УДК 621.311 **DOI 10.20535/1813-5420.2.2022.261372**

В.А. Степаненко, аспірант, ORCID 0000-0001-6176-589X
А.І. Замулко, канд. техн. наук, доц., ORCID 0000-0001-8018-6332
Ю.А. Веремійчук, канд. техн. наук, доц., ORCID 0000-0003-0258-0478
В.Ф. Находов, д-р техн. наук., доц., ORCID 0000-0001-7643-5965
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ОЦІНКА РИЗИКІВ ПРИ ІНТЕГРАЦІЇ ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ ДО СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

Робота присвячена розвитку методології, що дозволяє поєднувати якісні та кількісні оцінки різних факторів ризику для прийняття інтегрального рішення при приєднанні відновлюваних джерел енергії до системи електропостачання. Інтеграція кількісної інформації та якісно представлених знань шляхом створення відповідних алгоритмів дозволяє суттєво розширити можливості проведення ризик-аналізу об'єктів відновлюваних джерел енергії, утворених енергетичних систем та обґрунтування заходів щодо управління ними.

В ході дослідження проведено аналіз методів та підходів, що можуть використовуватися для врахування ризиків у складних системах. В умовах високої невизначеності та складності великомасштабних систем багато рішень можуть бути отримані шляхом використання якісних оцінок, що базуються на знаннях та досвіді експертів.

Підтримка надійності, стабільності та ефективності електричної системи стає складним питанням для розподільних мереж із змінними енергетичними ресурсами. Збільшення частки сонячних електричних станцій (СЕС) у генерації енергосистеми становить великий виклик для ефективного управління розподільною мережею та серйозну загрозу її нормальному функціонуванню.

В статті здійснено ідентифікацію основних факторів, що призводять до проблем інтеграції СЕС до системи електропостачання. Проведено оцінку ймовірності виникнення факторів ризику та рівня можливих наслідків від реалізації кожного з ідентифікованих факторів ризику за допомогою метода експертних оцінок.

За результатами дослідження встановлено, що основними проблемами при інтеграції СЕС до системи електропостачання є необхідність збільшення маневрової потужності, погіршення якості електричної енергії, виникнення необхідності модернізації ліній, зростання заборгованості за "зеленим" тарифом, виникнення вищих гармонік та неврегульованого перетікання реактивної потужності.

Ключові слова: *відновлювані джерела енергії, оцінка ризикових подій, система електропостачання, сонячна електрична станція, фактор ризику, якість електричної енергії.*

Вступ

Відповідно до Енергетичної стратегії України на період до 2035 р., схваленої розпорядженням Кабінету Міністрів України від 18 серпня 2017 р. № 605-р, розвиток енергетики на основі відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) є важливим напрямом, який підвищує рівень енергетичної безпеки і знижує антропогенний вплив на навколишнє середовище. Передбачається збільшення частки ВДЕ у загальному балансі встановлених потужностей до рівня 25% до 2035 р., що за базовим сценарієм становить близько 24 млн т н.е. [1].

Серед різних типів ВДЕ фотоелектричну генерацію можна вважати однією з найбільш перспективних технологій за рахунок тенденції до зниження вартості фотоелектричних панелей та підвищення ефективності сонячних елементів.

Принциповим питанням функціонування операторів системи розподілу є підтримання балансу в електричній мережі за допомогою управління її ресурсами та прогнозування попиту на електричну енергію. Коли до електричної мережі додаються елементи, поведінку яких важко передбачити, дотримання балансу потужності в системі стає більш складним завданням. СЕС належать до тієї категорії елементів мережі, функціонування яких суттєво залежить від метеорологічних та атмосферних умов. Тому питання коливань виробленої потужності, викликаних зміною інтенсивності сонця, стає більш вираженим у міру збільшення проникнення цих відновлюваних джерел в електричну мережу. Таким чином, їх стохастичний характер виробництва електричної енергії буде мати помітний вплив на відхилення показників якості електричної енергії [2]. Проблеми якості електроенергії, як правило, пов’язані з СЕС, включають перехідні процеси напруги, відхилення частоти та гармоніки. Тому підтримка надійності, стабільності та ефективності електричної системи стає складним питанням для розподільних мереж. Незважаючи на вищезазначені застереження, відмічається значна присутність встановленої потужності на основі СЕС в електричних мережах. Проте подальший рух у напрямку збільшення частки СЕС у генерації електроенергії

є викликом для ефективного управління розподільною мережею та серйозну загрозу її належному функціонуванню.

Інформованість осіб, які приймають рішення щодо проектів приєднання ВДЕ до систем електропостачання, багато в чому визначається стадією життєвого циклу цих об'єктів; так на ранніх етапах зазвичай відсутні достовірні дані по всіх факторах, що впливають на виникнення ризикових подій. Аналіз, що проводиться при цьому, будується на експертній оцінці. У міру подальшої розробки та впровадження ВДЕ до розподільних електромереж, виконані експертами оцінки переглядаються та уточняються, по ряду подій з'являється необхідна для подальшого аналізу інформація, розробляються різноманітні кількісні моделі та ін. Відсутність формальної методики, що дозволяє поєднувати якісні та кількісні оцінки різних факторів ризику для прийняття інтегрального рішення при приєднанні об'єктів ВДЕ до мережі, виявляється ключовою проблемою, вирішенню якої і присвячено справжню роботу. Інтеграція кількісної інформації та якісно представлених знань шляхом створення відповідних алгоритмів дозволяє суттєво розширити можливості проведення ризик-аналізу об'єктів ВДЕ на різних етапах приєднання до електромережі та проведення оцінювання заходів щодо управління ними.

Мета та завдання

Метою статті є розвиток методології, що дозволяє поєднувати якісні та кількісні оцінки різних факторів ризику для прийняття узагальненого рішення при приєднанні ВДЕ до системи електропостачання. Завданнями статті є ідентифікація та оцінка основних факторів і подій, що призводять до проблем інтеграції СЕС в енергосистему країни.

Матеріал і результати досліджень

Відомо, що ключовими особливостями великомасштабних і складних систем є різноманітність та взаємозалежність елементів, що входять до них, велика кількість осіб, що приймають рішення в умовах високої невизначеності та ризиків, а також унікальність цих об'єктів тощо [3]. Під складними системами розуміють сукупність безлічі взаємопов’язаних підсистем, кожна з яких може характеризуватися ієрархією спільних або взаємодіючих компонентів, власними функціями, операціями, базами даних, витратами та зацікавленими сторонами. При цьому особливості взаємодій між підсистемами не дозволяють аналізувати складну систему лише на основі знань про властивості формуючих її елементів.

Прикладами подібних систем є глобальні газотранспортні та енергетичні об'єкти, підприємства гірничодобувної та обробної промисловості тощо. Одним з ключових питань ефективного управління такими системами є оцінка та аналіз ризикових подій, що впливають на їх успішне функціонування. Наприклад, різноманітні природні, політичні, фінансово-економічні, організаційні та багато інших подій здатні суттєво вплинути на роботу складних систем, у зв'язку з чим мають піддаватися відповідному аналізу при виробленні управлінських рішень.

Для аналізу ризиків складних систем можуть використовуватися різні методи, у т. ч. аналітичні моделі, імітаційне моделювання, методи аналізу. Проте використання цих інструментів стикається з рядом проблем, пов'язаних з відсутністю необхідної кількісної інформації, складністю обґрунтування коректності результатів розрахунків, високою трудомісткістю оцінок, відсутністю необхідних програмних засобів та ін.

Зазначимо, що у багатьох випадках найпростішим і найефективнішим методом вирішення задачі в умовах невизначеності є комбіноване використання різних моделей та методів, коли кожен із них більшою мірою відображає особливості роботи відповідних підсистем. Такі комплексні моделі називають "гібридними". Особливості застосування методів аналізу ризиків складних систем та їх характеристики наведені у таблиці 1.

Таблиця 1 — Особливості застосування методів аналізу ризиків складних систем та їх характеристики

Метод	Можливість застосування в задачах аналізу ризиків складних систем	Умови та особливості застосування	
		Необхідні умови	Необхідність у програмному забезпеченні (ПЗ)
Метод SWOT-аналізу	Матриця SWOT-аналізу є своєрідною формою, яка не містить остаточної інформації про оцінку ризиків та прийняття рішень для складної системи чи її окремих елементів, але дає змогу впорядкувати процес обмірковування всієї наявної інформації.	1. Процес заповнення матриці повинен бути виконаний максимально ретельно. 2. Фактори, які утворюють матрицю SWOT-аналізу, обов’язково перевіряються на предмет наявності ефекту синергії (взаємного впливу).	Не потребує використання потужного ПЗ

Продовження табл. 1

Метод сценаріїв	Метод сценаріїв розвитку ризиків складних систем дозволяють з вибраним рівнем достовірності визначити можливі тенденції, взаємозв'язок між діючими факторами, сформувати картину станів, до яких може прийти система під впливом тих чи інших ризиків.	1. Наявність аналітиків складних систем високої кваліфікації. 2. В основу покладено методи якісного аналізу, введення емпіричних припущень та системну побудову цілісних сценаріїв.	Потребує використання потужного ПЗ для імітаційного моделювання сценаріїв ризиків складних систем
Метод Монте-Карло	Імітаційне моделювання за методом Монте-Карло застосовується для побудови математичної моделі оцінки ризиків складних систем з важкопрогнозованими показниками. Його метою є визначення розподілу результатів реалізації ризику на основі ймовірнісного розподілу ключових змінних і кореляційної залежності між елементами складної системи.	1. Наявність хорошої вихідної моделі із застосовуванням характеристик, отриманих на базі вивчення емпіричних даних про складну систему та її ймовірнісну поведінку. 2. Застосування спеціальних комп'ютерних програм.	Потребує використання потужного ПЗ для моделювання складних систем
Метод аналогій	Метод аналогій полягає в пошуку і використанні подібності між явищами, компонентами елементів складних системам. Він дає можливість врахувати можливі помилки, наслідки впливу несприятливих чинників та екстремальні ситуації як джерела ризику окремих підсистем.	1. Підбір аналога і оцінка того, наскільки його ризики можуть бути порівняні з ризиками, що розглядаються. 2. Застосування лише для повторюваних проектів та ситуацій окремих елементів складної системи. 3. Наявність відповідної інформаційної бази для проведення аналізу	Не потребує використання потужного ПЗ
Метод Дельфі	Метод Дельфі найбільш доцільний при оцінках окремих ризиків та визначенні ймовірності настання ризикових подій в складних системах, оцінці величини втрат, ймовірності зменшення втрат у обраній підсистемі тощо. Експертні оцінки можуть здійснюватися як за бальною системою, так і в конкретних кількісних показниках.	1. Наявність групи експертів з відповідних сфер знань для одержання кількісних оцінок. 2. Забезпечення анонімністю і керованим зворотнім зв'язком з метою уникнення групового обговорення і тиску думки авторитетних осіб.	Не потребує використання потужного ПЗ, для обробки експертних оцінок використовуються статистичні методи
Метод аналізу ієрархій (MAI)	MAI дозволяє зрозумілим і раціональним чином структурувати проблему аналізу ризиків складних систем у вигляді ієрархії, порівняти і виконати кількісну оцінку вибраних варіантів, а також детально проаналізувати критерії, їх функціональну взаємодію і вплив на досліджувану складну систему.	1. Базування на застосуванні методу Дельфі, якщо можливі сценарії не описують вербально. 2. Необхідність фахівців високого рівня в відповідній галузі. 3. Здійснення пошуку ймовірностей виникнення можливих сценаріїв за допомогою математичного та програмного забезпечення.	Виникає необхідність застосування потужного ПЗ через велику множину ризиків та критеріїв вибору у складних системах

У зв'язку з проблемами високої невизначеності та складності великомасштабних систем значна частина рішень може бути отримана шляхом використання якісних оцінок, що базуються на знаннях та досвіді експертів. Для цього широко застосовуються методи SWOT-аналізу, що вже зарекомендували себе, Дельфі, а також найбільш популярний і широко використовується в даний час метод аналізу ієрархій (MAI), запропонований Т. Сааті [4].

Ідентифікація основних факторів, що призводять до проблем інтеграції СЕС

З високою ймовірністю, значна частка сонячних фотоелектричних установок буде підключатися до системи розподілу низької напруги завдяки її модульним властивостям. У більшості систем електропостачання електроенергія спрямовується в одному напрямку: від централізованих виробників електричної енергії через підстанції різних рівнів напруги до споживачів. При інтеграції джерел розподіленої генерації до системи електропостачання електроенергія може протікати в зворотному напрямку. Однак більшість систем електричного розподілу не були розроблені для забезпечення двостороннього потоку енергії. Для ланцюгів розподільних фідерів, які є довгими і обслуговують сільські райони або райони, що розвиваються, навіть невелика кількість фотоелектричної енергії може вплинути на параметри системи, якщо навантаження та генерація фотоелектричної енергії не збігаються. Коли виробництво СЕС перевищує локальний попит на енергію, енергія буде переміщатися через розподільний фідер і, можливо, через місцеву підстанцію, збільшуючи потенціал впливу на інших споживачів, які обслуговуються тим же розподільним контуром [5, 6].

Проблема якості електроенергії варіює від напруги та частоти до інших областей, таких як гармоніки. Проблема з гармоніками виникає в основному через наявність інверторів живлення, які використовуються для перетворення постійної напруги, створеної відновлюваними джерелами, в змінний. Ці нелінійні навантаження вводять гармоніки в мережу живлення, викликаючи повне гармонійне спотворення, і можуть призвести до непрацездатності обладнання [7].

Гармоніки зазвичай викликані затримкою перемикання інвертора, що викликає спотворені хвилі. Гармонійні спотворення вихідної форми сигналу інвертора будуть значними, якщо інсоляція швидко змінюється, вихідна потужність фотоелементу занадто низька або потужність серйозно коливається. Гармонійна суперпозиція виникне в ситуації інтеграції великої кількості великомасштабних СЕС в мережу для цих фотоелектричних систем, які будуть діяти як мультигармонічні джерела. Практичний досвід експлуатації кількох систем великомасштабних СЕС за кордоном показав, що навіть гармоніки вихідного струму одного інвертора, підключеного до мережі, є малими, гармонічні струми на виході кількох шунтуючих інверторів можуть значно перевищувати нормальний стандарт [8, 9].

Характеристики фотоелектричних систем без диспетчеризації (тобто генерація електричної енергії, яку не можна ввімкнути або вимкнути для задоволення потреб суспільства, що коливаються в електроенергії) допускають коливання генерації напруги, які раніше не були присутні в мережі. Поряд з переривчастістю генерації фотоелектричної енергії, існують також проблеми з якістю напруги в мережі, які необхідно враховувати. Також із загальним впливом на якість електроенергії, підвищення рівня напруги в радіальних системах розподілу було зазначено як одне з основних технічних питань підключення розподіленої генерації [10].

У новому сценарії, коли генерація та споживання можуть одночасно надходити зі сторони попиту, можуть виникнути значні та небажані коливання напруги в мережах низької напруги, що призведе до згубного впливу на роботу мережі, головним чином на віддалених кінцях ліній [11].

Згідно формул (1) та (2), чим ближче точка під'єднання СЕС до навантаження, тим менші будуть втрати потужності та напруги в мережі.

$$\Delta P = \frac{\left(P - P_{\text{ВДЕ}}\right)^2 + \left(Q - Q_{\text{ВДЕ}}\right)^2}{U^2} \cdot R'_{\text{ек}}, \tag{1}$$

$$\Delta U = \frac{\left(P - P_{\text{ВДЕ}}\right) \cdot R'_{\text{ек}} + \left(Q - Q_{\text{ВДЕ}}\right) \cdot X'_{\text{ек}}}{U}, \tag{2}$$

де P – активна потужність, що споживається в мережі, кВт; $P_{\text{ВДЕ}}$ – активна потужність, що генеруються СЕС, кВт; Q – реактивна потужність, що споживається в мережі, квар; $Q_{\text{ВДЕ}}$ – реактивна потужність, що генеруються СЕС, квар; $R'_{\text{ек}}$ - приведений еквівалентний активний опір мережі, Ом; $X'_{\text{ек}}$ - приведений еквівалентний реактивний опір мережі, Ом; U – напруга мережі, кВ.

Проте позитивний ефект від інтеграції СЕС в електромережу матиме місце до тих пір, коли їх потужність генерування суттєво не перевищить потужність споживання. За певного значення потужності генерування СЕС втрати потужності та напруги в мережі почнуть зростати, а тому напруга може перевищити допустиме значення. Отже, потрібно визначати не тільки оптимальну точку під'єднання СЕС, а й оптимальну їх установлену потужність.

При варіанті інтеграції СЕС без суттєвих змін в схемі електричної мережі та без оновлення силового електрообладнання подальший рух у напрямку збільшення частки СЕС у генерації енергосистем не є можливим. Тобто розвиток генерації електроенергії з ВДЕ в електричній мережі потрібно проводити з одночасною її реконструкцією та модернізацією.

Наявні темпи розвитку СЕС визначають необхідність прийняття рішень у сфері розвитку та реконструкції мереж на всіх рівнях напруги, особливо в частині будівництва нових ліній електропередач,

заміни існуючих проводів повітряних та кабельних ліній, заміни трансформаторів та силового обладнання на вже існуючих підстанціях та спорудження нових підстанцій.

Також при тенденції до зростання потужностей СЕС та збільшенні їх частки у структурі виробництва електроенергії, практично незмінною залишається встановлена потужність теплової та гідрогенерації, котрі на сьогодні є основними інструментами у покритті пікового та напівпікового споживання та надають енергосистемі маневрові потужності.

Оскільки виробництво електроенергії СЕС припадає саме на добовий проміжок, коли в енергетичній системі відбувається зменшення споживання, у порівнянні з ранковими та вечірніми піками, то створюється профіцит виробництва в енергосистемі. До того ж електроенергія з СЕС та ВЕС відпускається в мережу в зазначений проміжок доби навіть більше обсягу, придбаного на ринкових сегментах учасниками ринку для потреб кінцевого споживача. У результаті для дотримання балансу в енергетичній системі та забезпечення операційної безпеки в цей період часу персоналу НЕК «Укренерго» доводиться використовувати всі наявні маневрені можливості виробників електричної енергії з теплових та гідроелектростанцій з метою розвантаження в межах балансуючого ринку та віддавати аналогічні команди з операційної безпеки, а також застосовувати роботу ГАЕС у акумулюючому режимі для збільшення обсягу споживання [12].

Проте із збільшенням потужностей СЕС наведених заходів не вистачає для врегулювання балансу, і з'являється необхідність у обмеженні ВДЕ. Так у 2019 р. було 3 випадки обмеження ВДЕ, у 2020 р. – 20 випадків, а у 2021 р. ця кількість зросла до 72 випадків, навіть незважаючи на необхідність компенсації власникам ВДЕ вартості невикористаної енергії у повному обсязі. ПрАТ "НЕК "Укренерго" довелося впроваджувати Систему керування обмеженнями ВДЕ, яка дозволяє надавати команди на обмеження генерації електроенергії одночасно на велику кількість сонячних та вітрових станцій. Максимальна сумарна добова величина обмеження за 2020 р. становила 2178,86 МВт (7 червня), а вже у 2021р. максимальне добове обмеження становило 5416МВт та трималося протягом 5 днів (з 30 квітня по 4 травня включно). Таким чином річне обмеження ВДЕ на етапі генерації за 2020 р. становило 14,7 ГВт, а у 2021р. - досягло майже 101 ГВт [13]. Якщо в країні не будуть запускатися маневрені потужності, то ці обмеження лише збільшуватимуться.

При подальшому зростанні частки СЕС у структурі виробництва електроенергії з метою забезпечення гнучкості енергосистеми та уникнення необхідності обмеження генерації електроенергії з ВДЕ, забезпечення при цьому безпеки і надійності роботи енергетичної системи, необхідно розвивати високоманеврові потужності та збільшувати обсяги системи акумулювання енергії.

До початку функціонування оптового ринку електроенергії виплати за "зеленим" тарифом були включені у тарифи для юридичних осіб (непобутових споживачів). В той період кількість електроенергії з ВДЕ мала невеликий обсяг, тому стаття витрат не становила проблему. Після запровадження оптового ринку електроенергії, виплата за електроенергію з альтернативних джерел була закладена в тариф на передачу електроенергії оператором системи розподілу НЕК "Укренерго", тобто за неї сплачували всі споживачі електричної енергії - по 22,6 коп. в кожному кВтгод [14].

За серпневою редакцією Положення «про покладення спеціальних обов'язків на учасників ринку електричної енергії для забезпечення загальносуспільних інтересів у процесі функціонування ринку електричної енергії» виплати за "зеленим" тарифом було перенаправлено на генеруючі державні компанії ПрАТ «Укргідроенерго» та ДП «НАЕК «Енергоатом», де посередником виступає ДП «Гарантований покупець» [15].

Профіт між доходами та витратами, що виникає під час виконання *Public Service Obligation (PSO),* майже стовідсотково спрямовується на купівлю електроенергії за «зеленим» тарифом. При цьому від'ємне сальдо нівелюється за рахунок послуги із забезпечення зростання частки генерації електричної енергії з відновлюваних джерел енергії, яку ДП «Гарантований покупець» надає оператору системи передачі ПрАТ «НЕК «Укренерго».

Таким чином борг ПрАТ «НЕК «Укренерго» перед ДП «Гарантований покупець» на травень 2022р. становить 8,7 млрд грн [16]. Накопичена заборгованість за виконання *PSO* становить загрозу стабільній безпечній роботі ПрАТ «Укргідроенерго» та ДП «НАЕК «Енергоатом», а також дотримання ними та власниками ВДЕ своїх зобов'язань перед державою, працівниками, кредиторами (у тому числі державними банками) та учасниками цивільно-правових відносинах [17].

Більшість фотоелектричних інверторів, встановлених сьогодні на СЕС, по паспортним технічним характеристикам мають коефіцієнт потужності, що дорівнює одиниці. Це означає, що жодна реактивна потужність не повинна віддаватися в мережу, лише активна. Проте спостереження показують залежність між активною та реактивною віддачою потужності до мережі. Наявний потік реактивної потужності більшості аналізованих інверторів підтверджує лінійну залежність від активної потужності [18].

Внаслідок зміни кута запалювання тиристорів в інверторі можна досягати різних кутів між струмом і напругою, що в електричній мережі буде причиною зміни перетоків реактивної потужності.

Також можна зробити висновок про те, що генерування сонячною станцією реактивної потужності, враховуючи практично активне навантаження споживачів на стороні низької напруги, призводить до її зворотних перетоків і, відповідно, до додаткових втрат активної потужності та до збільшення величини повного струму.

Підсумовуючи вищевикладене, можна виділити наступні фактори ризиків, що виникають при інтеграції відновлюваних джерел енергії до системи електропостачання: збільшення маневрової потужності, погіршення якості електричної енергії, виникнення необхідності модернізації ліній, зростання заборгованості за "зеленим" тарифом, виникнення вищих гармонік та перетікання реактивної потужності. Важливість врахування цих факторів підтверджується реальними проблемами, що виникають в Об'єднаній енергетичній системі України у сфері приєднання джерел розосередженої генерації до мережі.

Далі вирішення задачі оцінки ідентифікованих факторів слід розглядати в двох напрямках: як оцінку ймовірності виникнення визначених факторів ризику та як оцінку рівня наслідків від їх реалізації при інтеграції СЕС до системи електропостачання.

Оцінка основних факторів, що призводять до проблем інтеграції СЕС

На другому етапі здійснено оцінку ймовірності виникнення та рівня можливих наслідків від реалізації кожного з ідентифікованих факторів ризику за допомогою метода експертних оцінок. При застосуванні даного методу проводилося опитування спеціальної групи експертів з 6-ти спеціалістів різних організацій, які напряму або опосередковано дотичні до питання використання СЕС, по шкалі від 1 до 6, де 1 - дуже низька ймовірність (дуже низький рівень наслідків), а 6 - дуже висока ймовірність (дуже високий рівень наслідків). Результати опитування представлені у табл. 2 та 3.

Таблиця 2 – Оцінка ймовірності виникнення визначених факторів ризику при інтеграції СЕС

Найменування фактору	Експерт №1	Експерт №2	Експерт №3	Експерт №4	Експерт №5	Експерт №6
Збільшення маневрової потужності	1	1	2	1	2	3
Погіршення якості електричної енергії	6	5	6	5	3	4
Виникнення необхідності модернізації ліній	5	6	5	4	4	5
Зростання заборгованості за "зеленим" тарифом	4	4	3	5	3	6
Виникнення вищих гармонік	3	2	1	2	4	1
Перетікання реактивної потужності	2	3	4	3	5	2

Таблиця 3 – Оцінка рівня наслідків від реалізації визначених факторів ризику при інтеграції СЕС

Найменування фактору	Експерт №1	Експерт №2	Експерт №3	Експерт №4	Експерт №5	Експерт №6
Збільшення маневрової потужності	1	1	2	1	2	3
Погіршення якості електричної енергії	6	5	6	5	3	4
Виникнення необхідності модернізації ліній	5	6	5	4	4	6
Зростання заборгованості за "зеленим" тарифом	4	4	3	5	3	5
Виникнення вищих гармонік	3	2	1	2	4	1
Перетікання реактивної потужності	2	3	4	3	5	2

Статистичну обробку даних розпочинають з визначення узгодженості думок експертів, числовим вираженням якої є коефіцієнт конкордації [19]. Необхідність у проведенні такої процедури обумовлюється тим, що фактори можуть бути витлумачені неоднозначно в силу індивідуальних особливостей кожного експерта, рівня його знань та уявлень про об'єкт. Коефіцієнт конкордації W приймає значення від 0 до 1, для першої анкети коефіцієнт W_1 обчислюється за формулою (3):

$$W_1 = \frac{12 \cdot \sum_{i=1}^{n}\left(\sum_{j=1}^{m} r_{ij} - \bar{r}\right)^2}{m^2 \cdot \left(n^3 - n\right) - m \cdot \sum_{j=1}^{m}\sum_{k=1}^{H_j}\left(h_k^3 - h_k\right)} = \frac{12 \cdot 332{,}8}{6^2 \cdot \left(6^3 - 6\right) - 6 \cdot \left(\left(2^3 - 2\right) + \left(2^3 - 2\right)\right)} = 0{,}534, \quad (3)$$

де H_j - число груп рівних рангів у j-му ранжуванні; h_k - число рівних рангів у k-ій групі пов'язаних рангів при ранжуванні j-им експертом; n - кількість об'єктів; m - кількість експертів; r_{ij} - ранг, який присвоюється j-им експертом i-му об'єкту; $\bar{r}$ - середній ранг.

При W=1 є повна узгодженість думок експертів, а при W=0 узгодженість практично відсутня. В нашому випадку для анкети №1 W_1=0,534, а для анкети №2 аналогічно за формулою (3) - W_2=0,552. Потім отримане значення оцінюється на значимість для кожної анкети за допомогою коефіцієнта Пірсона $\chi^2_{\text{р}}$, що розраховується за формулою (4):

$$\chi^2_{\text{р1}} = \frac{\sum_{i=1}^{n}\left(\sum_{j=1}^{m} r_{ij} - \bar{r}\right)^2}{\frac{1}{12} \cdot \left[m \cdot n \cdot (n+1) - \frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^{m}\sum_{k=1}^{H_j}\left(h_k^3 - h_k\right)\right]} = \frac{332{,}8}{\frac{1}{12} \cdot \left[6 \cdot 6 \cdot (6+1) - \frac{1}{6-1} \cdot 12\right]} = 16{,}1. \quad (4)$$

Аналогічно за формулою (4) для анкети №2 $\chi^2_{\text{р2}}$=16,56. Розраховане значення $\chi^2_{\text{р}}$ співставляється з табличним значенням $\chi^2_{\text{т}}$ для n-1 ступенів свободи та довірчої ймовірності P=0,99 (для даного розрахунку $\chi^2_{\text{т}}$=15,08). І в тому, і в іншому випадках $\chi^2_{\text{р}} > \chi^2_{\text{т}}$, отже, коефіцієнт конкордації статистично істотний.

Оскільки думки експертів узгоджені, то можна перейти до розрахунку вагомості кожного з факторів за формулою (5):

$$k_j = \frac{\sum_{i=1}^{m} x_{ij}}{\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n} x_{ij}}, \quad (5)$$

Формула (5) дозволяє нормувати експертні оцінки, таким чином вагові коефіцієнти приймають значення від 0 до 1, а їхня сума стає рівною 1. Перевагою такого визначення вагомості факторів ризику є простота та можливість його застосування в умовах експертного оцінювання.

Результати розрахунків представлені у табл. 4. У сьомому стовпці наведено значення коефіцієнта підсумкового впливу як добутку ймовірності виникнення кожного з факторів ризику на рівень його можливих наслідків.

Таблиця 4 – Ранжування факторів ризиків (перший етап)

Найменування фактору	Ймовірність виникнення фактору			Рівень наслідку від реалізації фактору		Підсумковий вплив	Ранг
	$\sum_{i=1}^{m} x_{ij}$	k_j	k_j, %	$\sum_{i=1}^{m} x_{ij}$	k_j		
Збільшення маневрової потужності	10	0,080	8,0	10	0,080	0,64	6
Погіршення якості електричної енергії	29	0,232	23,2	29	0,232	5,38	2
Виникнення необхідності модернізації ліній	29	0,232	23,2	30	0,240	5,57	1
Зростання заборгованості за "зеленим" тарифом	25	0,200	20,0	24	0,192	3,84	3
Виникнення вищих гармонік	13	0,104	10,4	13	0,104	1,08	5
Перетікання реактивної потужності	19	0,152	15,2	19	0,152	2,31	4

З представленої таблиці випливає, що на даному етапі найбільший вплив серед проблем інтеграції СЕС в електромережу мають такі фактори, як виникнення необхідності модернізації ліній та погіршення якості електричної енергії. Фактор «збільшення маневрової потужності» отримав найменшу вагу та був виключений з подальшого розгляду.

Після виключення найменш впливового фактору необхідно провести перерахунок вагомості факторів, результати якого представлені у табл. 5.

Таблиця 5 – Ранжування факторів ризиків (другий етап)

Найменування фактору	Ймовірність виникнення фактору			Рівень наслідку від реалізації фактору		Підсумковий вплив	Ранг
	$\sum_{i=1}^{m} x_{ij}$	k_j	k_j , %	$\sum_{i=1}^{m} x_{ij}$	k_j		
Погіршення якості електричної енергії	29	0,252	25,2	29	0,252	6,36	2
Виникнення необхідності модернізації ліній	29	0,252	25,2	30	0,261	6,58	1
Зростання заборгованості за "зеленим" тарифом	25	0,217	21,7	24	0,209	4,54	3
Виникнення вищих гармонік	13	0,113	11,3	13	0,113	1,28	5
Перетікання реактивної потужності	19	0,165	16,5	19	0,165	2,73	4

Отже, проведені оцінки дозволили запропонувати підхід до виявлення ключових факторів, що впливають на інтеграцію СЕС в електромережу, а також оцінити ймовірність їх виникнення та рівень можливих наслідків. Таким чином, здійснено ідентифікацію та оцінку основних факторів і подій, що призводять до проблем інтеграції СЕС в енергосистему країни. Описані методи дозволяють поєднувати якісні та кількісні оцінки різних факторів ризику для прийняття узагальненого рішення при приєднанні ВДЕ до системи електропостачання.

В подальшому дослідженні отримані результати будуть використані для розробки формальної методики врахування впливу СЕС на етапі приєднання до Об'єднаної енергетичної системи України. Дана методика дозволить здійснювати техніко-економічне обґрунтуванням вибору місця та схеми приєднання ВДЕ до системи електропостачання, а також визначати відповідні вимоги до параметрів електроустановки відповідно до факторів ризику на етапі видання технічних умов замовнику.

Висновки

В ході дослідження було виявлено, що подальший розвиток у напрямку збільшення частки СЕС у генерації енергосистеми становить значний виклик для ефективного управління розподільною мережею та створює проблеми її нормальному функціонуванню, зокрема в частині щодо виконання вимог ДСТУ EN 50160:2014.

Розвиток "зеленої" енергетики відбувається без урахування реальних потреб ОЕС України у додаткових генеруючих потужностях, що призводить до таких проблем, як необхідність збільшення маневрової потужності, погіршення якості електричної енергії, виникнення необхідності модернізації ліній, зростання заборгованості за "зеленим" тарифом, виникнення вищих гармонік та перетікання реактивної потужності, а також запровадження неринкових методів щодо використання системи керування обмеженнями.

Для оцінки ризиків інтеграції сонячних систем можуть використовуватися різні методи, такі як: метод сценаріїв, метод Монте-Карло, метод аналогій, метод SWOT-аналізу, метод Дельфі та метод аналізу ієрархій. У багатьох випадках найпростішим підходом є комбіноване використання різних моделей та методів, коли кожен із них більшою мірою відображає особливості роботи відповідних підсистем. Такі комплексні моделі називають "гібридними". У зв'язку з проблемами високої невизначеності та складності великомасштабних систем багато рішень можуть бути отримані шляхом використання якісних оцінок, що базуються на знаннях та досвіді експертів, що і було показано у даному дослідженні.

Відсутність формальної методики, що дозволяє поєднувати якісні та кількісні оцінки різних факторів ризику для прийняття інтегрального рішення при приєднанні об'єктів ВДЕ до мережі, виявляється ключовою проблемою, над вирішенням якої буде здійснено подальшу роботу. Інтеграція

кількісної інформації та якісно представлених знань шляхом створення відповідних алгоритмів дозволяє суттєво розширити можливості проведення ризик-аналізу об'єктів ВДЕ на різних етапах приєднання до електромережі та проведення оцінювання заходів щодо управління ними.

Список використаних джерел

1. Енергетична стратегія України на період до 2035 року. Міністерство енергетики та вугільної промисловості України. URL: http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/uk/publish/article?art_id=245239564&cat_id=245239555.

2. ДСТУ EN 50160:2014 Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності (EN 50160:2010, IDT).

3. Haimes Y. Y. Risk modeling, assessment, and management. 3rd ed. Hoboken, NJ : J. Wiley & Sons, 2008.

4. Saaty T. L. Principia mathematica decernendi: Mathematical principles of decision making: generalization of the analytic network process to neural firing and synthesis. Pittsburgh, Pa: RWS Publications, 2010. 531 p.

5. Coddington M., Miller M., Katz J. Grid-Integrated Distributed Solar: Addressing Challenges for Operations and Planning, Greening the Grid. OSTI.GOV | OSTI.GOV. URL: https://www.osti.gov/servlets/purl/1244310.

6. Veremiichuk Y., Zamulko A., Zaichenko S., Mahnitko A., Berzina K., Zicmane I. "Analysis of Electric Energy Supply Security Attached to Renewable Energy Sources Implementation" X International Conference on Electrical and Power Engineering EPE 2018 Iaşi, Romania. October 18-19, 2018.

7. Belcher B., B.J. Petry, Davis T., K.. The effects of major solar integration on a 21-Bus system: technology review and PSAT simulations Conf. Proc. - IEEE SOUTHEASTCON (2017), 10.1109/SECON.2017.7925361.

8. Dong W, Bai X, Zhu N, Zhou Z, Li H. Discussion on the power quality under grid-connection of intermittent power sources. Power Syst Technol 2013;37 (5):1265–71.

9. Varma R, Salama M, Seethapathy R, Champion C. Large-scale photovoltaic solar power integration in transmission and distribution networks. In: Proceedings of IEEE power and energy society general meeting: the electrification of transportation and the grid for the future. Detroit, MI, USA; July 2011.

10. Лежнюк, П. Д. Вплив сонячних електричних станцій на напругу споживачів 0,4 кВ / П.Д. Лежнюк, О.Є. Рубаненко, І.О. Гунько // Енергетика: економіка, технології, екологія : науковий журнал. – 2015. – № 3 (41). – С. 7–13.

11. Tonkoski R., Lopes L. A. C., El-Fouly T. H. M. Coordinated Active Power Curtailment of Grid Connected PV Inverters for Overvoltage Prevention. IEEE Transactions on Sustainable Energy. 2011. Vol. 2, no. 2. P. 139–147. URL: https://doi.org/10.1109/tste.2010.2098483.

12. У 2020 році встановлена потужність ВЕС та СЕС зросла на 41%, а їхня частка у структурі виробництва електроенергії – вдвічі. Національна енергетична компанія «Укренерго». URL: https://ua.energy/zagalni-novyny/u-2020-rotsi-vstanovlena-potuzhnist-ves-ta-ses-zrosla-na-41-a-yihnya-chastka-u-strukturi-vyrobnytstva-elektroenergiyi-vdvichi/?fbclid=IwAR20eN3fgZVw22mBs3rx_XS4JMCSMoFZccKWXpN3Ah-MC-NwQYS9_OklBvg (дата звернення: 05.05.2022).

13. У 2020 році встановлена потужність ВЕС та СЕС зросла на 41%, а їхня частка у структурі виробництва електроенергії – вдвічі. ПрАТ "НЕК "Укренерго. URL: https://ua.energy/zagalni-novyny/u-2020-rotsi-vstanovlena-potuzhnist-ves-ta-ses-zrosla-na-41-a-yihnya-chastka-u-strukturi-vyrobnytstva-elektroenergiyi-vdvichi/?fbclid=IwAR20eN3fgZVw22mBs3rx_XS4JMCSMoFZccKWXpN3Ah-MC-NwQYS9_OklBvg (дата звернення: 14.05.2022).

14. Сагайдак І., Балагура О., Макаренко В. "Зелена" енергетика в контексті загроз економічній та національній безпеці. Економіка та держава. 2020. № 6. С. 113-117. URL: https://doi.org/10.32702/2306-6806.2020.6.113.

15. Положення про покладення спеціальних обов'язків на учасників ринку електричної енергії для забезпечення загальносуспільних інтересів у процесі функціонування ринку електричної енергії: Постанова Каб. Міністрів України від 05.06.2019 р. № 483 : станом на 18 квіт. 2022 р. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/483-2019-п#Text.

16. Актуальна інформація щодо розрахунків з виробниками електроенергії. ДП «Гарантований покупець». URL: https://www.gpee.com.ua/news_item/342. (дата звернення: 14.05.2022).

17. Ukrainian Association of Renewable Energy (2020), "UARE position on the proposal to liquidate SE "Guaranteed Buyer", available at: https://uare.com.ua/ novyny/707$pozitsiya$uave$shchodo$propozitsiji $likvidatsiji$dp$garantovanij$pokupets$2.html.

18. Grid Influences From Reactive Power Flow of Photovoltaic Inverters With a Power Factor Specification of One / A. Spring et al. IEEE Transactions on Smart Grid. 2016. Vol. 7, no. 3. P. 1222–1229. URL: https://doi.org/10.1109/tsg.2015.2413949.

19. Бешельєв С. Д., Гудвіч Ф. Г. (1980). Математично-статичні методи експертних оцінок. М.: Статистика. С. 263.

V. Stepanenko, Ph.D. student, ORCID 0000-0001-6176-589X
A. Zamulko, Cand**.** Sc. (Eng.), Assoc. Prof., ORCID 0000-0001-8018-6332
Y. Veremiichuk, Cand**.** Sc. (Eng.), Assoc. Prof., ORCID 0000-0003-0258-0478
V. Nakhodov, Dr. Eng. Sc., Assoc. Prof., ORCID 0000-0001-7643-5965
National Technical University of Ukraine
«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

ASSESSMENT OF RISK FOR THE INTEGRATION OF RENEWABLE ENERGY SOURCES INTO THE ELECTRICITY SUPPLY SYSTEM

The work is devoted to the development of a methodology that allows combining qualitative and quantitative assessments of different risk factors to make an integrated decision when renewable energy sources connect to the electricity supply system. The integration of quantitative information and qualitatively presented knowledge through the creation of appropriate algorithms can significantly expand the possibilities of risk analysis of renewable energy sources, established energy systems and justification of measures to manage them.

The key features of large-scale and complex systems are the diversity and interdependence of the elements included in them, the large number of decision-makers in conditions of high uncertainty and the uniqueness of these objects. Therefore, the study describes the methods and approaches that can be used to analyze the risks of complex systems. In conditions of high uncertainty and complexity of large-scale systems, many solutions can be obtained by using qualitative assessments based on the knowledge and experience of experts.

Maintaining the reliability, stability and efficiency of the electrical system is becoming a difficult issue for distribution networks with variable energy resources. Further movement in the direction of increasing the share of solar power plants (SPP) in the generation of the power system is a great challenge for effective management of the distribution network and a serious threat to its normal functioning.

The article identifies the main factors that lead to the problems of integration of SPP. Also, the probability of occurrence and the level of possible consequences of the implementation of each of the identified risk factors were assessed by using the method of expert assessments.

According to the results of the study, the main problems in integrating SPP into the power supply system are increasing shunting power, deteriorating electricity quality, the need to modernize lines, increasing debt on the "green" tariff, higher harmonics and reactive power flow.

Keywords: *renewable energy sources, risk assessment, power supply system, solar power plants, risk factor, electricity quality.*

References

1. Energy strategy of Ukraine for the period up to 2035. Ministry of Energy and Coal Industry of Ukraine.URL: http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/uk/publish/article?art_id=245239564&cat_id=245239555.

2. DSTU EN 50160: 2014 Characteristics of power supply voltage in general purpose electrical networks (EN 50160: 2010, IDT).

3. Haimes Y. Y. Risk modeling, assessment, and management. 3rd ed. Hoboken, NJ : J. Wiley & Sons, 2008.

4. Saaty T. L. Principia mathematica decernendi: Mathematical principles of decision making: generalization of the analytic network process to neural firing and synthesis. Pittsburgh, Pa: RWS Publications, 2010. 531 p.

5. Coddington M., Miller M., Katz J. Grid-Integrated Distributed Solar: Addressing Challenges for Operations and Planning, Greening the Grid. OSTI.GOV | OSTI.GOV. URL: https://www.osti.gov/servlets/purl/1244310.

6. Veremiichuk Y., Zamulko A., Zaichenko S., Mahnitko A., Berzina K., Zicmane I. "Analysis of Electric Energy Supply Security Attached to Renewable Energy Sources Implementation" X International Conference on Electrical and Power Engineering EPE 2018 Iaşi, Romania. October 18-19, 2018.

7. Belcher B., B.J. Petry, Davis T., K.. The effects of major solar integration on a 21-Bus system: technology review and PSAT simulations Conf. Proc. - IEEE SOUTHEASTCON (2017), 10.1109/SECON.2017.7925361.

8. Dong W, Bai X, Zhu N, Zhou Z, Li H. Discussion on the power quality under grid-connection of intermittent power sources. Power Syst Technol 2013;37 (5):1265–71.

9. Varma R, Salama M, Seethapathy R, Champion C. Large-scale photovoltaic solar power integration in transmission and distribution networks. In: Proceedings of IEEE power and energy society general meeting: the electrification of transportation and the grid for the future. Detroit, MI, USA; July 2011.

10. Lezhnyuk, P. Influence of solar power plants on consumer voltage of 0.4 kV / P. Lezhnyuk, O. Rubanenko, I. Gunko // Energy: economics, technology, ecology: scientific journal. -2015. - № 3 (41). - P. 7–13.

11. Tonkoski R., Lopes L. A. C., El-Fouly T. H. M. Coordinated Active Power Curtailment of Grid Connected PV Inverters for Overvoltage Prevention. IEEE Transactions on Sustainable Energy. 2011. Vol. 2, no. 2. P. 139–147. URL: https://doi.org/10.1109/tste.2010.2098483.

12. In 2020, the installed capacity of WPPs and SES increased by 41%, and their share in the structure of electricity production - doubled. Ukrenergo National Energy Company. URL: https://ua.energy/zagalni-novyny/u-2020-rotsi-vstanovlena-potuzhnist-ves-ta-ses-zrosla-na-41-a-yihnya-chastka-u-strukturi-vyrobnytstva-elektroenergiyi-vdvichi/?fbclid=IwAR20eN3fgZVw22mBs3rx_XS4JMCSMoFZccKWXpN3Ah-MC-NwQYS9_OklBvg (date of access: 05.05.2022).

13. In 2020, the installed capacity of WPPs and SES increased by 41%, and their share in the structure of electricity production - doubled. PJSC "NEK" Ukrenergo. URL: https://ua.energy/zagalni-novyny/u-2020-rotsi-vstanovlena-potuzhnist-ves-ta-ses-zrosla-na-41-a-yihnya-chastka-u-strukturi-vyrobnytstva-elektroenergiyi-vdvichi/?fbclid=IwAR20eN3fgZVw22mBs3rx_XS4JMCSMoFZccKWXpN3Ah-MC-NwQYS9_OklBvg (date of access: 14.05.2022).

14. Sagaidak I., Balagura O., Makarenko V. "Green" energy in the context of threats to economic and national security. Economy and state. 2020. № 6. P. 113-117. URL: https://doi.org/10.32702/2306-6806.2020.6.113.

15. Regulations on the imposition of special responsibilities on participants in the electricity market to ensure public interests in the functioning of the electricity market: Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine of 05.06.2019 № 483. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/483-2019-п#Text.

16. A Up-to-date information on settlements with electricity producers. SC "Guaranteed Buyer". URL: https://www.gpee.com.ua/news_item/342. (date of access:: 14.05.2022).

17. Ukrainian Association of Renewable Energy (2020), "UARE position on the proposal to liquidate SE "Guaranteed Buyer", available at: https://uare.com.ua/ novyny/707$pozitsiya$uave$shchodo$propozitsiji $likvidatsiji$dp$garantovanij$pokupets$2.html.

18. Grid Influences From Reactive Power Flow of Photovoltaic Inverters With a Power Factor Specification of One / A. Spring et al. IEEE Transactions on Smart Grid. 2016. Vol. 7, no. 3. P. 1222–1229. URL: https://doi.org/10.1109/tsg.2015.2413949.

19. Beshelev S., Goodwich F. (1980). Mathematical and statistic methods of expert assessments. M .: Statisticians. P. 263.

Надійшла 20.06.2022
Received 20.06.2022