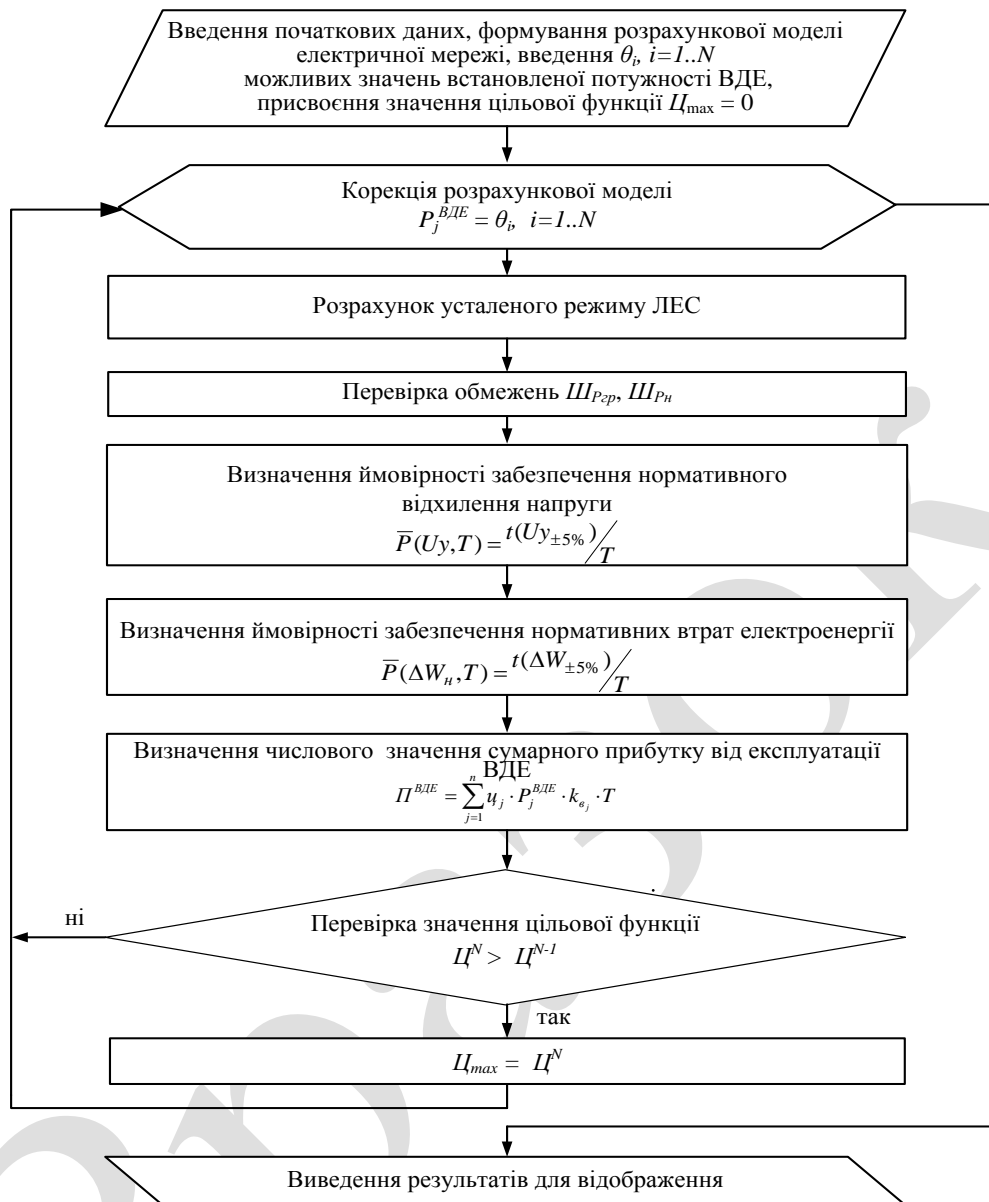


Рис.2. Блок-схема алгоритму фрагменту програми визначення оптимальної потужності ВДЕ за місцем експлуатації

Втрати - 10/0,4 (Версія 7.04) - 4 ПС.dat

Файл Розрахунок Електроощадні заходи (ЕОЗ) База основного обладнання Сервіс ?

Аналіз схеми Розрахунок Результати Вірогідність Тест

Інформація про підстанції

N шин	Назва	U, кВ	T, год	Wв, кВт год
1000	"Михайлівка"	10.00	24.0	
2000	"Ямпіль"	10.00	24.0	
3000	"Сл.Підлісівка"	10.50	24.0	
4000	"Івонівка"	10.00	24.0	

Фідери п/ст "Михайлівка"

N	Назва	I _{max} , А	I _{ср} , А	I _{min} , А	Wв, кВт год
1	ф. N#42		48.00		
2	ф. N#43		256.00		
3	ф. N#45		134.00		
4	ф. N#41		140.00		

Рис.3. Інформація про підстанції у програмі «Втрати-10/0,4»

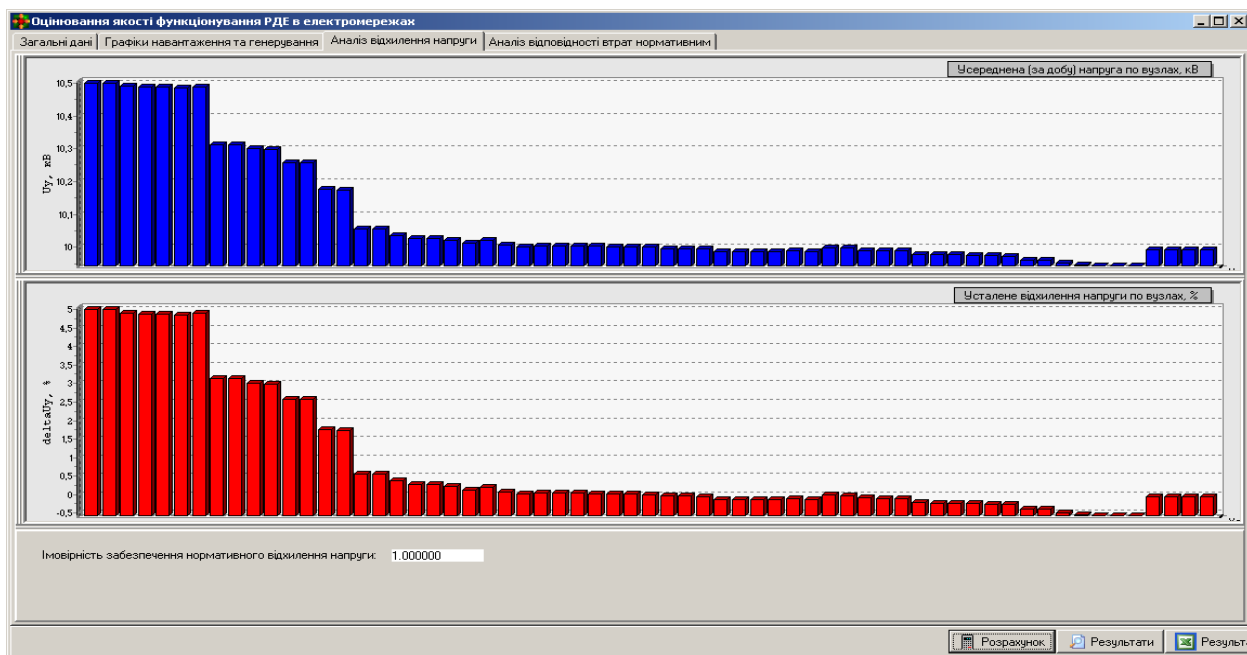


Рис.4. Розрахунок ймовірності забезпечення нормативного відхилення напруги

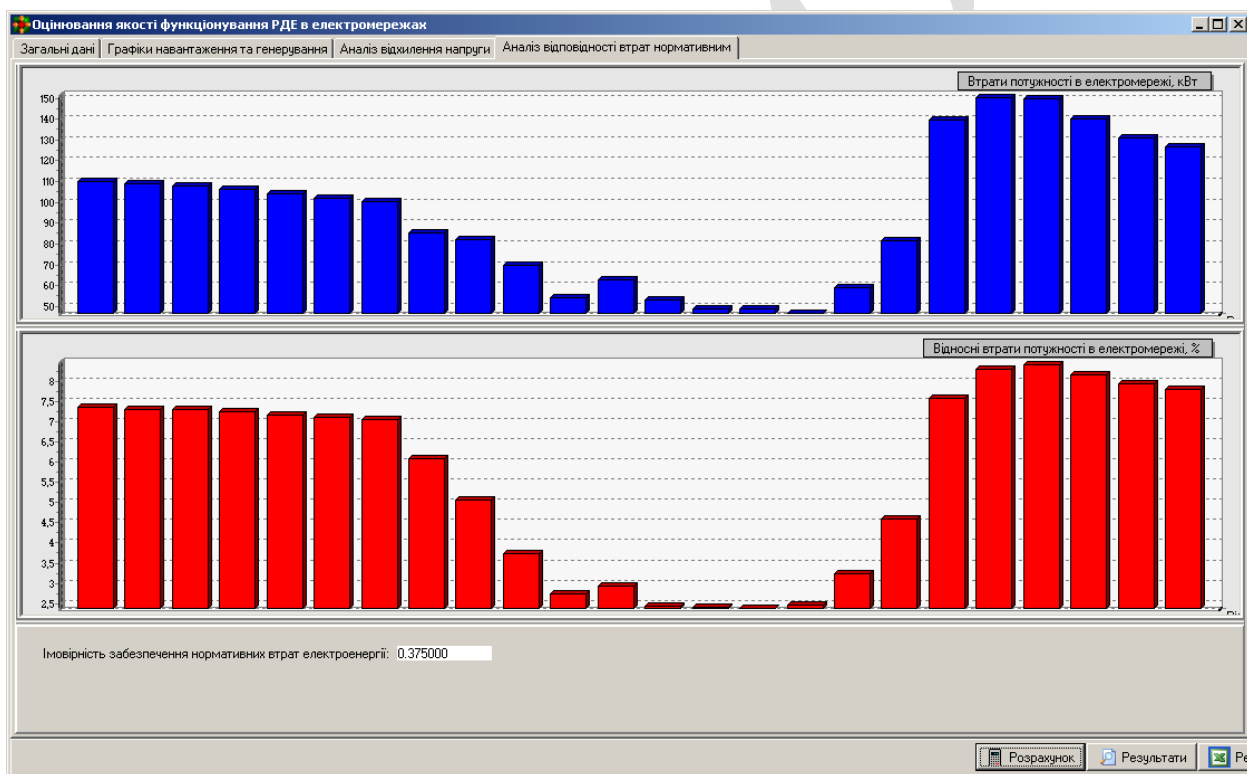


Рис.5. Розрахунок забезпечення ймовірності нормативних втрат електроенергії

Також розраховано ймовірності забезпечення нормативних втрат електроенергії та забезпечення нормативного відхилення напруги. Результати роботи програмного забезпечення приведено на рис. 4, 5.

Перевірка адекватності програмної реалізації

Для перевірки адекватності програмної реалізації запропонованого методу визначення оптимальної потужності ВДЕ розроблено комп'ютерну модель ЛЕС з ВДЕ для фрагменту ЛЕС Ямпільського району ПАТ «Вінницяобле-

нерго». Під час комп'ютерного моделювання проведені розрахунки з визначення оптимального місця увімкнення ВДЕ на паралельну роботу з розподільною ЕМ та генерованої цим ВДЕ потужності виконані на прикладі Цекинівської СЕС №1 (рис. 6), СЕС №2 та №3, які розташовані у Ямпільському районі. Основні характеристики станції такі:

Потужності цих СЕС наступні: Цекинівська СЕС №1: 1,43 МВт; Цекинівська СЕС №2: 1,43 МВт; Цекинівська СЕС №3: 0,25 МВт.

Для розрахунку числового значення цільової функції (2) скористаємось тарифами на виробництво електроенергії Цекинівської СЕС відповідно до постанови НКРЕ № 1072 від 31.07.2014 «Про встановлення «зелених» тарифів на електричну енергію».

Числове значення сумарного прибутку від експлуатації Цекинівської СЕС №1 приєднаної на паралельну роботу у Ямпільський РЕМ можна записати таким чином:

$$P_{ВДЕ} = \sum_{j=1}^n \psi_j \cdot P_{ВДЕ_j} \cdot k_{в_j} \cdot T =$$

$$= 731,95 \cdot 1430 \cdot 0,8 \cdot 24 = 200964192 \text{ грн.}$$

Цільова функція задачі оптимізації місць приєднання розосереджених джерел енергії в ЛЕС отримає таке числове значення:

$$Ц = P_{ВДЕ} \cdot e^{-(1-k_1 \cdot \bar{P}(U_y, T))} \cdot e^{-(1-k_2 \cdot \bar{P}(\Delta W_n, T))} =$$

$$= 200964192 e^{-(1-1)} \cdot e^{-(1-1 \cdot 0,375)} = 107568 \text{ грн.}$$

Таким чином, недотримання нормативних втрат потужності зменшує сумарний прибуток від експлуатації ВДЕ на 50%.

Отримане значення сумарного прибутку може варіюватись залежно від значення вагових коефіцієнтів k_1 та k_2 . Значення цих коефіцієнтів можуть встановлюватись на базі експертної оцінки або техніко-економічного порівняння значимості втрат та якості напруги. Результати розрахунку приведено у табл. 1.

Як видно з результатів дослідження, оптимальним є приєднання потужності 2080 кВт до фідера №31 Слобода-Підлісівської підстанції. Збільшення встановленої потужності призводить до погіршення якості напруги, що суперечить умовам видачі електроенергії.

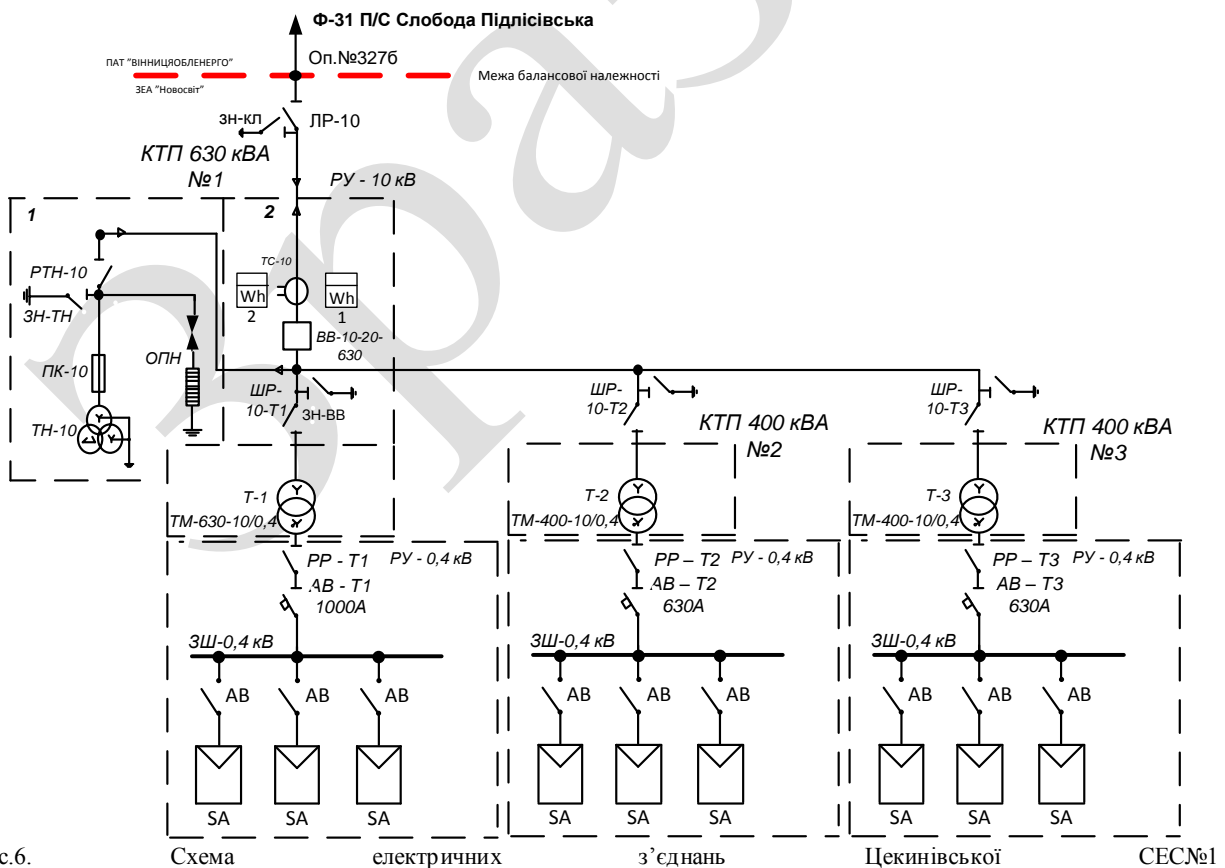


Рис. 6. Схема електричних з'єднань Цекинівської СЕС №1 ЗЕА «Новосвіт»

Таблиця 1. Результати розрахунку сумарного прибутку від експлуатації ВДЕ для різних місць приєднання

Встановлена потужність		Сумарний прибуток	Імовірність забезпечення нормативного відхилення напруги	Імовірність забезпечення нормативних втрат електроенергії	Значення цільової функції
Цекинівська СЕС №1, кВт	Цекинівська СЕС №2 та №3, кВт	$P_{ВДЕ}$, грн	$\bar{P}(U, T)$, в.о.	$\bar{P}(\Delta W_n, T)$, в.о.	C , грн
1430	1430+250	200964	1	0,375	107568
1430+250	1430	236097	1	0,4	129573
1430+650	1430-400	257177	1	0,416	143993
1430+1280	1430-1030	289500	0,91	0,4	143761

Висновки

За результатами аналізу доведено необхідність вдосконалення програмного забезпечення комп'ютерних систем керування потужністю відновлювальних джерел електроенергії їх підключенням до локальних електричних систем з метою покращення показників якості електричної енергії та ефективності їх використання.

Розроблено метод визначення оптимальної потужності та місць підключення ВДЕ у ЛЕС, покладений в основу алгоритму програмного забезпечення комп'ютерних систем керування їх режимами, який за рахунок врахування навантажень та показників якості електричної енергії дозволяє зменшити втрати активної потужності у вітках ЛЕС та підвищити ефективність використання КС.

За результатами моделювання на розробленій комп'ютерній моделі ЛЕС, яка входить до складу Ямпільських РЕМ ПАТ «Вінницяобленерго», доведено ефективність запропонованих методів визначення оптимальних потужностей та місць підключення ВДЕ в ЛЕС.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. NIST Releases Report on Smart Grid Development // National Institute of Standards and Technology (USA) – Recognized Standards for Inclusion In the Smart Grid Interoperability Standards Framework, Release 1.0 (електронний

ресурс). Режим доступу:

[http://collaborate.nist.gov/twiki-
sggrid/bin/view/SmartGridInterimRoadmap/InterimRoadmapFinal](http://collaborate.nist.gov/twiki-
sggrid/bin/view/SmartGridInterimRoadmap/InterimRoadmapFinal)

2. Seyed Mohammad Hossein Nabavi, Somayeh Hajforoosh, Mohammad A.S. Masoum, "Placement and Sizing of Distributed Generation Units for Congestion Management and Improvement of Voltage Profile using Particle Swarm Optimization", Innovative Smart Grid Technologies Asia (ISGT), 2011 IEEE PES, p.p. 1-6

3. О. С. Рубаненко, О. О. Рубаненко, І. О. Гунько. Вплив опорів ЛЕП мережі на нормальний режим електричних систем з розподіленими джерелами енергії. - «Електротехнічні системи, електрифікація й автоматизація в агропромисловому комплексі», 2014, с. 38-42.

4. Бурикін О.Б., Малогулко Ю.В. Оптимізація режиму локальних електричних систем з відновлювальними джерелами енергії. - Наукові праці ДонНТУ. Серія «Електротехніка та електротехнології», 2013, с. 42-46.

5. П. Д. Лежнюк, В. В. Кулик, О. А. Ковальчук. Оптимальне керування розосередженими джерелами енергії в локальній електричній системі. - Праці Інституту електродинаміки НАН України. Збірник наукових праць. Спеціальний випуск, 2011, с. 48-55.

6. Mohammadi, M.T. Arab Yar, Faramarzi, M. " PSO algorithm for siting and sizing of distributed generation to improve voltage profile and decreasing power losses ". - Electrical Power Distribution Networks (EPDC), 2012 p.p. 1-6.

О.Е. Rubanenko, О.В. Burykin, Y.V. Malohulko. **The improvement of the mathematical software of computer systems optimization of modes of local electrical systems with renewable energy sources.**

А.Е. Рубаненко, А.Б. Бурыкин, Ю.В. Малогулко **Улучшение математического обеспечения компьютерных систем оптимизации режимов локальных электрических систем с возобновляемыми источниками энергии.**

Показана необхідність удосконалення математичного забезпечення комп'ютерних систем (КС) управління режимами роботи відновлюваних джерел електроенергії (ВДЕ) в локальних електричних системах (ЛЕС) з метою удосконалення показників якості електричної енергії та ефективності їх використання. Представлено метод визначення оптимальної потужності та місць підключення ВДЕ в ЛЕС, який входить до складу алгоритму програмного забезпечення комп'ютерних систем оптимізації їх режимів. Результати моделювання на розробленій цифровій моделі реальної ЛЕС доведено ефективність запропонованих методів визначення оптимальних потужностей та місць підключення ВДЕ в ЛЕС.

Зразок