

11. Єгоров, С. Г. Конструкції агрегатів кольорової металургії [Текст] / С. Г. Єгоров, І. Ф. Червоний, Р. М. Воляр, під ред. д.т.н., проф. Червоного І. Ф.; Запоріж. держ. інж. акад. – Запоріжжя: ЗДІА, 2012. – 230 с.
12. Матрюков, Б. С. Теория, конструкция и расчёт металлургических печей. Т.2. Расчёты металлургических печей [Текст] / Б. С. Матрюков. – М.: Металлургия, 1986. – 376 с.
13. Металлургия марганца Украины / Б.Ф.Величко, В.А.Гаврилов, М.И.Гасик, С.Г.Грищенко, А.В.Коваль, А.Н.Овчарук // Київ, Техніка. 1996 – 470 с
14. Офіційний сайт АТ «Запорізький завод феросплавів» [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://zfz.com.ua/>
15. Офіційний сайт АТ «Нікопольський завод феросплавів» [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.nzf.com.ua/main.aspx>
16. Офіційний сайт компанії «YDD CORPORATION» [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://yddcorp.kz/>

Рукопис подано до редакції 15.09.23

УДК 624.15

Р.О. ТИМЧЕНКО, д-р техн. наук., проф., Д.А. КРИШКО, канд. техн. наук, ст. викладач,  
В.О. САВЕНКО, канд. техн. наук, наук. співроб., О.А. БЕЛКОВ, А.І. ГАРКУША,  
А.В. КОКОВИЧ, магістранти  
Криворізький національний університет

## НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН ПЛИТНО-ПАЛЬОВОГО ФУНДАМЕНТУ

**Мета.** Дослідження напружено-деформованого стану плитно-пального фундаменту і створення методів розрахунку для визначення несучої здатності та осідань для плитно-пальових фундаментів.

**Методи дослідження.** Основою досліджень є джерела в галузі геотехніки та пальових фундаментів авторами яких є вітчизняні та зарубіжні вчені, теоретичні та експериментальні методи які базуються на експериментальних дослідженнях, узагальненні та порівнянні результатів.

**Наукова новизна.** Розглянуто дані щодо особливостей поведінки плитно-пального фундаменту при циклічному навантаженні, розвитку осідань і втрати несучої здатності. Досліджено розрахункову модель деформування елементів конструкції плитно-пального фундаменту з урахуванням напружено-деформованого стану, що виникає під час циклічного навантаження. Розглянуто аналітичні залежності для опису процесу зміни несучої здатності та осідання плитно-пального фундаменту при циклічному навантаженні. Розглянуто метод розрахунку несучої здатності й осідань основ плитно-пальових фундаментів при циклічному навантаженні.

**Практична значимість.** Полягає у викладених інженерних методиках визначення несучої здатності та деформацій плитно-пальових фундаментів, які дають змогу оцінити вплив циклічного навантаження на будівлі та споруди, зведені на плитно-пальових фундаментах, з можливістю отримання оптимальних проєктних рішень під час проєктування плитно-свайних фундаментів.

**Результати.** Проведено аналіз методів розрахунку несучої здатності та деформацій пальових, плитних і плитно-пальових фундаментів у разі циклічного та статичного навантаження, які існують на сьогодні, огляд та оцінку результатів експериментальних і теоретичних досліджень та розрахункових моделей для плитно-пальових фундаментів у разі циклічного і статичного навантаження. Визначено деформації та напруження, що виникають в елементах плитно-пального фундаменту під час дії циклічного навантаження. Визначення взаємодії між елементами системи "палі - плитний ростверк - ґрунтова основа" під час дії циклічного навантаження на будь-який плитно-пальовий фундамент. Розглянуто розрахункову модель для плитно-пального фундаменту під час дії навантаження за циклічним законом.

**Ключові слова:** плитно-пальовий фундамент, несуча здатність, осідання, ґрунтова основа, напружено-деформований стан.

doi: 10.31721/2306-5451-2023-1-57-37-43

**Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями.** В сучасних умовах при будівництві будівель тенденція полягає в збільшенні навантажень на ґрунтові основи і використанні слабких ґрунтів як основ, що сприяє поширенню плитно-пальових фундаментів як одного з найпоширеніших способів збільшення несучої здатності та зменшення осідань. При цьому цей вид фундаментів і їхні основи поряд зі статичними, піддаються впливу різного роду циклічних навантажень, які в цілому ряді випадків є основними, що визначають безпеку експлуатації будівель і споруд. Під час проєктування будівель і споруд, під час експлуатації яких виникає необхідність у спільному врахуванні статичних і циклічних впливів. Серед першочергових завдань виступає встановлення несучої здатності фундаменту, а також прогнозування

вертикальних деформацій основ фундаментів, особливо з урахуванням наявної зміни міцності та деформаційних характеристик елементів комбінованого плитно-пального фундаменту та ґрунтів основ під час циклічного навантаження. У зв'язку з цим розроблення методів несучої здатності та розрахунку осідань плитно-пальових фундаментів на основі за наявності циклічних впливів є актуальним питанням [1-5].

**Аналіз досліджень і публікацій.** Питанням вивчення спільної роботи взаємодії паль одна з одною, з масивом ґрунту і плитним ростверком у процесі лабораторних і польових випробувань в різний час займалися: М.Ю. Абелев, А.А. Бартоломей, Б. В. Бахолдін, В.Г. Березанцев, М.В. Берлінов, І.Й. Бойко, М.М. Герсеванов, В.М. Голубков, М.І. Гольдштейн, А.Л. Готман, М.Н. Готман, Н.З. Готман, А.А. Григорян, Б.І. Далматов, М.М. Дорошкевич, Ю.К. Зарецький, Б.В. Знаменський, В.А. Іллічов, С.М. Клепиков, Л.Д. Козачок, А.А. Луга, Р.А. Мангушев, І.Т. Мірсаєпов, Л.В. Нуждін, О.І. Осокін, О.О. Петраков, В.П. Петрухін, А.І. Поліщук, А.Б. Пономарьов, Я.А. Пронозін, Д.Є. Разводовський, І.І. Сахаров, О.А. Сорочан, З.Г. Тер-Мартиросян, А. З. Тер-Мартиросян, Р.О. Тімченко, В.М. Улицький, С.Б. Ухов, А.Б. Фадєєв, В.Г. Федоровський, М.А. Цитович, Д.Ю. Чунюк, А. Г. Шашкін, К.Г. Шашкін, О.А. Шулятьєв, Б.С. Юшков, В.Д. Яблочков, так і зарубіжні дослідники – R. Katzenbach, T. H. Hanna, K. Horikoshi, A. Mandolini, M.F. Randolph, T. Whitaker та ін. [6-16].

З урахуванням великої кількості наукових і практичних робіт від вітчизняних та іноземних дослідників, які розглядають пальові фундаменти, нормативна література поки що не передбачає достатньо надійних методів розрахунку плитно-пального фундаменту, які б урахували взаємодію елементів у системі "плитний ростверк - палі - ґрунтова основа" у разі виникнення циклічних і статичних навантажень.

**Постановка задачі.** Дослідження напружено-деформованого стану плитно-пального фундаменту і створення методів розрахунку для визначення несучої здатності та осідань для плитно-пальових фундаментів.

**Викладення матеріалу та результати.** Нині під час будівництва висотних будівель і споруд широкого застосування набув плитно-пальовий фундамент, перевагою якого, на відміну від звичайних пальових фундаментів, є наявність можливості передавання значних часток навантаження на ґрунтову основу як через палі, так і через плитний ростверк. Необхідність використання при проектуванні та будівництві плитно-пальових фундаментів виникає в разі високих значень навантажень, що чиняться на основи фундаментів, або використання під забудову земельних ділянок, які відрізняються несприятливими фізичними та механічними особливостями ґрунтів основи. У подібних ситуаціях використання плитно-пальових фундаментів виявляється обґрунтованим у зв'язку зі зростанням несучої здатності та істотним зниженням величини осідання основ фундаментів, при цьому зменшуються нерівномірні осідання частин будівлі або її крен. Існуючі в нормативній літературі методики виконання розрахунків не дають змоги врахувати спільну роботу паль і плитного ростверку в складі комбінованих плитно-пальових фундаментів, на відміну від підходів для окремих розрахунків плитних і пальових фундаментів.

Проектування плитно-пальових фундаментів можна вести за такими основними підходами: з урахуванням потреби в дотриманні конкретних умов (для міцності, для деформацій). У цій ситуації під час проектування слід скористатися підсумками проведених досліджень, пов'язаних із розрахунком співвідношень навантажень, прийнятих плитною ростверку і палями в плитно-пальовому фундаменті;

методика проектування, заснована на використанні таких принципів: допустиме навантаження на окрему палю дорівнює 80% від граничної величини опору палі, коли відбувається формування пластичних деформацій; палі, розміщені під плитною, допомагають скоротити величину напруження в контактній області під основою плити фундаменту; фундамент виявляється плитним, при цьому йде зменшення загальної осадки основи, що зменшується за рахунок рівномірного введення паль під плитною.

спосіб проектування, що базується на визначенні деформацій плити на різних зонах, при цьому розміщення паль проводиться з урахуванням можливості зниження нерівномірності деформацій основи фундаментної плити. У цьому разі під час проектування палі розташовують під центральною зоною плити.

У європейському нормативі Eurocod 7 [17] під час проектування пальово-плитних фундаментів для груп паль рекомендується застосовувати такі методи:

з використанням результатів розрахунку одиночної палі та поправкою на взаємовплив паль у пальному полі;

з використанням схеми, де група паль приймається як велика одиночна паля.

У нормах зазначено, що використання в плитно-пальному фундаменті надійність споруди визначає несуча здатність паль, під час проектування необхідно враховувати загальну жорсткість усієї споруди.

Рекомендації містять у собі:

класифікацію фундаментів, сферу їх застосування, вимоги до визначення;

інженерно-геологічні умови, вимоги до розрахунку фундаментів і основ;

граничні стани на основі врахування вимог до експлуатації будівель.

Виконання розрахунків для поля паль слід передбачити на основі використання будь-якої з таких методик:

емпіричної методики, чисельної методики, аналітичної спрощеної методики;

методики на основі еквівалентних фундаментних систем.

Вибір методу розрахунку необхідно обґрунтувати на основі результатів статичних випробувань паль, а також даними спостережень за осіданнями фундаментів у схожих інженерно-геологічних умовах.

Під час проектування плитно-пального фундаменту крім призначення параметрів пального поля також велике значення має розрахунок плитного ростверку. Мають бути правильно знайдені зусилля, що виникають у різних перерізах плити і виходячи з цього, призначено її армування.

З аналізу напружено-деформованого стану, що виникає всередині системи "плитний ростверк – палі – ґрунт міжпальної ділянки – ґрунт нижче за п'яту палі" під час циклічного навантаження, впливають положення робочих гіпотез, які дають змогу побудувати розрахункову модель і сформувані розрахункову методику для оцінювання осідань і несучої здатності плитно-пального фундаменту під час циклічного навантаження.

Виконаний аналіз досліджень дає змогу сформулювати, стосовно оцінювання несучої здатності й осідань плитно-пального фундаменту під час циклічного навантаження, такі основні передумови:

плитно-пальовий фундамент розглядається як єдина система "плитний ростверк – палі – ґрунт міжпальної області – ґрунт нижче п'яти палі";

прийнято жорсткий варіант з'єднання між плитним ростверком і палями;

під час циклічного навантаження спостерігається виникнення перерозподілу зусиль між ґрунтом і палями в різних зонах єдиної системи;

під час циклічного навантаження відбувається зменшення механічних характеристик ґрунту  $\varphi$ ,  $c$ ,  $E$  і збільшення деформацій повзучості залежно від параметрів циклічного навантаження;

мінімальне значення коефіцієнта асиметрії циклу напружень у ґрунті пальної основи обмежується величиною горизонтальних напружень  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  в межах стислої товщі;

враховується вплив стискаючих напружень за допомогою збільшення бічного тиску ґрунту на палі в ґрунті, що перебувають під плитним ростверком, на значення несучої здатності паль по бічній поверхні;

згинальні деформації плиткового ростверку не враховуються, приймається абсолютна згинальна жорсткість;

приймається, що перерозподіл зусиль між кутовими, крайовими палями і рядовими палями враховується автоматично під час розв'язування п'яти рівнянь квазістатички відповідно до числа циклів навантаження і граничного стану ґрунту, що знаходиться на бічній поверхні паль;

значення граничних дотичних напружень у ґрунті по поверхні палі зменшуються по довжині під час циклічного навантаження й описуються законом Кулона-Мора;

взаємовплив паль у ґрунтовій основі фундаменту не враховується;

умови досягнення граничної несучої здатності палі, що входить у плитно-пальовий фундамент, і одиночної палі різні.

Напружено-деформована основа в плитно-пальному фундаменті відрізняється значною складністю. У подібній основі відбувається спільна деформація матеріалів, що мають різні деформаційні та міцнісні характеристики, а також відмінні умови навантаження.

Розвиватися деформації основи в плитно-пальовому фундаменті під час циклічного навантаження будуть у зв'язку із взаємодією ґрунту, плитної основи та паль у рамках зв'язкових умов:

вільна деформація ґрунтової основи в плитному ростверку не відбувається через використання паль;

передбачається обмеження вільного деформування паль з боку ґрунтової основи в плитному ростверку (ґрунту міжпальової області та під нижнім кінцем палі) і плитного ростверку;

вільному деформуванню плитного ростверку перешкоджають палі і ґрунт міжпальового простору і під нижнім кінцем палі.

Під час подібної взаємодії між компонентами, що входять у пальову основу, додатково з'являється напружений стан і перерозподіляються зусилля між палями і ґрунтом під час циклічного навантаження. Водночас значення напруги в палях зростає, а в ґрунті між палями скорочується, якщо зіставляти з даними першого циклу.

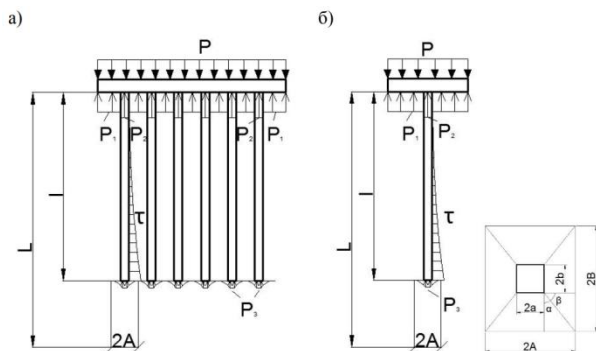
У рамках пальової основи окрема паля через наявність зчеплення з ґрунтом навколо по бічній поверхні, виявляється внутрішнім зв'язком. У результаті з'являється перешкода для вільної деформації ґрунту в міжпальовій області під час циклічного навантаження. Через обмежені деформації, пов'язані з циклічною повзучістю ґрунту, можуть з'явитися всередині пальової основи додаткові врівноважені напруження. Водночас усередині ґрунту можуть з'явитися напруження у зв'язку з розтягуванням, а в палях – виникнути напруження через стиснення.

Особливості деформування пальової основи при циклічному навантаженні використано при розробленні розрахункової моделі деформування плитно-пального фундаменту. Цей процес розглядають у просторовій постановці з урахуванням спільного деформування всіх елементів системи "плитний ростверк – палі – ґрунт міжпальового простору – ґрунт нижче вістря палі" завдяки жорсткому з'єднанню паль і плитного ростверку.

Враховується перерозподіл зусиль між елементами системи в процесі циклічного навантаження за рахунок спільної деформації плитного ростверку, паль, ґрунту міжпальового простору, і ґрунту нижче вістря палі. Напруження в окремих конкретних зонах системи визначають шляхом спільного розв'язання п'яти рівнянь квазістатисти, водночас за основу взято рівняння, розроблені З.Г. Тер-Мартirosяном і його учнями для випадку статичного навантаження і модифіковані для випадку циклічного навантаження залежно від кількості циклів навантаження і параметрів циклічного навантаження.

При цьому враховується зміни зони граничної рівноваги по бічній поверхні палі залежно від координати точки перетину епюр мобілізованого дотичного напруження та граничного дотичного напруження. Для аналітичного опису процесу невеликого деформування елементів системи прийнято розрахункову схему, запропоновану З.Г. Тер-Мартirosяном (рис. 1), розроблено рівняння механічного стану ґрунту і системи "паля – ґрунт", а також рівняння рівноваги зусиль. Спільне розв'язання цих рівнянь дає змогу отримати шукані значення осідань і несучої здатності плитно-пального фундаменту під час циклічного навантаження.

Для спрощення розрахунку прийнято розрахункову схему, яка складається з палі, ґрунту, що оточує її, і частини плити ростверку, що припадає на одну палю. Поведінка основних компонентів такого ґрунту буде відповідати поведінці палі у складі плитно-пального фундаменту (рис. 1). Розміри розглянутого ґрунту –  $2A \times 2B \times L$ , розміри палі –  $2a \times 2b \times l$ . На межах ґрунту прийнято умови вільного вертикального переміщення. На дні розглянутого ґрунту прийнято повну відсутність переміщень.



**Рис.1.** Розрахункова схема: а – взаємодії масиву ґрунту з плитно-свайним фундаментом; б – взаємодії однорідного масиву ґрунту з площею  $2A \times 2B$  з окремою палею

Напруження в елементах системи "плитний ростверк – палі – ґрунт міжпальового простору – ґрунт нижче вістря палі" визначають шляхом розв'язування рівнянь залежно від кількості циклів навантаження, параметрів циклічного навантаження та ґрунтових умов, розмірів зони граничної рівноваги на

боковій поверхні палі та для конкретного циклу навантажування N. Зони граничної рівноваги, враховуючи жорсткість матеріалу палі, визначають точкою перетину епюр мобілізованого дотичного напруження та дотичного напруження. При цьому враховується зміна зони граничної рівноваги по бічній поверхні палі залежно від координати точки перетину епюр мобілізованого дотичного напруження і граничного дотичного напруження.

Гранична величина циклічного навантаження (гранична несуча здатність), що сприймається плитно-пальовим фундаментом, залежить від умов спільного деформування ґрунту, палі і плитної ростверку та їхніх міцнісних і деформаційних властивостей і відповідає максимальному навантаженню циклу, яке може сприймати плитно-пальовий фундамент за умови заданої кількості циклів навантаження та наперед заданого граничного осідання.

Гранична несуча здатність плитно-пальового фундаменту під час циклічного навантаження обчислюється за розрахункових значень для першої групи граничних станів навантаження та розрахункових значень характеристик міцності і деформаційних характеристик ґрунту з урахуванням зниження втомної міцності та збільшення деформації циклічної повзучості за величиною граничного опору ґрунтової основи за умовою обмеження розвитку в ньому вертикальних деформацій згідно із заздалегідь заданими умовами.

Під час визначення граничної несучої здатності плитно-пальового фундаменту в разі циклічного навантаження розглядають гранично напружено-деформований стан системи "плитний ростверк – палі – ґрунт міжпальового простору – ґрунт нижче вістря палі" під нижнім кінцем палі та під плитним ростверком. У разі жорсткого з'єднання палі з плитним ростверком усі елементи системи деформуються спільно в процесі циклічного навантаження і відбувається перерозподіл зусиль між ними.

Гранична несуча здатність під час циклічного навантаження плитно-пальового фундаменту визначається для стадії, коли дотичні напруження по бічній поверхні відсутні у верхній і середній частині палі унаслідок досягнення граничного опору на зсув.

Приймається, що в ґрунті по підшві плитного ростверку і під вістря палі реалізується просторовий напружений стан. Досягнення межі несучої здатності плитно-пальового фундаменту відбувається, коли напруження під п'ятою палі та під плитним ростверком перевищують втомну міцність і граничні деформації ґрунту під час тривісного циклічного стиснення.

Розрахунок граничної несучої здатності проводять за значенням напружень під п'ятою палі і напруження під плитним ростверком, величину яких визначають для будь-якого циклу навантаження, який розглядають, із розв'язання системи рівняння з урахуванням перерозподілу зусиль між елементами системи та їхньої зміни в процесі циклічного навантаження.

Після певної кількості циклів навантаження напруження в ґрунті досягають межі витривалості в якомусь з елементів:

- під плитним ростверком, а потім після якоїсь кількості циклів під нижнім кінцем палі;
- під нижнім кінцем палі;
- одночасне досягнення під плитним ростверком і під нижнім кінцем палі.

Потім відбувається продавлювання тонкого шару ґрунту під нижнім кінцем палі та під плитним ростверком і, як наслідок, відбувається прирощення переміщення (осідання) плитно-пальового фундаменту, і цей процес періодично повторюється, доки загальне сумарне осідання пальового фундаменту не досягне граничного значення для конкретної будівлі або споруди.

При циклічному навантаженні відбувається збільшення осідань основи плитно-пальових фундаментів із різною інтенсивністю на всіх етапах навантаження. Найбільш інтенсивний розвиток осідань відбувається на початковій стадії навантаження (приблизно від 100...500 циклів), потім осідання поступово зменшуються, але повної стабілізації навантаження не настає.

У загальному випадку в разі циклічного навантаження осідання основи плитно-пальового фундаменту складається з трьох складових:

- осідання умовного фундаменту;
- додаткового осідання продавлювання палі на рівні підшви умовного фундаменту;
- додаткового осідання за рахунок стиснення стовбура палі.

Для визначення осідання умовного фундаменту при циклічних навантаженнях пропонується метод, в основу якого покладено метод пошарового підсумовування з урахуванням просторового напруженого стану ґрунтового масиву нижче умовного фундаменту і зміни механічного стану ґрунту в процесі циклічного навантаження.

Запропонована методика дає змогу обчислити осідання умовного фундаменту під час циклічного навантаження, при цьому природний тиск ґрунту розглядається як тривісне всебічне навантаження, а додаткове навантаження в період будівництва та експлуатації.

На основі передумов і припущень виконується розрахунок величини вертикальних деформацій (осідання) основи умовного фундаменту:

параметри циклічного навантаження і механічні характеристики ґрунтів приймаються для другої групи граничних станів;

передбачається, що існує нелінійна залежність між напруженнями, що виникають у масиві ґрунту від впливу зовнішнього навантаження, і деформаціями ґрунтового масиву;

розглядається просторовий напружений стан ґрунту, при цьому враховується, що кожна компонента нормальних напружень викликає відповідну деформацію ґрунту;

під час визначення величини додаткових вертикальних тисків шаруватість нашарувань не враховується;

враховується можливість бічного розширення ґрунту;

висота стисливої товщі визначається відповідно до чинних норм проектування основ, при цьому вважається, що нижче зазначеної активної зони ґрунт не деформується;

у розрахунку використовують умовні модулі, що характеризують перехід з природного стану основи в стан після прикладання місцевого навантаження;

враховується зміна напружено-деформованого стану і механічних властивостей при тривісному циклічному навантаженні.

**Висновки та напрямок подальших досліджень.** Розглянуто методику розрахунку несучої здатності плитно-пального фундаменту під час циклічного навантаження, включно з виразами для визначення: напружень у ґрунті міжпального простору, нижче вістря паль, під плитним ростверком і палях, граничних дотичних напружень у ґрунті, зони граничної рівноваги й умов досягнення граничної рівноваги. Несуча здатність визначається за величиною граничного опору ґрунтової основи за умовою обмеження розвитку в ній вертикальних деформацій у відповідність заздалегідь заданим умовам. Запропонована методика дає змогу достовірно розраховувати несучу здатність плитно-пального фундаменту в разі циклічного навантаження на всіх стадіях навантаження з урахуванням спільного деформування всіх елементів системи "плитний ростверк – палі – ґрунт міжпального простору – ґрунт нижче вістря палі".

Розглянуто метод розрахунку осідання плитно-пального фундаменту при циклічному навантаженні. Загальне осідання подається у вигляді суми осідань умовного фундаменту, додаткового осідання завдяки продавлюванню палею ґрунту на рівні підшви умовного фундаменту і додаткового осідання завдяки стисненню стовбура палі. Під час обчислення осідання умовного фундаменту приймають об'ємно-напружений стан ґрунту основи, враховують зміну напруженого стану, міцнісних і деформаційних характеристик ґрунту під час циклічного навантаження і використовують метод пошарового підсумовування деформацій.

### *Список літератури*

1. Применение геоинформационных систем в инженерно-геологических изысканиях / Р. А. Тимченко, Д. А. Кришко, С. О. Попов, М. О. Кравченко, Ю. В. Чугай // 36. наук. ст. "Галузеве машинобудування, будівництво". – Полтава: ПолтНТУ, 2013. – Вип. 3 (38). – Т.2. – С. 359-367.

2. Тимченко Р. А., Кришко Д. А. Особенности совместного расчета системы «основание – фундамент – верхнее строение» высотных зданий // Вісник Криворізького національного університету. – Кривий Ріг: КНУ, 2014. – Вип. 36. – С. 117-122.

3. Применение математического моделирования для оценки напряженно-деформированного состояния системы „основание – фундамент – верхнее строение” в сложных инженерно-геологических условиях / Р. А. Тимченко, Д. А. Кришко, С. О. Попов, А. П. Сухан // 36. наук. ст. "Строительство. Материаловедение. Машиностроение". Серия: Компьютерные системы и информационные технологии в образовании, науке и управлении. – Дн-ск: ПГА-СА, 2014. – Вип. 78. – С. 263-269.

4. Тимченко Р.О. Проективання і розрахунок урівноважуючих плитних фундаментів: Навч. посібн. для студентів будівельних спеціальностей. – Кривий Ріг, Мінерал, 2005. □ 82 с

5. Тимченко Р. А., Кришко Д. А. Работа плитных фундаментов-саморегуляторов (ПФС) на неравномерно-деформируемом основании // Современные проблемы строительства. – Донецк, 2010. – № 9. С. 173-177.

6. Шашкин К. Г. Расчет напряженно-деформированного состояния основания фундаментов и здания с учетом их взаимодействия // Реконструкция городов и геотехническое строительство. – 2003. – №4. – С. 15–25.

7. Катценбах Р., Шмитт А., Рамм Х. Основные принципы проектирования и мониторинга высотных зданий Франфурга-на-Майне. Случай из практики // Реконструкция городов и геотехническое строительство. – 2005. – № 9. – С. 80-99.
8. Тер-Мартirosян З.Г. Современные проблемы механики грунтов при высотном строительстве // Инженерная геология. – М.: 2007. – С. 33-41.
9. Федоровский В. Г., Безволев С. Г., Дунаева О. М. Методика расчета фундаментных плит на нелинейно-деформируемом во времени основании // Нелинейная механика грунтов: Тр. IV Рос. конф. с иностр. участием. – СПб., 1993. – Т.1. – С. 81–86.
10. Ильичёв В. А., Петрухин В. П., Шейнин В. И. Принципы проектирования оснований и фундаментов высотных зданий, учитывающие их геотехнические особенности // Современное высотное строительство / ГУП «ИТЦ Москомархитектуры». – М., 2007. – С. 255-261.
11. Федоровский В. Г., Колыбин И. В. Расчеты и проектирование оснований и фундаментов // Современное высотное строительство / ГУП «ИТЦ Москомархитектуры». – М., 2007. – С. 255-261
12. Тер-Мартirosян З. Г., Теличенко В. И., Королев М. В. Проблемы механики грунтов, оснований и фундаментов при строительстве многофункциональных высотных зданий и комплексов // Вестник МГСУ. – 2006. – №1. – С.18-27.
13. Улицкий В.М., Шашкин А.Г., Шашкин К. Г. Основы совместных расчетов зданий и оснований. – 2014. – 328 с.
14. Чунюк Д.Ю., Курилин Н.О. Оценка эффективности работы составляющих комбинированного свайно-плитного фундамента // Научное обозрение. – 2016. – № 16. – С.6-10.
15. Hanisch J., Katzenbach R., König G. Kombinierte Pfahl-Plattengrundungen. Ernst&Sohn. – 2002. – 222 p.
16. Katzenbach, R., Leppla S. Combined Pile-Raft Foundations (CPRF) in theory and engineering practice Current developments – 2016. – 64 p.
17. Eurocode 7. Geotechnical design in european engineering practice. – 1996. – 123 p.

Рукопис подано до редакції 09.05.23

УДК 621.312

І.О. СІНЧУК, канд. техн. наук, доц., М.Г. КОТЯКОВА, аспірантка  
Криворізький національний університет

## ПІДХІД ДО ПОКРАЩЕННЯ ЯКІСНИХ ПОКАЗНИКІВ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ЗАЛІЗОРУДНИХ ПІДПРИЄМСТВ

**Мета.** Метою даної роботи є розробка адаптивної системи керування інверторами джерел розосередженої генерації з мінімізацією гармонічних викривлень вихідної напруги. Даний напрямок є актуальним у зв'язку з бурхливим розвитком джерел відновлювальної енергії, потенційним їх впливом на зниження якості електричної енергії, а також активним впровадженням інтелектуалізації промислових підприємств.

Для досягнення поставленої мети проаналізовано показники якості електричної енергії та визначено найбільш значимі для розподільчих мереж залізорудних підприємств. Запропоновано підхід адаптивного керування та контролю оптимальним рівнем якості електричної енергії за критерієм впровадження інтелектуальних технологій в виробничі процеси.

**Методи дослідження.** Для розв'язання поставлених задач і аналізу статистичних даних використано аналітичні методи – для дослідження рівнів відхилень електричної енергії у мережі залізорудного підприємства та нечітких нейронних мереж для побудови адаптивної системи контролю та керування якістю електричної енергії в розподільчих електромережах.

**Наукова новизна.** Вперше запропоновано підхід щодо адаптивної системи контролю та керування якістю електричної енергії з мінімізацією гармонічних викривлень вихідної напруги в умовах розподільчих мереж залізорудних підприємств.

**Практична значимість.** Запропонований підхід покращення якості показників електричної енергії залізорудних підприємств може мати практичне втілення при інтеграції відновлювальних джерел енергії в розподільчі мережі підприємств, а також при інтелектуалізації промислових процесів.

**Результати.** У статті запропоновано підхід щодо вирішення наукове завдання з теоретичного обґрунтування та розбудови принципів визначення, контролю параметрів показників якості електричної енергії та побудови систем коригування енергетичних показників електричної енергії шляхом керованого впливу на роботу мережевого інвертора, за рахунок застосування теорії нейро-нечітких мереж у системі керування його роботою за даними діючого значення основних показників якості електричної енергії та імперично розрахованих показників втрат електричної енергії у розподільчій мережі залізорудних підприємств. Результати моделювання запропонованого підходу контролю та керування рівнем якості електричної енергії у мережі показав достатній нормований рівень якості електричної енергії для впровадження сучасних інтелектуальних технологій.

**Ключові слова:** система електропостачання, показники якості електричної енергії, електропостачання, відновлювальні джерела енергії, якість електричної енергії.