

С.М. БОЙКО, канд. техн. наук, Національний університет «Запорізька політехніка»

І.В. КАСАТКІНА, канд. техн. наук, доц., Криворізький національний університет

О.В. ДАНИЛІН, канд. техн. наук, доц., Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## АСПЕКТИ РЕКОНФІГУРАЦІЇ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПРИ ВПРОВАДЖЕННІ ДЖЕРЕЛ РОЗОСЕРЕДЖЕНОЇ ГЕНЕРАЦІЇ В УМОВАХ РОЗПОДІЛЬЧИХ МЕРЕЖ ПІДПРИЄМСТВ

**Мета.** Метою даної роботи є дослідження варіантів реконфігурації систем електропостачання при впровадженні джерел розосередженої генерації в умовах розподільчих мереж підприємств.

Для досягнення поставленої мети проаналізовано сучасні аспекти побудови систем електропостачання підприємств та визначено особливості під'єднання джерел розосередженої генерації електричної енергії до діючої електричної мережі.

Тож, одним із перспективних напрямів у реалізації наукових завдань щодо реконфігурації існуючих систем електропостачання підприємств, на погляд авторів та когорти науковців, є напрям на їх декарбонізацію за рахунок впровадження джерел розосередженої генерації з подальшою інтелектуалізацією. Такий підхід має особливості щодо його практичної реалізації. Між тим, враховуючи світовий досвід інтелектуалізації та, перш за все, основні положення концепції інтелектуальних мереж, є можливість вирішити завдання оптимізації режимів функціонування генеруючих установок на базі відновлювальних джерел енергії та раціональне використання згенерованої ними електричної енергії шляхом її накопичення за рахунок водневих технологій

**Методи дослідження.** Для розв'язання поставлених наукових задач використано аналітичні методи – для дослідження можливих варіантів реконфігурації енергетичних мереж підприємств шляхом впровадження джерел розосередженої генерації.

**Наукова новизна.** Вперше запропоновано варіант реконфігурації діючої системи електропостачання підприємства шляхом впровадження до її складу джерел розосередженої генерації.

**Практична значимість.** За результатами проведеного аналізу можна зробити висновок про те що, запропонований варіант реконфігурації діючих електричних мереж підприємств надасть можливість покращити енергетичні показники мережі підприємства та допоможе у адаптації до стратегії активного споживання електричної енергії.

**Результати.** Реконфігурація систем електропостачання підприємств є необхідним кроком у подолання викликів сьогодення щодо надійності та якості електропостачання. Між тим, запропонований варіант реконфігурації діючих електричних мереж підприємств виконаний в аспекті декарбонізації та подальшої інтелектуалізації цих мереж, що в майбутньому надасть їм можливість адаптації до мереж побудованих за концепцією Smart Grid.

**Ключові слова:** система електропостачання, розосереджена генерація, розподільчі мережі, воднева енергетика, паливні комірки, відновлювані джерела енергії.

**Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями.** Як відомо, розвиток та активне впровадження відновлювальних джерел енергії потребує відповідної перебудови мережевої інфраструктури та впровадження сучасних підходів до автоматизації систем управління.

Одним із прикладів такої трансформації у світовій практиці є концепція Smart Grid для автоматизації управління потоками енергії, режимного регулювання перетоками і споживанням електроенергії з планомірним використанням маневрених потужностей [1].

Між тим, слід зазначити, що стохастичність енергетичного потенціалу відновлюваних джерел енергії, зумовлює доцільність комплектації цих генеруючих систем акумуляторами, які можуть використовуватися для накопичення згенерованої електричної енергії з метою стабілізації рівнів згенерованої електричної енергії. Одним із пріоритетних напрямків акумуляції електричної енергії в сучасних системах генерації на сьогоднішній день є воднева енергетика, а саме паливні комірки.

Незважаючи на вагомий науковий та практичний досягнення за цим напрямом, ще залишається ряд наукових завдань, які стосуються управління генеруючими установками на базі відновлювальних джерел енергії та їх інтеграції до систем електропостачання [2].

Тож, одним із перспективних напрямів у реалізації наукових завдань щодо реконфігурації існуючих систем електропостачання підприємств, на погляд авторів та когорти науковців, є напрям на їх декарбонізацію за рахунок впровадження джерел розосередженої генерації з пода-

льшою інтелектуалізацію. Такий підхід має особливості щодо його практичної реалізації. Між тим, враховуючи світовий досвід інтелектуалізації та, перш за все, основні положення концепції інтелектуальних мереж, є можливість вирішити завдання оптимізації режимів функціонування генеруючих установок на базі відновлювальних джерел енергії та раціональне використання згенерованої ними електричної енергії шляхом її накопичення за рахунок водневих технологій [2].

**Аналіз досліджень і публікацій.** Сучасний розвиток енергетичної галузі в контексті декарбонізації пропагує насамперед збільшення частки джерел розосередженої генерації на базі відновлюваних джерел енергії у складі діючих енергосистем.

Між тим, реалізація такої реконфігурації потребує певної модернізації досліджуваної енергосистеми. Для підвищення техніко-економічної ефективності сумісної експлуатації джерел розосередженої генерації і розподільних електричних мереж необхідно розв'язати ряд задач, що дозволять підвищити стабільність сумарної генерації в розподільчих мережах при впровадженні до їх складу відновлюваних джерел електричної енергії [1-5].

Як відзначається у працях [3-5] на даному етапі впровадження, концепція Smart Grid розглядається в тому числі в контексті декарбонізації енергетичної галузі. Міжнародне енергетичне агентство розглядає водень як один із основних складових для реалізації цієї мети [5].

Аналіз зарубіжних і вітчизняних публікацій вказують на те, що залишається до кінця не вирішеним питання забезпечення накопичення згенерованої електричної енергії, особливо при широкому впровадженні відновлювальних джерел електричної енергії, що може бути вирішено розвитком систем накопичення електричної енергії з використанням водневих технологій [6-14].

**Постановка завдання.** Аналіз можливих варіантів впровадження джерел розосередженої генерації в системи електропостачання підприємств.

**Викладення матеріалу та результати.** На сьогоднішній день архітектура системи електропостачання промислового підприємства виглядає наступним чином (рис 1).

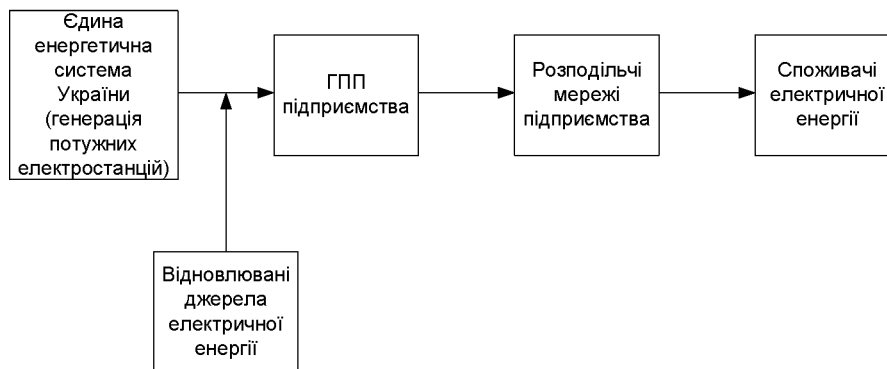


Рис. 1 Архітектура системи електропостачання промислового підприємства

До складу сучасних систем електропостачання підприємств входять такі структурні елементи, як єдина енергетична система України, що є основним і в більшості випадків, на сьогоднішній день, одним джерелом енергоресурсів. Відновлювані джерела електричної енергії приймає участь в електропостачанні підприємств як правило у складі єдиної енергетичної системи. Зовнішні джерела електричної енергії під'єднуються до електричної мережі підприємства через головну понижувальну підстанцію (ГПП), яка в свою чергу розподіляє електричну енергію між підстанціями розподільчої електричної мережі підприємства. Таким чином електрична енергія надходить до споживачів електричної енергії на підприємстві.

Між тим, такий підхід до побудови електропостачання підприємств є застарілим, та має ряд недоліків. Такий стан справ потребує реконфігурації існуючих архітектур систем електропостачання підприємств.

Перш ніж приступити до аналізу можливих варіантів реконфігурації систем електропостачання підприємств, та виокремлення серед них найбільш перспективних, слід зауважити, що сучасні технології в області енергетики мають потужний потенціал розвитку як в Україні так і у світі.

Інтелектуалізація та диджиталізація енергетичної галузі проходить у світовому масштабі, що проходить в аспекті декарбонізації енергетичного сектора світової економіки. Ці напрямки

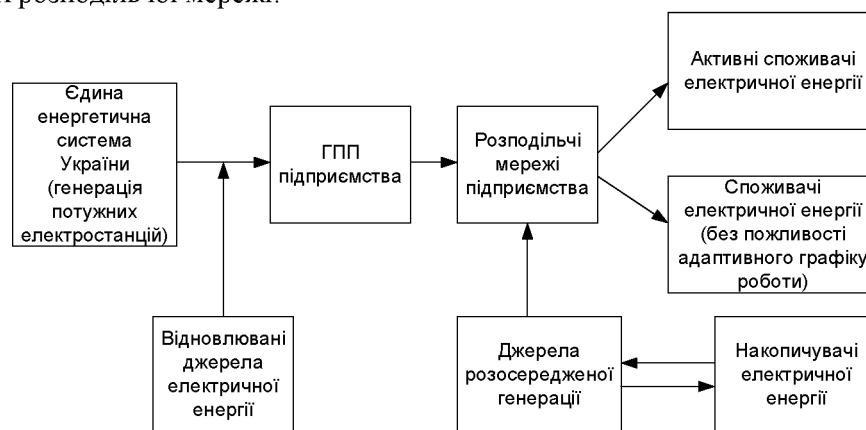
розвитку енергетичного сектору є одними з пріоритетних у світі, та є складовими сучасних концепцій розвитку розвинених країн світу.

Слід звернути увагу на розвиток відновлюваних джерел електричної енергії в аспекті проблематики їх функціонування у складі існуючих електричних мереж. Насамперед, досі не вирішеною залишається науково-практична задача стабілізації електропостачання в системах з під'єднаними енергетичними установками на базі відновлювальних джерел електричної енергії. Зважаючи на стохастичний характер генерування електричної енергії є необхідним в таких енергетичних вузлах встановлювати маневрові стабілізуючі електрогенеруючі потужності для вирівнювання стохастичного графіку електропостачання. До таких електрогенеруючих потужностей до недавнього часу відносилися вже наявні теплоелектростанції та атомні електростанції. Але зважаючи на критичний термін експлуатації існуючих потужностей теплоелектростанцій України слід вже зараз шукати їм альтернативу [4].

Між тим, враховуючи факт сучасних екстремальних режимів роботи енергетичної системи України, актуальним є впровадження додаткових електрогенеруючих потужностей.

Слід зауважити, що ре конфігурація існуючих систем електропостачання підприємств має певні особливості у порівнянні з побудовою нових систем електропостачання. При ре конфігурація існуючих систем електропостачання підприємств має бути врахована вже існуюча електрична мережа підприємства, особливості розташування енергетичного обладнання, та можливих місць встановлення нового електрогенеруючого обладнання та його під'єднання до розподільчої мережі підприємства.

Серед варіантів реконфігурації існуючих електричних мереж підприємств слід виокремити впровадження автономних енергетичних установок, резервних систем електропостачання та розосереджених джерел електричної енергії, що розташовані на території підприємства, та під'єднані до їх розподільчої мережі.



**Рис. 2.** Архітектура системи електропостачання промислового підприємства при реконфігурації при впровадженні джерел розосередженої генерації

Таким чином, авторами пропонується варіант під'єднання джерел розосередженої генерації електричної енергії до розподільчої мережі підприємства наступним чином (рис 2).

Слід зауважити, що джерела розосередженої генерації можуть бути виконані на базі будь-яких типів електрогенеруючих установок. Між тим, враховуючи той факт, що у статті розглядається ре конфігурація розподільчих мереж підприємств в аспекті декарбонізації, розглядаються електрогенеруючі установки на базі відновлюваних джерел енергії [7].

Свою роль у вирівнюванні графіку електроспоживання у запропонованій схемі, мають відіграти і споживачі електричної енергії. Споживачі електричної енергії, які мають можливість адаптивно змінювати графік своєї роботи можуть виконувати функцію споживачів-регуляторів.

Роль накопичувачів електричної енергії у випадку запропонованого варіанту реконфігурації можуть виконувати як електро-хімічні накопичувачі так і інші сучасні накопичувачі. Одним із перспективних варіантів накопичення електричної енергії є водневі накопичувачі, а саме паливні комірки [5].

Як відомо, поширення водневих технологій накопичення електричної енергії дає підприємствам ще один стимул для декарбонізації існуючих систем електропостачання. Використання водню як проміжного енергоносія для забезпечення збалансованого використання неконтро-

льованих відновлюваних джерел енергії а саме вітрової та сонячної електроенергії може орієнтуватися на відповідні обсяги генерації. Враховуючи мінливий характер їхньої генерації, на регулювання енергобалансу вони можуть спрямувати частину своєї згенерованої потужності.

Слід зазначити якісні зміни що відбулися за останній час та стали поштовхом для розвитку водневої енергетики. Таким чином, акцент у цьому питанні змістився з технологічних і енергетичних аспектів на екологічні й економічні складові проблеми створення міжгалузевої інфраструктури, що забезпечує широкомасштабне використання водню. Ці процеси, на сьогоднішній день, притаманні і Україні, де роботи з водневої енергетики віднесено до рангу пріоритетних цільових комплексних програм наукових досліджень, які охоплюють широке коло питань, вирішення яких у комплексі забезпечує перехід на якісно новий рівень технологій виробництва, розподілу і споживання водню в енергетиці, промисловості та інших сферах економіки.

Сучасні аспекти зберігання електричної енергії за допомогою водню розглядається як частина наступних концепцій [7]:

Power-to-Power із зберіганням водню як в газоподібному стані, в тому числі в підземних газосховищах, так і в зв'язаному стані, в тому числі в гідридах металів;

Power-to-Gas, що включає додавання водню в існуючу інфраструктуру для природного газу, а також створення синтетичного метану з водню.

На сьогоднішній день концепція Power-to-Gas розглядається як найпростіший і швидкий спосіб створення глобального ринку водню. Найдешевшим способом транспортування водню є транспортування по трубопроводу в суміші з природним газом, що зменшить значні обсяги капітальних витрат.

Перевагами цього рішення є відносна дешевизна технології, використанні існуючої інфраструктури природного газу, при цьому безпеку транспортування водню знаходиться на тому ж рівні, що і природного газу.

У той же час, такий підхід не позбавлений ряду недоліків, з посеред інших, в першу чергу слід вказати на необхідність поділу газів, що призводить до витрат 20 ... 30% водню на поділ (+ 25..50% до вартості), необхідність додаткового очищення на фоні існуючих обмежень на теплотворну здатність газу.

Між тим, на сьогоднішній день на теренах провідних країн світу та Європейського союзу йде робота по створенню пілотних проектів в рамках цієї концепції.

Зважаючи на високий коефіцієнт корисної дії енергоустановок на базі паливних елементів, вони розглядаються в якості перспективних джерел енергії в кіловатному класі потужності. Такі енергоустановки потребують використання чистого водню вище 99.9%. Комплекс електролізер - паливний елемент характеризується потужним коефіцієнтом рекуперації електроенергії, який може становити більше 40%, що цілком прийнятно для енергоустановок на основі відновлюваних джерел електричної енергії. При розробці таких систем акумулювання електроенергії основними невирішеними питаннями залишаються аспекти пов'язані зі створенням енергоефективних систем очищення і зберігання водню, інтегрованих з паливними елементами [6].

Між тим, слід зауважити, що серед розроблюваних нових технологій і пристроїв очищення і зберігання водню для автономної енергетики економічно прийнятними і безпечними можуть стати пристрої та системи, засновані на використанні оборотних металогідридів - інтерметалічних сполук, здатних вибірково і оборотно поглинати водень. При цьому основна маса водню в системі знаходиться в зв'язаному твердофазному стані, що забезпечує підвищену безпеку при експлуатації. Вибірковість поглинання водню, можливість гнучко контролювати термодинамічні властивості інтерметалічних сплавів за допомогою варіації їх складу дозволяє використовувати їх не тільки для зберігання, але і для високоефективної очистки водню, створення термохімічних теплових насосів і водневих компресорів [7].

Таким чином, підвищення ефективності роботи водневих систем акумулювання енергії пов'язано зі зниженням енергетичних витрат при отриманні, очищенні та зберіганні водню. Сучасні системи зрідження водню вимагають витрат до 30-40% загальної хімічної енергії зберігається водню (по нижчій теплоті згорання), і системи компримування водню до 350- 750 бар вимагають до 20%, при цьому експлуатація таких систем в енергоустановках автономної і розподіленої енергетики ускладнена. До основних перепон можна віднести високі витрати на криогенне устаткування або трубопровідну арматуру високого тиску, забезпечення безпеки витрат на навчання і підготовку обслуговуючого персоналу.

Між тим, на сьогоднішній день світова потужність систем акумулювання енергії оцінюється в 3% від загальної генерації електроенергії, причому на 95% ці потужності забезпечуються за рахунок єдиної технології гідроакумуючих станцій, що залишає актуальним на сьогодні питання буферних систем акумулювання електричної енергії в умовах впровадження джерел розосередженої генерації електричної енергії [8].

Слід зазначити, що авторами пропонуються до подальшої практичної реалізації в умовах промислових підприємств енерготехнологічні комплекси. При побудові систем з розосередженою генерацією вони повинні мати у своєму складі первинні приймачі енергії на базі відновлюваних джерел електричної енергії, дистиллятора з геліоколектором, електролізер, системи зберігання стиснених газів, паливного елемента. Також такі енерготехнологічні комплекси мають у своєму складі систему управління і відповідні вимірювальні датчики для збору й обробки даних щодо параметрів технологічних процесів, що реалізуються під час функціонування комплексу.

В основу енерготехнологічного комплексу покладено здатність споживання і переробки поновлюваної енергії. Нерегулярний потік первинної енергії, одержуваної від відновлюваних джерел електричної енергії, використовується в електролізері. Важливою характеристикою електролізера високого тиску є те, що в якості електроживлення може бути використана некондиційна електрична енергія. Очевидно, що такий підхід є найкращим для створення автономних електростанцій невеликої та середньої потужності. Розроблений енерготехнологічного комплексу може розглядатися як автономна станція отримання водню. У той же час отриманий водень може використовуватися для підтримання інших технологічних процесів чи пікових генерацій електричної енергії.

Дистиллятор для опріснення технічної води і води з високим вмістом солі та інших домішок з підземних джерел та ґрунтових вод є одним із споживачів енергії та складовим елементом енерготехнологічного комплексу. Дистилуючий модуль застосовується як складовий елемент енерготехнологічного комплексу, а також як окремий об'єкт із можливим енергопостачанням від традиційних джерел енергії. Під час теплової перегонки відбувається повна демінералізація і стерилізація води. Отримана таким чином вода може бути використана для технічного водопостачання, дистильована вода частково подається в електролізер [9].

На підставі викладеної інформації можна зазначити, що буферна воднева система, яка складається з електролізера і системи зберігання водню, органічно вписується в енерготехнологічну схему системи розосередженої генерації на базі відновлюваних джерел електричної енергії, забезпечуючи вирішення проблеми подачі енергії споживачеві у період відсутності генерації електричної енергії. Перспективними вважаються енерготехнологічні схеми автономних водневих станцій на базі використання відновлюваних джерел енергії [10].

Водневе акумулювання енергії у вигляді ланцюжка, що зв'язує первинний джерело енергії, виробництво водню, систему зберігання водню і водневу енергоустановку дозволяє здійснювати довгострокове акумулювання енергії без втрат, доповнюючи в мегаватного класу потужності гідроакумуючі системи і конкуруючи в області малих потужностей з акумуляторними системами [11].

Потенційна перевага електролізу полягає в тому, що його досить легко організувати в умовах маломасштабного виробництва, наблизивши його до споживачів. Це дозволяє відмовитися від споруди дорогих систем розподілу водню. Електролізери забезпечують виробництво особливо чистого водню. До недоліків електролізу відносяться низька сумарна енергетична ефективність процесу і відносно високі капітальні витрати. В даний час застосовується і розробляються нові типи електролізерів, що дозволяють збільшити ефективність і комерційну привабливість процесу електролізу (твердополімерним електролізери, високотемпературні і інші) [12].

Найбільш широко використовувана технологія електролізу заснована на застосуванні лужних електролітів. Вдосконалені лужні електролізери можуть бути використані для великомасштабного виробництва водню з води з відносно високою сумарною ефективністю перетворення первинної енергії, рівній 28-36% з урахуванням коефіцієнту корисної дії електростанції на рівні 35-40% [13].

Тим часом, перспективи електролізу пов'язані із застосуванням твердо-полімерних електролізерів з платиновими каталізаторами, які забезпечують більш високий вихід водню. Останнім часом ведуться розробки електролізерів з твердо-полімерних електролізерів, що не містять

дорогоцінних металів, хоча, незважаючи на деякі успіхи в рішенні цієї задачі для спеціальних електролізерів з малим ресурсом роботи, прийнятного рішення для промислових електролізерів поки не знайдено. Твердо-полімерних електролізери характеризуються значно більшими питомими капітальними витратами, ніж лужні, але ці витрати зменшаться при переході до великих обсягів виробництва [14].

**Висновки та напрямки подальших досліджень.** Реконфігурація систем електропостачання підприємств є необхідним кроком у подолання викликів сьогодення щодо надійності та якості електропостачання. Між тим, запропонований варіант реконфігурації діючих електричних мереж підприємств виконаний в аспекті декарбонізації та подальшої інтелектуалізації цих мереж, що в майбутньому надасть їм можливість адаптації до мереж побудованих за концепцією Smart Grid.

#### Список літератури

1. Енергетичні ресурси та потоки / під заг. ред. **А.К. Шидловського**. – Київ: Українські енциклопедичні знання, 2003. – 472 с.
2. World Energy Outlook –2021, OECD/IEA, Paris.
3. **Бойко С.М.** Теоретичні засади формування електроенергетичних систем з джерелами розосередженої генерації гірничорудних підприємств. Монографія, під редакцією доктора техн. наук, професора **О.М. Сінчука**. – Кременчук, 2020. – 263с.
4. **Stognii B., Kyrylenko O., Prakhovnyk A., Denysiuk S.** The evolution of intelligent electrical networks and their prospects in Ukraine // *Tekhnichna elektrodynamika*. – 2012. – № 5. – pp. 52–67.
5. **Buchholz B., Styczynski Z.** Smart Grids – Fundamentals and Technologies in Electricity Networks, Springer – 2014. – 396 p.
6. **Ogden, Joan.** 2004. “Transition Strategies for Hydrogen and Fuel Cells.” University of California, Davis
7. **Philibert, Cédric.** 2017. “Commentary: Producing Industrial Hydrogen from Renewable Energy.” IEA news release, April 18.
8. **S. Timmerberg, M. Kaltschmitt, and M. Finkbeiner,** “Hydrogen and hydrogen-derived fuels through methane decomposition of natural gas – GHG emissions and costs,” *Energy Convers. Manag.* X, vol. 7, no. May, p. 100043, 2020.
9. ESMAP. 2020. Green Hydrogen in Developing Countries. Washington, DC: World Bank.
10. Досвід розбудови розумних енергетичних мереж на міжнародному рівні : монографія / **І. А. Вакулєнко, С. І. Колосок, О. В. Кубатко та ін.** ; за ред. **С. І. Колосок**. – Суми : Сумський державний університет, 2019. – 109 с.
11. **Русанов А.В., Соловей В.В., Зіпунніков М.М., Шевченко А.А.** Термогазодинаміка фізико-енергетичних процесів в альтернативних технологіях в 3-х т.: т. 1. Термогазодинаміка фізико-енергетичних процесів в водневих технологіях / під загальною редакцією чл.-кор. НАНУ А.В. Русанова; НАН України, Інститут проблем машинобудування. – Харків: Видавництво та друкарня «Технологічний Центр», 2018. – 336 с.
12. **Malyshenko S.P., Borzenko V.I., Dunikov D.O., Nazarova O.V.** Metal hydride technologies of hydrogen energy storage for independent power supply systems constructed on the basis of renewable sources of energy // *Thermal Engineering (English translation of Teploenergetika)*. 2012. T. 59. № 6. — С. 468-478.
13. **Emonts B., Schiebahn S., Görner K., Lindenberger D., Markewitz P., Merten F., Stolten D.** Reenergizing energy supply: Electrolytically-produced hydrogen as a flexible energy storage medium and fuel for road transport // *Journal of Power Sources*. 2017. T. 342. — С. 320-326.
14. **Felgenhauer M., Hamacher T.** State-of-the-art of commercial electrolyzers and on-site hydrogen generation for logistic vehicles in South Carolina // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2015. T. 40. № 5. — С. 2084-2090.

Рукопис подано до редакції 24.04.2023

УДК 624.131:624.15

**Р.О. ТИМЧЕНКО**, д-р техн., наук., проф., **Д.А. КРІШКО**, канд. техн., наук, ст. викладач,  
**Т.А. МАРІНОВА**, **В.А. ГАНЖЕНКО**, магістранти  
Криворізький національний університет

### **ВЗАЄМОДІЯ ФУНДАМЕНТНИХ КОНСТРУКЦІЙ І НЕРІВНОМІРНО-ДЕФОРМОВАНОЇ ОСНОВИ**

**Мета.** Виконати аналіз і класифікувати причини виникнення нерівномірних деформацій основ, методи захисту від їхнього впливу, розробити метод розв'язання контактної задачі.

**Методи дослідження.** Математичне моделювання впливу різних чинників на роботу фундаментних плит. Метод кінцевих елементів, класичні методи будівельної механіки (початкових параметрів, сил, переміщень) для розрахунку взаємодії фундаментної конструкції та основи. Метод коефіцієнта жорсткості у розв'язанні контактної задачі взаємодії фундаментної плити і нерівномірно-деформованої основи.

© Тімченко Р.О., Крішко Д.А., Марінова Т.А., Ганженко В.А., 2023