

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.

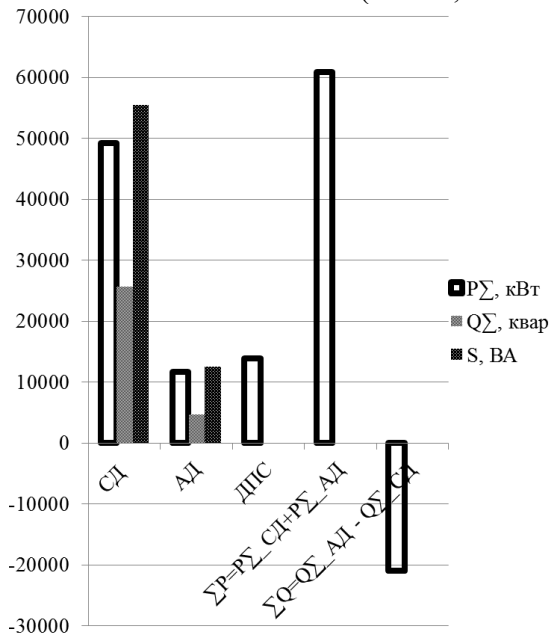
**Наукова новизна.** Вперше запропоновано підхід щодо адаптивної системи контролю та керування якістю електричної енергії з мінімізацією гармонічних викривлень вихідної напруги в умовах розподільчих мереж залізорудних підприємств.

**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.

**Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями.** На сьогоднішній день, більше 80% електроенергії на залізничних підприємствах споживається різноманітними системами електроприводів, з них, близько 60% випадає на синхронні двигуни. Останнє надає змогу робити висновок щодо високого потенціалу компенсації реактивної потужності синхронними електроприводами. Аналізуючи побудовані діаграми (**Ошибка! Источник ссылки не найден.** 1), видно, що циклічне навантаження (скіповий підйом) майже у два рази менше (до уваги береться тільки установлена потужність електричних машин змінного струму) від сумірного сталого навантаження (насоси, вентилятори, турбокомпресори) [1, 9].



**Рис. 1.** Розподіл встановленої номінальної активної та реактивної потужності двигунів головних та допоміжних приводів потужністю більше 500 кВт за видами приводів (ш. «Козацька»)

Отже, загальної компенсаційної здатності встановлених синхронних машин на шахті Козацька достатньо для компенсації реактивної потужності асинхронних машин, тиристорних приводів постійного струму та реактивних втрат в елементах мережі. Звісно, що система керування компенсаційною здатністю синхронних машин повинна враховувати перш за все надійне виконання технології, мінімум втрат у промислових електричних мережах, підтримання рівня напруги електричних мереж на нормованому рівні та недопускання перекомпенсації на межі балансової належності.

В руслі переходу від оптового ринку електроенергії єдиного покупця до балансувачого і до електропостачання за двосторонніми договорами в останні роки і на перспективу в Україні спостерігається тенденція переходу від чисто централізованого електропостачання до комбінованого, коли зростає кількість місцевих джерел електроенергії. До місцевих джерел електроенергії, що працюють безпосередньо в мережах 10–6–0,38 кВ, відносяться як традиційні джерела невеликої потужності, так і альтернативні. Як альтернатива традиційним розвиваються відновлювані джерела електроенергії (ВДЕ), когенераційні установки, газо- та парогазові установки та ін [2].

Разом з тим електричні мережі (ЕМ) енергосистем проектувалися і споруджувалися за умов централізованого електропостачання, коли електроенергія від крупних теплових і атомних електростанцій трансформуючись передавалась до споживачів.

З розбудовою в розподільних електричних мережах розосереджених джерел електроенергії (РДЕ) виникають нові задачі, такі як, необхідність оптимізації комбінованого електропостачання від ЕЕС і розосередженого генерування, узгодження покриття графіка навантаження розосередженими джерелами, які в силу своїх фізичних особливостей можуть видавати потужність за різними графіками, оцінка впливу РДЕ на значення струмів короткого замикання і, відповідно, на роботу релейного захисту та автоматики, оцінка впливу на техніко-економічні показники РЕМ, тощо [2].

Вплив РДЕ на режими РЕМ суттєво залежить від значення сумарного розосередженого генерування в ній, від одиничної встановленої потужності РДЕ та їх типу, а також від їх місця під'єднання в електричній мережі (це можуть бути шини нижчої напруги підстанцій або відгалуження ліній електропередачі).

Крім того слід враховувати, що одночасно змінюються економічні умови функціонування електроенергетики як галузі, зокрема змінюється модель оптового ринку. У випадку реалізації електропостачання за двосторонніми договорами за участі РДЕ, коли останні видають потужність в електричну мережу, постає необхідність узгодження їх роботи з енергосистемою, від якої здійснюється централізоване живлення.

Це стає обов'язковим, коли встановлена потужність РДЕ в ЕМ складає суттєву частку від її сумарного навантаження (наприклад, 20% і більше). В цьому випадку РЕМ можна і доцільно розглядати як локальну електричну систему (ЛЕС), в якій окрім зазначених вище задач постають задачі дослідження статичної і динамічної стійкості РДЕ та інші, характерні для електричної системи [3].

Актуальною задачею є отримання максимального прибутку від експлуатації ВДЕ для їх розбудови за умови зменшення втрат електроенергії та покращення її якості в РЕМ, а також підвищення надійності електропостачання. При цьому, враховуючи що електроенергія від РДЕ передається лініями РЕМ одночасно з електроенергією інших джерел, то необхідно виділяти з сумарних втрат електроенергії ту частку, яка стосується транзиту від РДЕ [4].

**Аналіз досліджень і публікацій.** Кагортою науковців розглядається цілий ряд систем керування та контролю, що дозволяють зменшити та визначити гармонічне спотворення сигналів [1-14]. Завданням таких систем є наближення вихідної напруги інвертора до синусоїдального сигналу завдання з усуненням інших гармонічних складових. Значна увага дослідників присвячена системам повторюваного керування мережевими інверторами [8], що використовують прості навчальні методи, які дозволяють усунути періодичні похибки у динамічних системах з використанням внутрішньої моделі. Перевагою такого підходу є те, що при цьому може враховуватися велика кількість гармонійних складових, забезпечуючи низькі показники коефіцієнту загального гармонічного спотворення. Недоліком такого підходу є необхідність проведення значного обсягу експериментальних досліджень для визначення задаючих сигналів гармонік.

Між тим, важливою складовою аналізу способів поліпшення якості електричної енергії є з'ясування причин їх погіршення. Якщо розглядати питання якості електричної енергії у контексті коефіцієнту загального гармонічного спотворення струму, то актуальним напрямком розвитку даного питання є розвиток структур силових активних фільтрів [1-14].

**Постановка завдання.** Метою 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.

**Викладення матеріалу та результати.** Важливим напрямком впливу на втрати електроенергії у розподільних мережах є розосереджені джерел енергії (РДЕ). Очевидно, що на значення втрат в електричних мережах (ЕМ) впливають як параметри РДЕ, так і схеми їх приєднання. Тож, виходячи з типових схем приєднання РДЕ до розподільних мереж, за певних потужностей генерування вони частково компенсують потоки потужності, що зумовлені навантаженням споживачів, і надходження електроенергії з боку системи зменшується. Разом з цим зменшуються втрати електроенергії в розподільних мережах.

Якщо генератор під'єднаний до енергосистеми на підстанції, зміна напруги на будь-якій лінії, що живиться від цієї підстанції, менше 0,5% для найважчих досліджених умов. Якщо генератор приєднаний ближче до кінця лінії, різкі зменшення швидкості вітру та його пориви викликають коливання напруги у розподільній мережі, що дорівнює 2,2 %.

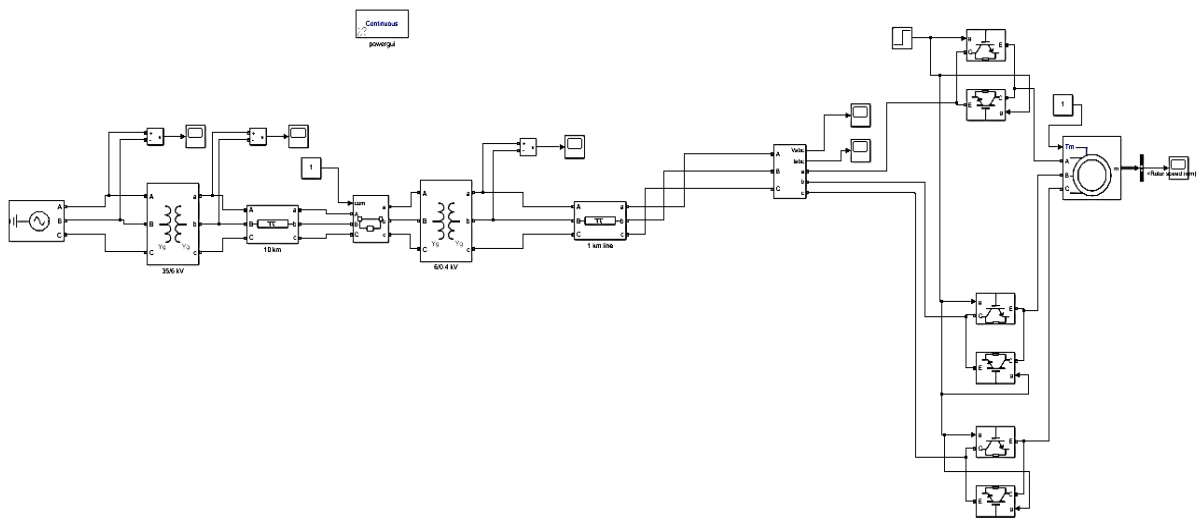
Допустимість зазначених відхилень напруги залежить від їх частоти, виду та від стандартів, встановлених для енергосистеми, до мереж якої підключається генератор. Оптимізація управління, пов'язаного зі зміною кута установки лопатей та регулювання напруги генератора, може зменшити коливання напруги в мережі. Мало ймовірно, що максимальні проектні пориви вітру можуть спричинити випадання генератора із синхронізму за типових умов його роботи.

Зниження напруги в мережі у зв'язку з підключенням до неї вітроенергетичних установок (ВЕУ) може виникнути в процесі пуску та зупинки ВЕУ та в результаті коливань їх потужності через зміни швидкості вітру. Для ВЕУ з синхронними генераторами зниження напруги, що відбувається при пуску, може бути повністю запобігти в результаті застосування автоматичної синхронізації, яка широко використовується в енергосистемах. У разі ВЕУ з асинхронними генераторами, причиною зниження напруги в мережі буде підключення до генераторів батареї конденсаторів, що використовуються для поліпшення  $\cos \phi$ .

Одновременні або незалежні флуктуації частоти і великі флуктуації напруги небажані для споживачів і повинні бути запобігти. Великі флуктуації напруги, зумовлені роботою ВЕУ, мо-

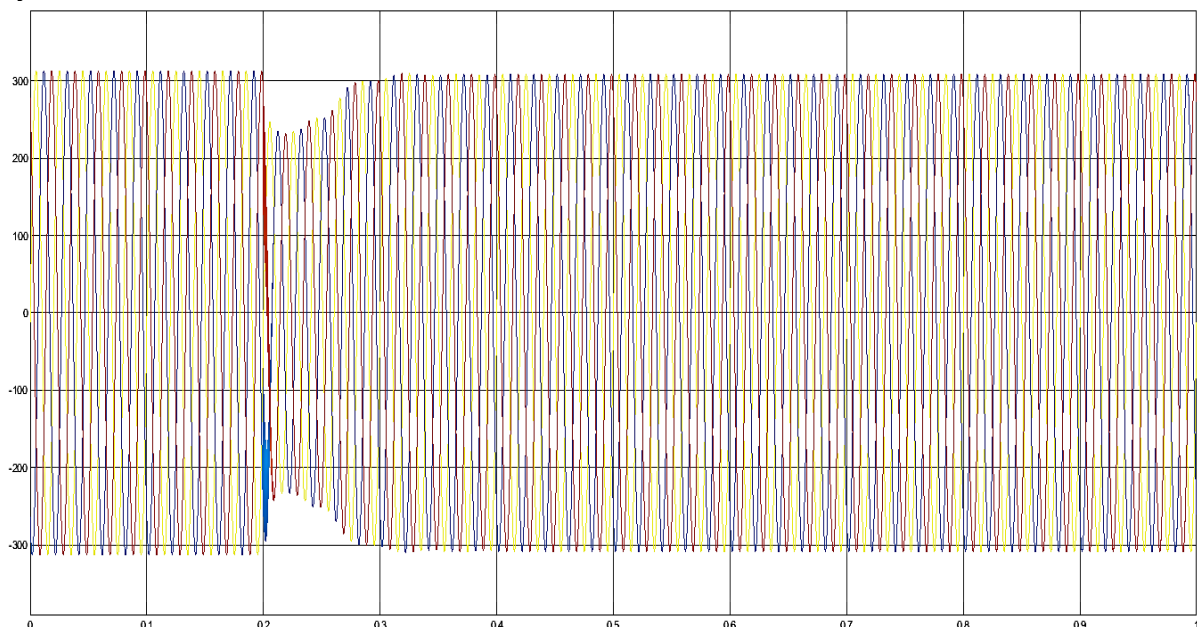
жна припустити, якщо вони трапляються рідко. Часті ж флуктуації напруги викликать претензії з боку споживачів енергосистеми, якщо коливання напруги не відповідатиме встановленим вимогам [9].

На рис. 2 представлено модель, побудовану в середовищі Mat Lab. До її складу входить загальна мережа 35 кВ, понижувальна трансформаторна підстанція 35/6 кВ, лінія протяжністю 10 км до понижувальної підстанції 6/0,4 кВ, понижувальна підстанція 6/0,4 кВ, лінія протяжністю 1 км до споживача електричної енергії, блок IGBT перетворювачів по 2 на кожну фазу та споживач електричної енергії, який представлено трифазним асинхронним двигуном 15 кВт.

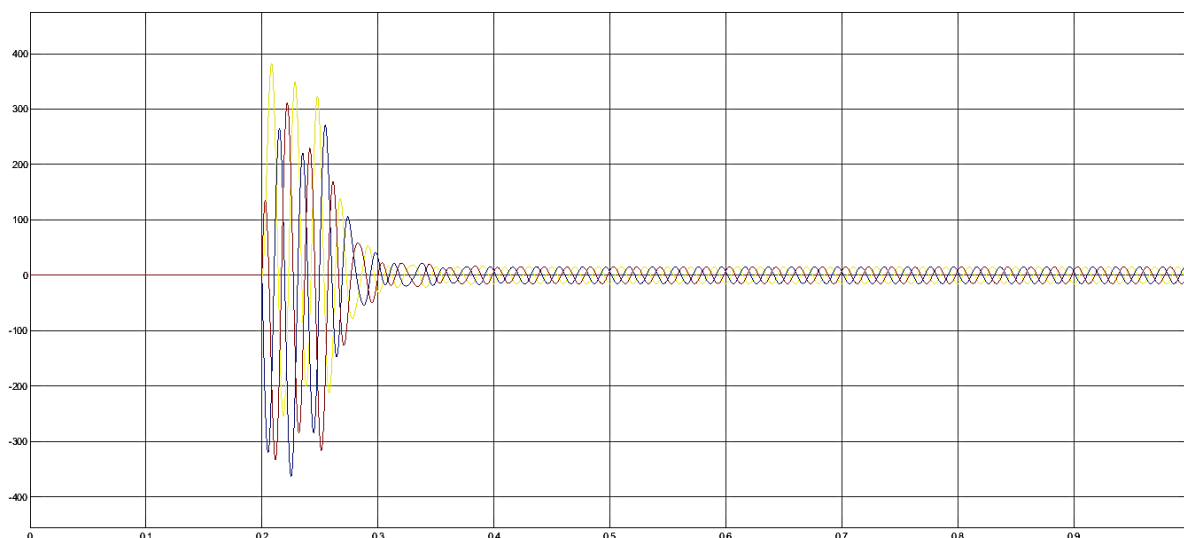


**Рис. 2.** Модель системи електропостачання навантаження промислового об'єкту 35/0,4кВ

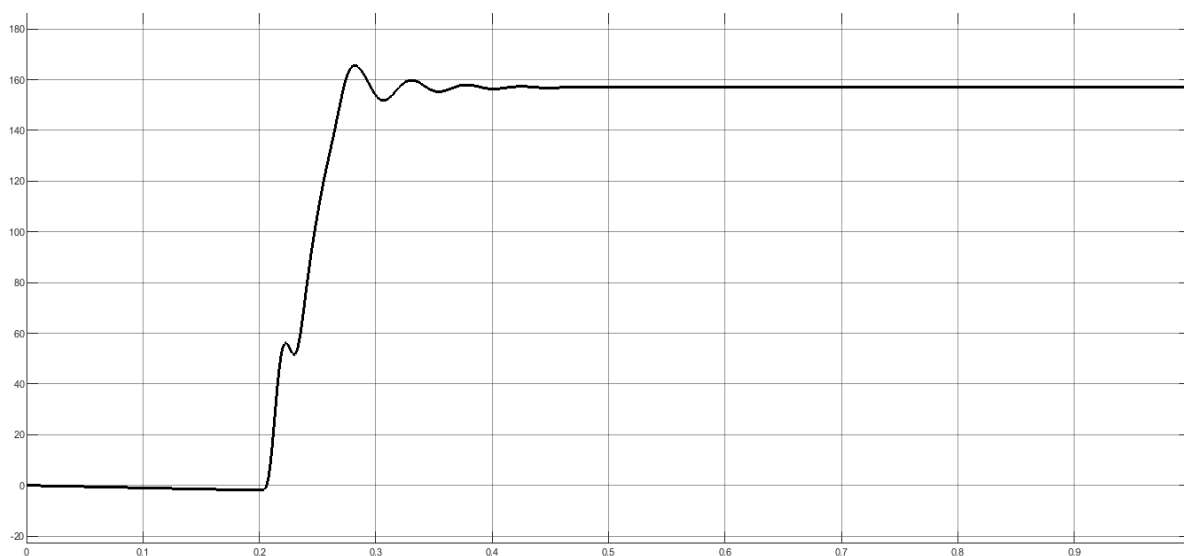
Таким чином, на рис. 3-5 можна спостерігати особливості впливу перехідних процесів одних із самих розповсюджених та потужних споживачів електричної енергії – електричних двигунів.



**Рис. 3.** Графік напруги на стороні 0,4 кВ навантаженням по фазам *a, b, c* (В)



**Рис. 4.** Графік струму на стороні 0,4 кВ навантаженням по фазам *a, b, c* (А)



**Рис. 5.** Графік швидкості обертів ротора асинхронного двигуна (пусковий режим) (проміжок перехідного процесу запуску двигуна) (об./хв.)

Як видно з рис. 3-5, перехідні процеси запуску електричних двигунів також мають місце саме на ділянці мережі до якої під'єднані. Перехідний процес не має суттєвого впливу на інші ділянки мережі на стороні вищої напруги і не поширюється в загальну мережу. Між тим, має суттєвий вплив на ділянку мережі до якої під'єднаний, негативно впливаючи на показники якості як складових струму так і складових напруги.

Між тим, з кожним роком інформаційно-комунікаційні технології (ІКТ) відіграють все більш важливе значення у житті людей, посилюючи при цьому свій вплив на соціально-економічний розвиток країни. Останнім часом широким попитом користуються як окремі телекомунікаційні сервіси (доступ до мережі Інтернет, відеоспостереження, віддалений контроль за опаленням, освітленням і т.д.), так і сучасні концепції, покликані автоматизувати певні побутові процеси, урізноманітнити дозвілля, спростити доступ до соціальних послуг і т.д. («розумний будинок» (Smart Home), «розумне місто» (Smart City) та «Інтернет речей» (IoT)).

Однак, необхідною умовою для використання потенціалу перелічених концепцій є наявність мереж швидкого доступу, здатних забезпечувати високу пропускну здатність. На сьогодні основою для побудови мереж швидкого доступу є телефонні мережі загального користування (ТМЗК), оптоволоконні мережі, кабельні мережі, мобільні та супутникові мережі, а також ме-

режі електричної проводки (технологія PLC). Кожна з них має свої переваги і недоліки, які обумовлюють доцільність їх використання в тих чи інших умовах. Зокрема, мережі електричної проводки (МЕР) використовують як середовище поширення сигналів при побудові інфраструктури згідно з концепцією «розумне місто» для організації сервісів віддаленого контролю за показаннями різноманітних датчиків, встановлених у будівлі, а також при розгортанні «розумного будинку».

Технологія PLC – перспективна телекомунікаційна технологія, яка, працюючи по силових електромережах, дозволяє організувати високошвидкісний інформаційний обмін. В залежності від швидкості передавання, PLC поділяється на широкосмугову (BPL) зі швидкістю більше 1 Мбіт/с і вузькосмугову (NPL).

Однак, за таких можливих варіантів підключення джерел розосередженої генерації до електричної мережі підприємства, та зважаючи на стохастичний характер функціонування відновлювальних джерел енергії, на потужностях яких мають вони базуватися слід приділити увагу аспектам якості електричної енергії, як локального показника, а не загального показника в мережі підприємства [10].

Таким чином, зважаючи на всі зазначені аспекти, умови та чинники запропоновано схему системи контролю та керуванням рівнем якості електричної енергії (рис. 6).

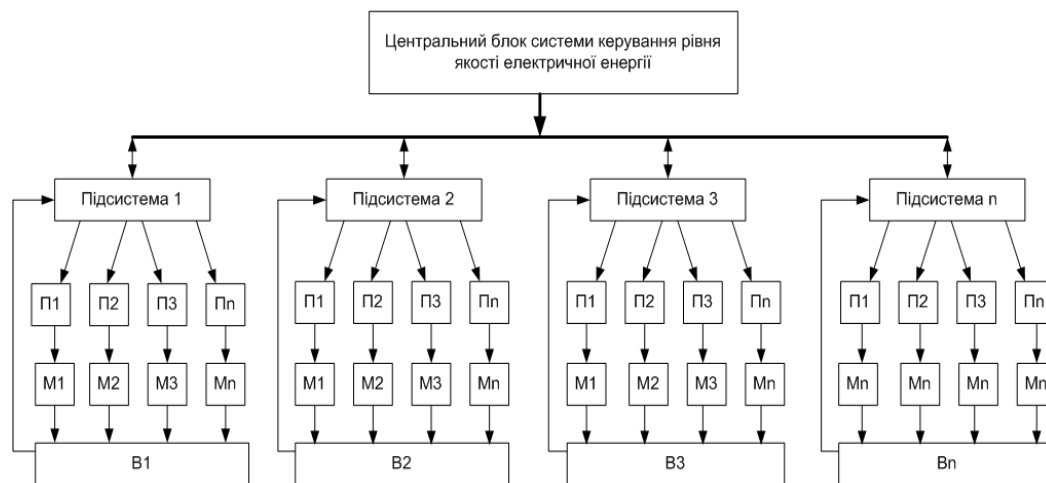


Рис. 6. Схема системи контролю та керування рівнем якості електричної енергії

На рис. 6 зображена запропонована схема системи контролю та керування рівнем якості електричної енергії, де В1-п – вимірювальні блоки відповідних показників якості електричної енергії в на ділянках мережі М1-п, що регулюються відповідними пристроями П1-п. Алгоритм дає можливість корегування відповідних показників якості електричної енергії централізовано-децентралізованим способом управління на відповідних ділянках мережі з підключенням розосереджених джерел електричної енергії на базі відновлювальних джерел енергії.

Враховуючи можливість адаптивного управління якістю електричної енергії у мережі централізовано-децентралізованим способом, є можливим впровадження технології PLC для передавання інформації у аспекті інтелектуалізації систем управління електропостачанням та впровадження технологій Micro Grid. Зважаючи на актуальність інтелектуалізації систем управління електропостачанням є можливим впровадження технології PLC для передавання інформації у Micro Grid, що позбавить труднощів з передачею управляючого сигналу та передачі даних до системи управління [2].

На основі дерева логічного висновку конструктивних і технологічних факторів змодельюємо структуру ієрархічної нейронечіткої мережі (рис. 7).

Кожен елемент цієї структури являє собою певний рівень логічного дерева впливу на якість системи електропостачання. Кожен елемент має терм-набір експертних оцінок, який вказується на вході параметрів у рядку: «Н – низький», «С – середній», «Н - високий».

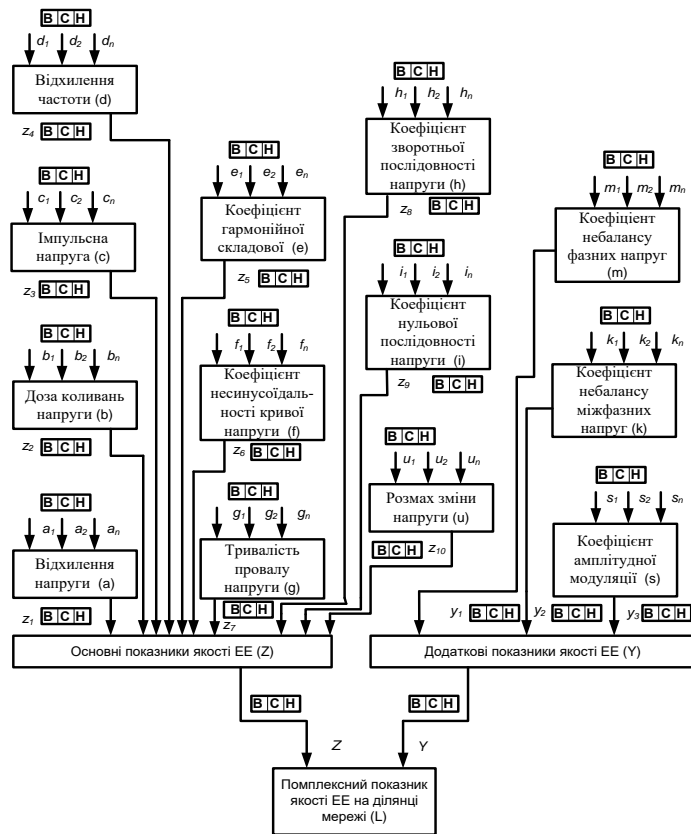


Рис. 7. Структура ієрархічної нейронечіткої мережі для визначення та контролю показників якості системи електропостачання

Фактори впливу, що впливають на якість системи електропостачання

$$L = f_L(Y, Z);$$

$$Z = f_z(z_1, z_2, z_3, z_4, z_5, z_6, z_7, z_8, z_9, z_{10}),$$

$$Y = f_Y(y_1, y_2, y_3);$$

$$z_1 = f_{z_1}(a_1, a_2, a_n),$$

$$z_2 = f_{z_2}(b_1, b_2, b_n),$$

$$z_3 = f_{z_3}(c_1, c_2, c_n),$$

$$z_4 = f_{z_4}(d_1, d_2, d_n),$$

$$z_5 = f_{z_5}(e_1, e_2, e_n),$$

$$z_6 = f_{z_6}(f_1, f_2, f_n),$$

$$z_7 = f_{z_7}(g_1, g_2, g_n),$$

$$z_8 = f_{z_8}(h_1, h_2, h_n),$$

$$z_9 = f_{z_9}(i_1, i_2, i_n),$$

$$z_{10} = f_{z_{10}}(u_1, u_2, u_n),$$

$$y_1 = f_{y_1}(m_1, m_2, m_n),$$

$$y_2 = f_{y_2}(k_1, k_2, k_n),$$

$$y_3 = f_{y_3}(s_1, s_2, s_n),$$

де  $Y$  - лінгвістична змінна, що описує основні показники якості електричної енергії;  $Z$  - лінгвістична змінна, що описує додаткові показники якості електричної енергії;  $Z_1$  - відхилення напруги;  $Z_2$  - доза коливань напруги;  $Z_3$  - імпульсна напруга;  $Z_4$  - відхилення частоти;  $Z_5$  - коефіцієнт гармонійної складової;  $Z_6$  - коефіцієнт несинусоїдальності кривої напруги;  $Z_7$  - тривалість про-

валу напруги;  $Z_8$  - коефіцієнт зворотної послідовності напруги;  $Z_9$  - коефіцієнт нульової послідовності напруги;  $Z_{10}$  - розмах зміни напруги;  $y_1$  - коефіцієнт небалансу фазних напруг;  $y_2$  - коефіцієнт небалансу міжфазних напруг;  $y_3$  - коефіцієнт амплітудної модуляції;  $a, b, c, d, e, f, g, h, i, u, m, k, s$  – відповідні параметричні входи показників якості електричної енергії на відповідних 1, 2, n ділянках розподільчої електричної мережі.

Лінгвістичній постановці, що описує вплив різних параметрів електричної мережі на якість системи електроживлення, відповідає наступна система рівнянь нечіткої логіки

$$\mu_H(e) = \mu_H(e_1) \wedge \mu_H(e_2) \wedge \mu_H(e_3) \vee \mu_H(e_1) \wedge \mu_H(e_2) \wedge \mu_H(e_3) \vee \mu_H(e_1) \wedge \mu_H(e_2) \wedge \mu_C(e_3),$$

$$\mu_C(e) = \mu_C(e_1) \wedge \mu_C(e_2) \wedge \mu_H(e_3) \vee \mu_H(e_1) \wedge \mu_C(e_2) \wedge \mu_E(e_3) \vee \mu_C(e_1) \wedge$$

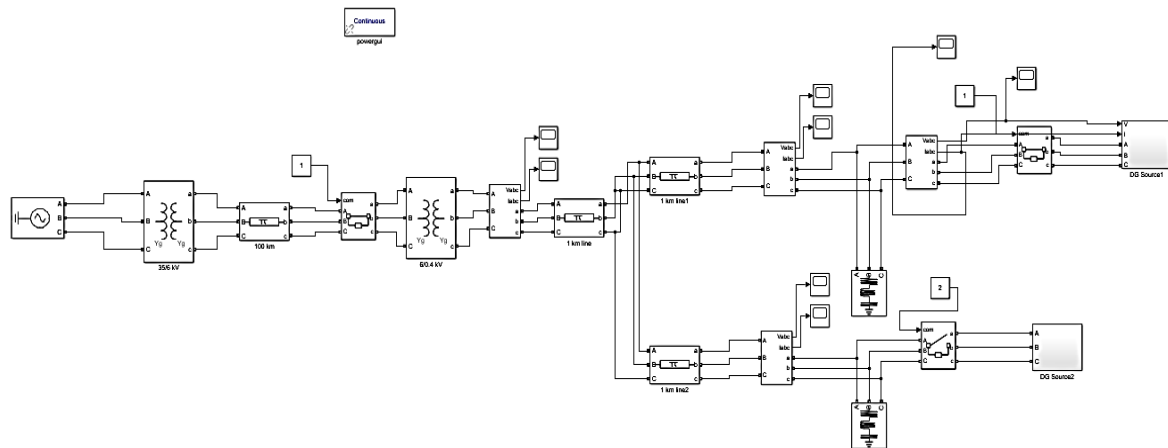
$$\wedge \mu_H(e_2) \wedge \mu_E(e_3) \vee \mu_C(e_1) \wedge \mu_C(e_2) \wedge \mu_H(e_3) \vee \mu_H(e_1) \wedge \mu_E(e_2) \wedge \mu_C(e_3) \vee \mu_E(e_1) \wedge$$

$$\wedge \mu_H(e_2) \wedge \mu_C(e_3) \vee \mu_C(e_1) \wedge \mu_C(e_2) \wedge \mu_E(e_3),$$

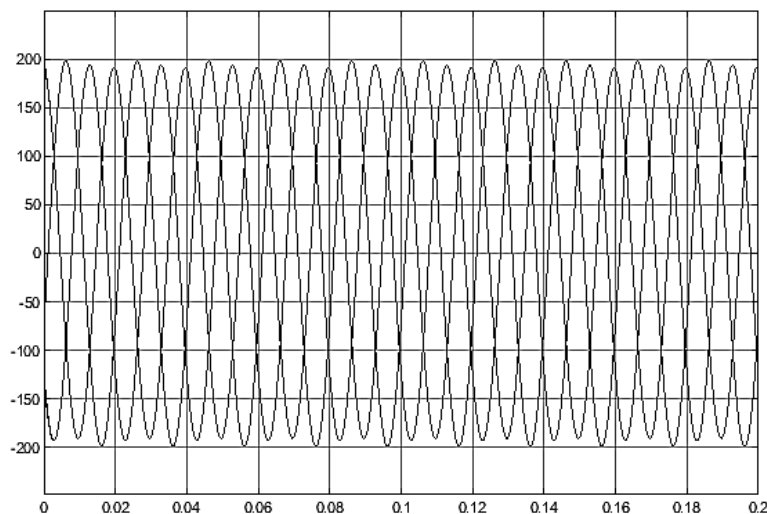
$$\mu_2(e) = \mu_E(e_1) \wedge \mu_C(e_2) \wedge \mu_E(e_3) \vee \mu_E(e_1) \wedge \mu_C(e_1) \wedge \mu_C(e_3) \vee \mu_E(e_1) \wedge \mu_E(e_2) \wedge \mu_E(e_3).$$

Отримана база знань щодо зв'язків нечітких термів вхідних і вихідних лінгвістичних змінних дозволяє оптимізувати керуючий сигнал системи управління та контролю якості електричної енергії за відповідними показниками у зазначених контрольованих ділянках розподільчої мережі.

Результати моделювання системи електропостачання з використання джерел розосередженої генерації наведені на рис. 8-10.



**Рис. 8.** Модель системи електропостачання у середовищі Matlab/Simulink з використання одного джерела розосередженої генерації



**Рис. 9.** Графік напруги фаз А, В, С 0,4 кВ після фільтру (В)



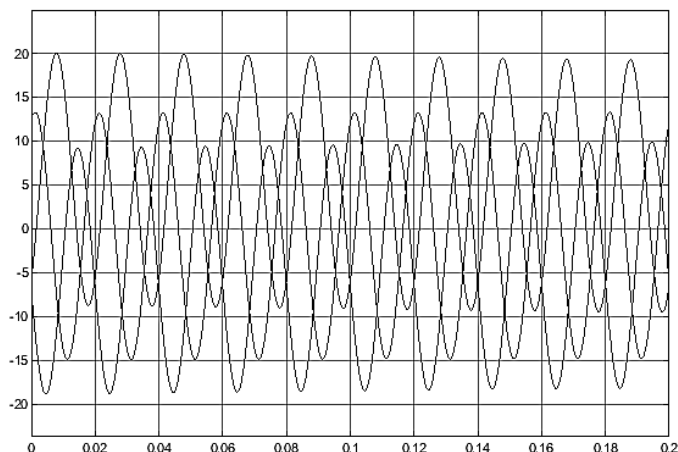


Рис. 10. Графік струму фаз А, В, С 0,4 кВ після фільтру (А)

Наведені результати моделювання вказують на можливість впровадження сучасних систем передачі керуючих сигналів силовими розподільчими мережами залізничних підприємств.

**Висновки та напрямок подальших досліджень.** У статті запропоновано підхід щодо вирішення наукового 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 залізничних підприємств.

Враховуючи актуальність та необхідність застосування технології PLC для передавання інформації у Micro Grid залізничних підприємств є необхідність впровадження адаптивного керування якістю електричної енергії у мережі цих підприємств централізовано-децентралізованим способом, з метою підтримання належного рівня показників якості електричної енергії в мережі.

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.

#### Список літератури

1. Енергоефективність та відновлювальні джерела енергії / Під заг. ред. **А. К. Шидловського**. – К.: Українські енциклопедичні знання, 2007 – 560 с.
2. **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.
3. **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.
4. **Кириленко, В.В. Павловський, Л.М. Лук'яненко.** Технічні аспекти впровадження джерел розподільної генерації в електричних мережах. – Технічна електродинаміка. 2011. № 1. – С. 46-53
5. **Жежеленко И.В., Саенко Ю.Л.** Качество электроэнергии на промышленных предприятиях. – М.: Энергоатомиздат, 2005. – 261 с.
6. Аналіз споживання електроенергії з контролем якості в розподільних мережах / **О. Г. Гриб, Ю. О. Сиротин, Д. А. Гапон, А. В. Дяченко, Т. С. Йерусалимова, О. В. Бортніков** // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка. Технічні науки. – Харків : ХНТУГС, 2015. – С. 9–10.
7. **Козакевич І.А.** Система енергоефективного керування динамічним компенсатором викривлень напруги / **І.А. Козакевич, А.А. Кондратенко** // Гірничий вісник. – 2019. – Випуск 105. С. 154-159.
8. **Козакевич І.А.** Система керування вентилями реактивними двигунами / **І.А. Козакевич, І.І. Шевченко** // Гірничий вісник. – 2017. – Випуск 102. С. 135-138.
9. **Сінчук І.О.** Превентивна оцінка і основні напрями підвищення енергоефективності підземних залізничних підприємств / **І.О. Сінчук, І.А. Козакевич, М.Л. Барановська, Т.М. Берідзе, І.І. Пересунько** // Вісник Криворізького національного університету. Збірник наукових праць. – Кривий Ріг, 2020. – Вип. 50. С. 142-147.
10. **Jahanbakhshi M.** A novel deadbeat controller for single phase PV grid connected inverters / **M. Jahanbakhshi, B. Asaei, V. Farhangi** // 23rd Iranian Conference on Electrical Engineering. – Tehran, 2015. – Pp. 1613-1617.
11. **Kanai N.** A Study of Quasi Multi-rate Deadbeat Control for Modular Multi-level Converter using FPGA based Hardware controller / **N. Kanai, S. Kurita, T. Ando and T. Yokoyama** // IEEE 4th International Future Energy Electronics Conference (IFEEEC). – Singapore, Singapore, 2019. – Pp. 1-5.

12. **Tao Y.** Deadbeat Repetitive Control for a grid-connected inverter with LCL Filter / **Y. Tao, C. Tan, Q. Chen, L. Zhang, K. Zhou, L. Liu** // IEEE 15th International Conference on Control and Automation (ICCA). – Edinburgh, United Kingdom. – 2019. – Pp. 573-577.

13. **Ueta H.** 1MHz multisaampling deadbeat control with disturbance compensation method for three phase PWM inverter / **H. Ueta, T. Yokoyama** // International Power Electronics Conference (IPEC-Niigata 2018 -ECCE Asia). – Niigata, 2018. – Pp. 1883-1889.

14. **Xing Y.** An improved deadbeat plus plug-in repetitive controller for three-phase four-leg inverters / **Y. Xing, C. Tan, Q. Chen, L. Zhang, K. Zhou** // IECON 2017 - 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. – Beijing, 2017. – Pp. 6325-6329.

Рукопис подано до редакції 29.09.23

УДК 621.311:620.92

О.А. ШРАМ, канд. техн. наук, доц., Ю.Г. КАЧАН, д-р техн. наук, проф.  
Національний університет «Запорізька політехніка»

## **ВИЗНАЧЕННЯ ДОЦІЛЬНИХ ЗАСОБІВ НАКОПИЧЕННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В МЕРЕЖАХ ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ**

**Метою дослідження** є аналіз сучасних способів накопичення електроенергії, які можуть бути використані в мережах промислових підприємств та визначення доцільності їх застосування.

**Методи дослідження.** У статті використано теоретичні та емпіричні загальнонаукові методи дослідження, опис, аналіз та узагальнення тощо.

**Наукова новизна.** В роботі представлено аналіз доцільності використання різних засобів накопичення електричної енергії в мережах промислових підприємств з метою зменшення перетоків енергії при використанні відновлюваних джерел.

**Практична значимість** дослідження полягає в визначенні доцільних засобів накопичення електроенергії в мережах промислових підприємств, оскільки дає можливість зменшити небажані двонаправлені перетоків енергії та знизити її втрати.

**Результати дослідження.** В статті розглянуто сучасні способи накопичення електроенергії, які можуть бути використані в мережах промислових підприємств. До них відносяться акумуляторні батареї, двошарові електростатичні конденсатори, гідроакумуляуючі станції та водневі установки. Проведений аналіз технічних параметрів різних типів літєвих акумуляторних батарей показав, що використання цього засобу накопичення ускладнене через проблеми організації плаваючого заряджання та неможливості роботи в режимі струмових перевантажень. Використання суперконденсаторів в якості накопичувачів енергії обмежено значною питомою вагою високою вартістю. В той же час паралельна робота суперконденсаторів разом з акумуляторними батареями дозволяє суттєво покращити експлуатаційні характеристики останньої. Проведено аналіз використання гідроакумуляуючих станцій в мережах з відновлюваними джерелами енергії. Зазначено, що для ефективної роботи гідроакумуляуючої станції на території підприємства необхідно вирішити проблему накопичення великої кількості води. Високий потенціал щодо ефективного зберігання енергії мають новітні натепер водневі накопичувачі.

В статті розглянуто сучасні способи перетворення водню в електричну енергію за допомогою твердооксидних паливних елементів. Представлено технічні характеристики паливних комірок найбільш крупних виробників США, Канади, Німеччини, Японії, Південної Кореї.

**Ключові слова:** накопичувач енергії, відновлювані джерела енергії, паливна комірка, воднева енергетика, суперконденсатор, електрична енергія.

doi: 10.31721/2306-5451-2023-1-57-52-59

**Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями.** Значні коливання обсягів споживання енергії в електромережах промислових підприємств, а також зростаючі обсяги впровадження ними у якості власних розосереджених на їх території додаткових джерел останньої, таких як вітро- й геліоустановки, призводить до значних і небажаних двонаправлених перетоків енергії, надто великих коливань потужності, погіршення електромагнітної сумісності у мережах, тощо [1]. Обсяги генерації зазначених джерел мають випадковий характер через залежність від конкретних погодних умов, тож їх використання без можливості накопичення достатньо великої кількості енергії є проблематичним.

Місце розташування зазначених накопичувачів у промислових електромережах може бути або безпосередньо біля вітроустановки чи сонячної електростанції, або у місцях найбільших перетоків енергії. Все це залежить від обсягів такої генерації та потужності її споживачів на конкретному підприємстві.