

ЕНЕРГЕТИЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

ENERGY EFFICIENCY AND ENERGY SAVING

УДК 621.31

DOI 10.20535/1813-5420.1.2024.297508

О.В. Кириленко¹, академік НАН України, ORCID 0000-0003-3610-7670

С.П. Денисюк², д-р техн. наук, проф., ORCID 0000-0002-6299-3680

І.В. Блінов^{1,2}, д-р. техн. наук, проф., ORCID 0000-0001-8010-5301

¹Інститут електродинаміки НАН України

²Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ЕНЕРГЕТИЧНИЙ МЕНЕДЖМЕНТ: НОВІ ПРІОРИТЕТИ XXI СТОЛІТТЯ

Розглянуто розвиток методології менеджменту, поняття енергоменеджменту у сучасних умовах трансформації енергетичного сектору згідно вимог безвуглецевої економіки. Розкрито нові якісні риси, нові сфери застосування енергетичного менеджменту та систем енергетичного менеджменту (СЕМ) при здійсненні енергетичного переходу та реалізації концепції Smart Grid. Встановлено, що сучасний енергетичний менеджмент – це проактивна, організована та систематична координація закупівлі, перетворення, розподілу та використання енергії для задоволення вимог, беручи до уваги екологічні та економічні цілі. На відміну від формування СЕМ згідно серії стандартів ISO 50000, сьогодні набуває актуальності побудова СЕМ, яка забезпечує системну (комплексну) оптимізацію параметрів, структури та режимів різноманітних технічних об'єктів за сукупністю технічних, економічних та екологічних критеріїв.

Показано, що СЕМ – це набагато більше, ніж просте технічне рішення для моніторингу параметрів та стану енергетичних систем. Завдяки всебічним прогнозам попиту на енергію та пропозиції ця система виводить управління енергією на абсолютно новий рівень, дозволяючи операторам об'єкту (підприємств, будівель і інтелектуальних мереж та систем) визначати стратегічний напрямок управління енергією, здійснювати його реалізацію та досягати цілей як енергоефективності, так і енергетичної доступності та екологічності (соціальності) прийнятності. Охарактеризовано складові СЕМ для Smart Grid, зокрема: моніторинг (фактичне виробництво енергії, фактичний попит на енергію, стан заряду накопичувача для зберігання енергії, невизначеність ціни); прогноз (виробництво енергії, попит на енергію, мобільне зберігання даних, невизначеність); керування якістю електроенергії (мінімізація втрат, показники якості електроенергії, надійність / комфортність); планування / диспетчеризація / вартість (операційні витрати, зменшення викидів ПГ, максимізація прибутку).

Запропоновано, що перспективним напрямком є розгляд СЕМ як системи інформаційно-комунікаційних технологій, яка на системному рівні поєднується з силовими енергетичними процесами, що використовуються операторами електроенергетичних систем та мереж для моніторингу, контролю та оптимізації продуктивності виробництва, передачі та споживання енергетичних ресурсів у системах різного ієрархічного рівня (як ОЕС України, так регіональних та локальних системах, на конкретних енергетичних об'єктах чи окремих енерготехнологіях тощо). На основі аналізу перспективних сфер застосування СЕМ на об'єктах енергетичного сектору визначено сучасні сфери науково-технічних досліджень при побудові систем енергоменеджменту для енергетичних, електроенергетичних та електротехнічних систем, які доцільно здійснювати в Україні.

Ключові слова: енергетична трансформація, менеджмент, енергоменеджмент, системи енергетичного менеджменту, Smart Grid.

Вступ

На сьогодні формування безвуглецевої енергетики характеризується наступними ознаками енергетичної трансформації [1, 2]:

1) перехід до більш гнучкої архітектури енергетичних систем за рахунок зростання частки джерел розосередженої генерації (ДРГ), у тому числі й відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), в енергобалансі, розвитку інтелектуальних мереж [3] і систем (Smart Grid) у взаємозв'язку з вдосконаленням технологій та ринку систем накопичення енергії (СНЕ), появи активних споживачів (prosumer та prosumage);

2) перехід до нового пакету технологій: генерація електроенергії на базі ВДЕ, застосування пристроїв силової електроніки, СНЕ, водневої енергетики, цифрових платформ (Cloud-технології) та великих даних (Big Data), Інтернету речей (Internet of Things), фінансових технологій з розширеними можливостями, зокрема, блокчейн;

3) перехід до нових бізнес-моделей електроенергетики: від традиційного ланцюжка формування доданої вартості «генерація – трейдинг – передача – збут» до моделі «Інтернету енергії» (Internet of Energy) та надання послуг у sms-середовищі, а також перехід до розвитку нових сервісів типу «Energy as a Service» для систем «виробник – споживач» енергії;

4) трансформація системи регулювання ринку електроенергетики [4], зокрема, перехід від підтримки ВДЕ і конкуренції на ринку електроенергії до пріоритету підтримки споживача, перехід до «гнучкого» ринку, інтеграції локальних рішень, а також від постачання енергії до створення енергетичних хабів.

Доступна та чиста енергія (Affordable and Clean Energy) значиться серед сімнадцяти Цілей сталого розвитку (Sustainable Development Goals) Програми розвитку ООН.

Сучасний розвиток енергетичного сектору можемо охарактеризувати як поетапну реалізацію концепції 3D (Decarbonization, Decentralization, Digitalization), складові якої передбачають [1, 2, 5]:

Декарбонізація (Decarbonization) – відмова від традиційних джерел енергії (виплоного палива: нафти, кам'яного вугілля, природного газу, торфу та ін.) та перехід на ВДЕ, нові технології накопичення енергії; створення нових ринків для ВДЕ-генерації та нових способів збереження надлишку електроенергії;

Децентралізація (Decentralization) – нарощування частки ДРГ (включаючи ВДЕ, накопичувачі енергії тощо), які утворюють локальні кластери виробництва / споживання та підключені до загальної мережі чи працюють автономно, а також впровадження нових додатків спрямованих на розширення меж та динаміки розвитку енергетичної системи;

Діджиталізація (Digitalization) – перехід до реалізації концепції Smart Grid електричних мереж, створення та впровадження нових бізнес-моделей, сервісів та ринків на основі цифрових технологій; використання нових методів керування, що орієнтовані на покращення постачання від ВДЕ-генерації, зменшення впливу мережових обмежень, знижуючи необхідність посилення мережі та полегшуючи умови участі такої генерації на ринку, посилення гнучкості електроенергетичної системи.

При переході від енергетичних систем, заснованих на виплоному паливі, до інтелектуальних і стійких енергетичних систем можемо виділити дві сторони процесів [6]:

– цифровий перехід (Digital Transition) – інструменти та рішення: штучний інтелект (Artificial Intelligence, AI), великі дані, Інтернет речей, інтелектуальні датчики, онлайн-платформи, багатофункціональні пристрої, машинне навчання, цифрові близнюки;

– енергетичний перехід (Energy Transition) – інструменти та рішення: вітрова та сонячна енергетика, «зелений» водень, теплові насоси, енергозбереження, заходи з енергоефективності.

Складові інтелектуальних та стійких енергетичних систем близького майбутнього:

– революція із застосуванням ВДЕ: гнучкі енергетичні системи, децентралізоване виробництво електроенергії, покращення керування ВДЕ та мережевою інфраструктурою.

– енергозбереження та ефективність: ефективне керування, кращі будівлі, вдосконалені промислові процеси, чистіший і розумніший транспорт та мобільність, сталі високоефективне сільське господарство.

Це все поєднується ефективним керуванням як силовими, так і інформаційними процесами. На сьогодні технологічний прогрес у розвитку технологій генерації, передачі та споживання електроенергії окремих об'єктів обумовлює визначення як перспективного напрямку побудову багатофункціональних систем керування, які отримали назву енергетичного менеджменту.

Проведений аналіз підтверджує, що формування сучасних інтелектуальних енергетичних та електроенергетичних систем різноманітного призначення базується на такому важливому елементі як керування – менеджменті, який в сучасних умовах набуває нових рис, складових та сфер застосування. У нашій країні на сьогодні такий підхід реалізується в рамках «Концепції впровадження «розумних мереж» в Україні до 2035 року», схваленої розпорядженням КМУ від 14 жовтня 2022 р. № 908-р.

Тенденції розвитку теорії енергоменеджменту та власне особливості застосування енергоменеджменту, зокрема, формування системи енергетичного менеджменту (СЕМ) [Energy Management System (EMS)] в енергетичних та електроенергетичних системах розглядаються в статті.

1. Загальна характеристика методології менеджменту

Менеджмент (англ. Management – управління, система управління) – це сукупність сучасних технологій, принципів, методів, засобів та форм діяльності, спрямованих на підвищення ефективності роботи різних об'єктів, зокрема, підприємств чи електроенергетичних систем [7–10]. Надалі будемо використовувати як аналог терміну менеджмент два визначення:

– управління – менеджмент загальних систем (підприємства, організації, установи із залученням людини);

– керування – менеджмент технічних систем (енергетичних, електроенергетичних та електротехнічних).

Менеджмент представляється як процес, завершальною або результативною точкою якого є конкретний результат у вигляді отриманої продукції та досягнутих результатів. Менеджмент є системою, що складається з окремих частин, елементів, структура яких спрямована на обробку ресурсів, які входять до її складу, та їх трансформація в кінцевий результат.

Концепцію менеджменту варто комплексно розглядати як теоретичну платформу управління [7]. Можемо виділити наступні підходи до менеджменту: процесний, функціональний, системний, ситуаційний, холистичний.

Процесний підхід трактує управління як серію безпосередніх взаємопов'язаних дій. Ці дії, кожна з яких сама по собі вже є процесом, значною мірою визначають успіх діяльності організації. Вони дістали назву «управлінські функції». Процесний підхід базується на визначенні функцій менеджменту, які розглядаються як взаємопов'язані. Управління сприймається як процес, як серія безперервних взаємозалежних дій. Ці дії, кожна з яких також є процесом, називають управлінськими функціями. Сума всіх функцій і є процесом управління. Процес управління містить функції планування, організування, мотивації, контролювання та регулювання [7, 8].

Функція планування передбачає рішення про те, якими мають бути цілі об'єкта (організації, підприємства) і що слід зробити, щоб досягти їх. Передусім треба відповісти на такі питання: стан справ, бажані результати, шляхи досягнення їх. Планування – це один з способів, за допомогою якого керівництво спрямовує зусилля всіх членів колективу на досягнення його загальних цілей.

Функція організування. Організувати – означає створити деяку структуру з метою досягнення певної мети. Сюди входить розподіл функцій між елементами об'єкта (системи), делегування завдань і повноважень. Функція організування забезпечує організованість, дисципліну, відповідальність за покладені функціональні обов'язки на рівні підприємства як об'єкта.

Функція мотивування. Керівник має завжди пам'ятати, що навіть прекрасно складений план, найдосконаліша структура організації втрачають зміст, якщо працівники не виконують доручену їм роботу або виконують її неякісно, безініціативно. Функція мотивування спрямована на забезпечення виконання працівниками підприємства делегованих їм обов'язків. Для цього на об'єкті (підприємстві) мають бути створені умови для матеріальної та моральної зацікавленості працівників у виконанні робіт.

Функція контролювання – це процес забезпечення досягнення об'єктом своїх цілей. Існує три аспекти управлінського контролю: встановлення стандартів, зміни того, що було фактично досягнуто за відповідний період, порівняння досягнутого з очікуваним результатом. Розглянуті функції управління мають загальну характеристику: всі вони потребують прийняття рішення. Тому прийняття рішення і комунікації належать до сполучних процесів управління [8].

Функція регулювання – вид управлінської діяльності, спрямований на усунення відхилень, збоїв, недоліків тощо в керованій системі шляхом розроблення і впровадження керуючою системою відповідних заходів.

Особливість регулювання полягає в тому, що, на відміну від функцій планування, організування та мотивування, які удосконалюються безпосередньо в керуючій системі організації, регулювання, як і контролювання, вдосконалюється у керуючій та керованій системах.

Системний підхід. Система розглядається як деяка цілість, що складається із взаємозалежних частин (сукупність взаємопов'язаних елементів), кожна з яких певною мірою характеризує ціле та має розглядати об'єкт (наприклад, підприємство) зі складниками, як люди, структура, завдання, технологія, що орієнтовані на досягнення певних цілей і тісно переплетені з зовнішнім світом (кожен із яких робить свій внесок у характеристику цілого об'єкта, є системами в управлінні). Вихідним положенням системного підходу є поняття мети, наявність якої – найважливіша ознака високого рівня об'єкта, яким дана система відрізняється з інших. Системний підхід – спосіб мислення щодо організації дій чи управління, а не набір принципів для управляючих.

Типи систем: закриті – мають жорсткі фіксовані межі, її дії незалежні від навколишнього зовнішнього середовища; відкриті – характеризуються взаємодією з навколишнім (зовнішнім) середовищем та здатні адаптуватися (приспосовуватися) до нього.

Ситуаційний підхід ґрунтується на тому, що пріоритетність методів управління визначається ситуацією. Через те, що існує низка визначальних складників як у самому об'єкті, так і у зовнішньому середовищі, не існує єдиного «кращого» методу управління. Щодо конкретної ситуації найефективнішим є той, що найбільш повно відповідає її суті.

Функціональний підхід. Поставлена задача менеджменту розглядається як сукупність функцій, які необхідно виконувати для задоволення управляючої системи. Після визначення необхідних управлінських функцій розробляється декілька альтернативних варіантів і обирається кращий з них. При впровадженні функціонального підходу йдуть від зворотнього – від необхідних результатів.

Холистичний підхід передбачає розуміння взаємовідносин між суб'єктами як системи, де кожен

компонент впливає на ефективність всього ланцюга. Складові холистичного підходу: вища пріоритетність цілого над його складовими; активність стосовно елемента, виходячи із змісту цілого; встановлення змісту складової за рахунок вивчення її зав'язків в межах цілого; уточнення властивостей одного із елементів шляхом вивчення природи усіх інших складових; застосування заходів, що впливають на фізичну та інформаційну складові об'єкта керування.

На сьогодні постала загальноприйнятою так названа піраміда менеджменту (див. рис. 1) [9, 10]:

- **Верхній рівень** – інституційний рівень (управління вищої ланки (Top Management));
- **Середній рівень** – управлінський рівень (управління середньої ланки (Middle Management));
- **Нижній рівень** – технічний рівень (управління низової ланки (Down Management)).



Рисунок 1 – Піраміда менеджменту

При розгляді об'єкта, як технічної системи, знайшли свій розвиток (сформувались) такі напрямки менеджменту як інженерний, технічний та технологічний [10–13].

Інженерний менеджмент (англ. Engineering Management) – галузь менеджменту і наукова дисципліна, яка вивчає та застосовує інженерні принципи в плануванні і оперативному управлінні в промисловості та на виробництві. Інженерний менеджмент поєднує в собі управлінську, технічну, наукову, економічну та правову складові.

Технічний менеджмент – це систематичні дії, які здійснюються для розгортання системи або процесу та для збалансування їх вартості, ефективності та можливості підтримки протягом життєвого циклу, метою якого є збільшення терміну експлуатації інженерних мереж і конструктивних елементів об'єкта, підвищуючи їх експлуатаційні якості за рахунок своєчасного обслуговування та профілактичних заходів, що, в свою чергу, збільшує термін їх експлуатації, а відповідно й прибутковість об'єкта.

Технологічний менеджмент – управління технологічними ресурсами елементів об'єкта: виявлення та комерційна оцінка технологічних можливостей; управління дослідженнями та розробками; інтеграція технології у спільну діяльність компанії; стратегічне керування інтелектуальною власністю; підтримка конкурентоспроможності, просування ринку нових продуктів; управління поточними та радикальними інноваціями; управління життєвим циклом продукту та асортиментом продукції, у тому числі управління процесами заміни застарілих технологій та обладнання; формування інноваційної культури персоналу; управління якістю продукції; управління інтелектуальною власністю тощо.

При реалізації завдань менеджменту реалізується цикл Демінга PDCA (Plan – Do – Check – Act) як чотириетапний підхід до вдосконалення (безперервного поліпшення процесів) процесів і завдань [14, 15]:

Проектування: формалізація стратегії, проектування бізнес-процесів, проектування організаційної структури, імітаційне моделювання та функціонально-вартісного аналізу, розробка технічного завдання на впровадження системи;

Впровадження: формування регламентуючої документації (алгоритмів), доведення документації до співробітників (елементів системи);

Контроль: контроль показників, контролінг бізнес-процесів з урахуванням даних систем;

Аналіз: аналіз показників, аналіз невідповідностей та його наслідків.

Реалізація циклу PDCA вимагає приділяти значну увагу особливостям визначення поняття «процедури» та «процесу»:

Процедура – дія чи взаємопов'язана послідовність дій для отримання вигоди або виконання зобов'язання.

Процес (лат. Processus – рух; англ. Process, нім. Prozess):

– послідовна зміна предметів і явищ, що відбувається закономірним порядком;

– сукупність ряду послідовних дій, спрямованих на досягнення певного результату;

– послідовна зміна станів об'єкту в часі.

Так, «**виробничий процес**» (англ. Manufacturing Process) – це систематичне та цілеспрямоване змінювання в часі й просторі кількісних та якісних характеристик засобів виробництва і робочої сили, для отримання готової продукції з вихідної сировини, згідно із заданою програмою; «**технологічний процес**» – частина виробничого процесу, сукупність технологічних операцій, які виконуються планомірно й послідовно в часі та просторі над однорідними або аналогічними предметами, у результаті яких змінюється агрегатний стан, місце розташування чи властивості предмета праці, що має закінчений за виробничим призначенням характер.

2. Загальне поняття енергоменеджменту: вітчизняний та закордонний досвід

Ще у 1994 р. **Законом України «Про енергозбереження»** (Відомості Верховної Ради України (ВВР), 1994, № 30, ст.283) (м. Київ 1 липня 1994 року № 74/94-ВР); {Закон втратив чинність на підставі Закону № від 21.10.2021} було унормовано низку понять та визначень. Так, було визначено, що «**енергозбереження**» – це діяльність (організаційна, наукова, практична, інформаційна), яка спрямована на раціональне використання та економне витрачання первинної та перетвореної енергії і природних енергетичних ресурсів в національному господарстві і яка реалізується з використанням технічних, економічних та правових методів [16].

Згідно Закону України «Про енергозбереження» **менеджмент з енергозбереження** – це система управління, спрямована на забезпечення раціонального використання споживачами паливно-енергетичних ресурсів (система управління, яка забезпечує роботу суб'єкта господарювання, при якій споживається тільки необхідна для виробництва кількість палива і енергії).

Система енергетичного менеджменту – частина загальної системи управління підприємством, яка включає в себе організаційну структуру, функції управління, обов'язки та відповідальність, процедури, процеси, ресурси для формування, впровадження, досягнення цілей політики енергозбереження.

У подальші 10 – 15 років в Україні в залежності від сфери застосування було сформована та застосовувалась низка визначень, які характеризували енергетичний менеджмент з різних сторін [14–16].

Енергетичний менеджмент є ефективним інструментом для підвищення конкурентоздатності підприємства, шляхом скорочення видатків на придбання енергетичних ресурсів і їх нераціональних втрат.

Енергоменеджмент – це система, що включає: моніторинг енергоспоживання; аналіз існуючих показників як основи для складання нових бюджетів та розрахунків; розроблення інноваційних, безвідходних, та прибуткових технологій; планування нових енергозберігаючих заходів, їх розроблення та впровадження; організацію впровадження систем енергетичного менеджменту у економіку країни.

Енергетичний менеджмент – це постійно діюча система керування енергоспоживанням, яка дозволяє значно оптимізувати обсяги енерговитрат, прогнозувати і контролювати процеси вироблення, транспортування та використання необхідної кількості енергоресурсів для забезпечення господарської діяльності об'єктів.

Енергетичний менеджмент – це управлінська і технічна діяльність персоналу об'єкту господарювання, що направлена на раціональне використання енергії, із врахуванням соціальних, технічних, економічних і екологічних аспектів з метою забезпечення ефективних шляхів реалізації енергозберігаючої стратегії суб'єкту господарювання.

Енергетичний менеджмент як наука розглядався за низкою напрямів, зокрема [14, 15]: організація обліку енергоносіїв і забезпечення споживачів постійної інформацією про рівень споживання; моніторинг ринку передових технологій та енергоефективного обладнання; організація енергетичного аудиту; складання енергобалансів та розробка раціональних схем виробництва, транспортування, зберігання та споживання енергоносіїв з мінімальними втратами та фінансовими витратами на всіх рівнях.

В результаті була сформована багаторівнева структура енергоменеджменту України [14, 15, 17, 18], складовими якої було визначено:

1) **Рівень державного управління енергоменеджментом (задачі)**: розробка енергетичної політики та стратегії на підставі економічної стратегії держави; складання та аналіз енергобалансів виробництва та споживання енергоресурсів; виявлення та фінансування розробок фундаментальних технологій виробництва енергії; розробка енергетичної бази та участь у законодавчій ініціативі з цінової та податкової політики;

2) **Галузевий рівень (міністерства) управління енергоефективністю**: розробка галузевих енергетичних балансів; прогнозування розвитку галузі; дослідження технологічних особливостей галузі в сфері виробництва та використання енергії; здійснення та фінансування НДДКР в енергетичній сфері для конкретної галузі; розробка та введення в дію галузевих стандартів з енергоменеджменту;

3) **Регіональний рівень управління енергоефективністю**: розробка енергетичних балансів прогнозування розвитку регіону на основі енергоаудиту; інформаційна та освітня діяльність у сфері підвищення енергоефективності; аналіз потенціалу місцевих енергоресурсів шляхів зменшення споживання енергії в бюджетній і соціальній сферах; аналіз результатів маркетингу енергоефективних

технологій і устаткування; визначення об'єктів для пілотного впровадження; оцінка результатів моніторингу та розробка програми впровадження з визначенням джерела фінансування;

4) **Рівень підприємства/організації/установи управління енергоефективністю:** збір та аналіз інформації про джерела та напрями використання енергетичних ресурсів; розробка енергетичної стратегії підприємства та планів щодо її втілення; залучення персоналу підприємства до виконання цілей енергетичної стратегії. При цьому організаційно-економічний механізм енергозбереження промислових підприємств розглядався як сукупність економічних, організаційних, мотиваційних методів і способів, які направлені на економічно обґрунтоване виявлення та максимальне використання потенціалу енергозбереження з метою мінімізації питомих витрат на виробництво продукції та зменшення екологічного навантаження на навколишнє середовище.

Власне, коли говорити про менеджмент як управління, то згідно піраміди управління (рис. 1) енергетичний менеджмент в Україні, в переважаючій більшості випадків, розглядався як взаємопов'язаність цілей та задач для середнього та верхнього рівня. Нижньому – технічному рівню – увага фактично не приділялася (це не стосується конкретних заходів впровадження енергоефективних технологій, матеріалів та обладнання).

Згідно Закону України «Про енергетичну ефективність» (Відомості Верховної Ради України (ВВР), 2022, № 2, ст. 8) (м. Київ 21 жовтня 2021 року № 1818-IX) окремі базові визначення у сфері енергозбереження та енергоефективності було уточнено:

Економія енергії – обсяг скорочення споживання енергії, який визначається шляхом зіставлення обсягів споживання, виміряних та/або розрахованих до та після впровадження енергоефективних заходів із забезпеченням нормалізації зовнішніх і внутрішніх умов, які впливають на енергоспоживання.

Енергетична ефективність – кількісне співвідношення між роботою, послугами, товарами або енергією на виході та витраченою енергією на вході.

Система енергетичного менеджменту – система управління, що визначає енергетичну політику та цілі, енергетичні завдання, плани дій та процеси для досягнення цілей та енергетичних завдань.

Згідно стандарту ДСТУ ISO 50001-2020 «Системи енергетичного менеджменту. Вимоги та настанова щодо використання»:

– **Енергетична ефективність, енергоефективність** – співвідношення (коефіцієнт) або інший кількісний взаємозв'язок між отриманим результатом (вихідний показник), тобто між виконаною роботою, послугами, виробленими товарами чи енергією, і вхідним показником, тобто вхідним рівнем енерговитрат.

– **Система енергетичного менеджменту, система енергоменеджменту** – набір взаємопов'язаних або взаємодійних елементів, що визначають енергетичну політику та енергетичні цілі, а також процеси і процедури для досягнення цієї політики та цих цілей.

У свою чергу, Державне агентство з енергоефективності та енергозбереження України на сьогодні розглядає енергетичний менеджмент як основу підвищення енергоефективності, компонент енергетичної безпеки та стабільної роботи органу, підприємства, установи [19]. Енергоменеджмент – не тільки контроль за споживанням енергії. Це система, що дозволяє моделювати і прогнозувати енергоспоживання в залежності від зовнішніх і внутрішніх умов та їх мінливості. Система енергоменеджменту позиціонується не лише як інструмент зниження витрат на енергію, але й як стратегічна ініціатива, спрямована на створення стійкої, конкурентоспроможної та відповідальної системи для будь якого об'єкту.

Більш детальні та конкретизовані визначення «енергетичного менеджменту» подають закордонні джерела, що обумовлено більш значними результатами (як в науковій, так і в технічній сферах) [20–25].

• **Енергетичний менеджмент** – це інструмент управління, що забезпечує постійне дослідження та генерацію інформації про розподіл та рівні споживання енергії, а також про оптимальне використання енергоресурсів.

• **Енергетичний менеджмент** включає планування та експлуатацію установок виробництва та споживання енергії, а також розподіл та зберігання енергії. Метою є збереження ресурсів, захист клімату та економія коштів, а користувачі, у свою чергу, мають постійний доступ до необхідної їм енергії.

• **Енергетичний менеджмент** включає, зокрема, незначні дії, такі як моніторинг щомісячних рахунків за електроенергію та оновлення до енергозберігаючих ламп. Це може означати більш масштабні вдосконалення, такі як додавання ізоляції, встановлення світловідбиваючого покриття даху або вдосконалення обладнання HVAC (опалення та охолодження) для оптимізації енергоефективності. Енергетичний менеджмент також включає більш складні дії, такі як створення фінансових прогнозів для введення в експлуатацію послуг відновлюваної енергії та внесення інших удосконалень для споживання чистої енергії та зниження витрат на енергію в найближчі роки.

• **Енергетичний менеджмент** – це процес моніторингу та контролю енергетичних активів для мінімізації споживання та максимізації ефективності та роботи. Це включає оптимізацію використання енергії для досягнення найкращих можливих результатів з економічного та екологічного боку, а також її збереження.

• **Енергетичний менеджмент** – це проактивний і систематичний моніторинг, контроль і

оптимізація споживання енергії підприємством для економії використання та зменшення витрат на енергію. Енергетичний менеджмент включає планування і експлуатацію установок виробництва та споживання енергії, а також розподіл та зберігання енергії.

• **Енергетичний менеджмент** – це проактивна, організована та систематична координація закупівлі, перетворення, розподілу та використання енергії для задоволення вимог, беручи до уваги екологічні та економічні цілі; систематична спроба оптимізувати енергоефективність для конкретних політичних, економічних і екологічних цілей за допомогою методів проектування та управління.

• **Енергетичний менеджмент** пов'язаний з плануванням, моніторингом та керуванням пов'язаними з енергією процесами з метою збереження енергетичних ресурсів та економії витрат на енергію та захисту навколишнього середовища.

• **Енергетичний менеджмент** – це використання та застосування технології, включаючи планування та функціонування як виробництва, так і споживання енергії з метою підвищення енергоефективності організації. Основними цілями енергоменеджменту є збереження ресурсів, економія бюджету та запобігання зміні клімату, а також забезпечення легкого та вкоріненого доступу для всіх до енергетичного спектру.

• **Енергоменеджмент** визначається як реалізація різноманітних оптимізаційних заходів на основі даних для зниження витрат на постачання енергії. Такого зниження витрат можна досягти шляхом оптимізації використання або навіть модернізації існуючих споживачів енергії. Іншою можливістю є додаткове отримання доходів від власних установок з виробництва електроенергії (наприклад, фотоелектричні системи на даху) або від маркетингу гнучких споживачів, таких як електромобільність або електрифіковане тепlopостачання. З цієї причини енергоменеджмент аж ніяк не є синонімом терміну енергоефективність, навіть незважаючи на те, що між цими двома сферами цілком може бути збіг.

Як приклад зазначимо, що першою комплексною СЕМ є система енергоменеджменту для промисловості (виробництва) **Enerize E3**, розроблена компанією Yokogawa (Японія) [26]. Ця система є першою, у якій вдалося візуалізувати ключові показники ефективності (Key Performance Indicators, KPI) у сфері енергозбереження.

Enerize E3 моделює сторону енергопостачання (обладнання, що постачає енергію) та сторону споживання (обладнання, що споживає та виробниче обладнання) заводу, щоб:

- виявити відходи в енергопостачальному обладнанні та їх кількісне використання;
- підвищення обізнаності енергозбереження в енергоспоживаючих підрозділах;
- виявлення відходів і підвищення ефективності виробничої діяльності.

Компанія Yokogawa сформулила показники KPI для постійної діяльності у сфері енергозбереження як ключові показники ефективності використання енергії та запропонувала використовувати KPI для визначення точок, де можна зберегти енергію, і використовувати їх як критерії управління. **Enerize E3** базується на трьох ключових складових енергоменеджменту підприємства, кожен з яких включає важливі енергетичні KPI: розпізнавання потоку енергії; уточнення систем управління споживчими підрозділами; інтеграція потоку енергії та потоку виробництва товарів (див. рис. 2) [26].

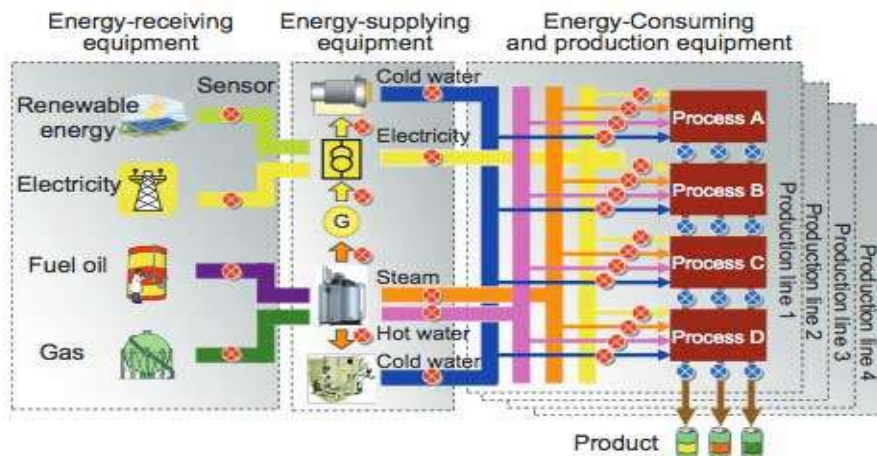


Рисунок 2 – Потоки енергії на заводах Enerize E3 (компанія Yokogawa)

3. Систематизація вимог до енергоменеджменту XXI століття

Можемо стверджувати, що **енергетичний менеджмент** сьогодні має розглядатися як проактивний і систематичний моніторинг, контроль і оптимізація споживання енергії об'єктом для економії використання та зменшення витрат на енергію. Він включає планування та експлуатацію установок виробництва та споживання енергії, а також розподіл та зберігання енергії. Метою є збереження ресурсів,

захист клімату та економія коштів, а користувачі мають постійний доступ до необхідної їм енергії. Тобто, *енергетичний менеджмент – це проактивна, організована та систематична координація закупівлі, перетворення, розподілу та використання енергії для задоволення вимог, беручи до уваги екологічні та економічні цілі*. На відміну від формування СЕМ згідно серії стандартів ISO 50000, сьогодні набуває актуальності побудова СЕМ, яка забезпечує системну (комплексну) оптимізацію параметрів, структури та режимів різноманітних технічних об'єктів за сукупністю технічних, економічних та екологічних критеріїв.

Сьогодні СЕМ характеризуються різноманітністю, системністю, комплексністю. Можемо виділити такі різні аспекти енергетичного менеджменту:

- за напрямками типу об'єкту управління з врахуванням, що енергоменеджмент є частиною управління об'єктом (Facility Management);
- енергетичний менеджмент у промисловості та паливно-енергетичному комплексі;
- управління енергією в логістичних операціях і на транспорті;
- енергетичний менеджмент будівель та споруд;
- енергетичний менеджмент у процесі закупівлі енергії;
- особистий енергетичний менеджмент.

Наприклад, на сьогодні знаходять застосування такі напрямки розвитку систем енергоменеджменту: HEMS – системи енергоменеджменту в будівлях, IPMS – системи енергоменеджменту для індустрії, PMS – системи енергоменеджменту в електроенергетиці, EMCS – системи керування для систем енергоменеджменту, EMPS – засоби програмного забезпечення для систем енергоменеджменту та інш. [21–25].

До переваг сучасних СЕМ різних об'єктів можемо віднести: економічні рішення, простота налаштування та обслуговування, можливість визначити ефективне електрообладнання, візуалізація енергоспоживання, можливість перегляду електричних даних і звітів про енергопостачання в реальному часі, зниження вартості енергії, менший вплив на навколишнє середовище, підвищення енергетичної безпеки тощо.

У свою чергу, є актуальними низка питань, які ще потрібно вирішити при реалізації сучасних СЕМ: розвиток енергетичної бази, пристосування до наявної енергетичної бази, операційна економія, зниження фінансових витрат, розробка договорів (алгоритмів, механізмів) на технічне обслуговування, контроль якості, зниження трудомісткості, формування нових «технічних» знань, підвищення масштабованості при централізованому обмеженні. Важливо розробити передове програмне забезпечення з гнучкою архітектурою, яке дозволить працювати з різними налаштуваннями компонентів, а також здійснювати прогнози на основі інтелектуальної оптимізації, які сприяють самооптимізованій системі.

Система енергоменеджменту – це набагато більше, ніж просте технічне рішення для моніторингу параметрів та стану енергетичних систем. Завдяки всебічним прогнозам попиту на енергію та пропозиції ця система виводить управління енергією на абсолютно новий рівень, дозволяючи операторам об'єкту (підприємств, будівель і інтелектуальних мереж та систем) визначити стратегічний напрямок управління енергією, здійснювати його реалізацію та досягати цілей як енергоефективності, так і енергетичної доступності та екологічної (соціальної) прийнятності. При цьому враховується, що складність системи, яка керує, не може бути нижче складності системи, якою вона керує (базова теорема кібернетики, сформульована Вільямом Россом Ешбі). Зазначимо, що якщо ж навпаки, то система, якою керують, буде розвиватися (мінати стани) випадковим чином, або катастрофічно спроститься.

Можемо стверджувати, що СЕМ загалом охоплює три концепції:

- **СЕМ як технологія**: технологічний продукт, часто хмарний, який використовують для збору, аналізу та реагування на споживання та витрати енергії;
- **СЕМ як стратегія**: кожна внутрішня зацікавлена сторона (підсистема ланцюга постачання / закупівель / сталого розвитку (наприклад, менеджер з енергетики або менеджер з технічного обслуговування)) отримує вигоду від різних стратегій, щоб приймати правильні рішення щодо управління енергією у своїй зоні відповідальності;
- **СЕМ як процес**: система, прийнята об'єктом для управління та виконання необхідних дій щодо своєї енергії.

Енергетичний менеджмент розглядається в системі управління не тільки підприємством (організацією, установою), а більш ширше – технічним (технологічним) об'єктом. Поняття «енергетичний менеджмент» та «система енергетичного менеджменту» наповнюється новим змістом. Менеджмент (процес, система): (1) управлінська діяльність; (2) керування об'єктом. Важливе значення має для мультиагентних систем та транзактивних систем. Стандарт ІЕС 61970 Міжнародної електротехнічної комісії визначив EMS як «комп'ютерну систему, яка містить програмну платформу, що надає основні послуги підтримки, і набір програм, що забезпечують функціональність, необхідну для ефективної роботи об'єктів виробництва та передачі електроенергії для забезпечення безпеки енергопостачання за мінімальних витрат».

Енергетичний менеджмент в сучасних інтелектуальних електроенергетичних системах (Smart Grid) [27] забезпечує підтримку стабільності між попитом і пропозицією з дотриманням усіх системних обмежень для економічної, надійної та безпечної роботи електроенергетичної системи. Він також включає оптимізацію, яка забезпечує зниження вартості виробництва електроенергії. Таким чином, СЕМ керує і зменшує до мінімуму кількість і ціну енергії, необхідні для конкретного застосування, групуючи всі систематичні процедури разом.

З точки зору побудови Smart Grid Міжнародною електротехнічною комісією в межах стандарту ІЕС 63097 «Smart Grid standardization Road Map» (Дорожня карта із стандартизації в сфері «розумних мереж») [28] визначено перелік основних систем, що відносяться до сфери Smart Grid: система управління генеруванням електроенергії; системи FACTS та HVDC для мереж; система електроенергетичного менеджменту; система запобігання відключенням; розвинена система управління розподілом; система автоматизації розподілу; система автоматизації підстанції; система управління розподіленими енергоресурсами; система управління накопиченням електроенергії; розвинена інфраструктура вимірювання; система допоміжного підрозділу, пов'язана із вимірюванням; ринкова система; система управління споживанням / навантаженням; системи автоматизації будівель; промислова система автоматизації; система E-mobility; системи мікромереж.

Наведений перелік функціональних систем Smart Grid реалізується у вигляді відповідних систем енергетичного менеджменту на основі визначених стандартів [29, 30] щодо забезпечення керування енергетичними об'єктами та процесами інформаційної взаємодії, пов'язаної із таким керуванням.

Отже, по відношенню до об'єктів енергетичного сектора, СЕМ – це система інформаційно-комунікаційних технологій, яка на системному рівні поєднується з силовими енергетичними процесами, що використовуються операторами електроенергетичних систем та мереж для моніторингу, контролю та оптимізації продуктивності виробництва, передачі та споживання енергетичних ресурсів у системах різного ієрархічного рівня (як ОЕС України, так регіональних і локальних системах, на конкретних енергетичних об'єктах чи окремих енерготехнологіях тощо) [31].

EMS координує роботу з іншими системами, такими як розширена інфраструктура вимірювання (AMI), планування технічного обслуговування, керування відключеннями, керування розподілом електроенергії та системами прогнозування погоди, щоб зібрати велику кількість даних у реальному часі. Зібрані дані точно обробляються для генерації відповідних керуючих сигналів для досягнення заздалегідь визначених економічних або технічних цілей. Однак це ієрархічне прийняття рішень, включаючи щоденне, погодинне планування та / чи планування в режимі реального часу. Система енергоменеджменту – це система, яка використовується операторами електричних мереж для моніторингу, контролю та оптимізації роботи системи передачі та генерації, з метою економії загальних експлуатаційних витрат.

Широко застосовувана а електроенергетиці система SCADA (система диспетчерського керування та збору даних – Supervisory Control and Data Acquisition, SCADA), хоча і дозволяє переглядати дані в реальному часі, однак інструменти аналізу у ній мають обмеження [32]. У свою чергу, СЕМ містить набір інструментів, які допоможуть проаналізувати енергетичні дані більш комплексно (наприклад, за допомогою СЕМ є можливість застосовувати тарифи для перетворення енергії у витрати або викиди CO₂ для розширеного звітування).

Сьогодні енергетичний менеджмент – це планування (система енергетичного менеджменту), перевірка (реагування на попит – алгоритм великих даних), дія (ефективна робота), повторна перевірка (моніторинг). У свою чергу, енергетичний менеджмент можемо розділити як енергоменеджмент для міста, будівлі, промислової мікромережі тощо, де СЕМ передбачає функції: вимірювання, ідентифікації, розвитку, впровадження, навчання, оцінювання.

Безперервний цикл стратегії енергоменеджменту (цикл PDCA) сьогодні набуває нових обрисів, зважаючи на нові вимоги щодо можливостей енергозбереження, забезпечення фінансових стимулів, керування енергозберігаючими і енергоефективними проектами та комплексне відстеження результатів [33, 34]. Сучасний контур взаємодії може бути представлений складовими (див. рис. 3) [34]: Оцініть, де Ви зараз; Купуйте екологічно чисту (зелену) енергію; Розумно керуйте своєю енергією; Усуньте відходи; Зменшіть попит; Генеруйте власну енергію.

Можемо стверджувати, що енергоменеджмент постійно розвивається з появою нових технологій і передового досвіду (див. рис. 4) [35]. Згідно рис. 4 енергетичний менеджмент на сьогодні має включати: мережі (Smart, мікромережі, децентралізовані); інтеграція відновлюваної енергетики; блокчейн; моніторинг, цілепокладання та звітність (Monitoring, Targeting & Reporting, MT&R); декарбонізація; Smart технології (освітлення, лічильники, мережі, будівлі); рішення для керування попитом (Demand Side Management, DSM); цифровізація; рішення для зберігання енергії; рекуперация тепла; економіка модернізації; повторне введення в експлуатацію; розосереджені енергетичні ресурси (Distributed Energy Resources, DERs); гнучкість на стороні попиту (Demand Side Flexibility, DSF); стратегічний енергетичний менеджмент (StEM); системи енергетичного менеджменту.



Рисунок 3 – Сучасний контур взаємодії в рамках системи енергетичного менеджменту

Можливі типи систем енергетичного менеджменту: система енергоменеджменту громади (CEMS); система енергоменеджменту виробництва (FEMS); система енергоменеджменту будівлі (BEMS); домашня система енергоменеджменту (HEMS); системи енергетичного менеджменту ВДЕ (паливний елемент (FC), фотовольтаїка (PV)); система енергоменеджменту електричного автомобіля (PHEV), систем заряджання електромобілів. Як приклад зазначимо, що критеріями успішної системи енергоменеджменту в промисловості є: ефективна політика, довгострокова стратегія, розподіл витрат на енергію, моніторинг витрат на енергію, підтримка менеджменту, енергоменеджмент, критерії окупності. Інтеграція сучасних технологій генерації електроенергії в мережі розподілу електроенергії відкриває шлях для широкого розвитку мікромереж, як самопідтримуваної системи, що складається з розосереджених енергетичних ресурсів, які можуть працювати в автономному режимі під час збоїв у мережі.

Сьогодні важливим напрямком розвитку електричних мереж в Україні є запровадження мікромереж. Згідно визначення в електротехнічному словнику ІЕС 60050 (International Electrotechnical Vocabulary – IECV) [36] мікромережа – група взаємопов’язаних навантажень і розподілених енергетичних ресурсів із визначеними електричними межами, що утворюють локальну електроенергетичну систему на рівні розподільних мереж, яка діє як єдиний керований об’єкт і здатна працювати в режимі приєднання до мережі або в острівному режимі

СЕМ мікромережі – система забезпечення функціонування та керування джерелами розосередженої генерації і навантажень мікромережі [23, 24, 37]. Відповідно СЕМ мікромережі важлива для оптимального використання розосереджених енергетичних ресурсів розумним, захищеним, узгодженим і синхронізованим способом. Така СЕМ відіграє важливу роль у забезпеченні роботи мікромережі у погодніному або щохвилинному часовому масштабі задля забезпечення керування об’єктами, що входять до її складу, та забезпечення взаємодії з СЕМ операторів систем розподілу.

Дослідження з керування мікромережею на початку були зосереджені на потоках електроенергії та оптимізації процесів відбору енергії від ВДЕ. Однак у міру більшого проникнення ВДЕ постає необхідність розглядати взаємозв’язок низки мікромереж, механізми та підходи до їх контролю. Ієрархічне розподілене керування розосередженими енергетичними ресурсами, що вирішується в межах мікромережі, безумовно потребує поєднання в одне ціле моніторингу та контролю (керування).

У свою чергу, мікромережа, як локальна енергетична система, яка включає три ключові компоненти: генерація, зберігання та попит (і все це в рамках обмеженої та контрольованої мережі), потребує СЕМ як ефективного та оптимального інструменту через стохастичну природу зміни електричних навантажень та генерації ВДЕ. Крім того, система енергоменеджменту відповідає за надійну, безпечну та економічну роботу мікромережі у будь-якому стані підключення до мережі або відключення.

Це дає змогу координувати попит і постачання електроенергії, зменшуючи потребу у дорогих запасах енергії. Активно керуючи та реагуючи на коливання попиту, мікромережі можуть досягти більш збалансованого та надійного енергопостачання, не покладаючись виключно на традиційні резервні одиниці генерації електроенергії.

У інтелектуальній електроенергетичній системі (електромережі) енергоменеджмент підтримує стабільність попиту та пропозиції, дотримуючись усіх системних обмежень для економічно ефективної, надійної та безпечної роботи електричної системи [22, 32, 38]. **Система інтелектуального енергоменеджменту (СИЕМ)** є однією з передових технологій, яка використовує зв’язок, який забезпечує Інтернет речей (IoT), щоб відстежувати, вимірювати, контролювати та оптимізувати споживання енергії в будівлях або офісних комплексах. Використання інтелектуального керування енергією в мікромережах може ефективно покращити баланс між попитом і пропозицією та зменшити пікове навантаження протягом незапланованих періодів. При цьому СЕМ здатна не тільки розподіляти навантаження чи

забезпечувати обмін енергією між різними наявними генераторами (підсистемами), але й економічно забезпечувати навантаження надійним, безпечним та ефективним способом за всіх умов, необхідних для роботи електромережі. Як приклад, інтелектуальний енергоменеджмент електромобілей працює шляхом інтеграції інтелектуальних систем керування енергією для оптимізації процесу заряджання електромобілів. Ці системи можуть регулювати швидкість заряджання, контролювати графік заряджання (логістичні операції) та навіть контролювати споживання енергії окремими електромобілями.

Безумовно, сучасні системи енергетичного менеджменту базуються на використанні операцій з інтелектуальними лічильниками, зокрема із технологіями:



Рисунок 4 – Складові «розвинутого» енергоменеджменту

AMR (Automated Meter Reading) – дистанційне зчитування показів лічильників – передові технології, які забезпечують можливість дистанційного зчитування даних, що накопичені Smart Meter. Такі лічильники дозволяють не тільки вимірювати та обліковувати електричну енергію, а й обчислювати параметри режимів електроспоживання, зберігати обчислені значення параметрів, а також забезпечують доступ до цієї бази даних через цифрові комунікаційні інтерфейси. Завдяки застосуванню багатофункціональних електронних лічильників вимірювана електроенергія може бути розподілена за інтервалами часу (інтервалами доби, тарифними зонами, добами, місяцями тощо). Впровадження AMR суттєво скорочує терміни збору даних, підвищує достовірність обліку та дозволяє автоматизувати процес розрахунків за електроенергією.

AMM (Advanced Meter Management) – розвинута система керування лічильниками (система інтелектуальних вимірювань) є системою дистанційного зчитування даних обліку з розвиненими функціональними можливостями щодо надання клієнтам сервісних послуг інформаційною мережею.

Інтелектуальна незалежна Smart мережа (див. рис. 5) має низку особливостей [39]: контроль і моніторинг у режимі реального часу, підключене до мережі сховище енергії, цифрова необслуговувана підстанція, розширена система вимірювання (AMS), система енергетичного менеджменту, система менеджменту ринку, інтегрований гігабітний зв'язок на основі IP, контроль попиту (Demand respond control, DRC), генерація відновлюваної енергії.

Складові CEM для Smart Grid (CIEM) представлена на рис. 6.

Інтелектуальний енергетичний менеджмент характеризується складовими: керування навантаженням на попит (Demand Load Management, DLM), кібербезпека зв'язку, резервне дублювання SCADA, географічна інформаційна система (GIS), SCADA, база даних, менеджмент виробництва енергії, прогнозування. CIEM забезпечує та включає [38, 39]:

- керування даними: дані про споживання енергії, дані про збої в електромережі, дані про виробництво енергії;
- система диспетчерського контролю та збору (SCADA): системи генерації та передачі, лічильники та датчики енергії;
- система автоматизації та керування розподілом (Distribution Automation and Control, DAC): система розподілу, підключене навантаження;
- прогнозування: прогноз кривої попиту на енергію, прогноз виробництва енергії.

При цьому поєднання керування якістю електроенергії з системою енергоменеджменту в системах

енергоменеджменту включає:

- керування якістю електроенергії: точність, індикація якості, зменшення втрат;
- планування: межі експлуатації, зменшення викидів парникових газів, збільшення вигод і прибутків;
- прогноз: невизначеність, генерація енергії, попит на енергію;
- моніторинг: передбачуваність ціни, точність генерації енергії, Точність попиту на енергію (Accuracy of demand of energy).



Рисунок 5 – Інтелектуальна незалежна Smart система

При побудові СЕМ для Microgrid враховується особливості керування (централізоване чи децентралізоване), а самі системи розглядаються як мультиагентні.

Для формування загальних ключових КРІ в СЕМ необхідно здійснювати відповідне моделювання, зокрема [39, 40]:

- зчитування основних показників: струм, дисбаланс струму, напруга, дисбаланс напруги, потужність (активна, уявна реактивна), частота, коефіцієнт потужності;
- зчитування показників енергії: активна енергія, реактивна енергія, повна енергія;
- якість електроенергії: коефіцієнти спотворень напруги та струму, крест-фактор струму;
- прогнозування (показники алгоритму): середня квадратична помилка, середня абсолютна помилка, середньоквадратична помилка;
- діаграми: діаграма гармонік, діаграма напруги струму, діаграма потужності, діаграма прогнозованих профілів, крива навантаження, крива генерації;
- КРІ мікромереж: стабільність напруги в електромережі, загальна генерація, загальне підключене навантаження, надійність генерації, дефіцит генерації;
- фінансові ключові показники ефективності: капітальний запас, річний експлуатаційний запас, вартість технічного обслуговування, вартість генерації, вартість заміщення;
- навколишнє середовище: викиди CO₂, дефіцит енергії.

4. Перспективні напрямки розвитку та структури систем енергоменеджменту

Система енергоменеджменту та оптимізації (СЕМО) (Energy Management and Optimization System, EMOS) [41].

Сьогодні питання енергоменеджменту стали наскрізними темами, які стосуються кожного. Наприклад, на корпоративному рівні це може стосуватися управління ризиком нестабільності цін на енергопостачання, дотримання вимог щодо сталого розвитку та зростаючих потреб у звітності, а також зменшення споживання енергії при збереженні оптимальної продуктивності. Через це існує потреба в одному унікальному технологічному середовищі або системі, яку може використовувати будь-який об'єкт.

СЕМО (EMOS) може запропонувати модульний і гнучкий підхід для неоднорідних організацій з декількома вузлами, яким потрібно працювати з різними рівнями зрілості, що означає кращу та довгострокову підтримку.

СЕМО – це повна інтегрована пропозиція. Вона включає звичайні функції СЕМ, однак вони безпосередньо пов'язані з розширеними можливостями оптимізації. СЕМО пропонує глобальне рішення, яке може задовольнити потреби всіх ключових користувачів в одному семантичному середовищі. Таким чином усі ці користувачі можуть узгоджувати свої зусилля, контролювати результати та ділитися цілями.

СЕМО дає користувачам можливість виконувати конкретні дії, які є більш просунутими завдяки його вражаючим технологічним можливостям.



Рисунок 6 – Система енергоменеджменту для Smart Grid (CIEM)

Інформаційна система енергоменеджменту (ICEM) (Energy Management Information System, EMIS) – це система керування продуктивністю, яка дозволяє окремим особам і організаціям планувати, приймати рішення та вживати ефективних заходів для управління використанням енергії та витратами [42].

ICEM (EMIS) робить енергоефективність видимою для різних рівнів організації, перетворюючи дані про енергетичні та комунальні послуги в центрах обліку енергії в інформацію про енергоефективність. Це здійснюється за допомогою рівнянь ефективності, які порівнюються з енергетичними цільовими показниками організації. ICEM – це постійне вдосконалення, інтеграція, зв'язок, оптимізована продуктивність: (зростання за ступенями охоплення та значущості): центри обліку енергії (Energy Account Centers, EAC), вимірювання та вхідні дані (Metering & Inputs), збір даних та звітування (Data Capture & Reporting), системи керування: люди та процедури (People & Procedures).

Моделі СЕМ для керування енергією в інтелектуальному співтоваристві (Smart community) [43]:

- розвиток технологій HEMS (автоматизація та керування, Smart пристрої, датчики та Smart лічильники, метод оптимізації, зберігання енергії, система зв'язку);
- системи енергоменеджменту будівель (Building Energy Management System, BEMS): домашній енергоменеджер, сонячна фотоелектрична система, вітрові енергоустановки невеликої потужності, енергоефективне освітлення, прилади реагування на попит, накопичення енергії, фільтрація води, водонагрівач з тепловим насосом, геотермальні теплові насоси, розумний лічильник.

Інтеграція попиту та пропозиції (ППП) (Demand and Supply Integration, DSI) [44].

Структура системи інтеграції попиту та пропозиції ППП (DSI) розглядається як збалансування ринкової інформації щодо попиту та пропозиції і бізнес-аналітики за допомогою інтегрованих процесів управління знаннями для стратегічного управління діяльністю попиту та пропозиції з метою створення вищої цінності для клієнтів (див. рис. 7). Одночасно враховуючи застосовні ринкові зміни, що відбуваються як у вихідних, так і в зворотних напрямках, підприємства готові задіяти та використовувати операції, орієнтовані на ефективність, зберігаючи відповідний рівень продуктивності.

Як приклад комплексного підходу наведемо **систему керування енергопостачанням і попитом NEC** (NEC's Energy Supply & Demand Management System) розвинулася як платформа управління енергією, яка пов'язана з цими системами, щоб зробити можливим досягнення розширеного управління енергією [45].

Система керування енергопостачанням і попитом від **Nippon Electric Corporation** використовує моніторинг балансу постачання/попиту для оптимізації балансу між виробництвом і споживанням електроенергії. Однак це лише одна з функцій керування енергією, для досягнення якої покликана ця система. Система енергоменеджменту NEC охоплює три цикли: збір і візуалізація, аналіз і прогнозування, контроль і оптимізація.

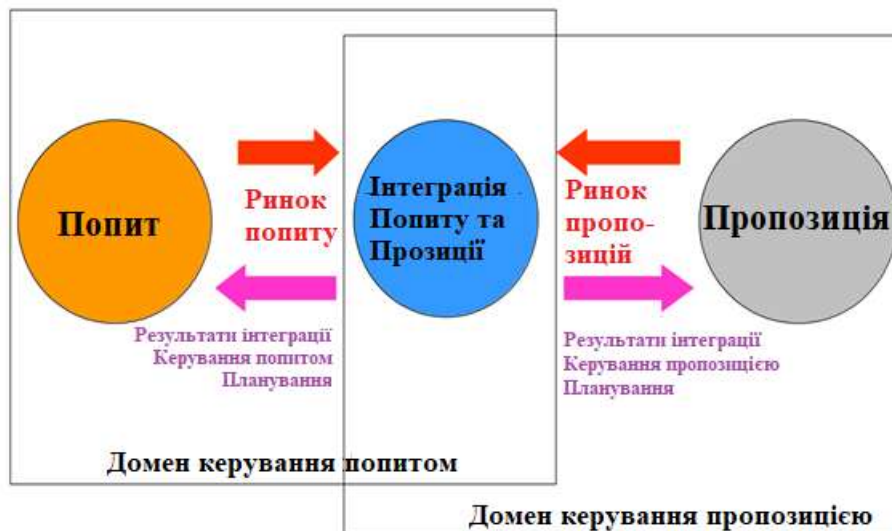


Рисунок 7 – Концептуальна основа інтеграції попиту та пропозиції

Мета системи енергоменеджменту NEC – сприяти стабілізації та оптимізації загальної енергетичної системи, зосереджуючись на трьох основних цілях:

- 1) автоматичний збір та візуалізація різноманітних і невизначених даних реального світу на додаток до кількості виробленої та спожитої енергії;
- 2) створити план оптимального управління енергією відповідно до витрат і вимог, використовуючи аналіз великих даних для прогнозування майбутнього;
- 3) впровадження інтелектуальної системи керування енергією на основі технології накопичення електроенергії NEC.

Складові СЕМ для Smart Grid згідно концепції платформи енергоменеджменту NEC:

- моніторинг: фактичне виробництво енергії, фактичний попит на енергію, стан заряду (State of Charge, SoC) накопичувача для зберігання енергії, невизначеність ціни;
- прогноз: виробництво енергії, попит на енергію, мобільне зберігання даних, невизначеність;
- керування якістю електроенергії: мінімізація втрат, показники якості електроенергії, надійність / комфортність;
- планування / диспетчеризація / вартість: операційні витрати, зменшення викидів ПГ, максимізація прибутку.

Щодо перспективної концепції системи керування енергією Hitachi [46].

Концепція системи керування енергією Hitachi – внесок у створення гнучкої енергетичної інфраструктури, яка може пристосуватися до поширення відновлюваної енергії та особливостей конкретних територій. Hitachi сприяє масовому впровадженню ВДЕ, яке очікується в майбутньому, і широкому діапазону потреб відповідно до характеристик території, таких як «місцеве виробництво та місцевий тип споживання» та «острівний тип» за допомогою поєднання «базових моделей» керування енергією. Hitachi реалізує високонадійну енергетичну інфраструктуру з можливістю розширення та гнучкості за допомогою конфігурації «автономної децентралізованої» системи.

Наведемо чотири фактори «базової моделі» енергоменеджменту, що дозволяє масово використовувати ВДЕ (див. рис. 8):

Постачання: традиційне виробництво електроенергії, як-от теплова та відновлювана енергія (наприклад, фотоелектрична (сонячна) та вітрова);

Попит: домашні споживачі, великі споживачі, такі як фабрики та офіси, а також станції для зарядки електромобілів, які, як очікується, збільшаться в майбутньому;

Зберігання: функція для пом'якшення коливань попиту на електроенергію та вихідної потужності обладнанням для накопичення енергії, таким як зберігання електроенергії та теплової енергії;

Керування: вся функція оптимізації шляхом координації вищевказаних трьох факторів із керуванням стабілізацією мережі, керуванням генерацією, DSM та керуванням електропостачанням.

Складові розвинутої СЕМ наведено на рис. 9.

Знайшли своє застосування такі перспективні СЕМ як динамічна та на основі Інтернет речей [47].

Динамічна система енергоменеджменту (англ. Dynamic Energy Management System, DEMS) складається з високоефективних кінцевих пристроїв, оснащених розширеними засобами керування та комунікаційними можливостями, які дозволяють пристроям динамічно взаємодіяти із зовнішніми сигналами та регулювати свою продуктивність у відповідь на ці сигнали [48].

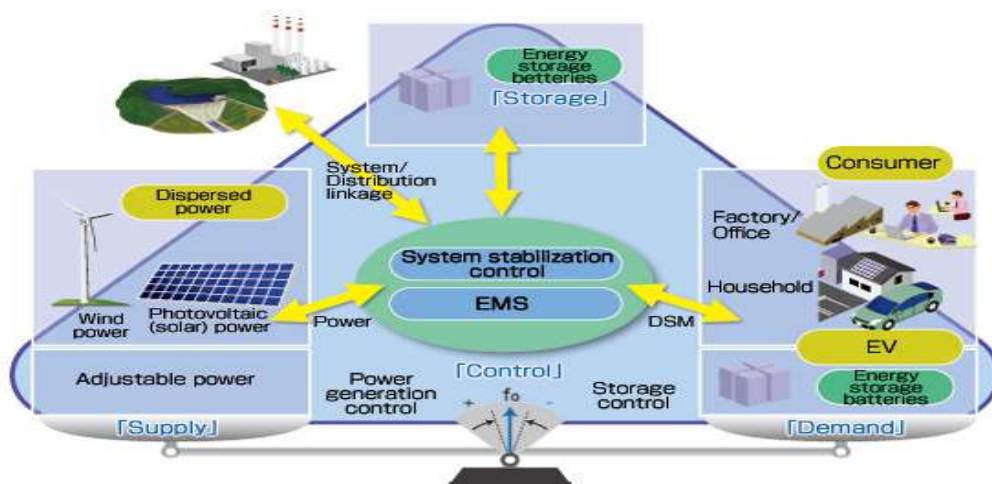
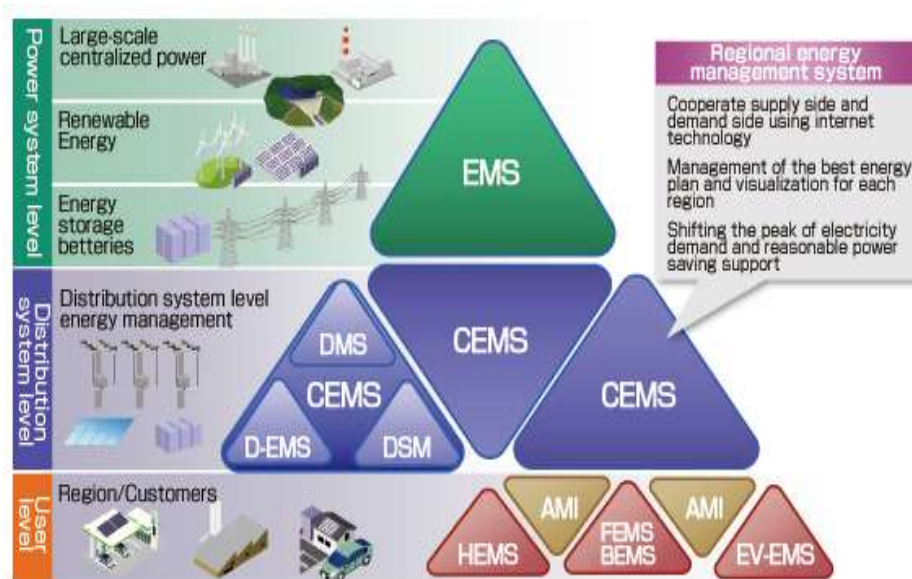


Рисунок 8 – Система енергоменеджменту з виділенням чотирьох факторів «базової моделі»

Сучасна практика керування використанням енергії: енергоефективні кінцеві пристрої (End-Use Devices); обмежені розподілені енергетичні ресурси; локальні стандартні системи управління; базовий двосторонній зв'язок. Додатковий потенціал динамічного керування енергією: Smart енергоефективні кінцеві пристрої; Smart розосереджені енергетичні ресурси; передові системи керування всіма будівлями (Advanced Whole-Building Control Systems); інтегрована комунікаційна архітектура.

Система енергоменеджменту на основі Інтернет речей (Internet of Things in Energy Management System, IoT EMS) [49].



Позначення: **AMI** – Advanced Metering Infrastructure; **BEMS** – Building Energy Management System; **CEMS** – Community Energy Management System; **D-EMS** – Distributed Energy Management System; **DMS** – Distribution Management System; **DSM** – Demand Side Management; **EMS** – Energy Management System; **EV-EMS** – Electric Vehicle Energy Management System; **FEMS** – Factory Energy Management System; **HEMS** – Home Energy Management System.

Рисунок 9 – Складові розвинутої системи енергоменеджменту

Системи енергоменеджменту на основі IoT використовують дані про енергоспоживання в режимі реального часу, щоб допомогти оптимізувати використання електроенергії, динамічно переключатися на економічніші та ресурсоефективніші режими, а також розробляти ефективну та стійку стратегію споживання енергії на основі спеціалізованих моделей використання. Хмарна система для CEM пропонує такі переваги: гнучка структура та швидке розгортання; безпека: включено автоматичне оновлення та обслуговування рішення; зниження витрат і економія на багатьох предметах; доступ з будь-якого

пристрою з будь-якого місця та в будь-який час; розширена співпраця; кращий контроль впливу цифрового рішення на вуглець.

Ключові моменти СЕМ на основі IoT [50]:

– програмне забезпечення для управління енергією дозволяє промисловим групам і компаніям поглибити аналіз своїх енергетичних даних; крім того, він може ідентифікувати можливі дрейфи, які можуть додатково зменшити вплив вуглецю та витрати на постійній основі;

– система СЕМ забезпечує чіткий огляд споживання як у всьому світі, так і за географічним регіоном і для кожного місця за типом енергії; прості та налаштовувані інформаційні панелі дозволяють кожній зацікавленій стороні швидко визначати свої проблеми та за потреби отримувати доступ до звітів;

– переваги СЕМ полягають головним чином у вимірюванні споживання енергії, зниженні витрат, зменшенні потреб і викидів вуглецю; вони також дозволяють групам легше поважати законодавство та залучати команди до екологічно свідомого підходу;

– СЕМ пропонує багато переваг для кожної складової об'єкта, від технічного обслуговування до управління, включаючи фінанси, IT і ланцюг постачання;

– ідеальним є хмарне програмне забезпечення для управління енергією; це забезпечує швидке розгортання, економічно ефективну масштабованість і можливість працювати будь-де та з будь-якого типу терміналу.

Інтегрована система менеджменту (Integrated Management System, IMS) підприємства (організації, установи)

Підприємства (організації чи установи) часто зосереджуються на індивідуальних системах управління, часто розділених, а іноді навіть таких, що конфліктують між собою. Команда з якості займається системою управління якістю, часто менеджер з охорони навколишнього середовища, охорони здоров'я та безпеки займається питаннями безпеки, здоров'я, навколишнього середовища та якості тощо.

Інтегрована система менеджменту (Integrated Management System, IMS) об'єднує всі системи та процеси організації в єдину повну структуру, що дозволяє організації працювати як єдине ціле з єдиними цілями. IMS є поєднання, як окремих складових, таких систем менеджменту як QMS, EMS, SMS, EnMS, FSMS та ISMS [51]:

QMS – система управління якістю (QMS – Quality Management System)

Система управління якістю (СУЯ) — це набір політик, процесів і процедур, необхідних для планування та виконання (виробництво, розробка, обслуговування) в основній сфері діяльності організації (тобто сферах, які можуть впливати на здатність організації задовольняти вимоги клієнтів). ISO 9001:2015 є прикладом системи управління якістю (ISO 9001 Системи управління якістю; AS9100 Аерокосмічна промисловість і оборона; ISO 13485 Медичні пристрої; IATF 16949 Автомобільна промисловість).

EMS – Система управління навколишнім середовищем (EMS – Environmental Management System)

Система управління навколишнім середовищем (EMS) визначає та постійно покращує екологічну позицію та ефективність організації (ISO 14001 Системи управління навколишнім середовищем).

SMS – система управління безпекою (SMS – Safety Management System)

SMS (або OHSMS) визначає та постійно покращує позицію та продуктивність організації в галузі охорони здоров'я та безпеки. Вона відповідає плану та управляється так само, як будь-який інший аспект бізнесу, наприклад, маркетингові чи інженерні функції (ISO 45001 Системи управління охороною праці та безпекою).

EnMS – система енергетичного менеджменту (EnMS – Energy Management System)

EnMS визначає та постійно покращує використання енергії організацією та вплив (ISO 50001 Система управління енергією).

FSMS – Система управління безпекою харчових продуктів (FSMS – Food Safety Management System)

Система управління безпекою харчових продуктів підтверджує, що корпорації в харчовій промисловості дотримуються певних процедур і вказівок, щоб забезпечити безпеку своїх продуктів для споживачів (сертифікація харчової безпеки FSSC 22000; ISO 22000; SQF).

ISMS – Система управління інформаційною безпекою (ISMS – Information Security Management System)

Система управління інформаційною безпекою визначає, як ваша організація повинна організовувати та керувати своєю інформаційною безпекою (ISO 27000 Система управління безпекою в Інтернеті).

В ідеалі підприємству (організації, установі) доцільно мати IMS, яка одночасно вирішує всі визначені цілі. Однак може бути важко задовольнити потреби різних систем менеджменту, що працюють в рамках одного підприємства. Інтегровані стандарти створили спосіб інтеграції кількох відповідних систем у будь-яку організацію, незалежно від її ринку. Інтеграція кількох систем менеджменту в єдину систему (які спільно використовують документацію, політики, процедури та процеси) має сенс.

IMS може принести користь підприємству завдяки підвищенню ефективності і результативності та скороченню витрат, мінімізуючи збої у роботі підприємства [51]. Це також свідчить про відданість на підприємстві підвищенню продуктивності, задоволенню співробітників та клієнтів і постійному вдосконаленню. Завдяки IMS системи управління підприємства працюють разом, причому кожна функція об'єднана в одну мету: покращення продуктивності всієї організації. Замість розрізненості з'являється можливість скоординувати зусилля, при яких результати постають більшими, ніж сума його частин, і є не тільки більш продуктивними, але й більш ефективними. Інтегрована система надає чітке, єдине уявлення про підприємство в цілому, про те, як ці складові впливають одна на одну, і пов'язані з цим ризики. Ефективність досягається завдяки меншій кількості дублікатів, і стає легше запроваджувати нові системи в майбутньому.

Виділимо 10 переваг інтегрованих система менеджменту: покращення продуктивності; усунення надлишків, підзвітність, встановлення узгодженості, зменшення бюрократії, зниження витрат, оптимізуйте процеси та ресурси, скорочення технічного обслуговування, інтегровані аудити, полегшення прийняття рішень.

На завершення наведемо сучасні області науково-технічних досліджень при побудові систем енергоменеджменту для енергетичних, електроенергетичних та електротехнічних систем, які доцільно здійснювати в Україні:

- 1) енергоменеджмент локальних ринків, агрегаторів та віртуальних електростанцій;
- 2) рейтинг непередбачених обставин;
- 3) керування обмеженнями та перевантаженнями;
- 4) аналіз безпеки;
- 5) економічна диспетчеризація з контролем викидів;
- 6) управління попитом;
- 7) оптимальна робота розподільних мереж у режимі реального часу;
- 8) системи глобального моніторингу та контролю;
- 9) застосування методів оптимізації в енергосистемах;
- 10) оцінка та контроль стабільності напруги;
- 11) оцінка стану енергосистеми;
- 12) розробка технологій передачі високої потужності для перевантажених районів (наприклад, міських);
- 13) розробка технологій економічно ефективної експлуатації та керування енергосистемами;
- 14) рішення технічних проблем в інтеграції відновлюваної енергетики;
- 15) прогноз потужності джерел ВДЕ;
- 16) інтеграція систем накопичення енергії з системами відновлюваної енергії.
- 17) забезпечення функціонування та оптимізація роботи мікромереж;
- 18) оптимізація роботи споживачів електричної енергії на роздрібному ринку.

Висновки

1. Розглянуто розвиток методології менеджменту, поняття енергоменеджмент у сучасних умовах. Розкрито нові якісні риси, нові сфери застосування енергетичного менеджменту та систем енергетичного менеджменту при здійсненні енергетичного переходу та реалізації концепції Smart Grid.

2. Показано, що системи енергетичного менеджменту мають розглядатися не лише як енергоефективного управління енергетичними процесами на підприємстві (організації, установи), де у контурі управління є фахівець – енергоменеджер. Це обумовлює необхідність систематизації використання відповідних систем енергоменеджменту для різних енергетичних об'єктів та систем, підготовки фахівців енергоменеджерів за сферами їх застосування.

3. Встановлено, що сучасний енергетичний менеджмент – це проактивна, організована та систематична координація закупівлі, перетворення, розподілу та використання енергії для задоволення вимог, беручи до уваги екологічні та економічні цілі. Охарактеризовано складові СЕМ для Smart Grid, зокрема: моніторинг (фактичне виробництво енергії, фактичний попит на енергію, стан заряду накопичувача для зберігання енергії, невизначеність ціни); прогноз (виробництво енергії, попит на енергію, мобільне зберігання даних, невизначеність); керування якістю електроенергії (мінімізація витрат, показники якості електроенергії, надійність / комфортність); планування / диспетчеризація / вартість (операційні витрати, зменшення викидів ПГ, максимізація прибутку).

4. Запропоновано, що перспективним напрямком є розгляд СЕМ як системи інформаційно-комунікаційних технологій, яка на системному рівні поєднується з силовими енергетичними процесами, що використовуються операторами електроенергетичних систем та мереж для моніторингу, контролю та оптимізації продуктивності виробництва, передачі та споживання енергетичних ресурсів у системах різного ієрархічного рівня (як ОЕС України, так регіональних та локальних системах, на конкретних енергетичних об'єктах чи окремих енерготехнологій тощо).

5. На основі аналізу перспективних сфер застосування СЕМ на об'єктах енергетичного сектора визначено сучасні області науково-технічних досліджень при побудові систем енергоменеджменту для енергетичних, електроенергетичних та електротехнічних систем, які доцільно здійснювати в Україні.

Список використаної літератури

1. Кириленко О.В. Заходи та засоби перетворення енергетики України на інтелектуальну екологічно безпечну систему. *Вісник Національної академії наук України*. 2022. № 3. С. 18–23.
2. Денисюк С.П. Енергетичний перехід – вимоги до якісних змін у розвитку енергетики. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2019. № 1. С. 7–28.
3. Інтелектуальні електричні мережі: елементи та режими. Під заг. ред. акад. НАН України Кириленко О.В. К.: Ін-т електродинаміки НАН України, 2016. 400 с.
4. Блінов І.В. Проблеми функціонування та розвитку ринку електричної енергії України. (за матеріалами наукової доповіді на засіданні Президії НАН України 3 лютого 2021 р.). *Вісник НАН України*. 2021. № 3. С. 20–28. DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2019.54.005>.
5. Денисюк С.П., Мельничук Г.В., Чернецьук І.С., Лисий В.В. Техніко-економічні механізми розвитку локальних систем енергозабезпечення (Microgrid). *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2021. № 4. С. 7–22.
6. Кириленко О.В., Денисюк С.П., Блінов І.В. Цифрова трансформація: сучасні тенденції та завдання. *Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України*. 2023. № 65. С. 5 – 14. DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2023.65.005>
7. Дергачова В.В., Кузнецова К.О., Григорова З.В. Теорія і концепція менеджменту»: методологічні аспекти дисципліни. *Економічний вісник НТУУ «Київський політехнічний інститут»*. 2021. № 20. С. 64–68.
8. Лазоренко Т.В., Голуб М.О. Економічні аспекти застосування сучасних концепцій менеджменту на вітчизняних підприємствах. *Економіка та управління підприємствами*. 2019. Вип. 1 (18). С. 139–143.
9. <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9C%D0%B5%D0%BD%D0%B5%D0%B4%D0%B6%D0%BC%D0%B5%D0%BD%D1%82>
10. Інженерний менеджмент: навч. посіб. / І.І. Мельник, І.Г. Тивоненко, С.Г. Фришев [та ін.]; за ред. І.І. Мельник. Вінниця: Нова Книга. 2007. 536 с.
11. https://uk.wikipedia.org/wiki/Інженерний_менеджмент
12. https://en.wikipedia.org/wiki/Technical_management
13. <https://www.cronservise.com.ua/technical-management-services.html>
14. Дзядичевич Ю.В. Енергетичний менеджмент / Ю.В. Дзядичевич, М.В. Буряк, Р.І. Розум. Тернопіль: Економічна думка, 2010. 295 с.
15. Денисюк С.П. ISO 50001: цілі стандарту та перспективи його впровадження в Україні. К.: ТОВ «СІК ГРУП Україна», 2015. 208 с.
16. Ковалко М.П., Денисюк С.П. Енергозбереження – пріоритетний напрямок державної політики України. К.: УЕЗ. 1998. 512 с.
17. Енергоефективність у регіональному вимірі. Проблеми та перспективи. Аналітична доповідь / Шевцов А.І., Бараннік В.О., Земляний М.Г., Рязова Т.В. Регіональний філіал Національного інституту стратегічних досліджень в м. Дніпропетровську, 2014. – 78 с.
18. Дегтярьова О.О., Пудичева Г.О. Організація енергоменеджменту в системі управління енергетичним господарством. *Вісник соціально-економічних досліджень: зб. наук. пр.* 2012. № 4 (47). С. 289–295.
19. <https://saee.gov.ua/uk>
20. [https://www.ucaiug.org/Meetings/CIGRE_2014/USB%20Promo%20Content/NR%20Electric/Brochures/Energy%20Management%20System\(EMS\).pdf](https://www.ucaiug.org/Meetings/CIGRE_2014/USB%20Promo%20Content/NR%20Electric/Brochures/Energy%20Management%20System(EMS).pdf)
21. Денисюк С. П., Стржелецькі Р. Формування складових інтелектуальної платформи керування енергетичними системами та мережами. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2019. № 3 (57). С. 7–22.
22. Rathor S.K., Saxena D. Energy management system for smart grid: An overview and key issues. *Int J Energy Res.* 2020;1–43. <https://doi.org/10.1002/er.4883>
23. Albarakati A.J, Boujoudar Y., Azeroual M., Eliysaouy L., Kotb H., Aljarbough A., Khalid Alkahtani H., Mostafa S.M., Tassaddiq A., Pupkov A. (2022), Microgrid energy management and monitoring systems: A comprehensive review. *Front. Energy Res.* 10:1097858. doi: 10.3389/fenrg.2022.1097858
24. Battula, A.R., Vuddanti, S., Salkuti, S.R. Review of Energy Management System Approaches in Microgrids. *Energies* 2021, 14, 5459. <https://doi.org/10.3390/en14175459>
25. VDI-Guideline VDI 4602, page 3, Beuth Verlag, Berlin 2007.
26. Katsutomo Tanaka, Hiroshi Watanabe, Akira Endou. Enerize E3 Factory Energy Management System – For Visualizing the Energy Key Performance Indicator and Achieving Optimal Energy Efficiency. *Yokogawa Technical Report. English Edition*. Vol.53, No 1(2010), P.23–26.
27. Кириленко О.В., Блінов І.В., Танкевич С.Є. Smart Grid та організація інформаційного обміну в електроенергетичних системах. *Технічна електродинаміка*. 2012. № 3. С. 47 – 48.
28. IEC/TR 63097:2017 Smart grid standardization roadmap. 2017. 315 p.

29. Танкевич С.Є., Блінов І.В., Кириленко В.В. Україна та світ: нормативне забезпечення інтелектуальних електроенергетичних систем за концепцією Smart Grid. *Стандартизація, сертифікація, якість*. 2014. № 4 (89). С. 38 – 44.
30. Кириленко О.В., Блінов І.В., Зайцев Є.О., Палачов С.О., Васильченко В.І. Впровадження міжнародних та європейських стандартів для розвитку ОЕС України згідно з концепцією Smart Grid. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. 2022. № 63. С. 5–12. DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2022.63.005>
31. Saleh, Mahmoud; Esa, Yusef; Mohamed, Ahmed (8 January 2018). "Communication Based Control for DC Microgrids – IEEE Journals & Magazine". Publications and Research. doi:10.1109/TSG.2018.2791361. S2CID 67870651.
32. Kermani, M., Adelmanesh, B., Shirdare, E. et al (2021). Intelligent energy management based on SCADA system in a real Microgrid for smart building applications. *Renewable Energy*, 171: 1115-1127. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2021.03.008>
33. <https://integrated-standards.com/articles/what-is-integrated-management-system/>
34. <https://eaguk.org/energy-services/energy-management/>
35. <https://cietcanada.com/news/highlighting-energy-management-jobs-training-hot-topics/> Energy management information systems
36. IEC 60050 Electropedia: The World's Online Electrotechnical Vocabulary. URL: <https://www.electropedia.org/>
37. Muhammad Fahad Zia, Elhoussin Elbouchikhi, Mohamed Benbouzid. Microgrids energy management systems: A critical review on methods, solutions, and prospects. *Applied Energy*. Volume 222, 15 July 2018, Pages 1033-1055.
38. Rathor S.K., Saxena D. Energy management system for smart grid: An overview and key issues. *Int J Energy Res*. 2020;1–43. <https://doi.org/10.1002/er.4883>
39. Laayati, O., Bouzi, M., Chebak, A. Smart Energy Management System: SCIM Diagnosis and Failure Classification and Prediction Using Energy Consumption Data. In *Digital Technologies and Applications*; Motahhir, S., Bossoufi, B., Eds.; Springer International Publishing: Cham, Switzerland, 2021; Volume 211, pp. 1377–1386.
40. Trianni, A., Cagno, E., de Donatis, A. A framework to characterize energy efficiency measures. *Appl. Energy* 2014, 118, 207–220.
41. Central Energy Management System for Smart Grids. <https://www.cgi.com/sites/default/files/cgi-central-energy-management-system-factsheet.pdf>
42. <https://www.energy.gov/femp/what-are-energy-management-information-systems>
43. Nitasha Khan, Zeeshan Shahid, Muhammad Mansoor Alam, Aznida Abu Bakar Sajak, Mazliham, Talha Ahmed Khan, Syed Safdar Ali Rizvi. Energy Management Systems Using Smart Grids: An Exhaustive Parametric Comprehensive Analysis of Existing Trends, Significance, Opportunities, and Challenges. *Hindawi International Transactions on Electrical Energy Systems*. Volume 2022, Article ID 3358795, 38 pages <https://doi.org/10.1155/2022/3358795>
44. Terry L. Esper & Alexander E. Ellinger & Theodore P. Stank & Daniel J. Flint & Mark Moon. Demand and supply integration: a conceptual framework of value creation through knowledge management. *J. of the Acad. Mark. Sci.* DOI 10.1007/s11747-009-0135-3
45. Nippon, BASF, DSM asset restructuring event. <https://www.echemi.com/cms/122893.html>
46. https://www.hitachi.com/products/it/control_sys/cems/management.html
47. https://www.aceee.org/files/proceedings/2008/data/papers/10_559.pdf
48. https://www.aceee.org/files/proceedings/2008/data/papers/10_559.pdf
49. <https://webbylab.com/blog/how-iot-can-help-with-energy-management/>
50. Top 10 Applications of AI in the Energy Sector. <https://www.fdmgroup.com/blog/ai-in-energy-sector/>
51. <https://integrated-standards.com/articles/what-is-integrated-management-system/>

O. Kyrylenko¹, academician of the NAS of Ukraine, ORCID 0000-0003-3610-7670

S. Denysiuk², Dr. Sc. (Eng.), Prof., ORCID 0000-0002-6299-3680

I. Blinov^{1,2}, Dr. Sc. (Eng.), Prof., ORCID 0000-0001-8010-5301

¹Institute of Electrodynamics National Academy of Science of Ukraine

²National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

ENERGY MANAGEMENT: NEW PRIORITIES OF THE 21ST CENTURY

The development of management methodology and the concept of energy management in modern conditions of transforming the energy sector by the requirements of the carbon-free economy are considered. New qualitative features and new areas of application of energy management and energy management systems (EMS) in the implementation of the energy transition and implementation of the Smart Grid concept have been revealed. It has been established that modern energy management is a proactive, organized, and systematic coordination of the purchase, transformation, distribution, and use of energy to meet requirements, taking into account environmental

and economic goals. In contrast to the formation of the EMS according to the ISO 50000 series of standards, today the construction of the EMS is becoming more relevant, which provides systemic (complex) optimization of the parameters, structure, and modes of various technical objects according to a set of technical, economic and environmental criteria.

It is shown that EMS is much more than a simple technical solution for monitoring the parameters and state of energy systems. With comprehensive forecasts of energy demand and supply, this system takes energy management to a completely new level, allowing operators of facilities (enterprises, buildings, and smart networks and systems) to determine the strategic direction of energy management, implement it, and achieve both energy efficiency and energy availability and environmental (social) acceptability. The components of EMS for Smart Grid are characterized, in particular: monitoring (actual energy production, actual energy demand, state of charge of energy storage, price uncertainty); forecast (energy production, energy demand, mobile data storage, uncertainty); power quality management (loss minimization, power quality indicators, and reliability/comfort); planning/dispatch/cost (operating costs, reduction of GHG emissions, profit maximization).

It is proposed that a promising direction is to consider the SEM as a system of information and communication technologies, which at the system level is combined with power energy processes used by operators of electric power systems and networks to monitor, control, and optimize the productivity of production, transmission, and consumption of energy resources in systems of various hierarchical levels. level (as UES of Ukraine, regional and local systems, on specific energy facilities or individual energy technologies, etc.). Based on the analysis of prospective areas of application of EMS at energy sector facilities, modern areas of scientific and technical research in the construction of energy management systems for energy, electric power, and electrotechnical systems, which are practical to carry out in Ukraine, have been determined.

Keywords: energy transformation, management, energy management, energy management systems, Smart Grid.

References

1. Kyrylenko O. Measures and Ways of Transforming Ukraine's Energy Sector into an Intelligent Environmentally Friendly System. *Bulletin of the National Academy of Sciences of Ukraine*. 2022. № 3. C. 18-23.
2. Denysiuk S. Energy transition – requirements for quality changes in energy sector development. *Power engineering: economics, technique, ecology*. 2019. № 1. P. 7–28.
3. Intelligent electrical networks: elements and modes. Under general Ed. Acad. National Academy of Sciences of Ukraine O. V. Kyrylenko: Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2016. 400 p.
4. Blinov I.V. Problems of functioning and development of the electric energy market of Ukraine. (based on the materials of the scientific report at the meeting of the Presidium of the National Academy of Sciences of Ukraine on February 3, 2021). *Bulletin of the National Academy of Sciences of Ukraine*. 2021. No. 3. P. 20-28. DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2019.54.005>
5. Denysiuk S., Melnychuk H., Cherneshchuk I., Lysyi V. Technical and economic development mechanisms of local energy supply systems (Microgrid). *Power engineering: economics, technique, ecology*. 2021. № 4. P. 7–22.
6. Kyrylenko O., Denysiuk S., Blinov I. Digital transformation of the energy industry: current trends and task. *Pratsi Instytutu Elektrodynamiky NAN Ukrainy*. 2022. № 63. P. 5–12. DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2022.63.005>
7. Dergachova V., Kuznetsova K., Grigorova Z. Theory and concepts of management: methodological aspects of the course. *Economic Bulletin of NTUU «Kyiv Polytechnic Institute»*. 2021. № 20. P. 64–68.
8. Lazorenko T.V., Holub M.O. (2019) Economic aspects of modern management concepts application at domestic enterprises. *Ekonomika ta upravlinnia pidpryemstvamy*. №. 1 (18). P. 139–143.
9. <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9C%D0%B5%D0%BD%D0%B5%D0%B4%D0%B6>
11. https://uk.wikipedia.org/wiki/Інженерний_менеджмент
12. https://en.wikipedia.org/wiki/Technical_management
13. <https://www.cronservice.com.ua/technical-management-services.html>
14. Dziadykevych Yu.V., Buriak V.M., Rozum R.I. Energy management. Ternopil: Ekonomichna dumka, 2010. 295 p.
15. Denysiuk S.P. ISO 50001: objectives of the standard and prospects for its implementation in Ukraine. K.: SIK GROUP Ukraine LLC, 2015. 208 p.
16. Kovalko M.P., Denysiuk S.P. Energy conservation is a priority direction of the state policy of Ukraine. K.: UEZ, 1998. 512 p.
17. Energy efficiency in the regional dimension. Problems and prospects. Analytical report / Shevtsov A.I., Barannik V.O., Zemlyanyi M.G., Ryauzova T.V. // Regional branch of the National Institute of Strategic Studies in Dnipropetrovsk, 2014. – 78 p.
19. <https://sae.gov.ua/uk>
20. [https://www.ucaiug.org/Meetings/CIGRE_2014/USB%20Promo%20Content/NR%20Electric/Brochures/Energy%20Management%20System\(EMS\).pdf](https://www.ucaiug.org/Meetings/CIGRE_2014/USB%20Promo%20Content/NR%20Electric/Brochures/Energy%20Management%20System(EMS).pdf)
21. Denysiuk S.P., Strzelecki R. Formation of components of an intelligent platform for managing energy systems and networks. *Energy: economy, technology, ecology: scientific journal*. 2019. No. 3 (57). P. 7– 22.

22. Rathor S.K., Saxena D. Energy management system for smart grid: An overview and key issues. *Int J Energy Res.* 2020;1–43. <https://doi.org/10.1002/er.4883>
23. Albarakati A.J, Boujoudar Y., Azeroual M., Eliysaouy L., Kotb H., Aljarbough A., Khalid Alkahtani H., Mostafa S.M., Tassaddiq A., Pupkov A. (2022), Microgrid energy management and monitoring systems: A comprehensive review. *Front. Energy Res.* 10:1097858. doi: 10.3389/fenrg.2022.1097858
24. Battula, A.R., Vuddanti, S., Salkuti, S.R. Review of Energy Management System Approaches in Microgrids. *Energies* 2021, 14, 5459. <https://doi.org/10.3390/en14175459>
25. VDI-Guideline VDI 4602, page 3, Beuth Verlag, Berlin 2007.
26. Katsutomo Tanaka, Hiroshi Watanabe, Akira Endou. Enerize E3 Factory Energy Management System – For Visualizing the Energy Key Performance Indicator and Achieving Optimal Energy Efficiency. *Yokogawa Technical Report. English Edition.* Vol.53, No 1(2010), P.23-26.
27. Kyrlyenko O.V., Blinov I.V., Tankevich S.E. Smart Grid and the organization of information exchange in electric power systems. *Technical electrodynamics.* 2012. No. 3. P. 47-48.
28. IEC/TR 63097:2017 Smart grid standardization roadmap. 2017. 315 p.
29. Tankevich S.E., Blinov I.V., Kyrlyenko V.V. Ukraine and the world: regulatory support for intelligent electric power systems based on the Smart Grid concept. *Standardization, certification, quality.* 2014. No. 4 (89). P. 38-44.
30. Kyrlyenko O., Blinov I., Zaitsev Ie., Palachov S., Vasylychenko V. International and European standards implementation for use Smart Grid concept in IPS of Ukraine. *Pratsi Istitutu Elektrodynamiky NAN Ukrainy.* 2022. No 63. Pp. 5–12. DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2022.63.005>
31. Saleh, Mahmoud; Esa, Yusef; Mohamed, Ahmed (8 January 2018). "Communication Based Control for DC Microgrids – *IEEE Journals & Magazine*". Publications and Research. doi:10.1109/TSG.2018.2791361. S2CID 67870651.
32. Kermani, M., Adelmanesh, B., Shirdare, E. et al (2021). Intelligent energy management based on SCADA system in a real Microgrid for smart building applications. *Renewable Energy*, 171: 1115-1127. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2021.03.008>
33. <https://integrated-standards.com/articles/what-is-integrated-management-system/>
34. <https://eaguk.org/energy-services/energy-management/>
35. <https://cietcanada.com/news/highlighting-energy-management-jobs-training-hot-topics/> Energy management information systems
36. IEC 60050 Electropedia: The World's Online Electrotechnical Vocabulary. URL: <https://www.electropedia.org/>
37. Muhammad Fahad Zia, Elhoussin Elbouchikhi, Mohamed Benbouzid. Microgrids energy management systems: A critical review on methods, solutions, and prospects. *Applied Energy.* Volume 222, 15 July 2018, Pages 1033-1055.
38. Rathor S.K., Saxena D. Energy management system for smart grid: An overview and key issues. *Int J Energy Res.* 2020;1–43. <https://doi.org/10.1002/er.4883>
39. Laayati, O., Bouzi, M., Chebak, A. Smart Energy Management System: SCIM Diagnosis and Failure Classification and Prediction Using Energy Consumption Data. In *Digital Technologies and Applications*; Motahhir, S., Bossoufi, B., Eds.; Springer International Publishing: Cham, Switzerland, 2021; Volume 211, pp. 1377–1386.
40. Trianni, A., Cagno, E., de Donatis, A. A. framework to characterize energy efficiency measures. *Appl. Energy* 2014, 118, 207–220.
41. Central Energy Management System for Smart Grids. <https://www.cgi.com/sites/default/files/cgi-central-energy-management-system-factsheet.pdf>
42. <https://www.energy.gov/femp/what-are-energy-management-information-systems>
43. Nitasha Khan, Zeeshan Shahid, Muhammad Mansoor Alam, Aznida Abu Bakar Sajak, Mazliham, Talha Ahmed Khan, Syed Safdar Ali Rizvi. Energy Management Systems Using Smart Grids: An Exhaustive Parametric Comprehensive Analysis of Existing Trends, Significance, Opportunities, and Challenges. *Hindawi International Transactions on Electrical Energy Systems.* Volume 2022, Article ID 3358795, 38 pages <https://doi.org/10.1155/2022/3358795>
44. Terry L. Esper & Alexander E. Ellinger & Theodore P. Stank & Daniel J. Flint & Mark Moon. Demand and supply integration: a conceptual framework of value creation through knowledge management. *J. of the Acad. Mark. Sci.* DOI 10.1007/s11747-009-0135-3
45. Nippon, BASF, DSM asset restructuring event. <https://www.echemi.com/cms/122893.html>
46. https://www.hitachi.com/products/it/control_sys/cems/management.html
47. https://www.aceee.org/files/proceedings/2008/data/papers/10_559.pdf
48. https://www.aceee.org/files/proceedings/2008/data/papers/10_559.pdf
49. <https://webbylab.com/blog/how-iot-can-help-with-energy-management/>
50. Top 10 Applications of AI in the Energy Sector. <https://www.fdmgroup.com/blog/ai-in-energy-sector/>
51. <https://integrated-standards.com/articles/what-is-integrated-management-system/>

Надійшла: 18.01.2024

Received: 18.01.2024

T. Yevtukhova¹, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof., ORCID 0000-0003-4778-2479

E. Nikitin^{1,2}, Dr. Sc. (Eng.), ORCID 0000-0002-0173-6461

O. Novoseltsev¹, Dr. Sc. (Eng.), ORCID 0000-0001-9272-6789

O. Shemchuk³; regional manager, ORCID 0009-0006-1618-1311

¹General Energy Institute of National Academy of Sciences of Ukraine

²The Gas Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine

³Khmelnitsky Oblast Military Administration

REGIONAL ENERGY MANAGEMENT SYSTEMS BASED ON ESCOs: FEATURES OF CREATION AND APPLICATION

Excessive consumption and inefficient use of fuel and energy resources, unsatisfactorily high energy intensity of production of goods and services and their associated low competitiveness in domestic and foreign markets, in the context of a shortage of own energy resources and constant growth of prices for them, puts the problem of improving energy efficiency and energy saving of the regional and, as a result, national economy in the category of primary importance and relevance. The solution to this problem is achieved by creating a regional energy management system in regions (districts) on the platform of regional energy service companies, which allows, through a unified energy policy for the development and implementation of energy efficiency and energy saving projects in the region and the introduction of renewable energy sources, to more effectively address the problems of attracting foreign investment in the recovery and innovative development of the regional economy.

Keywords: energy management, energy service companies, energy efficiency, energy saving, regional management system.

Introduction

Energy efficiency and energy saving are crucial factors for sustainable economic development and the competitiveness of goods and services produced in any sector of the economy. These factors directly affect the energy security and environmental condition of the region and the welfare of its residents. At the same time, the current state of development of the country's regional economic systems is characterized by excessive consumption and inefficient use of fuel and energy resources (FER), unsatisfactorily high energy intensity of production of goods and services and their associated low competitiveness in domestic and foreign markets. This, in the context of a shortage of domestic energy resources and a constant increase in their prices, puts the problem of improving energy efficiency and energy saving (EE) of the regional and, accordingly, national economy in the category of priority importance and relevance.

The solution to this problem requires a systematically coordinated national and regional energy policy and the introduction of energy-saving, low-waste and zero-waste technologies, equipment, devices and materials, effective systems and means of controlling energy consumption, energy efficiency and environmental protection, and the development of relevant regulatory, methodological and information and advisory materials.

Energy management systems (EMS) are used worldwide as a productive tool for solving this problem, where among the fundamental methods and mechanisms for their implementation on the basis of energy service companies (ESCOs), the main focus is on mechanisms of economic incentives for enterprises and institutions to improve EE, the methodology of integrated resource planning, and the use of performance contracting. It is these methods and mechanisms implemented on the basis of ESCOs that ensure a guaranteed result from the realization of EE measures (projects) for the rational use of resources and budget savings for their purchase, which is crucial for business decisions on the feasibility of implementing EE projects [1-7].

Purpose and objectives of the study.

The aim of the study is to identify, on the basis of SWOT analysis, the strengths, weaknesses, opportunities and threats to the implementation of the tasks of improving the regional system of management of the efficiency of fuel and energy resources and reducing the corresponding financial costs in the budgetary sphere and for the population through the implementation of a set of organizational and technical measures and energy-efficient investment projects.

Material and results of the research.

At present, one of the main factors of competitiveness of goods and services produced in the regions of Ukraine is the reduction of energy intensity of production and, accordingly, the growth of its energy efficiency. Therefore, to manage the energy efficient behavior of enterprises, it is necessary to create appropriate regional energy management mechanisms that meet the requirements of the socio-economic and environmental environment of the region. The required level of energy efficiency is achieved in the process of systematic organizational and managerial activities at the regional level aimed at analyzing, monitoring and planning the

behavior of enterprises in relation to the used energy resources, including their selection, assessment of efficiency, economy and environmental friendliness, implementation of staff motivation measures, etc. [8]

The combination of the regional energy supply system with the regional economic system allows for the fullest use of the potential for efficient use of the region's natural resources in the context of the specifics of its production, distribution, exchange and consumption of materials, goods and services, with internal and external relations. The latter, in addition to the systemic properties of the territory, determine the conditions of reproduction of the gross regional product and fixed assets, optimal distribution of labor force, formation of population incomes and their commodity supply, sources of investment, etc. At the same time, the mechanisms of the region's transition to sustainable development should be aimed at achieving natural and economic balance, taking into account the peculiarities and originality of natural resources, economic and social conditions.

Regional energy management on the basis of ESCOs is a special type of business activity carried out within the territorially united urban and rural communities of a region (oblast, district) in accordance with the goals and on the basis of regional policy mechanisms, and consists in uniting and combining the efforts of local authorities, heads of enterprises and organizations, and small and medium-sized businesses to effectively meet the needs of end users (primarily the population) in fuel and energy resources of local origin.

A regional energy management system (REMS) based on a regional ESCO combines and focuses the activities of local EMSs established at enterprises and organizations in the region, and through their jointly coordinated interaction contributes to additional benefits in terms of improving business efficiency, saving energy resources and preserving the environment.

Among the main tasks of the REMS are the following:

- monitoring the flow of fuel, energy, water and related financial flows in the region;
- optimization of budget expenditures for the purchase of fuel and energy resources;
- improving the quality of energy services;
- initiating, preparing and monitoring the implementation of energy service projects;
- attracting investment in technological upgrades and energy-efficient modernization of regional infrastructure;
- shaping the economical behavior of energy consumers and promoting energy efficiency;
- motivation for energy and water conservation by the population and utility workers.

The regional ESCO (RESCO) is the central executive element of the REMS, responsible for the development and implementation of EE projects within the region. For this purpose, it is authorized to redistribute a share of resources of local energy service companies attracted on voluntary mutually beneficial terms and fixed by energy service agreements with each of them.

RESCO is an energy service company that provides energy services, i.e., carries out measures that allow for a guaranteed increase in energy efficiency and energy savings. A typical list of RESCO services includes: energy audit; feasibility study of proposed EE measures; attraction of financial resources for project implementation; management of financial and technical risks associated with the implementation of energy saving measures; supply, installation, operation and maintenance of equipment; supervision of energy saving measures and control of achieved savings; conducting trainings for customer's personnel aimed at changing people's behavior aimed at efficient use of energy resources.

The effectiveness of coordinated cooperation between RESCO and local EMSs largely depends on their ability to take into account the absolute and comparative advantages of cooperation between enterprises and organizations located in different territorial and economic zones of the region's internal and possibly external markets. Fig. 1 shows a structural and functional diagram of the proposed mechanism of cooperation between RESCO and enterprises operating in different economic zones. The boundary line in Fig. 1 conditionally separates the two zones where enterprises (RESCO's clients) are located or carry out business activities within the framework of local EMS projects.

The organization of a REMS based on cloud-based virtual energy management computer technologies opens up fundamentally new opportunities that allow remote control of various energy-consuming equipment, such as heating, ventilation, air conditioning systems, etc., collecting operational data on the efficiency of each unit of the identified energy-intensive equipment and generating specific recommendations in real time to find and use the most attractive energy saving opportunities at the enterprise (company, organization). Such opportunities also include the interaction of REMS with suppliers of fuel and energy resources and communal services, as well as with manufacturers and suppliers of energy-efficient equipment and materials and, most importantly, with consumers of the services provided (Fig. 2).

Within the virtually organized RESCO community, these difficulties are largely overcome by [9]:

- Systematic coordination of interaction between the community members (clients) based on the principle of relative organizational and functional independence of each of them,
- Systemic ranking of projects submitted by clients to identify the possibility, feasibility and priority of their financing, in whole or in part, at the expense of the community (RESCO),

- Integration and further optimization of the parameters of financial, economic and energy resources provided by project clients,
- Integrated attraction of investments in a set of projects of the community members and provision of prompt assistance to participants in cases of unforeseen expenses (losses, etc.).

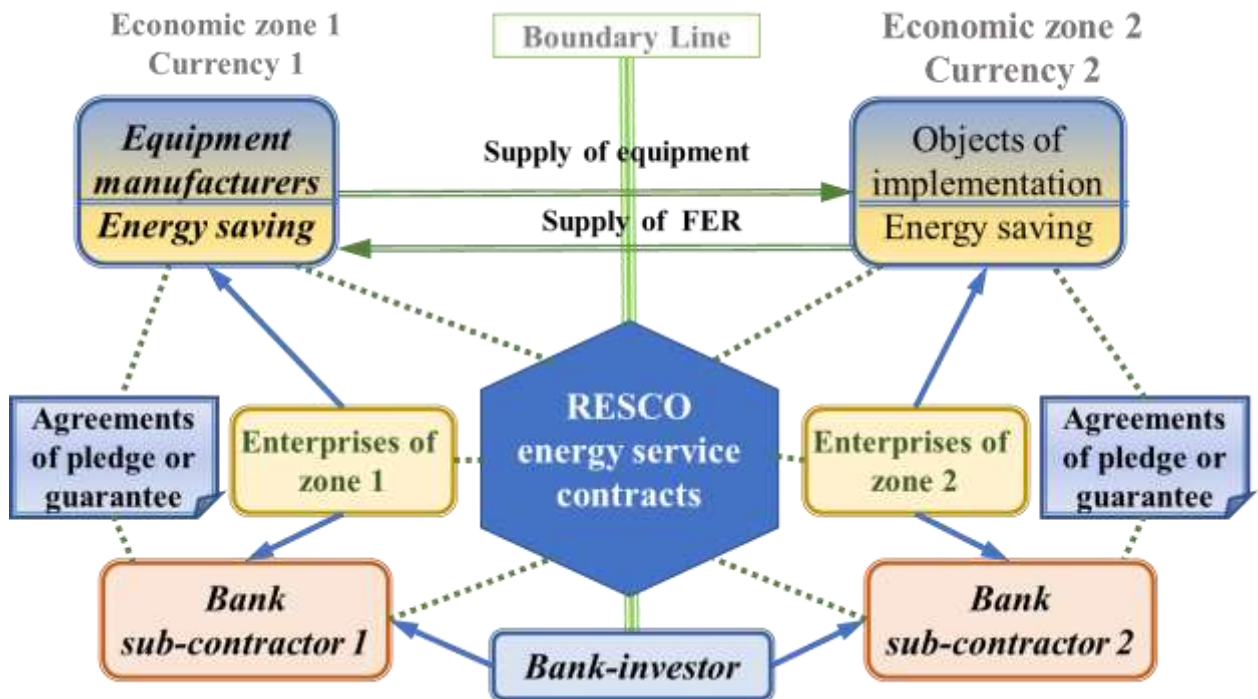


Figure 1. *Structural and functional diagram of the RESCO mechanism for cooperation between enterprises operating in different economic zones*

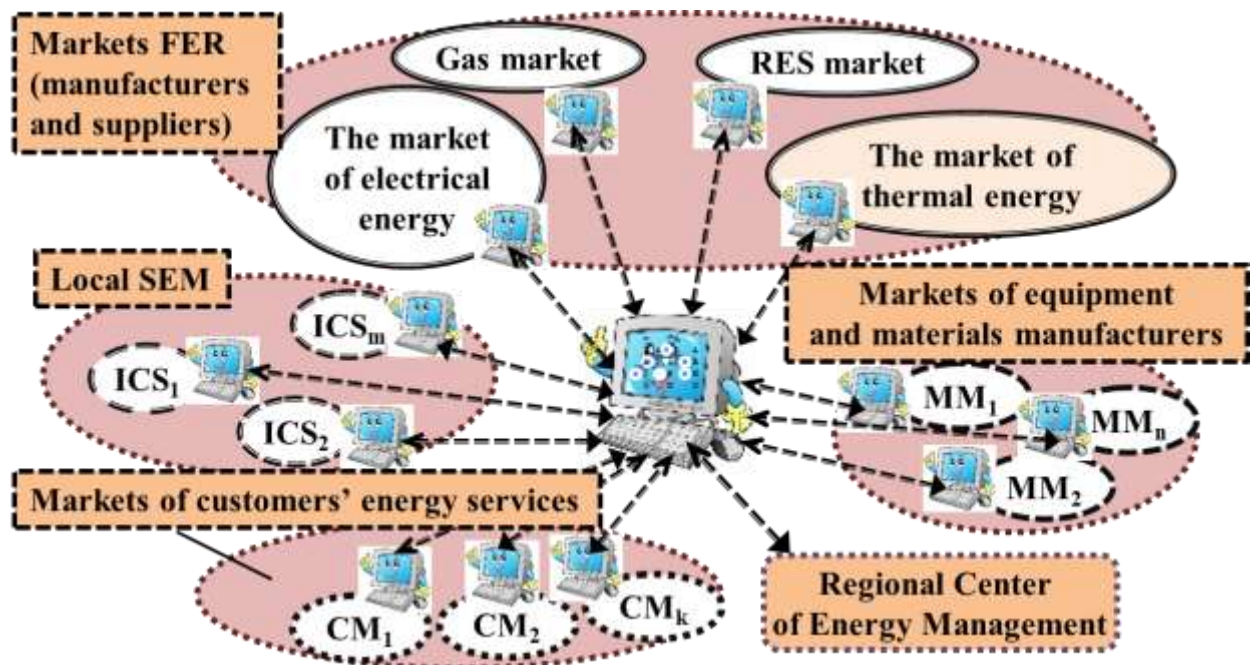


Figure 2. *Participants (service providers and customers) of REMS.*

REMSs based on cloud information and communication technologies used by system operators to monitor, control and optimize the parameters of business activities of an organization (company), including those related to

the actions of personnel to control the operating modes of technological and auxiliary equipment [10]. The main advantages of using such REMSs are their capabilities for further development of the service market, which are realized by: improving the efficiency of service provision; more sustainable and reliable investment attraction; use of renewable energy sources, energy storage; introduction of virtually organized systems of automated control of energy facilities of customers, etc.

The implementation of energy management services in the environment of virtually organized local EMSs allows to expand the scope and improve the quality of energy service provision by specialized companies by combining their resources, capabilities and information. The list of the latter usually includes various service-oriented organizations, consulting and research institutes, construction and installation organizations, industry associations, governmental organizations and independent consultants providing specialized legal or insurance services, marketing expertise, etc. This allows the members of the virtual business community of local EMSs united under the responsibility of the REMS to reduce business costs and risks, increase the efficiency and flexibility of data and modern technology exchange, facilitate access to new markets and improve the conditions for financing joint projects.

Among other advantages of using virtual energy management services, we would like to highlight their potential for further development of the energy service market, which is realized through:

1. Improving the efficiency of service delivery,
2. More sustainable and reliable investment attraction,
3. Use of renewable energy sources, cogeneration, heat pumps, energy storage, etc,
4. Managing the workload of project customers (clients),
5. Organizing portfolio supplies of equipment and materials,
6. Use of distributed generation,
7. Simplifying the procedure for effective search and selection of partners and establishing fair competition.

An analysis of the international experience of developed countries, as well as Ukraine, shows the effectiveness of creating and operating regionally oriented energy management systems based on ESCOs in the form of a municipal enterprise or a limited liability company. In any case, they are responsible, in whole or in part, for energy management and planning, energy service project management (preparation of such projects, support of energy service procurement, protection of community interests), conclusion and implementation of energy service contracts, supervision of their implementation, mediation between the municipality and business in the field of energy efficiency and energy supply, attraction of financing for EE projects, conducting information campaigns and trainings in the field of energy efficiency.

Establishing a community-based RESCO in the form of a municipal enterprise to implement energy service projects has a number of advantages. First, a municipal RESCO selects objects for investment in energy efficiency measures taking into account the interests of the community, second, it keeps the saved funds in the community, and third, it has the ability to attract external financing for projects. I.e., its effective operation increases the community's ability to attract loans and grants from Ukrainian banks and international financial institutions by using the mechanism of local guarantees of debt obligations that significantly improves the RESCO 's creditworthiness, reduces the cost of financing the energy efficiency projects. And finally, a municipal RESCO increases the institutional capacity of the community in the field of energy efficiency. According to the relevant decision of the council of the respective territorial community, the RESCO may have the status of a municipal company with its own staff, which usually includes the positions of director (also known as regional energy manager), regional energy auditor and investment project finance specialist. Their primary task should be to form teams of qualified specialists in engineering, energy efficiency and construction for the regional and local EMS.

In practice, other options are also possible, for example, the creation of RESCO as separate unit at the operating utility company of the region.

Conclusions.

The creation of a regional energy management system in oblasts (districts) on the platform of a regional ESCO, which coordinates the activities of local EMSs, is undoubtedly necessary, since the era of energy efficiency and energy saving projects and even the implementation of renewable energy sources funded by grants from international organizations is already over, and existing local ESCOs are not able to offer projects large enough in terms of funding to be attractive to investors, both external and internal.

It is important that the systemic combination of two usually separate approaches (EMS and ESCO) allows for a unified energy policy for the development and implementation of EE and RES projects in the region to more effectively address the problems of attracting investment in the recovery and innovative development of the regional economy.

In our opinion, the establishment of a regional ESCO in the form of a municipal enterprise is more attractive than in the form of a limited liability company, mainly due to the wider possibilities to support ESCO activities in terms of using local debt guarantee mechanisms to improve the creditworthiness of ESCOs and create favorable conditions for attracting loans and grants from Ukrainian banks and international financial institutions for the

implementation of large-scale EE and RES projects at the regional level. It should also be noted that despite the fact that ESCO projects are self-sustaining (they pay for themselves through energy savings achieved as a result of their implementation), project customers should also take an active part in their financing.

References

1. Kovalko O.M., Kovalko N.M., Yevtukhova T.O., Novoseltsev O.V. (2023), Communal Heat Engineering: Energy Efficiency, Structure of Management, Energy Services (in Ukrainian-English), under general ed. of O.V. Novoseltsev: NAS of Ukraine, Institute of General Energy (in Ukrainian), - 720 p., <https://web.nlu.org.ua/object.html?id=2196>
2. Cooremans C, Sch?nenberger A. (2019) Energy management: A key driver of energy-efficiency investment? // Journal of Cleaner Production Vol. 230(4), P. 264-275. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.04.333
- 3, IEA (2022), Energy Efficiency - Paris: IEA Publication . - 130 p. <https://www.iea.org/reports/energy-efficiency-2022>
4. Badi S. (2021) Facilitating ESCO market development through value co-creation: role of utility sector intermediaries. Energy Efficiency;14(6):56. doi: 10.1007/s12053-021-09972-x
5. Eutukhova T., Kovalko O., Novoseltsev O., Woodroof E. Energy Services: A Proposed Framework to Improve Results // Energy Engineering, 2020, Vol.117(3), P. 99-110. DOI: 10.32604/EE.2020.010864
6. Essig, M.; Glas, A.; Selviaridis, K. and Roehrich, J.K. (2016). Performance-based contracting in business markets. Industrial Marketing Management, Vol. 59, pp. 5-11. <https://doi.org/10.1016/j.indmarman.2016.10.007>
7. Alatorrefrenk, C., Backhaus, M., Bauer, N. (2017). Perspectives for the energy transition: investment needs for a low-carbon energy system. Germany: IEA & IRENA Publications.
8. Kostina L.M. Mechanisms for the formation of a comprehensive strategy for the innovative development of industrial regions: PhD thesis for the degree of Candidate of Science in Public Administration: specialty 25.00.02 "Mechanisms of Public Administration" / L.M. Kostina.
9. Novoseltsev O.V., Yevtukhova T.O., Chupryna L.V. Methods and models of a comprehensively balanced virtual energy management system. Energy: economy, technology, ecology. 2023. №2. С. 46-51. DOI 10.20535/1813-5420.2.2023.279641.
10. Chupryna L., Kovalko O., Novoseltsev O., Woodroof E. Virtual Organization of Energy Management: Service-Oriented Framework to Improve Results // International Journal of Energy Management, Vol. 2, No. 6, 2020, P. 47-63. <https://www.researchgate.net/publication/356980815>

Т.О. Євтухова¹, канд. техн.наук., доцент; ORCID 0000-0003-4778-2479

Є.Є. Нікітін^{1,2}, д-р техн.наук; ORCID 0000-0002-0173-6461

О.В. Новосельцев¹, чл. кор. НАН України, д-р техн.наук; ORCID 0000-0001-9272-6789

О.О. Шемчук³, регіональний менеджер, ORCID 0009-0006-1618-1311

¹Інститут загальної енергетики НАН України

²Інститут газу НАН України

³Хмельницька обласна військова адміністрація

СПЕЦИФІКА СТВОРЕННЯ РЕГІОНАЛЬНИХ СИСТЕМ ЕНЕРГЕТИЧНОГО МЕНЕДЖМЕНТУ НА БАЗІ ЕСКО

Надмірне споживання та неефективне використання паливно-енергетичних ресурсів, незадовільно високий рівень енергоємності виробництва товарів і послуг і пов'язана з цим низька їх конкурентоспроможність на внутрішньому та зовнішніх ринках, в умовах дефіциту власних енергоресурсів і постійного зростання цін на них, висуває проблему підвищення енергоефективності та енергозбереження регіональної і, як наслідок, національної економіки у категорії першочергової значущості та актуальності. Вирішення цієї проблеми досягається шляхом створення регіональної системи енергетичного менеджменту в областях (районах) на платформі регіональних енергосервісних компаній, яка координує діяльність місцевих систем енергетичного менеджменту, що дозволяє за рахунок проведення єдиної енергетичної політики з розробки та впровадження в регіоні проектів з підвищення енергоефективності та енергозбереження і впровадження відновлюваних джерел енергії більш ефективно вирішувати проблеми залучення іноземних інвестицій у відновлення та інноваційний розвиток регіональної економіки.

Ключові слова: системи енергетичного менеджменту, енергосервісні компанії, енергоефективність, енергозбереження, регіональна система управління.

Надійшла: 07.11.2023

Received: 07.11.2023

TOPOLOGY OF EFFICIENT USE OF ENERGY BY A CHARGING STATION FOR ELECTRIC VEHICLES

Presents the results of the research of semiconductor converters of charging stations for electric vehicles based on lithium-ion cells. Basic energy parameters and charge-discharge characteristics of lithium-ion and lithium-iron-phosphate batteries are given. The topology of the proposed charging station for electric vehicles based on active rectifier circuits is presented. The parameters of the substitution circuits the battery compartment of the Tesla S electric vehicle are described. The method of fast battery charging with constant voltage and constant current is described, which provides a greater number of battery charge-discharge cycles. A simulation model of the proposed charging station structure with an automatic control system is presented. The efficiency of the proposed charging station system was calculated for different parameters of the charge current and switching frequency.

Keywords: *active rectifier, charging station, energy efficiency, electric vehicle, lithium-ion battery.*

Introduction

Over the last decade, the number of electric vehicles in Europe has increased more than 20 times. This is due to the fact that electric vehicles are an environmentally friendly form of transport, and it is much cheaper to drive 100 km in an electric car than in a car with an internal combustion engine [1, 2].

Charging stations are an important component of electric vehicle infrastructure. Further development and improvement of power converters for charging stations of electric vehicles with lithium-ion, lithium-iron-phosphate and other types of batteries will lead to an increase in the energy efficiency of charging stations, better electromagnetic compatibility between charging stations and the power network, lower emissions of harmonics and components of reactive power [3, 4].

The power circuit with fast charging consists of three stages, namely: an input filter to reduce input harmonics and optimize the power factor, a rectifier for cyclic DC currents, and a DC-DC converter to transfer energy to the battery for fast DC charging from a hybrid electric vehicle [5, 6].

Analysis of Recent Research and Publications

In paper [7] converters with 9-phase power systems for charging stations of electric vehicles are considered. However, their disadvantages include low efficiency, which reaches 91 %. In addition, the converter presented in this article requires electromechanical phase separation, which significantly increases the cost of the system and increases its weight and size indicators.

The paper [8] presents a study of the efficiency of a charging station for electric vehicles based on a converter consisting of a rectifier and a parallel three-channel buck converter. However, the disadvantage of this topology is that the power source is not galvanically isolated from the load. Studies also show that the peak efficiency of the converter is lower than 92 %. In addition, there is no data on the integral value of the efficiency of the entire process of charging the battery of an electric vehicle.

A general drawback of the considered systems is the very concept of multi-stage energy conversion, which causes power losses in converters and, accordingly, a decrease in the efficiency of the charging station [9, 10].

Thus, the issue of further improving the energy efficiency of charging stations for electric vehicles is an urgent and unsolved task.

Purpose and Objectives of the Study

The purpose of the study is to increase the energy performance of the electric vehicles charging station by using an active rectifier that works in the power factor correction mode. To achieve this purpose, the following tasks are set:

- analyze the basic energy parameters and charge-discharge characteristics of batteries used in electric vehicles;
- present the proposed structure of a charging station for electric vehicles based on an active rectifier;
- conduct a study of energy indicators, namely power losses and electricity quality indicators in the developed simulation model of a charging station based on an active rectifier.

Main Material of the Study

Traditional charging stations for electric vehicles include a two-stage energy conversion and consist of an input AC/DC rectifier and an output DC/DC converter [11, 12]. In this topology, an input rectifier is used to create

a DC voltage circuit. Then the DC/DC converter regulates the voltage and charging current of electric vehicles in a certain range. DC/DC converters are also used for galvanic isolation of electric vehicles from the network.

The most common element of electric vehicle batteries are lithium-ion batteries [13, 14]. The main parameters of lithium-ion and lithium-iron-phosphate batteries are given in Table 1.

Table 1 – Parameters of lithium-ion and lithium-iron-phosphate batteries

Parameter	Li-Ion	Li-Fe-PO ₄	Li-Ti-O
Specific energy, Wh/kg	100...265	90...160	60...110
Energy density, Wh/L	240...693	325	170...180
Charge / discharge efficiency, %	80...90	≥90	–
Energy / consumer price, Wh/US\$	7.6	1...4	–
Cycle durability	400...1200	2750...12000	≥15000
Capacity, A·h	2.6	–	–
Max voltage, V	4.2	3.5	2.7
Nominal voltage, V	3.7	3.2	2.4
Discharge-cut voltage, V	3	2.1	1.5
Max charge voltage, V	4.2	3.65	–
Internal impedance of single battery, mOhm	≤70	≤15	–
Operating temperature, °C	0...+45 (charge) –20...+60 (discharge)	–	–
Recommended charge current, A	0.52 (standart, 0.2C) 1.3 (fast, 0.5C)	–	–

The charge-discharge characteristics of the LIR18650 lithium-ion battery at currents from 0.52 A to 7.2 A are shown in Fig. 1.

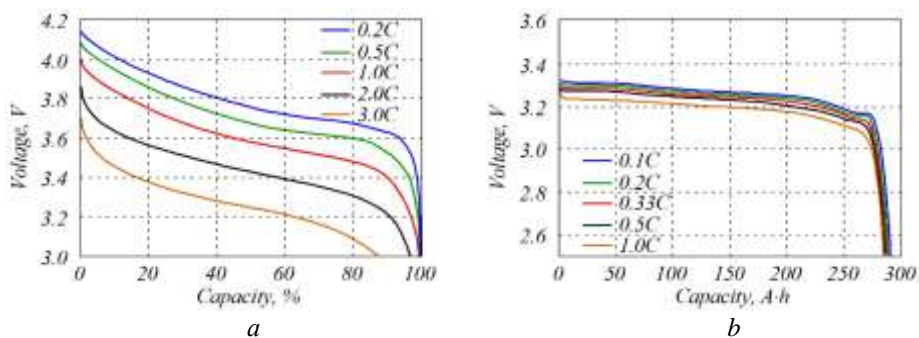


Figure 1 – Charge-discharge characteristics:
a – lithium-ion battery LIR18650; b – lithium-iron-phosphate battery LF280

As can be seen from Fig. 1 lithium-ion batteries allow to deliver a fairly large current, but due to the presence of internal active resistance, at high currents there is a significant drop in the voltage delivered by the storage device.

At the same time, the amount of internal power losses in the battery will also increase, which will lead to its overheating. At the same time, the operating range of lithium-ion batteries in charge mode is from –20 °C to +45 °C, and in discharge mode from –20 °C to +60 °C. When the temperature regime is exceeded, the battery loses a significant part of its capacity, and with a significant exaggeration of the temperature, the battery may catch fire and destroy. The recommended charging mode for Li-Ion batteries is the CV–CC (constant voltage – constant current) mode, which is shown in Fig. 2 [15, 16].

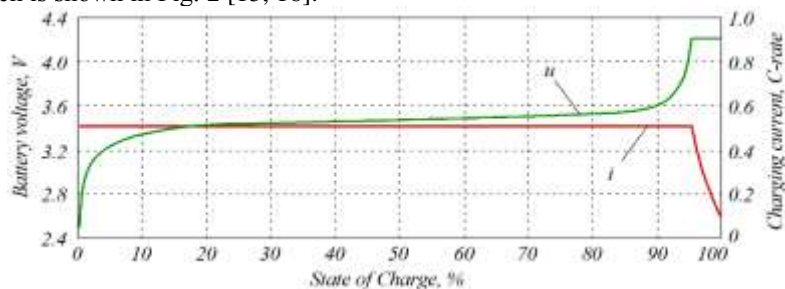


Figure 2 – Characteristics of the Li-Ion battery charge mode

Thus, there are several promising types of storage batteries, between which there is a fairly close correlation between cost and operational characteristics, namely, the resource of the amount of charge-discharge, charge time, degradation, and others.

At the same time, the main requirements of charging station systems are regulation and stabilization of charging current and voltage. In addition, it is also important to ensure the requirements for increasing the efficiency of the converter, and to ensure the requirements for electromagnetic compatibility [17].

Based on the recommended charge modes of lithium-ion storage devices, there are requirements for regulation and feedback of the output current and output voltage to the converters implementing the charge. In addition, in the case of power supply from the general industrial electrical network, electromagnetic compatibility requirements are imposed on them, namely the limitation of the harmonic spectrum of higher harmonics of currents that are consumed from the electrical network or generated to it. The topology of a single-link transformation of a charging station for electric vehicles is shown in Fig. 3.

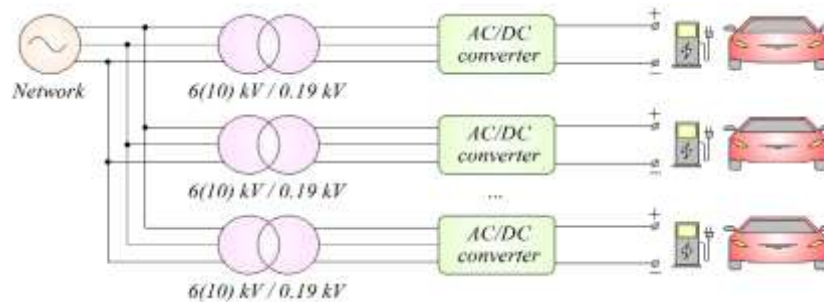


Figure 3 – Structural diagram of a single-link charging station for electric vehicles

Promising topologies that can provide the listed requirements for charge-discharge modes of powerful storage devices are an active three-phase voltage rectifier, the circuits of which are shown in Fig. 4, 5.

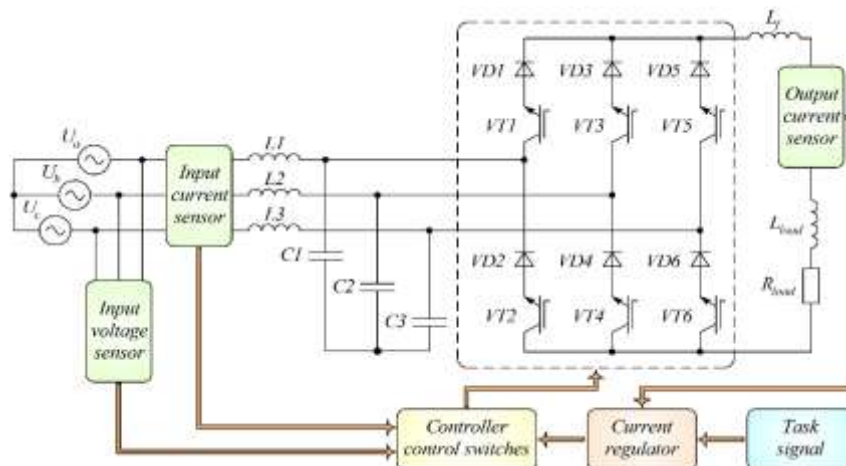


Figure 4 – Topology of an active three-phase current rectifier

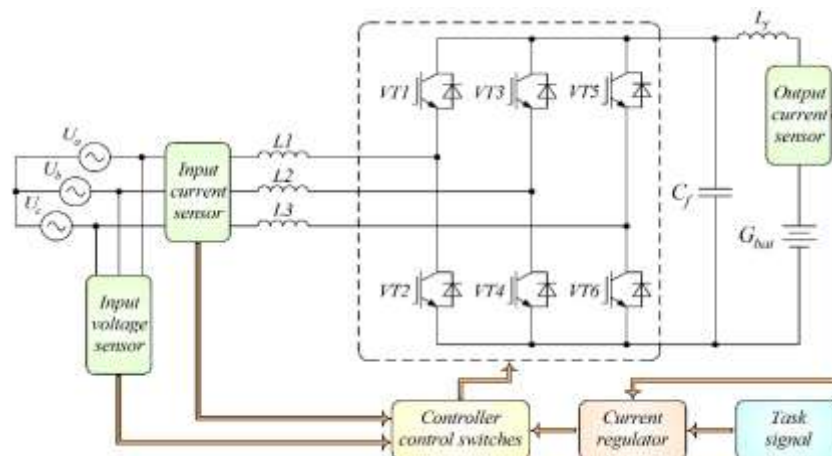


Figure 5 – Topology of an active three-phase voltage rectifier

These topologies have significant advantages over conventional diode and thyristor rectifiers. These advantages are threefold: the ability to operate in near-unity power factor mode, the ability to generate a sinusoidal form of current drawn from the network, and the ability to provide power factor correction. A simulation model was developed to study the energy and electromagnetic compatibility of electric vehicle charging stations and the power network (Fig. 6).

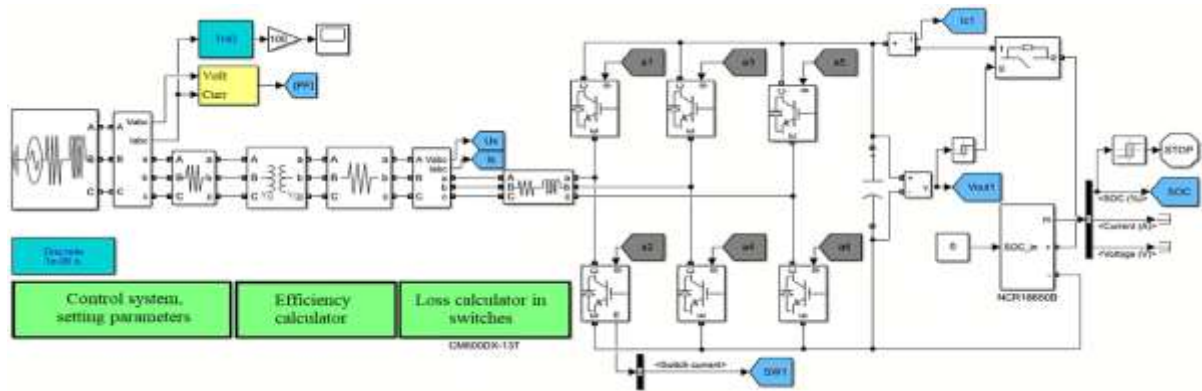


Figure 6 – A model of a charging station for electric vehicles

The structure of the proposed charging station consists of an input transformer, a three-level active rectifier and a load. The Tesla S electric car is chosen as the load. The battery compartment of the Tesla S has a capacity of 85 kW·h and consists of 7104 lithium-ion batteries of the Panasonic NCR18650b type (16 blocks containing 74 cells in 6 groups) [18, 19]. In the battery compartment, individual NCR-18650b batteries are connected in parallel in groups of 74 pieces. When connected in parallel, the voltage of the group is equal to the voltage of each element (4.2 V), and the capacity of the group is equal to the total capacity of the element (250 A·h). Then the six groups are connected in series, forming a module. The voltage of the module is equal to the sum of the voltages of the groups and is 25.2 V. The modules are connected in series, forming a battery. The battery contains a total of 16 modules (a total of 96 groups). The total voltage of all modules is 400 V. The equivalent resistance of the battery is also calculated. The average battery resistance $R_{NCR} = 37 \text{ m}\Omega$ is based on the equivalent battery resistance $R_{bat} = 27 \text{ m}\Omega$. The simulation results, that is, the oscillograms of the input current and input voltage of the active rectifier, are shown in Fig. 7.

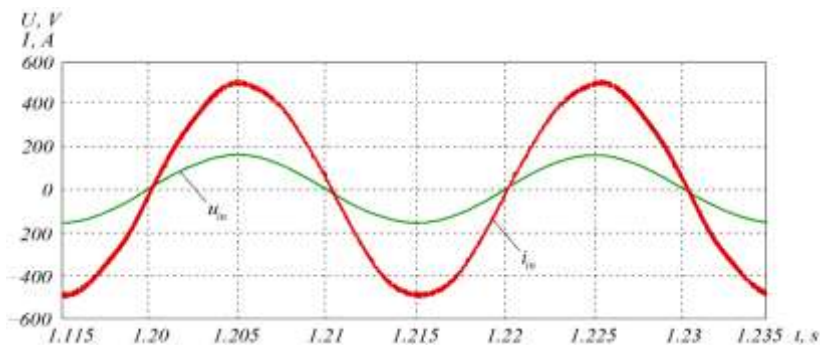


Figure 7 – Oscillograms of the input current and voltage of the active rectifier

The paper evaluates the efficiency of the proposed charging station. The efficiency was estimated based on the total energy losses and useful energy received by the battery during the full charge interval. The efficiency is calculated using the expression:

$$\eta = \frac{E_c}{E_c + \Delta E_{\Sigma}}, \quad (1)$$

where E_c is the useful energy transferred to the battery during charging; ΔE_{Σ} is the total energy losses in the considered system.

Table 2 shows the values of efficiency, power factor, and harmonic distortion factor of the charging station system at different charge currents and PWM frequency.

Based on the conducted research, it can be seen that the efficiency of the proposed structure of the charging station is quite high. The dynamics of the fact that the higher the charge current, the lower the efficiency is clearly visible. With different parameters of the charge current and switching frequency, the efficiency of the charging station, taking into account the power losses in the battery of the electric vehicle, ranges from 91.3 % to 95.6 %.

Table 2 – Parameters of energy indicators of the charging station

PWM frequency, kHz	Charge current in CC mode, A	Efficiency, %	Charging time, s, $\cdot 10^3$	Power factor	THD, %
5	150 (0.6C)	95.6	6.55	0.985	11.8
	200 (0.8C)	94.8	5.18	0.987	9.8
	250 (1C)	93.9	4.38	0.989	7.2
	300 (1.2C)	93.1	3.84	0.991	6.0
	350 (1.4C)	92.2	3.47	0.992	5.1
	400 (1.6C)	91.4	3.2	0.992	4.5
10	150 (0.6C)	95.4	6.55	0.987	6.1
	200 (0.8C)	94.5	5.19	0.99	4.6
	250 (1C)	93.7	4.38	0.991	3.7
	300 (1.2C)	92.9	3.85	0.992	3.1
	350 (1.4C)	92.1	3.48	0.992	2.7
	400 (1.6C)	91.3	3.2	0.993	2.5

Conducted studies of the energy indicators of the charging station based on a three-level active rectifier showed that the power factor of the charging station lies in the range from 0.985 to 0.993. The coefficient of harmonic distortion in the charging process ranges is 2.5...11.8 %.

Conclusions

On the basis of the conducted research, the following conclusions can be drawn:

– basic energy parameters and charge-discharge characteristics of lithium-ion and lithium-iron-phosphate batteries used in electric vehicles are presented. The main requirements for charging station systems are regulation and stabilization of the charging current and voltage, increasing the efficiency of the converter and ensuring electromagnetic compatibility;

– the proposed structure of an electric vehicle charging station, consisting of an input transformer, a three-level active rectifier and a load, provides relative to the known technical solutions of charging stations, improvement of the parameters of efficiency, power factor and harmonic distortion factor. The obtained results are explained by the fact that the proposed charging station implements a single-stage conversion of electricity in an active rectifier with power factor correction;

– the calculation of the efficiency of the charge process of the proposed system was carried out at different parameters of the charge current and switching frequency. Taking into account the power losses in the battery of the electric vehicle, the maximum efficiency of the system is achieved in the mode of minimum charging current.

Acknowledgement

The article was prepared as part of the support of the grant of young scientists of Ukraine "Development of scientific bases for improving energy efficiency and improving the quality of electricity in electricity networks" (State Registration Number 0121U109440).

References

1. Dell'Amico M., Hadjidimitriou N. S., Renzi G. Assessing the Impact of Shared L-Category Electric Vehicles in six European cities. *2020 IEEE 23rd International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*. 2020. P. 1–5 DOI: 10.1109/ITSC45102.2020.9294355.
2. Matanov N., Zahov A. Developments and Challenges for Electric Vehicle Charging Infrastructure. *2020 12th Electrical Engineering Faculty Conference (BulEF)*. 2020. P. 1–5. DOI: 10.1109/BulEF51036.2020.9326080.
3. Pareek S., Sujil A., Ratra S., Kumar R. Electric Vehicle Charging Station Challenges and Opportunities: A Future Perspective. *2020 International Conference on Emerging Trends in Communication, Control and Computing (ICONC3)*. 2020. P. 1–6. DOI: 10.1109/ICONC345789.2020.9117473.
4. Pliakostathis K. Research on EMI from Modern Electric Vehicles and their Recharging Systems. *2020 International Symposium on Electromagnetic Compatibility – EMC EUROPE*. 2020. P. 1–6. DOI: 10.1109/EMCEUROPE48519.2020.9245742.
5. Oliinyk M., Dzmura J., Pal D. The impact of a electric vehicle charging on the distribution system. *2020 21st International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE)*. 2020. P. 1–5. DOI: 10.1109/EPE51172.2020.9269213.
6. Weiss M., Zerfass A., Helmersb E. Fully electric and plug-in hybrid cars. An analysis of learning rates, user costs, and costs for mitigating CO₂ and air pollutant emissions. *Clean Prod.* 2019. Vol. 212. P. 1478–1489. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.12.019.

7. Taylor A., Lu J., Zhu L., Bai K., McAmmond M., Brown A. Comparison of SiC MOSFET-based and GaN HEMT-based high-efficiency high-power-density 7.2kW EV battery chargers. *IET Power Electronics*. 2018. Vol. 11, No. 11. P. 1849–1857. DOI: 10.1049/iet-pel.2017.0467.
8. Kim D.-H., Kim M.-J., Lee B.-K. An Integrated Battery Charger With High Power Density and Efficiency for Electric Vehicles. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2017. Vol. 32, No. 6. P. 4553–4565. DOI: 10.1109/tpel.2016.2604404.
9. Lee W.-S., Kim J.-H., Lee J.-Y., Lee I.-O. Design of an Isolated DC/DC Topology With High Efficiency of Over 97% for EV Fast Chargers. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2019. Vol. 68, No. 12. P. 11725–11737. DOI: 10.1109/TVT.2019.2949080.
10. Nerubatskyi V. P., Plakhtii O. A., Tugay D. V., Hordiienko D. A. Method for optimization of switching frequency in frequency converters. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2021. Vol. 1, No. 181. P. 103–110. DOI: 10.33271/nvngu/2021-1/103.
11. Aggarwal S., Bajaj M., Singh A. K. Analysis of Electric Vehicle Charging Station Allocation in Deregulated Electric Power System. *2020 IEEE 9th Power India International Conference (PIICON)*. 2020. P. 1–6. DOI: 10.1109/PIICON49524.2020.9113022.
12. Plakhtii O., Nerubatskyi V., Hordiienko D. Efficiency analysis of DC-DC converter with pulse-width and pulse-frequency modulation. *2022 IEEE 41st International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*. 2022. P. 571–575. DOI: 10.1109/ELNANO54667.2022.9926762.
13. Nuamkoksung P., Buayai K., Kongjeen Y. Impact of Fast Charging on Lithium-ion Battery in Electric Vehicle Application. *2020 8th International Electrical Engineering Congress (iEECON)*. 2020. P. 1–4. DOI: 10.1109/iEECON48109.2020.244120.
14. Srdic S., Lukic S. Toward Extreme Fast Charging: Challenges and Opportunities in Directly Connecting to Medium-Voltage Line. *IEEE Electrification Magazine*. 2019. Vol. 7, No. 1. P. 22–31. DOI: 10.1109/mele.2018.2889547.
15. Park M., Seo M., Song Y., Kim S. W. Capacity Estimation of Li-Ion Batteries Using Constant Current Charging Voltage With Multilayer Perceptron. *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. P. 180762–180772. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3028095.
16. Huang X., Li Y., Acharya A., Sui X., Meng J., Teodorescu R., Stroe D.-I. A Review of Pulsed Current Technique for Lithium-ion Batteries. *Energies*. 2020. Vol. 13. 2458. DOI: 10.3390/en13102458.
17. Plakhtii O., Nerubatskyi V., Mykhalkiv S., Hordiienko D., Shelest D., Khomenko I. Research of energy characteristics of three-phase voltage source inverters with modified pulse width modulation. *2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*. 2021. P. 422–427. DOI: 10.1109/KhPIWeek53812.2021.9570071.
18. Chao C.-H. Tesla Model S Induction Motor Analysis. *2023 IEEE 3rd International Conference on Power, Electronics and Computer Applications (ICPECA)*. 2023. P. 1462–1464. DOI: 10.1109/ICPECA56706.2023.10075690.
19. Plakhtii O., Nerubatskyi V., Hordiienko D. Efficiency analysis of DC-DC converter with pulse-width and pulse-frequency modulation. *2022 IEEE 41st International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*. 2022. P. 571–575. DOI: 10.1109/ELNANO54667.2022.9926762.

В. П. Нерубацький¹, канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0002-4309-601X

Д. А. Гордієнко¹, аспірант, ORCID 0000-0002-0347-5656

¹Український державний університет залізничного транспорту

ТОПОЛОГІЯ ЕФЕКТИВНОГО ВИКОРИСТАННЯ ЕНЕРГІЇ ЗАРЯДНОЮ СТАНЦІЄЮ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ

Наведено результати дослідження напівпровідникових перетворювачів зарядних станцій для електромобілів на основі літій-іонних елементів. Наведено базові енергетичні параметри та зарядно-розрядні характеристики літій-іонних та літій-залізо-фосфатних акумуляторів. Наведено топологію запропонованої зарядної станції для електромобілів на основі схем активного випрямляча. Описано параметри схеми заміщення акумуляторного відсіку електромобіля Tesla S. Описано метод швидкого заряду батареї постійною напругою і постійним струмом, при якому забезпечується більша кількість циклів заряду-розряду батареї. Представлено імітаційну модель запропонованої структури зарядної станції з системою автоматичного керування. Проведено розрахунок ККД запропонованої системи зарядної станції при різних параметрах струму заряду та частоти комутації.

Ключові слова: активний випрямляч, зарядна станція, електромобіль, енергоефективність, літій-іонний накопичувач.

Надійшла: 13.11.2023

Received: 13.11.2023

ТЕРМОДИНАМІЧНІ ІМПЕРАТИВИ МОДЕРНІЗАЦІЇ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ НАСОСНИХ АГРЕГАТІВ МЕРЕЖІ ЦЕНТРАЛІЗОВАНОГО ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ В КОНТЕКСТІ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ

Встановлено взаємозв'язок термодинамічних та гідравлічних параметрів мережі централізованого теплопостачання. Визначено залежність споживаної електричної потужності електроприводом насосного агрегату від гідравлічного напору та кількості подачі теплоносія. Доведено, що система регульованого електроприводу має переваги над системою нерегульованого електроприводу в контексті енергоефективності насосного агрегату та мережі централізованого теплопостачання загалом. Визначено підходи та критерії до синтезу системи регульованого електроприводу, в тому числі системи його автоматичного керування. Проаналізовано методи регулювання та обрано найбільш прийнятний варіант електроприводу: керований перетворювач частоти – асинхронний двигун з короткозамкненим ротором. З урахуванням вище наведеного, синтезовано енергозберігаючу електромеханічну систему мережі централізованого теплопостачання. Особливістю цієї системи є те, що дотримання параметрів гідравлічного та температурного режимів в мережі централізованого теплопостачання забезпечується за допомогою екстремальних систем автоматичного керування. При цьому завдання режимних параметрів здійснюється температурним регулятором теплообмінного пункту мережі. Регулювання напору та продуктивності насосного агрегату здійснюється за рахунок зміни, за певним законом, частоти та напруги живлення асинхронного двигуна.

Ключові слова: *термодинамічні параметри, насосний агрегат, регульований електропривід, енергозберігаюча електромеханічна система централізованого теплопостачання.*

Вступ. На сучасному етапі в електроприводі насосних агрегатів систем централізованого теплопостачання, широко застосовуються трифазні асинхронні електродвигуни, які живляться безпосередньо від електричної мережі. Така спрощена система електроприводу насосних агрегатів дозволяє значно зменшити капітальні інвестиції, що в умовах обмеженості фінансових ресурсів підприємств комунальної теплоенергетики України, відіграє важливу роль. Проте, вона не дозволяє повноцінно регулювати технологічні процеси, обумовлені зміною термодинамічних параметрів в теплових мережах систем централізованого теплопостачання, що призводить до додаткових експлуатаційних витрат та зниження показників енергоефективності. Перманентне підвищення цін на енергоносії, зокрема на електроенергію тільки загострює цю проблему. Одним із напрямів вирішення цієї проблеми, може стати модернізація електроприводів насосних агрегатів, які експлуатуються, в теперішній час, з урахуванням вимог обумовлених термодинамічними параметрами мережі централізованого теплопостачання.

Питання енергоефективності електроприводу насосних агрегатів, в основному розглядаються в працях зарубіжних вчених, і вони стосуються здебільшого роботи насосних агрегатів в системах водопостачання, які не ставлять вимог до термодинамічних параметрів, а лише до гідравлічних. На практиці, більшу частину часу відцентрові насосні установки експлуатуються при низьких або середніх навантаженнях, що відбувається через зміну технологічних параметрів, при цьому насоси проектується таким чином, щоб задовольняти максимальні навантаження [1]. У публікації [2] оцінено, що 75% відцентрових насосних агрегатів мають завищену потужність електроприводу, чимало їх більш, ніж на 20%. У публікації [3] вказується, що лише 20% електродвигунів у насосних агрегатах працюють за номінальної потужності. У публікаціях [4, 5] проводиться порівняння енергоспоживання насосного агрегату з електродвигунами різних типів та класів ІЕ з частотно-регульованим приводом, оскільки при частотному регулюванні досягається значна економія енергії, особливо в умовах малих навантажень.

У даній роботі досліджується вплив термодинамічних параметрів мережі централізованого теплопостачання, таких як температура, тиск та об'єм подачі теплоносія на гідравлічні параметри, а саме на гідравлічний напір, гідравлічний опір мережі та витрати теплоносія для забезпечення необхідного температурного графіка. У зв'язку з цим розглядається робоча гіпотеза, що названі параметри прямо впливають на споживану насосними агрегатами електричну потужність, та визначають як їх енергоефективність, так і загальний рівень енергоефективності мережі централізованого теплопостачання.

Мета роботи. Метою роботи є обґрунтування взаємозв'язку термодинамічних та гідравлічних параметрів тепломережі та визначення підходів до вибору типу та синтезу структури електроприводу насосних агрегатів для підвищення їх енергоефективності та енергоефективності мережі централізованого тепlopостачання загалом.

Матеріал і результати роботи. Як об'єкт дослідження в даній роботі обрано реальну найбільш типову мережу централізованої системи тепlopостачання підприємства комунальної теплоенергетики, де має місце кількісно-якісний метод регулювання температурного режиму. При цьому подача теплоносія регулюється за допомогою засувки, тобто має місце дросельне регулювання продуктивності насосного агрегату. Обстеження реальної теплової мережі показали, що за температурного графіка 95-70 фактичні витрати та подача теплоносія складає 1063 м³/год., максимальна подача (витрата) теплоносія 1200 м³/год., перепад тиску на насосі 12/4.8 атмосфер.

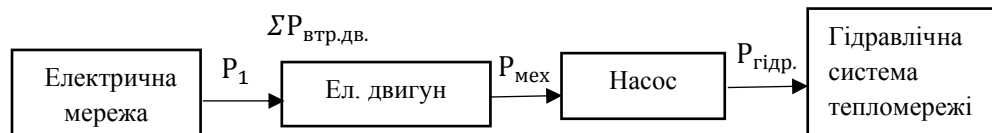


Рисунок1- Структура типового насосного агрегату мережі централізованого тепlopостачання

В мережі встановлено насосний агрегат, де в якості насоса використовується відцентровий насос ЦН-400-105 [6]. Для приводу насоса використовується асинхронний двигун класу ефективності типу 1LE1503-3AB52-2AA4 потужністю 200кВт та обертами 1450 [7]. При цьому для забезпечення режиму роботи має місце паралельна робота трьох насосних агрегатів.

Гідравлічна потужність визначається витратою Q та напором насоса $H_{нас}$. Напір насоса залежить від витрати відповідно до характеристики Q - H насоса при заданій частоті обертання насоса n . Отже, необхідна електрична потужність електроприводу P_1 залежить від витрати теплоносія Q та напору насоса H [8]:

$$P_1 = \rho g Q H_{нас} + \Sigma P_{втр.нас} + \Sigma P_{втр.дв} \quad (1);$$

де ρ – щільність теплоносія, g – прискорення вільного падіння.

Отже для визначення споживання електроенергії електроприводом насосного агрегату необхідно розрахувати такі параметри, як напір та подачу теплоносія. За умови, що частота обертання насоса не регулюється, його продуктивність та напір змінюються дроселюванням, наслідком чого є значні втрати електроенергії в електроприводі. Зміна частоти обертання робочого колеса насоса призводить до зміни всіх його характеристик і, в першу чергу його продуктивності та напору. Перерахунок характеристик насоса на іншу частоту обертання здійснюється за допомогою формул приведення,

Робота насосного агрегату розглядається в режимах, де витрата теплоносія протягом циклу роботи насосного агрегату змінюється відповідно до гідравлічного навантаження, характерного для HVAC додатків. Типовий цикл роботи насоса (рис. 2), визначений регламентом Євросоюзу [9] і поділений на 4 режими. Особливістю циклу є те, що більшу частину часу насос працює з витратою набагато меншою за номінальну. Наприклад, з витратою 25 % від номінального значення насос працює відносний час $t_i/t_\Sigma = 44$ %, де t_Σ – сумарний час роботи, прийнятий рівним 24 годинам, t_i – час роботи насоса в даному режимі. Цей профіль навантаження є типовим для насосних систем із потребою у зміні витрати в широких межах.

Дослідження проведені в теплових мережах підприємств комунальної теплоенергетики в середньостатистичному вимірі підтверджують такий профіль навантаження мережевих насосних агрегатів.

У першому варіанті дослідження до модернізації, електродвигун вмикається у мережу безпосередньо, тобто швидкість двигуна не регулюється протягом циклу, а подача теплоносія насосом Q регулюється за допомогою засувки, тобто має місце дросельне регулювання. Напір теплоносія у цьому випадку змінюється відповідно до кривої Q - H насоса, а робоча точка є точкою перетину характеристики насоса та характеристики гідравлічної системи.

На рис. 3 наведено напірні характеристики насоса за різних частот обертання та гідравлічні характеристики тепломережі за різних теплових та гідравлічних режимів роботи.

З рис.3 видно, що при зміні частоти обертання насоса, його напірна характеристика переміщається по гідравлічних характеристиках трубопроводу мережі централізованого тепlopостачання, що призводить до зменшення його продуктивності та напору, а отже до зменшення споживаної електроприводом електричної потужності. Таким чином регульований тип електроприводу, в контексті енергоефективності, має переваги перед не регульованим.

Синтез структури регульованого електроприводу здійснюється за декількома критеріями, а саме: технологічними вимогами; за терміном окупності; вимогою до надійності в експлуатації, тощо.

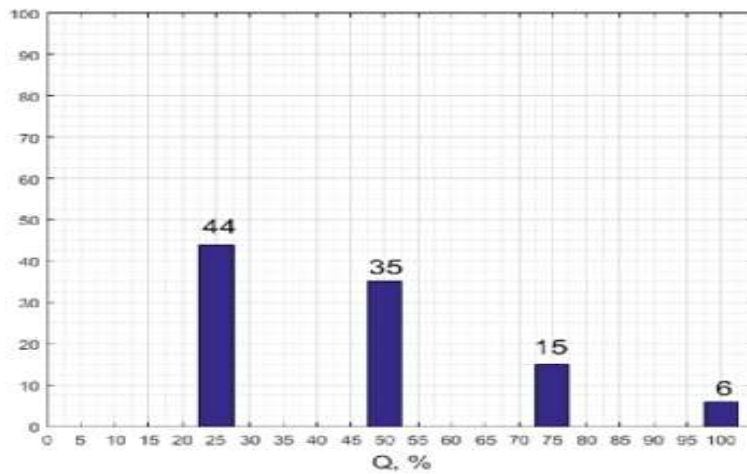


Рисунок 2 - Часова залежність витрати теплоносія за цикл [9]

З технологічної точки зору для досягнення потрібного значення подачі теплоносія в мережі, насосні агрегати об'єднуються в насосну станцію, в даному дослідженні мова йде про три насосні агрегати. При цьому кожен з насосних агрегатів впливає на роботу інших насосних агрегатів цієї групи. Це призводить до того, що подача, тиск, потужність і коефіцієнт корисної дії насосної станції суттєво залежить від режимів навантаження насосних агрегатів, що працюють спільно.

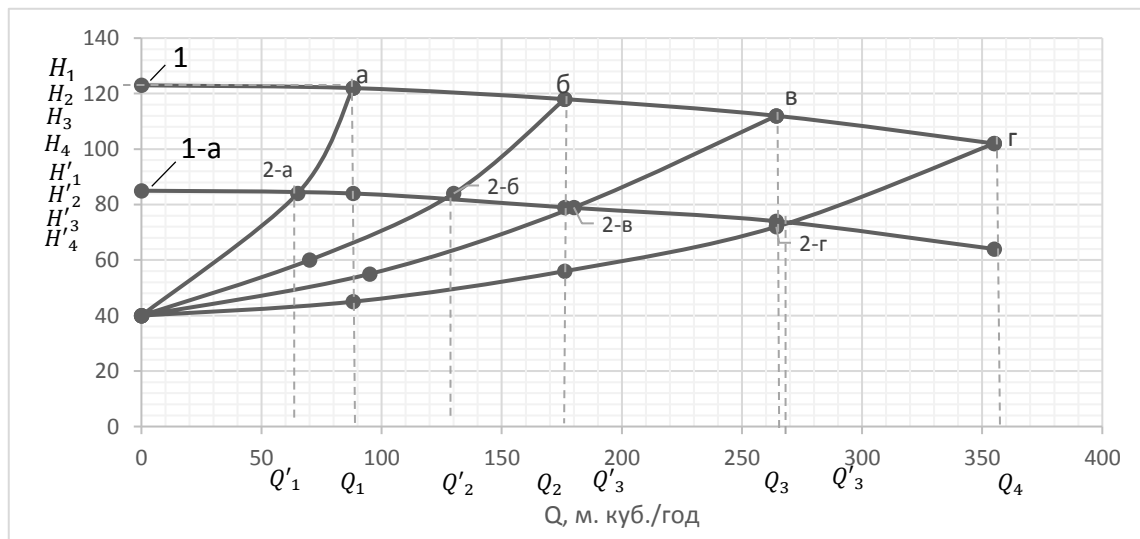


Рисунок 3 - Напірні характеристики насоса: (1) – при частоті обертання $n1$; (1-a) - при частоті обертання $n2$; $n2 < n1$ [6]. Гідравлічні характеристики мережі за різних теплових навантажень: 2-а; 2-б; 2-в; 2-г [розраховано авторами]

Насосна станція тепломережі працює за змінним графіком, це означає, що система автоматичного керування має забезпечити потрібні параметри, оскільки невідповідність параметрів призводить до зниження коефіцієнта корисної дії насосних агрегатів, і до додаткових витрат електроенергії. До особливостей роботи насосних станцій слід віднести те, що вони оснащені обладнанням, яке зазвичай має завищену потужність, тому насосні агрегати станції працюють із зниженим значенням коефіцієнта корисної дії. Крім того значна протяжність теплотраси та різна висота подачі теплоносія спричиняють нерівномірність розподілу тиску, що призводить до витоків теплоносія, та до зниження енергоефективності тепломережі. Таким чином, як показують результати аналізу термодинамічних параметрів, які отримані в даному дослідженні, для досягнення енергоефективного режиму роботи насосних станцій, їхню продуктивність необхідно регулювати зміною продуктивності насосних агрегатів, що працюють у їх складі.

Існують різні методи регулювання насосних агрегатів, які працюють у складі насосних станцій. Сучасний стан розвитку техніки дозволяє реалізовувати різні методи регулювання електроприводу, а саме: частотне регулювання швидкості обертання асинхронних електродвигунів з короткозамкненим ротором; електропривід на базі асинхронного вентильного каскаду; електропривід на основі використання електродвигунів постійного струму; електропривід з використанням електромагнітних муфт ковзання[12]. Аналіз результатів практичного використання електроприводів насосних агрегатів показує, що в діапазоні потужностей електроприводів необхідних для мережі централізованого теплопостачання, найбільш прийнятним варіантом є система електроприводу керований перетворювач частоти – асинхронний електродвигун з короткозамкненим ротором[13].

У випадку якщо на насосній станції встановлено регульовані і не регульовані електроприводи насосних агрегатів необхідно застосовувати не лише зміну частоти обертання насосних агрегатів, але і зміну кількості працюючих нерегульованих електроприводів[14].

Вище наведене висуває вимоги до застосування на насосних станціях сучасних систем автоматизації[15]. Серед таких вимог слід назвати: підтримання заданого значення тиску на виході групи насосних агрегатів; контроль за роботою насосів і перемикання на резервний насос при аварії робочого; перемикання на роботу насосів від мережі при аварії перетворювача частоти; автоматичне підключення одного або двох додаткових насосів при недостатній продуктивності робочого (для станцій з кількістю насосів більшою 2); автоматичне чергування ввімкнених насосів через задані інтервали часу для забезпечення рівномірного завантаження насосів; забезпечення оперативного керування режимом роботи перетворювача частоти безпосередньо з панелі керування станції; можливість запуску і зупинки кожного насоса кнопками в режимі ручного керування прямим пуском від мережі; видача на диспетчерський пульт сигналів про режими роботи станції[16].

З урахуванням вимог може бути синтезована функціональна схема енергозберігаючої електромеханічної системи автоматичного керування насосного агрегату.

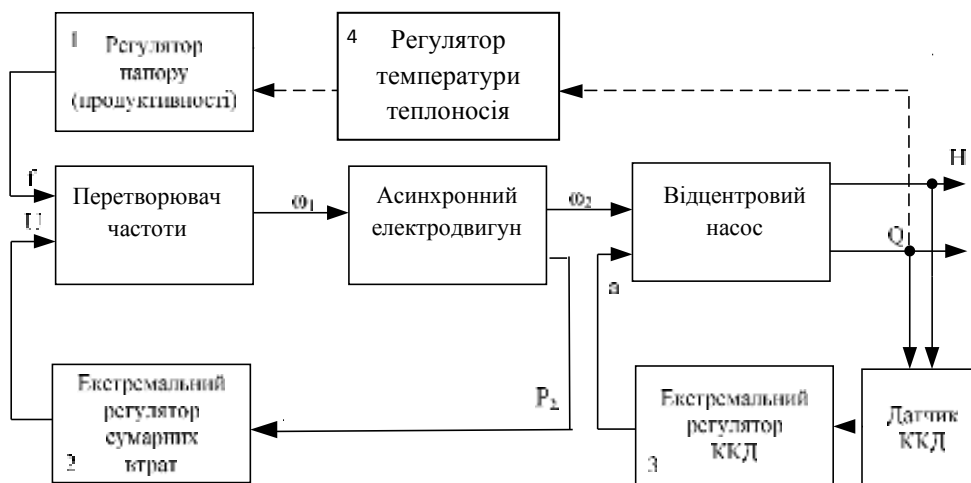


Рисунок. 4 - Функціональна схема енергозберігаючої електромеханічної системи насосного агрегату мережі централізованого теплопостачання

Особливістю цієї системи є те, що стабілізація параметрів гідравлічної характеристики Q або H здійснюється за допомогою основного регулятора 1, а їх завдання – екстремальними системами автоматичного регулювання ККД електроприводу та ККД насоса (регуляторами 2; 3). Взаємозв'язок температурного режиму з гідравлічним забезпечує температурний регулятор (регулятор 4) теплообмінного пункту мережі централізованого теплопостачання. Регулювання напору та продуктивності здійснюється за рахунок зміни, за певним законом частоти та напруги живлення асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором.

Висновки: Дослідження проведені в реальній типовій мережі централізованого теплопостачання, підтверджують гіпотезу про те, що термодинамічні параметри, а саме температурний графік, параметри зовнішнього середовища, технологічні особливості функціонування мережі, мають визначальний вплив на гідравлічний режим роботи насосного агрегату, а отже на обсяг споживаної його електроприводом електроенергії. Відповідно до цього формуються вимоги до типу регульованого електроприводу та синтезу його автоматизованої системи керування. Найбільш прийнятним варіантом регульованого електроприводу з точки зору забезпечення енергоефективності є електропривід, за системою, керований перетворювач частоти – асинхронний електродвигун з короткозамкненим ротором, при цьому автоматизована система

керування електроприводом побудована на основі екстремальних регуляторів. Подальші дослідження мають бути спрямовані на визначення впливу окремих складових системи електроприводу на його відповідність термодинамічним, технологічним вимогам та вимогам щодо енергоефективності.

Список використаної літератури.

1. Gevorkov L. Simulation and Experimental Study on Energy Management of Circulating Centrifugal Pumping Plants with Variable Speed Drives. PhD Thesis, Tallinn University of Technology, 2017.
2. Shuvalova J. Optimal Approximation of Input-Output Characteristics of Power Units and Plants. PhD Thesis, Tallinn University of Technology, 2004.
3. Glover A., Lukaszczyk M. Oversizing pump motors – the problems. World Pumps, 2005, vol. 2005, no. 466, pp. 36-38. doi: 10.1016/s0262-1762(05)70638-6.
4. Safin N., Kazakbaev V., Prakht V., Dmitrievskii V. Calculation of the efficiency and power consumption of induction IE2 and synchronous reluctance IE5 electric drives in the pump application based on the passport specification according to the IEC 60034-30-2. 2018 25th International Workshop on Electric Drives: Optimization in Control of Electric Drives (IWED), Jan. 2018. doi: 10.1109/IWED.2018.8321381.
5. Kazakbaev V., Prakht V., Dmitrievskii V., Ibrahim M., Oshurbekov S., Sarapulov S. Efficiency Analysis of Low Electric Power Drives Employing Induction and Synchronous Reluctance Motors in Pump Applications. Energies, 2019, vol. 12, no. 6, p. 1144. doi: 10.3390/en12061144
6. Сумська насосна техніка <https://sumnt.com/>
7. Catalog D 81.1: SIMOTICS GP, SD, XP, DP Low-Voltage Motors - December 2022 <https://support.industry.siemens.com/cs/document/109749197/catalog-d-81-1-simotics-gp-sd-xp-dp-low-voltage-motors-december-2022?dti=0&lc=en-UA>
8. Лезнов Б. С. Л 41 Частотно-регулируемый электропривод насосных установок. — М.: Машиностроение, 2013. — 176 с., ил.
9. Commission Regulation (EC) No 641/2009 of July 22, 2009 implementing Directive 2005/32/EC of the European Parliament and of the Council with regard to ecodesign requirements for glandless standalone circulators and glandless circulators integrated in products, amended by Commission Regulation (EU) No 622/2012 of July 11, 2012 <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A32009R0641>
10. European Commission Regulation (EC) No. 640/2009 implementing Directive 2005/32/ EC of the European Parliament and of the Council with Regard to Ecodesign Requirements for Electric Motors, (2009), amended by Commission Regulation (EU) No 4/2014 of January 6, 2014. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32014R0004>
11. Rotating electrical machines – Part 30-1: Efficiency classes of line operated AC motors (IE code). IEC 60034-30-1/ Ed. 1; IEC: 2014-03. <https://webstore.iec.ch/publication/136>
12. Режими роботи насосних та вентиляторних установок із автоматизованим електроприводом: навч. посібник / Т. В. Коренькова, О. О. Сердюк, В. Г. Ковальчук. – Кременчук: Видавництво ПП Щербатих О. В., 2013. – 200 с. http://www.kdu.edu.ua/new/PHD_vid/rewumu%20robotu.pdf
13. Каталог ABB Приводы ABB для систем отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха <https://global.abb.com/group/en>
14. Каталог ABB Двигатели и генераторы <https://new.abb.com/motors-generators/ru>
15. Метод та засоби оптимізації роботи електроприводів насосної станції водопостачання А. О. Лозинський, доктор технічних наук, професор В. М. Кутін, доктор технічних наук, професор Грабко, В. В.
16. Система керування запуском насосного агрегата станції водопостачання / Микола Мошноріз, Володимир Грабко // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – 2008. – Випуск 30. – С. 310–311.

M. Fedirko¹, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof, ORCID 0000-0001-8244-3478

R. Holovko¹, student;

¹West Ukrainian National University

THERMODYNAMIC IMPERATIVES THE MODERNIZATION OF THE ELECTRIC DRIVE OF PUMP UNITS OF THE CENTRALIZED HEAT SUPPLY NETWORK IN THE CONTEXT OF INCREASEING ENERGY EFFICIENCY

The relationship between thermodynamic and hydraulic parameters of the heat supply network has been established. The dependence of the electric power consumed by the electric drive of the pump unit on the pressure and supply of the coolant was determined. It is proved that the regulated electric drive system has advantages over

the non-regulated electric drive system in the context of energy efficiency of the pumping unit and the district heating network in general. Approaches and criteria for the synthesis of a regulated electric drive system, including its automatic control system, were determined, regulation methods were analyzed, and the most acceptable version of the electric drive was chosen: a controlled frequency converter - an asynchronous motor with a short-circuited rotor, taking into account the above, an energy-saving mechanical system of a centralized heat supply network was synthesized. The peculiarity of this system is that the protection of parameters of hydraulic and temperature regimes in the network of centralized heat supply is ensured with the help of extreme automatic control systems. At the same time, the assignment of mode parameters is provided by the temperature controller of the heat exchange point of the network. Regulation of the pressure and productivity of the pumping unit is carried out by changing, according to a certain law, the frequency and power supply of the asynchronous motor.

Keywords: *thermodynamic parameters, pump unit, adjustable electric drive, energy-saving electromechanical system of the pump unit.*

References

1. Gevorkov L. Simulation and Experimental Study on Energy Management of Circulating Centrifugal Pumping Plants with Variable Speed Drives. PhD Thesis, Tallinn University of Technology, 2017.
2. Shuvalova J. Optimal Approximation of Input-Output Characteristics of Power Units and Plants. PhD Thesis, Tallinn University of Technology, 2004.
3. Glover A., Lukaszczuk M. Oversizing pump motors – the problems. *World Pumps*, 2005, vol. 2005, no. 466, pp. 36-38. doi: 10.1016/s0262-1762(05)70638-6.
4. Safin N., Kazakbaev V., Prakht V., Dmitrievskii V. Calculation of the efficiency and power consumption of induction IE2 and synchronous reluctance IE5 electric drives in the pump application based on the passport specification according to the IEC 60034-30- 2. 2018 25th International Workshop on Electric Drives: Optimization in Control of Electric Drives (IWED), Jan. 2018. doi: 10.1109/IWED.2018.8321381.
5. Kazakbaev V., Prakht V., Dmitrievskii V., Ibrahim M., Oshurbekov S., Sarapulov S. Efficiency Analysis of Low Electric Power Drives Employing Induction and Synchronous Reluctance Motors in Pump Applications. *Energies*, 2019, vol. 12, no. 6, p. 1144. doi: 10.3390/en12061144
6. Sumy pumping equipment <https://sumnt.com/>
7. Catalog D 81.1: SIMOTICS GP, SD, XP, DP Low-Voltage Motors - December 2022 <https://support.industry.siemens.com/cs/document/109749197/catalog-d-81-1-simotics-gp-sd-xp-dp-low-voltage-motors-december-2022?dti=0&lc=en-UA>
8. Leznov B. S. L 41 Frequency-regulating electric drive of pump installations. — M.: Mashinostroenie, 2013. — 176 p., illustrations.
9. Commission Regulation (EC) No 641/2009 of July 22, 2009 implementing Directive 2005/32/EC of the European Parliament and of the Council with regard to ecodesign requirements for glandless standalone circulators and glandless circulators integrated in products, amended by the Commission Regulation (EU) No 622/2012 of July 11, 2012 <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A32009R0641>
10. European Commission Regulation (EC) No. 640/2009 implementing Directive 2005/32/ EC of the European Parliament and of the Council with Regard to Ecodesign Requirements for Electric Motors, (2009), amended by Commission Regulation (EU) No 4/2014 of January 6, 2014. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32014R0004>
11. Rotating electrical machines – Part 30-1: Efficiency classes of line operated AC motors (IE code). IEC 60034-30-1/Ed. 1; IEC: 2014-03. <https://webstore.iec.ch/publication/136>
12. Modes of operation of pump and fan installations with an automated electric drive: training. manual / T.V. Korenkova, O.O. Serdyuk, V.G. Kovalchuk. – Kremenchuk: Publishing House PP Shcherbatykh O. V., 2013. – 200 p. http://www.kdu.edu.ua/new/PHD_vid/rewumu%20robotu.pdf
13. ABB catalog ABB drives for heating, ventilation and air conditioning systems <https://global.abb/group/en>
14. ABB catalog Engines and generators <https://new.abb.com/motors-generators/ru>
15. Method and means of optimizing the operation of electric drives of a water supply pumping station A. O. Lozynskyi, Doctor of Technical Sciences, Professor V. M. Kutin, Doctor of Technical Sciences, Professor Grabko, V.V.
16. Moshnoriz M. The control system for starting the pumping unit of the water supply station / Mykola Moshnoriz, Volodymyr Grabko // *Bulletin of the National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"*. – 2008. – Issue 30. – P. 310–311.

Надійшла:09.01.2024

Received:09.01.2024

ЕФЕКТИВНІСТЬ ВПРОВАДЖЕННЯ СИСТЕМИ ЕНЕРГЕТИЧНОГО МЕНЕДЖМЕНТУ У ТОВ «НАУКОВО-ВИРОБНИЧА ФІРМА «ЗОНД»

Досліджено ефективність системи енергетичного менеджменту у ТОВ «НАУКОВО-ВИРОБНИЧА ФІРМА «ЗОНД». Проведено аналіз споживання паливно-енергетичних ресурсів з урахуванням структури енергоспоживання та вартості, визначаючи перспективні напрямки для зменшення витрат. Описано конструктивні та експлуатаційні недоліки системи опалення та впроваджені заходи для раціонального використання газу. Розглянуті аспекти освітлення, включаючи перехід на світлодіодні лампи та використання природного освітлення. Виявлено проблеми тепловтрат та описано заходи з утеплення будівлі, включаючи економічний аналіз. Описано заходи, вжиті підприємством для забезпечення резервного живлення в умовах тривалих вимкнень електроенергії, а також проаналізовано їхню ефективність. Особлива увага приділяється вибору та застосуванню агрегатів безперервного живлення для підтримання функціонування критичних споживачів. Запропоновано використання спеціальних дахових світловодів. Зроблено висновки про важливість комплексного підходу до управління енергоефективністю підприємства в умовах сучасних викликів.

Ключові слова: енергетичний менеджмент, енергетичне аналізування, енергоефективні заходи, ефективність управління

Вступ

Організації та підприємства України витрачають значні фінансові ресурси на оплату споживаної енергії. Дефіцит енергетичних ресурсів, разом із нестабільністю цін на них, став основною складністю для всіх сфер промисловості.

Крім того, завершення 2022 року та початок 2023 року стали для України серйозним випробуванням [1]. Російські загарбники розпочали війну проти нашої енергетичної системи, наносячи руйнівні удари як по об'єктах генерації, так і по розподільним підстанціям. Це викликало планове та часто аварійне відключення електроенергії у всіх регіонах країни. Впровадження резервного живлення стало не просто корисною опцією на всякий випадок, але й нагальною життєвою необхідністю. У випадку відсутності електропостачання для побутових споживачів це часто призводить лише до незручностей, але для об'єктів інфраструктури та виробничих підприємств це може мати серйозні негативні наслідки.

Тому правильне управління та ефективне використання енергії привертає все більше уваги в сфері бізнесу. Компетентний менеджмент завжди розглядає можливості енергозбереження з мінімальними витратами. Впровадження системи енергоменеджменту може забезпечити правильний підхід до виявлення можливостей і підтримки покращень.

Мета та завдання

Метою роботи є оцінювання ефективності впровадженої системи енергетичного менеджменту у ТОВ «НАУКОВО-ВИРОБНИЧА ФІРМА «ЗОНД». Для досягнення цієї мети необхідно проаналізувати, як система енергетичного менеджменту може допомогти компанії протистояти труднощам, зумовленим енергетичною нестабільністю та військовим конфліктом.

Матеріал і результати досліджень

Основною спеціалізацією ТОВ «НАУКОВО-ВИРОБНИЧА ФІРМА «ЗОНД» є неруйнівний контроль, випробування та експертне обстеження (технічне діагностування) машин, механізмів, устаткування підвищеною безпеки. Фірма виконує повний цикл робіт у цій галузі, починаючи від стадії наукових досліджень.

ТОВ «Науково-виробнича фірма «Зонд» належать адміністративний корпус, лабораторні, виробничі та складські приміщення загальною площею понад 750 м²; транспортні засоби; дослідне виробництво з парком верстатного обладнання; технічні засоби (прилади, атестовані зразки, стаціонарні та переносні установки) й технології НКТД для надання послуг і навчання фахівців; випробувальне обладнання та контрольно-вимірні прилади для проведення випробувань; внутрішня комп'ютерна мережа.

У ТОВ «НАУКОВО-ВИРОБНИЧА ФІРМА «ЗОНД» впроваджено сертифіковану систему енергетичного менеджменту, яка ефективно функціонує та постійно поліпшується. Керівництво фірми несе відповідальність за підтримання функціонування системи енергетичного менеджменту та виділяє необхідні ресурси.

Основними задачами системи енергетичного менеджменту ТОВ є:

- підтримання витрат на енергоносії на мінімально-можливому (з врахуванням існуючого технічного стану) рівні з одночасним підтриманням умов перебування персоналу на рівні, що відповідає діючим нормативним документам;

- підготовка та впровадження технічних та організаційних заходів щодо зниження витрат на енергоносії та покращення умов перебування персоналу;

- впровадження системи стимулювання ощадного використання енергоресурсів на всіх рівнях.

Для спостереження за тенденцією використання паливно-енергетичних ресурсів фірмою проводиться постійне аналізування споживання паливно-енергетичних ресурсів з розбивкою по місяцях як в натуральних одиницях, так і у грошовому вираженні. Крім того, важливим при проведенні аналізування є знання структури енергоспоживання – частки кожного з видів енергоресурсів в загальних витратах.

Для встановлення ефективності прийнятих рішень з впровадження заходів щодо підвищення енергоефективності на даному підприємстві проаналізовано споживання енергії за останні п'ять років. Станом на кінець 2018 року баланс енергоспоживання в натуральних одиницях (рисунок 1) показував, що більшу частку займає споживання природного газу, а саме 70%. Споживання електроенергії займає 30%. Тому заходи з енергоефективності потрібно спрямовувати на зменшення споживання природного газу в першу чергу.

З іншого боку, проаналізувавши дані в грошовому вираженні (рисунок 2), стало зрозумілим, що з метою економії коштів доцільно впроваджувати заходи для зменшення споживання електроенергії. Адже, як видно з балансу енергоспоживання за 2018 р. в гривнях, 38% припадають на оплату за спожитий природний газ, 61% на оплату за спожиту електроенергію та лише 1% на оплату за холодне водопостачання.



Рисунок 1 - Баланс енергоспоживання в натуральних одиницях

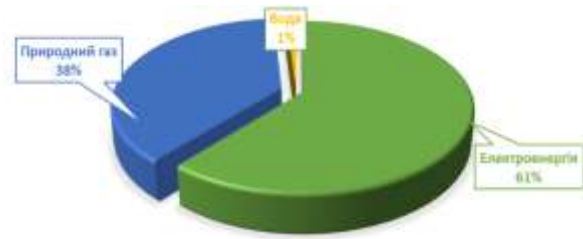


Рисунок 2 - Баланс енергоспоживання в грошовому вираженні

Загальний висновок полягає в тому, що ефективно управління енергоефективністю на фірмі вимагає комплексного підходу, зорієнтованого на конкретні дані щодо витрат та енергоспоживання. Обидва аспекти, тобто витрати в грошах та зменшення споживання, є важливими і взаємопов'язаними. Належне розуміння цих критеріїв дозволяє встановлювати першочерговість заходів з енергоефективності, спрямованих на покращення економічної та екологічної стійкості.

Однак, крім аналізування споживання паливно-енергетичних ресурсів актуальним є питання обстеження стану самих систем енергозабезпечення фірми. В статті розглянемо систему опалення та гарячого водопостачання, систему електрозабезпечення та систему освітлення.

На фірмі використовується система опалення на природному газі. Впроваджена двотрубна система опалення зазнала реконструкції у 2014 році. Тоді був встановлений новий газовий котел фірми Vaillant з максимальною тепловою потужністю 80 кВт. Нагрівальні елементи – сталеві водяні радіатори різної потужності (залежно від площі окремого кабінету). Усі радіатори обладнані терморегуляторами.

Водночас, за період роботи цієї системи опалення було виявлено низку недоліків. Зокрема, терморегулятори (термоголовки) змонтовані під кутом 45 градусів до вертикалі, тоді як вони мають встановлюватися горизонтально. Також, за результатами проведеного тепловізійного обстеження виявлено суттєву непропорційність температури радіаторів у різних частинах корпусу. Так, кабінети, які розташовані далі від котельного приміщення, нагріваються значно гірше, ніж ті, які є ближчими до джерела тепла.

Специфіка діяльності фірми полягає в частих відрядженнях персоналу, тому з метою раціонального споживання природного газу було прийнято рішення підтримувати тепловий режим на зниженому рівні, а у кабінетах, де залишались працівники, догрівати за допомогою електричних обігрівачів.

Так як в адміністративному корпусі персонал перебуває досить тривалий час, у санвузлах, в кімнаті для розігрівання їжі, а також в санвузлі гардеробної кімнати на першому поверсі передбачене гаряче водопостачання. В усіх випадках гаряче водопостачання забезпечується водяними електронагрівачами

накопичувального типу. В кімнаті розігрівання їжі – нагрівач об’ємом 15 л, споживана потужність 1,6 кВт. Санвузол (два туалети) оснащений нагрівачем води об’ємом 30 л, потужністю 2 кВт. У гардеробній (дві кімнати з шафами для спецодягу працівників) є умивальник та духова кабіна, які забезпечуються гарячою водою за допомогою нагрівача води об’ємом 50 л, потужністю 2 кВт.

Таким чином, гаряче водопостачання забезпечується виключно за допомогою електроенергії. Водночас, близьке розташування споживачів теплої води до нагрівачів зменшує тепловтрати, спричинені окремими втратами тепла в трубопроводах.

Система освітлення адмінкорпусу фірми виконана в основному з використанням накладних стельових світильників на чотири лампи з цоколем G13. Початково ці світильники були оснащені газорозрядними лампами, тому до їх комплекту входили спеціальні електричні стартери для газорозрядних ламп. Пізніше більшість газорозрядних ламп були замінені на світлодіодні такого ж типорозміру. Відповідно, усе додаткове електрообладнання світильника було демонтовано, а цоколі ламп з’єднані паралельно. На цей час на підприємстві замінені усі лампи розжарювання на світлодіодні. Газорозрядні лампи ще використовуються у кількох кабінетах.

Також, важливе значення має і природне освітлення. Зокрема, у світлу пору доби при ясній погоді використовувати додаткове штучне освітлення немає потреби, особливо у кабінетах, розташованих з південного боку. Водночас, коридор другого поверху, як правило, не отримує достатньо освітлення крізь скління дверей кабінетів. Цю проблему частково вирішує штучне освітлення. Проте, у коридорі було б доцільно використовувати датчики руху для вмикання-вимикання освітлення.

За результатами аналізування різних заходів з підвищення енергоефективності саме утеплення будівлі фірми стало найоптимальнішим із варіантів, адже це дозволяло шляхом зменшення тепловтрат зовнішніми огорожувальними конструкціями відразу отримати економії природного газу та електроенергії. Захід щодо утеплення реалізовано в 2020 році. В якості утеплюючого матеріалу застосовано пінополістирольні плити теплопровідністю 0,04 Вт/(м·К), товщиною 0,15 м. Площа утеплення склала 337,67 м². Проведений техніко-економічний аналіз запропонованих заходів підтвердив його ефективність та окупність (таблиця 1). Крім того, отримано додаткову шумоізоляцію від вулиці та покращено естетичний вигляд корпусу.

Таблиця 1. Результати розрахунку техніко-економічних показників

Загальна вартість проведення утеплення (грн)	$Q_{H,use}$ Вт·год (до утеплення)	$Q_{H,use}$ Вт·год (Після утеплення)	Економія енергії (Вт·год) в рік	Економія в коштах (Вт·год·грн) в рік	Термін окупності заходу енергоефективності (роки)
547025,4	414345193,8	328602055	85743,13886	60457,6622	9,01

Для підтвердження ефективності розглянемо динаміку зміни споживання електроенергії та природного газу за останні 5 років. Результати подано на рисунках 3-4.

Аналізуючи динаміку споживання бачимо, що утеплення будівлі дало позитивний ефект для зниження споживання електроенергії за рахунок відмови від догріву приміщень електричними нагрівачами. Однак, як показує динаміка в грошовому вираженні значний вплив мають тарифи на ті чи інші енергоносії. Зростання тарифу на природний газ дало значне збільшення оплати. Що ще раз підтвердило ефективність заходу щодо економії природного газу та доцільність комплексного підходу до встановлення першочерговості впровадження заходів з енергоефективності.

Якісне впровадження систем енергетичного менеджменту закладає у тому числі фундамент кризового реагування на енергетичні виклики.

ТОВ «НАУКОВО-ВИРОБНИЧА ФІРМА «ЗОНД» не припиняла своєї діяльності ні на початку російського вторгнення, ні під час цілеспрямованої атаки на енергосистему України. Часті і тривалі вимкнення електроенергії змусили керівництво підприємства в доволі стислий термін впровадити певні рішення щодо резервного живлення споживачів електроенергії, без яких неможлива діяльність підприємства. Такими споживачами є мережеве та серверне обладнання, ПК окремих робочих місць та система опалення (газовий котел з вбудованим циркуляційним насосом).

Так як система опалення повинна бути постійно увімкнена в холодну пору року, тому для неї було вибрано агрегат резервного живлення на акумуляторах. Було обрано систему, яка складається окремо з гелевого акумулятора (12 В, 250 А·год) та інвертора/зарядного пристрою KEMOT PROsinus-800. Оскільки споживана електрична потужність котла становить не більше 260 Вт, тому така система забезпечує роботу газового котла впродовж 5-6 годин.

Роботу серверного, мережевого обладнання, а також ПК окремих працівників вдалося забезпечити за допомогою бензинового генератора з вихідною електричною потужністю 1,8 кВт. Таке рішення було

тоді типовим для більшості малих бізнесів. Сприяли цьому значна власна територія фірми та ангари великої площі, що давало змогу використовувати бензиновий генератор тривалий час у відповідності до всіх вимог безпеки. Потужності генератора вистачало якраз для роботи серверного та мережевого обладнання, а також на роботу до десяти ПК (переважно типу ноутбук). Обмін даними з серверами здійснювався з використанням безпроводної мережі (WiFi). Серверне обладнання доводилось також перемикаєти вручну до подовжувача, який приєднаний до генератора.

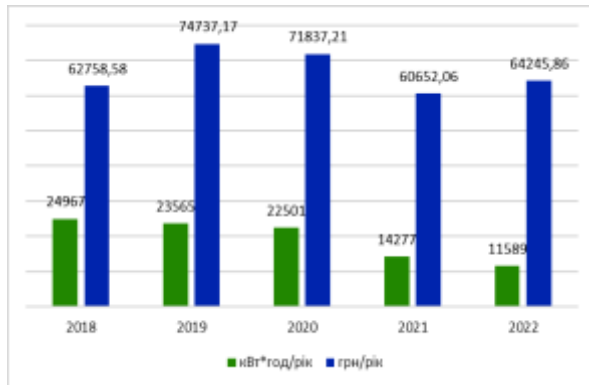


Рисунок 3 – Динаміка споживання електроенергії

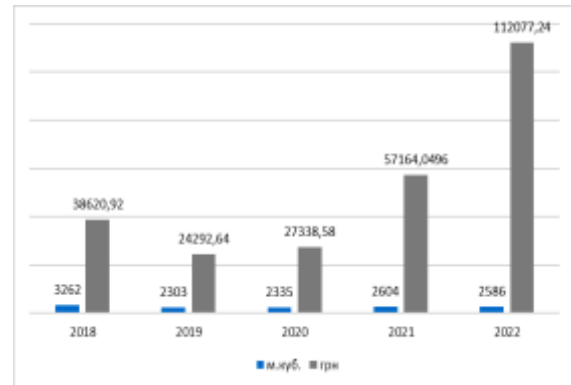


Рисунок 4 – Динаміка споживання природного газу

Проведено аналіз роботи підприємства в період тривалих аварійних вимкнень електроенергії. Було виявлено низку як незначних, так і суттєвих недоліків описаних вище заходів щодо забезпечення електроенергією споживачів підприємства. Це і не дивно, враховуючи невідповідність підприємства до такого розвитку подій. Отже, виявлено наступні недоліки:

- так як електромережа підприємства не передбачає під'єднання резервних джерел електроенергії, то перемикаєння серверів, комп'ютерної мережі та ПК на резервне живлення здійснювалося «вручну» зі значною перервою і з деякими незручностями;

- доводилося робити імпровізовану мережу живлення в актовому залі, де було організовано робочі місця більшої частини працівників, а за допомогою розгалужувачів вдавалося подати живлення на ПК усіх працівників та забезпечити необхідний рівень освітлення;

- при розміщенні працівників (понад 10 чол.) у актовому залі неможливо забезпечити дотримання санітарно-гігієнічних норм щодо мінімальної площі приміщення на одного працівника (не менше 6 м²) [2], мінімального повітрообміну, мінімальних відстаней тощо;

- значна вартість електроенергії, що виробляється бензиновим генератором (близько 36 грн за 1 кВт-год при тарифі від 5 до 6 грн./кВт-год для підприємств у 2022 році);

- незручності, пов'язані з роботою бензинового генератора (заміна мастила, доливання пального, облік мотогодин роботи генератора, часті переміщення з приміщення назовні і навпаки, шум та шкідливі викиди при роботі генератора);

- неможливість використання бензинового генератора підприємствами, які розташовані в багатоповерхових офісних будівлях;

- обмежений час роботи газового котла від акумуляторної батареї.

Таким чином, основний акцент зроблено на застосуванні агрегатів безперервного живлення (АБЖ). Сформульовано наступні основні вимоги до системи резервного живлення для малих підприємств на основі АБЖ:

- час неперервної роботи споживачів від АБЖ повинен становити не менше 8 год (тривалість робочого дня);

- АБЖ має бути інтегрований у внутрішню електромережу, забезпечуючи надійне живлення для важливих споживачів;

- в основі АБЖ має бути система подвійного перетворення, що забезпечить найбільш якісні параметри вихідного електричного струму;

- перевагу слід надавати літій-іонним акумуляторним батареям, так як такі акумулятори характеризуються великим ресурсом роботи, значною глибиною розрядження та високими струмами зарядження і розрядження;

- система повинна передбачати можливість підключення додаткових пристроїв живлення, у тому числі відновних джерел, тобто бути придатною до розширення спроможностей (future-ready);

– керування системою має відбуватися автоматично за допомогою логічного контролера, а також з можливістю віддаленого керування та моніторингу (для цього можна використати технології інтернету речей);

– усі розетки лінії резервного живлення повинні бути обладнані захистом від перевищення споживаної потужності (в межах максимальної споживаної потужності ПК).

На основі аналізу споживачів електроенергії, які потребують резервного живлення, та вивчивши різні варіанти АБЖ, було обрано найбільш оптимальне рішення. Таким рішенням став АБЖ виробництва компанії Schneider Electric під брендом APC, а саме Smart-UPS Ultra On-Line Li-Ion 10 кВА (рисунок 5). Це сучасне рішення щодо резервного живлення невеликих офісів, в основі якого є система подвійного перетворення електричного струму, літій-іонна акумуляторна батарея, корпус горизонтального чи вертикального типу. Один з найважливіших параметрів установки є форма напруги, яка є максимально наближеною до ідеальної синусоїди.

За допомогою такої системи буде можливо забезпечити неперервне живлення робочих ПК, серверів та мережі. Також, стає можливим організувати необхідний рівень освітлення робочих місць. І, що важливо, не буде потреби працівникам переносити свої робочі місця в один зал, де буде брак простору та свіжого повітря. Проте, щоб максимально використати переваги пропонованої системи, доведеться здійснити реконструкцію внутрішньої електромережі з урахуванням усіх аспектів та технічних нюансів.

З метою збільшення тривалості роботи обладнання виключно від системи резервного живлення, варто вжити деякі енергоощадні заходи. Зокрема, не повинні вмикатися електричні нагрівальні прилади, електрочайники, мікрохвильові печі, електричні нагрівачі води тощо.

Проблемою стає використання лазерних принтерів. Їх безпосереднє використання можливе лише при увімкненні електроенергії ззовні. При живленні від АБЖ варто користуватися принтерами струменевого типу, які споживають суттєво менше електроенергії, ніж лазерні.

Штучне освітлення повинно забезпечуватися лише з використанням енергоефективних світлодіодних ламп. Також доцільно максимально використовувати природне освітлення. Рівень освітленості на робочому столі в зоні розташування документів має бути в межах 300–500 лк [3], а коефіцієнт природної освітленості (КПО) має бути не нижче ніж 1,5%.

Виходячи з наведених вище умов, варто розглянути можливість використання спеціальних дахових світловодів (рисунок 6). Дахові світловоди вмонтовуються між дахом та стелею приміщення, що дає змогу подавати денне світло у найменш освітлені частини будинку. Дахові світловоди здатні проводити до 99% денного світла в середину приміщення [4]. Таке рішення може значно збільшити КПО і знизити використання штучного освітлення, а, отже, збільшити тривалість роботи обладнання від акумуляторів АБЖ.



Рисунок 5 – Загальний вигляд АБЖ Smart-UPS Ultra On-Line Li-Ion 10 кВА

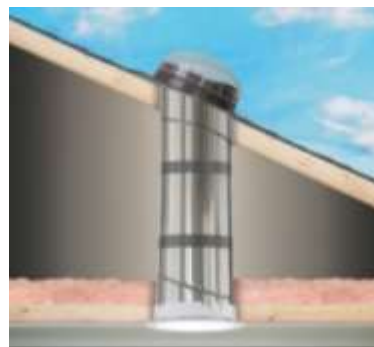


Рисунок 6 – Даховий світловод VELUX TGR

Висновки

Проведений аналіз споживання паливно-енергетичних ресурсів науково-виробничою фірмою «Зонд» з розбивкою за місяцями та в грошовому вираженні надає детальний огляд та визначає структуру енергоспоживання, що є важливим кроком для розробки ефективних стратегій управління. Комплексний підхід до встановлення пріоритетності заходів з енергоефективності є ключовим для досягнення успішних результатів. Динаміка зміни споживання енергії підтверджує, що ефективність заходів не обмежується лише економією ресурсів, але також допомагає вирішувати проблеми економічної стійкості та сталого розвитку підприємства. Важливо враховувати вплив тарифів на рішення з енергоефективності, оскільки зміни в цінах на енергоносії можуть суттєво впливати на економічні вигоди від проведених заходів.

Крім того, ситуація в країні створює все нові виклики для бізнесу, в тому числі енергетичні. Запропоновані технічні рішення забезпечать неперервну роботу підприємства при аварійних вимкненнях

електроенергії без зміни розташування робочих місць, з дотриманням усіх санітарних норм в кризові періоди.

Отже, впроваджена система енергетичного менеджменту у ТОВ "НАУКОВО-ВИРОБНИЧА ФІРМА «ЗОНД» продемонструвала свою ефективність та постійне поліпшення, що свідчить про високий рівень управління енергоефективністю на підприємстві.

Список використаної літератури

1. Резервне живлення дому, квартири, офісу. URL: <https://inteleng.com.ua/blog-uk/rezervne-zhivlennya-domu-kvartiri-ofis> (дата звернення: 15.12.2023).
2. ДСН 3.3.6.042-99 Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. [Чинний від 1999-12-01]. Вид. офіц. Київ, 1999. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/va042282-99#Text> (дата звернення: 16.12.2023).
3. ДБН В.2.5-28:2018 Природне і штучне освітлення. [Чинний від 1999-12-01]. Вид. офіц. Київ: Мінрегіон України, 2018. 133 с.
4. VELUX Sun Tunnel® Rigid Skylights. URL: <https://www.veluxusa.com/products/sun-tunnels/rigid> (дата звернення: 18.12.2023).

I. Vashchysyak¹, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof, ORCID 0000-0002-9078-6726

Yu. Movchan¹, Master

¹Ivano-Frankivsk National University of Oil and Gas

EFFICIENCY OF IMPLEMENTATION OF THE ENERGY MANAGEMENT SYSTEM AT RESEARCH AND PRODUCTION COMPANY 'ZOND' LTD

To ensure the correct approach to energy management and efficient use by enterprises and organizations, an energy management system is being implemented. The article is about effectiveness of the energy management system at the 'ZOND' LLC. An analysis of the use of fuel and energy resources is carried out, taking into account the structure of energy consumption and cost. It is established that in order to ensure rational consumption, it is necessary to apply a comprehensive approach to analyzing and prioritizing the proposed energy efficiency measures. The constructive and operational shortcomings of the heating system are described. The implemented measures for the rational use of gas are presented. Lighting aspects are considered, including the transition to LED lamps and the use of natural light. Significant heat losses by external envelope structures are revealed and the implemented measures for the building insulation with polystyrene insulation boards (EPS) are described. The results of the economic analysis are presented. The effectiveness of the measures taken by the enterprise to ensure backup power supply in the conditions of prolonged power outages is analyzed. The analysis of the enterprise's work during prolonged emergency power outages is carried out. A number of both minor and significant shortcomings of the described measures to provide electricity to the company's consumers have been identified. Particular attention is paid to the selection and use of uninterruptible power supply units to keep critical consumers running. The use of special skylights, also known as solar daylight tubes or light tubes, to reduce the use of artificial lighting is proposed. A conclusion is made about the effectiveness of an integrated approach to managing the energy efficiency of an enterprise in the context of modern challenges and a high level of energy efficiency management at this enterprise is confirmed.

Keywords: *energy management, energy analysis, energy efficiency measures, management efficiency*

References

1. Backup power for homes, apartments, offices. Accessed: December 15, 2023. [Online]. Available: <https://inteleng.com.ua/blog-uk/rezervne-zhivlennya-domu-kvartiri-ofis>.
2. Sanitary norms for microclimate in industrial premises, DSH 3.3.6.042-99, Kyiv, Ukraine, 1999. Accessed: December 16, 2023. [Online]. Available: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/va042282-99#Text>.
3. Natural and artificial lighting, DBN V.2.5-28:2018. Ministry of Regional Development of Ukraine. Kyiv, Ukraine, 2018.
4. VELUX Sun Tunnel® Rigid Skylights. Accessed: December 18, 2023. [Online]. Available: <https://www.veluxusa.com/products/sun-tunnels/rigid>.

Надійшла: 09.01.2024

Received: 09.01.2024

МОНІТОРИНГ, ДІАГНОСТИКА ТА КЕРУВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ ТА ОБЛАДНАННЯМ

MONITORING, DIAGNOSTICS AND CONTROL OF ENERGY PROCESSES AND EQUIPMENT

УДК 621.311.4

DOI 10.20535/1813-5420.1.2024.297525

Т.І. Друбєцька¹, канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0002-8580-9719

Є.М. Козаченко¹, студент

Д.К. Панасенко¹, студент

¹Український державний університет науки і технологій

ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ І РЕМОНТУ ОБЛАДНАННЯ ТЯГОВИХ ПІДСТАНЦІЙ

У статті розглянуто питання технічного обслуговування і ремонту тягових підстанцій.

Описана загальна проблема удосконалення системи технічного обслуговування і ремонту тягових підстанцій електрифікованих залізниць.

Проведений аналіз методів і засобів технічного обслуговування і ремонту обладнання підстанцій.

Проаналізовані причини порушення роботи обладнання ТП та розподіл порушень роботи обладнання ТП за типами устаткування.

Наведені результати обстежень трансформаторів.

Ключові слова: тягова підстанція, надійність, технічне обслуговування, ремонт, трансформатор, силове обладнання.

Вступ.

Сучасне електротехнічне устаткування має високі розрахункові показники надійності, однак в процесі експлуатації під впливом різних чинників, умов і режимів роботи стан обладнання ТП безперервно погіршується, знижується експлуатаційна надійність і збільшується небезпека виникнення відмов. Надійність силового обладнання тягових підстанцій залежить не лише від якості виготовлення, але і від науково - обґрунтованої експлуатації, правильного технічного обслуговування і своєчасного ремонту. У основі процесу експлуатації електроустаткування тягових підстанцій лежать послідовні в часі зміни технічного стану обладнання ТП, наявність резерву, своєчасність ремонту, якісне технічне обслуговування та зберігання, проведення моніторингу стану технічного обладнання, тощо.

На сьогоднішній день значна частина обладнання електроенергетичної інфраструктури залізничного транспорту України вже вичерпала свій ресурс і потребує заміни або поетапної реконструкції та оновлення. Більше 70% підстанцій мають термін експлуатації більше 70 років.

Необхідно підвищувати ефективність використання існуючого обладнання, застосовувати нові методи діагностування фактичного технічного стану обладнання, скорочувати експлуатаційні витрати і переходити на ресурсозберігаючі та енергозберігаючі технології.

Надійна робота пристроїв електропостачання грає важливу роль з питань вирішення проблеми безпеки руху на залізницях України. При цьому більшості відмов електроустаткування дистанцій електропостачання передує той або інший вид накопичених ушкоджень.

Враховуючи вищерозглянуте та результати аналізу стану технічної експлуатації ТП на цей час проблема забезпечення надійності електроустаткування та зниження аварійності силового обладнання ТП в процесі експлуатації стає першочерговим завданням системи електропостачання електрифікованих залізниць.

Розвиток швидкісного руху та зростання його інтенсивності, застосування електрорухомого складу нового покоління вимагають заміни застарілого обладнання низької експлуатаційної надійності на високотехнологічні пристрої підвищеної надійності і збільшеного ресурсу, впровадження нових методів діагностування технічного стану обладнання ТП та вдосконалення існуючої системи технічного обслуговування і ремонту пристроїв електропостачання електрифікованих залізниць України.

Зазначені обставини показують на необхідність розробки науково-обґрунтованого комплексу методів і засобів, спрямованих на підвищення надійності системи технічної експлуатації (СТЕ). Даний комплекс повинен базуватися на детальному аналізі виходу з ладу електрообладнання СТЕ зі застосуванням сучасних математичних моделей і методів.

Мета та завдання досліджень.

Мета. Провести аналіз методів і засобів технічного обслуговування і ремонту обладнання підстанцій.

Завдання. Дослідити причини порушення роботи обладнання тягових підстанцій

Матеріал і результати досліджень.

На цей час розроблена велика кількість інформаційних систем, методів і засобів контролю технічного стану і діагностування електрообладнання [1]. Їх широке впровадження створює умови для реалізації нової технології експлуатації електрообладнання з урахуванням технічного стану.

Загальна проблема удосконалення системи ТО і Р електрообладнання у тому числі ТП електрифікованих залізниць як правило включає в себе вирішення наступних завдань [1-3]:

- підвищення надійності електропостачання залізниць і безвідмовності роботи системи електропостачання;
- підвищення ефективності витрати енергоресурсів зі збереженням необхідних параметрів якості електричної енергії;
- автоматизоване управління і моніторинг стану електротехнічного устаткування;
- розробка системи збору і обробки даних стану електротехнічного устаткування (високо інтегровані комплекси оперативного управління в режимі реального часу при ухваленні рішень проведення ТО і Р;
- застосування великої кількості датчиків, які вимірюють поточні режимні параметри для оцінки стану обладнання в різних режимах роботи електропостачання;
- оптимізацію строків проведення ТО і Р;
- визначення оптимального обсягу ТО і Р;
- вибір раціональної стратегії проведення ТО і Р;
- вибір стратегії управління станами процесу експлуатації електрообладнання;
- розробка та застосування автоматичної оцінки поточної ситуації і побудови прогнозів роботи ТП;
- планування ТО і Р електрообладнання з урахуванням фактичного технічного стану.

Таким чином, основним принципом нової технології управління технічним станом електрообладнання є метод ТО і Р електрообладнання, заснований на індивідуальному спостереженні за реальними змінами технічного стану обладнання в процесі експлуатації. Тоді система ТО і Р являє собою сукупність правил, що забезпечують задане та якісне управління виробничою експлуатацією електрообладнання на основі контролю його технічного стану.

Щоб провести оцінку нормальної роботи системи тягового електропостачання можна використати безліч сучасних методів. У цьому напрямі японські вчені, в період становлення науки про якість, відібрали сім основних методів. Заслуга вчених полягає в тому, що вони забезпечили простоту, наочність, візуалізацію багатьох статистичних методів, перетворивши їх фактично в ефективні інструменти оперативного контролю якості [1].

Розглянемо один з таких методів, а саме закон Парето. Його принцип заснований на відокремленні важливих факторів від малозначущих і несуттєвих та дозволяє сфокусувати зусилля і ресурси на усунення найбільш значимих проблем. Побудована діаграма Парето з причин порушень нормальної роботи системи тягового електропостачання електрифікованих залізниць України, представлена на рис. 1 [1].

Аналіз діаграми показав, що основним обладнанням з причини якого здійснюється 79,59 % порушень нормальної роботи ТП електрифікованих залізниць України за досліджуваний період є: вимикачі, трансформатори (як силові, так і вимірювальні), пристрої релейного захисту, ізолятори та пристрої дистанційного і телеуправління. Також бачимо що основні порушення нормальної роботи ТП відбуваються за рахунок виходу з ладу вимикачів (29,58 %) та трансформаторів (20,21 %).

Важливим напрямом рішення проблеми підвищення надійності системи тягового електропостачання є ефективне та якісне діагностування фактичного технічного стану силових трансформаторів ТП з метою повного використання його ресурсу. Трансформатори ТП дистанцій електропостачання обумовлені особливою значущістю у забезпеченні надійної роботи системи тягового електропостачання залізниць, високою вартістю, небезпекою виникнення ушкоджень, які викликають значні наслідки. Діаграма розподілу порушень роботи обладнання ТП за типами устаткування (рис. 2) показує, що пошкодження трансформаторів відносяться до основних значущих проблем порушення тягового електропостачання.

На цей час на залізницях України з 422 понижувальних та тягових трансформаторів напругою 110-220 кВ. знаходиться в експлуатації 337 трансформаторів зі строком служби понад 25 років, що складає 79% від загальної кількості понижувальних та тягових трансформаторів (табл. 1) [1].

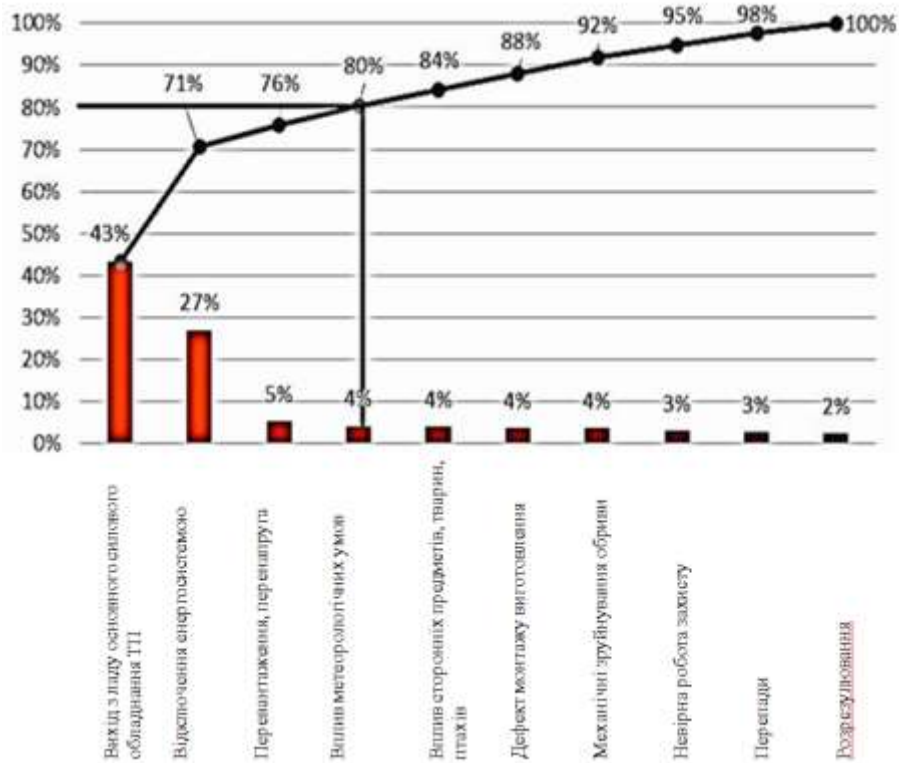


Рисунок 1 – Причини порушення роботи обладнання ТП

Проведемо аналіз діаграми рис. 1. Бачимо, що 80 % причин порушень нормальної роботи системи тягового електропостачання електрифікованих залізниць України за досліджуваний період складають: пошкодження основного силового обладнання ТП; відключення живлення енергосистемою; перевантаження та перенапруга; та вплив метеорологічних умов. З них 43 % складають відмови основного силового обладнання ТП.

Для виявлення обладнання ТП, стану якого необхідно приділити першочергову увагу при проведенні моніторингу, діагностуванні та ТО і Р, була побудована діаграма Парето по результатам дослідження які наведені на рис 2 [1].

Таблиця 1 – Трансформатори з понаднормативним строком експлуатації

Назва залізниці	Південна залізниця	Південно-Західна залізниця	Одеська залізниця	Укрзалізниця
Кількість трансформаторів зі строком експлуатації понад 25 років, шт.	48 (70% від загальної кількості залізниці) по	43 (60% від загальної кількості залізниці) по	37 (59% від загальної кількості залізниці) по	337 (79% від загальної кількості по Укрзалізниці)

Термін служби трансформатора складає не менше 25 років, при цьому через 12 років необхідно виконувати капітальний ремонт.

Проведений аналіз технічного стану силових трансформаторів ТП показав, що за 8 років відбулося 30 пошкоджень та відмов трансформаторів [1-3]. Із числа пошкоджених замінені 17 трансформаторів. Аналіз розподілу відмов і пошкоджень силових трансформаторів залежно від періоду їх експлуатації представлено на рис. 3.

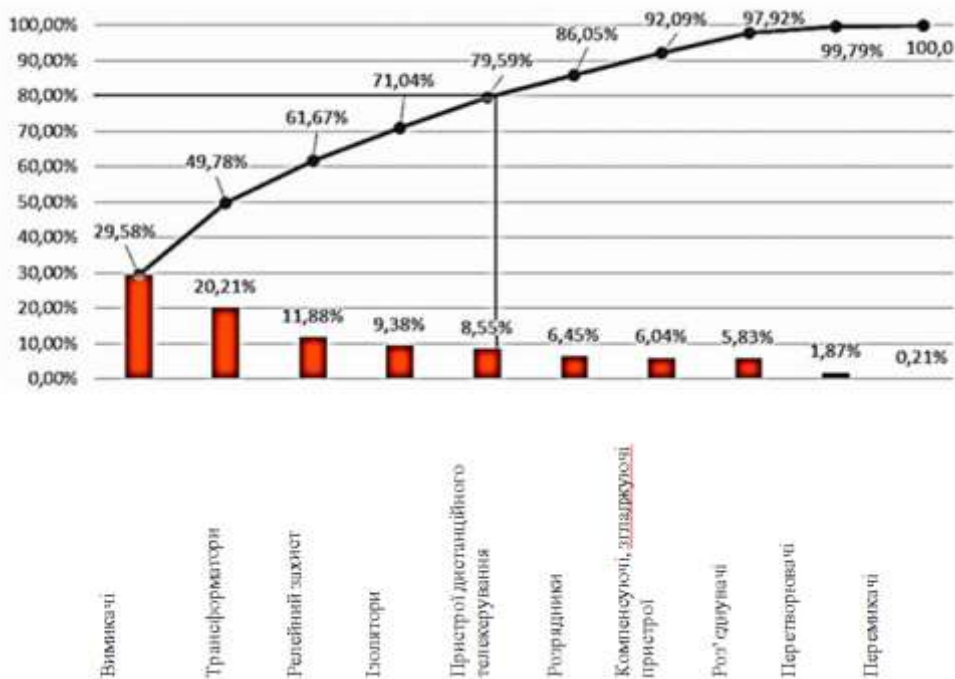


Рисунок 2 – Розподіл порушень роботи обладнання ТП за типами устаткування

Проведемо аналіз відповідно до рис. 3:

1. Розподіл має чітко виражений максимум, найбільша кількість відмов і пошкоджень силових трансформаторів спостерігається після 10 і 30 років. Пошкоджуваність трансформаторів на рівні 15...20 % в перші 10...15 років роботи пояснюється, в основному, проявом істотних заводських дефектів конструкції і виготовлення;

2. Максимум пошкоджуваності силових трансформаторів в період експлуатації 10...15 років збігається з терміном капітального ремонту, який в умовах тягових підстанцій, як правило, не проводиться через відсутність ремонтної бази;

3. Зниження пошкоджуваності до 25...30 рокам експлуатації пояснюється виробленим вибраковуванням обладнання з істотними дефектами шляхом його заміни і частково проведенням ремонтів;

4. Зростання пошкоджуваності після 30 років експлуатації свідчить про недосконалість системи діагностування та ТО і Р.

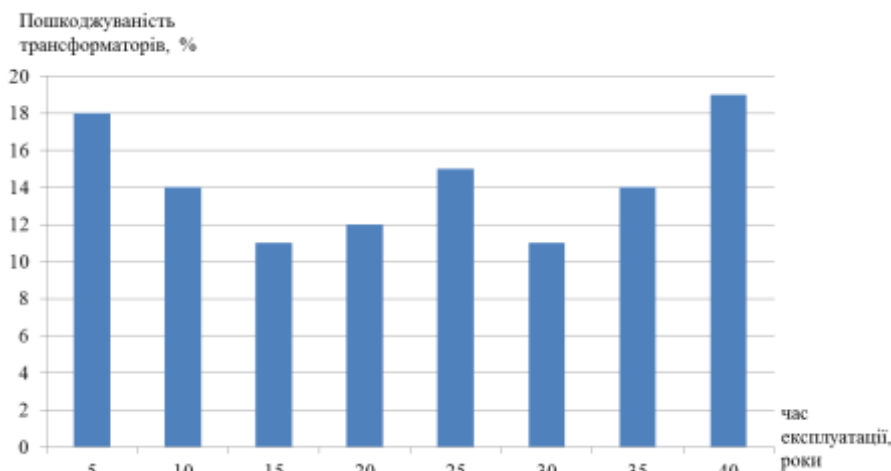


Рисунок 3 – Розподіл відмов і пошкоджень силових трансформаторів

Продовжити термін експлуатації трансформатора та повністю використати залишковий ресурс можливо за умови проведення якісного і своєчасного діагностування, раннього усунення виявлених дефектів шляхом недорогого відновлювального ремонту. Досвід експлуатації силових трансформаторів

показує, що і після нормативного терміну служби значна частина трансформаторів зберігає свою працездатність при дотриманні допустимих навантажувальних режимів, своєчасному проведенні випробувань, діагностування, технічного обслуговування ремонтів і якісному їх виконанні, з іншого боку термін служби трансформатора залежить від його залишкового ресурсу.

Підтвердженням цього є результати обстежень більше двохсот трансформаторів потужністю від 6,3 до 1000 МВт, виготовлених в Україні, Швеції і Бельгії і встановлених в різних кліматичних зонах [1]. Майже 70% з обстежених трансформаторів мали напрацювання більше 25 років. Близько половини з них відносяться до великих (більше 100 МВт). Узагальнені результати комплексних діагностичних обстежень представлені на рис. 4.

Результати обстежень показують що 30 % трансформаторів, з числа обстежених, можуть продовжувати експлуатуватися без яких обмежень. І усього лише 2 % мають бути замінені. Інші трансформатори вимагають або капітального ремонту (15 %), або відносно невеликих і не дорогих відновних ремонтів (23%), або просто підвищеного контролю (30 %) [1].

Тому поряд з плановою заміною застарілого обладнання найважливішим завданням є використання повного робочого ресурсу трансформаторів за рахунок комплексного застосування сучасних методів діагностування та технологій ремонту за фактичним технічним станом обладнання.

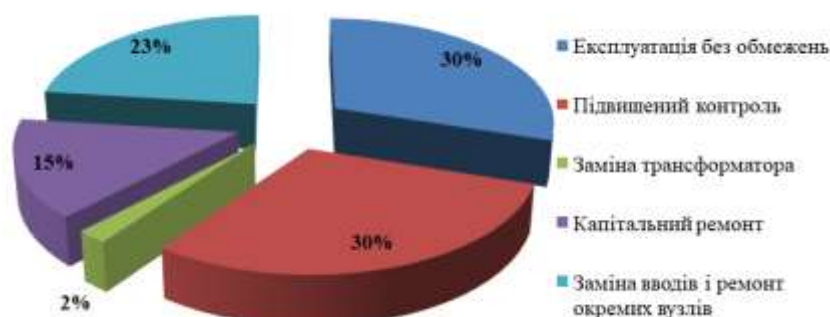


Рисунок 4 – Результати обстежень трансформаторів

Висновки

Існуюча система ППР обладнання ТП не відповідає сучасним умовам його експлуатації.

Необхідне удосконалення існуючої системи ТО і Р та діагностування електроустаткування шляхом розробки і застосування її нових форм, що забезпечують зниження витрат на ТО і Р при одночасному збільшенні надійності експлуатації електрообладнання.

Задача вдосконалення існуючої системи ТО і Р полягає в переході від системи ППР з жорсткою структурою ремонтного циклу, до системи, котра враховує досягнутий електроустаткуванням міжремонтний ресурс, який визначається результатами діагностування з використанням сучасних методів. Найбільш прогресивною в цьому розумінні є система технічного обслуговування і ремонту, заснована на встановленні фактичного технічного стану обладнання з використанням сучасних засобів діагностики, дефектоскопії і автоматизованого контролю в електропостачанні залізниць.

На початковому етапі впровадження системи ТО і Р електроустаткування за фактичним технічним станом доцільно зберегти планування основних ремонтних показників. При подальшому глибокому розвитку і впровадженні методів і засобів технічної діагностики можна буде відмовитися від регламентного календарного планування термінів ремонту, замінивши його на календарне планування діагностичних перевірок.

Список використаної літератури

1. Удосконалення методології системи технічного обслуговування і ремонту тягових підстанцій: монографія / О. О. Матусевич. – Дніпропетровськ: Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2015. – 295 с.
2. Концепция мониторинга и диагностирования электрооборудования тяговых подстанций электрифицированных железных дорог / О. О. Матусевич // Problemy Kolejnictwa – Zeszyt 167 (czerwiec 2015) — с. 43-49
3. О. Матусевич, Д. Міронов, “Дослідження експлуатації силового обладнання системи тягового електропостачання залізниць”, Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, № 6(54), с. 78-86, 2015.

T. Drubetska¹, Cand.Sc. (Eng.), Assoc. Prof., ORCID 0000-0002-8580-9719

Е.М. Kozachenko¹, student

D.K. Panasenko¹, student

¹**Ukrainian State University of Science and Technologies**

IMPROVING THE QUALITY OF MAINTENANCE AND REPAIR OF TRACTION SUBSTATIONS EQUIPMENT

The article deals with maintenance and repair of traction substations.

The general problem of improving the maintenance and repair system of traction substations of electrified railways is described.

An analysis of methods and means of maintenance and repair of substation equipment was carried out.

The causes of malfunctions of the traction substations equipment are analyzed/

The distribution of malfunctions of TP equipment by types of equipment was analyzed.

The results of transformer inspections are presented.

Key words: *traction substation, reliability, maintenance, repair, transformer, power equipment.*

References

1. Improvement of the methodology of the maintenance and repair system of traction substations: monograph / O. O. Matusyevych. - Dnipropetrovsk: Dnipropetr. national Railway University transp. named after Acad. V. Lazaryan, 2015. – 295 p.

2. Concept of monitoring and diagnosis of electrical equipment of traction substations of electrified railways / O. O. Matusyevych // Problemy Kolejnictwa – Zeszyt 167 (czerwiec 2015) — p. 43-49

3. O. Matusyevych, D. Mironov, "Investigation of operation of the power equipment of the traction power supply system of railways", Science and progress of transport. Visnyk Dnipropetr. national Railway University transp. named after Acad. V. Lazaryan, No. 6(54), p. 78-86, 2015.

Надійшла: 13.11.2023

Received: 13.11.2023

ОСОБЛИВОСТІ ПОБУДОВИ СИСТЕМ SMART-МОНІТОРИНГУ MICROGRID СИСТЕМ

У даній статті проведено аналіз основних вимог до систем керування в Microgrid системах. Визначено основні цілі впровадження Microgrid систем та, на основі проведеного аналізу, систематизовано вимоги до систем Smart-моніторингу. Проаналізовано складові систем Smart-моніторингу, які включають: комунікаційну програмну платформу, апаратну комунікаційну платформу та типи обладнання джерел РГ для Microgrid систем. Запропоновано побудову систем Smart-моніторингу для Microgrid систем здійснювати на основі моделі SGAM з урахуванням різноманітних моделей агрегування різноманітних джерел РГ у рамках Microgrid систем. Запропонована структура системи Smart-моніторингу для Microgrid систем з різноманітними джерелами РГ дає змогу ефективно агрегувати джерела РГ та активних споживачів та здійснювати ефективну диспетчеризацію генерувальних потужностей на основі ринкових механізмів їх взаємодії зі споживачами та між собою.

Ключові слова: *Microgrid, системи моніторингу, відновлювальні джерела енергії, системи накопичення енергії, активні споживачі.*

Вступ. Незважаючи на те, що локальні Microgrid системи пропонують цілий ряд переваг, їх впровадження пов'язане з багатьма проблемами. Ці виклики можна структурувати наступним чином: двонаправлений потік електроенергії; проблеми з якістю електроенергії; низька інерційність; ізолюваний режим роботи; скоординоване керування декількома джерелами розосередженої генерації (РГ); накопичення енергії; економічна та надійна робота; технологічні виклики та кібербезпека; регуляторні бар'єри [1-7].

Інтеграція джерел РГ в мережу Microgrid систем починається з взаємозв'язку між різноманітними джерелами РГ та системами накопичення енергії (СНЕ) або їх агрегування у точці приєднання, організованої як Microgrid система або агрегації операторами систем розподілу (ОСР) або сторонніми агрегаторами, якими можна керувати для надання послуг клієнтам та мережі. Microgrid системи в основному створюються для забезпечення стійкої та надійної роботи критичних інфраструктурних об'єктів. Вони можуть надавати послуги мережі, але в основному вони зосереджуються на обслуговуванні споживачів у межах своїх кордонів, коли вони являють собою повністю локальні системи. Агреговані джерела РГ, з іншого боку, не живлять окремі навантаження, а надають послуги системам розподілу та передачі та беруть участь у роботі ринків електроенергії. ОСР/регулюючі органи повинні брати участь у визначенні операцій приєднання/інтеграції джерел РГ у Microgrid системах чи їх агрегуванні.

Інтеграція джерел РГ є одним із важливих завдань Microgrid, оскільки джерела РГ та системи накопичення енергії (СНЕ) є конкурентними альтернативами для керування генеруванням у пікові години на ринку електричної енергії України. Для забезпечення ефективної процедури агрегування розосереджених енергетичних ресурсів, Інформаційно-комунікаційні технології (ІКТ) повинні забезпечувати двосторонній зв'язок між зацікавленими суб'єктами, тобто споживачами ↔ агрегатором та власниками РГ/СНЕ ↔ агрегатором.

Окремою задачею є регулювання ціноутворення та виставлення рахунків у реальному часі. Для її виконання повинні використовуватися Smart системи моніторингу, котрі здатні забезпечити двосторонній потік інформації між означеними суб'єктами.

Є дві основні цілі Microgrid систем щодо управління енергоресурсами, які повинні бути враховані при побудові відповідної системи моніторингу, - це можлива інтеграція джерел РГ та здатність системи накопичувати енергію (Рис. 1) [1, 8].

Сучасні архітектури Microgrid систем повинні відповідати моделі архітектури Smart Grid (SGAM), яка складається з трьох вимірів: домени, зони та рівні сумісності [9]. Він зосереджений на сумісності архітектур розумних мереж шляхом моделювання електричних з'єднань, інформаційних потоків і комунікаційних технологій між фізичними компонентами та програмними додатками, враховуючи при цьому існуючі нормативні та бізнес-обмеження. Усі важливі аспекти інтелектуальної мережі представлені на п'яти рівнях сумісності: компонентному, комунікаційному, інформаційному, функціональному та бізнес-рівні. Горизонтальна вісь SGAM структурована на п'ять доменів. Вона складається з традиційних елементів у ланцюжку постачання енергії: генерації, передачі та розподілу, а також двох досить децентралізованих доменів, розосереджені енергетичні ресурси (РГ та СНЕ (DER)) та «Customer Premise».

Останній домен включає (промислових, комерційних і житлових) споживачів. Третій вимір представляє ієрархічні зони управління енергосистемою в інтелектуальній мережі. Він включає: процес (перетворення енергії та залучене фізичне обладнання), поле (обладнання для захисту, контролю та моніторингу енергетичної системи), станцію (рівень площинної агрегації для рівня поля), експлуатацію (операцію керування енергосистемою), підприємство (комерційне та організаційні процеси, послуги та інфраструктури), і Ринок (можливі ринкові операції) [9].

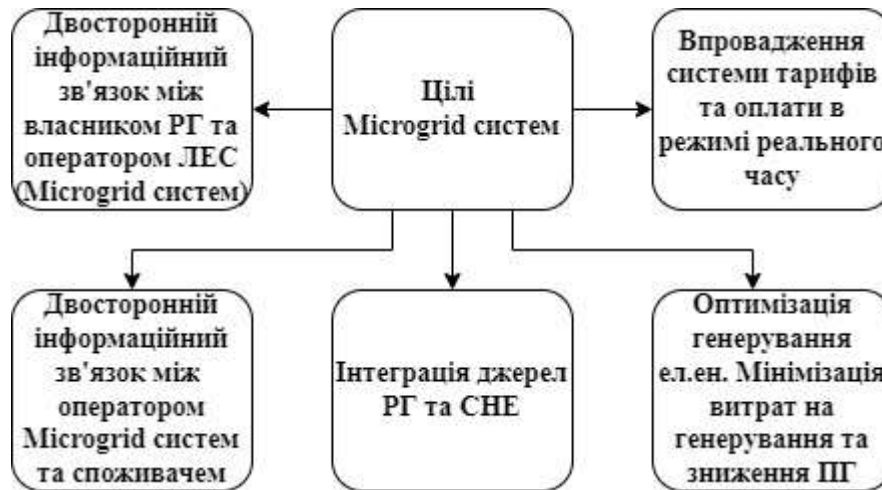


Рисунок 1 – Основні цілі впровадження Microgrid систем

Оскільки генерація стає більш децентралізованою завдяки інтеграції значної кількості джерел РГ, енергетичні ринки та електромережі повинні адаптуватися на рівні систем передачі та розподілу. Таким чином, Microgrid системи та пов'язана з ними концепція локальних енергетичних ринків стають все більш важливими для стійкої та надійної роботи енергетичних систем [10-12].

Впроваджуючи моделі змінного ціноутворення для локальних енергетичних ринків, оператор / агрегатор Microgrid (MGA) системи повинен враховувати характеристики різних типів джерел РГ та *LCOE* для кожного типу джерел РГ, щоб стимулювати кожного місцевого учасника ринку електроенергії окремо.

У відповідності до окреслених структурних особливостей, сучасний розвиток Microgrid систем для вирішення задач керування енергетичними потоками та оптимізації режимів генерування та споживання електричної енергії неможливий без наявності систем Smart-моніторингу та керування.

Враховуючи вищезазначене, вимоги до моніторингу та керування Microgrid систем визначаються наступним:

1. Профіль і прогнозованість генерування від різнотипних джерел РГ та залишкового навантаження є двома ключовими показниками завдань, що стоять перед іншими елементами електроенергетичної системи.

2. Джерела РГ поділяються на диспетчеризовані та недиспетчеризовані (керовані та некеровані) і технічні засоби системи моніторингу повинні забезпечувати достатність інформації для прийняття керуючих рішень, що в свою чергу, дасть змогу, на основі існуючих методів керування оптимізувати електроенергетичні процеси в Microgrid системі.

3. Архітектура системи Smart-моніторингу, завдяки сучасним комунікаційним технологіям повинна забезпечувати функції з координації та керування джерелами РГ.

Мета роботи. Метою даного дослідження є розробка структури системи Smart-моніторингу для Microgrid систем з джерелами розосередженої генерації, котра дасть змогу враховуючи особливості різнотипних джерел генерації при їх роботі.

Матеріал і результати дослідження.

Smart-моніторинг Microgrid систем це багатоцільова складна система моніторингу та контролю: розподіл потужності навантаження, регулювання напруги/частоти та якості електроенергії, участь у локальних ринках, коротко- та довгострокове планування.

Можна виділити три рівня Smart-моніторингу [13].:

- перший рівень – є базовим, це моніторинг у реальному часі параметрів мережі: частоти, напруги, струмів. Швидке інформування щодо наявності невідповідностей у системі, також збір даних з усіх датчиків в системі. Цей рівень вважаються найскладнішими.

- другий рівень – є продовженням першого рівня, в ньому відбувається аналіз якості параметрів електричної енергії та якості енергопостачання, відповідність стандартам всіх параметрів мережі. Крім того, він контролює синхронізацію та обмін електроенергією між елементами локальної системи

- третій рівень – на основі отриманих даних, формуються згідно алгоритмів інформація для участі у ринках електроенергії. Виконується загальна перевірка даних та вирішується, які кроки зробити далі.

Модель такої комплексної Microgrid системи охоплює напрямки від схмотехнічного та технологічного аж до формування відповідних бізнес-процесів, зокрема: розвиток інформаційно-комунікаційних технологій (ІКТ); поширення джерел розосередженої генерації (ДРГ), у тому числі ВДЕ, формування різних за типом та потужністю локальних систем енергозабезпечення; розвиток енергетичних кооперативів, агрегаторів навантажень та генераторів електроенергії при широкому застосуванні активних споживачів (prosumer); урізноманітнення навантажень при швидкому розвитку технологій перетворення та накопичення електроенергії; формування нових ринкових механізмів та нових бізнес-моделей з врахуванням положень клієнтоорієнтованого підходу концепції Smart Grid; наявність системи двостороннього обміну енергією та інформацією в реальному часі відносно точки приєднання.

При розвитку динамічного ціноутворення необхідно враховувати технічні можливості Smart-лічильників. Ефективне динамічне ціноутворення можливе за умови використання Smart-лічильників з мінімальними вимогами, що дають змогу надійно відслідковувати споживання в конкретні часові інтервали, що відповідають інтервалам, визначених ринковими відносинами.

Загалом, система керування Microgrid системи повинна відповідати наступним вимогам:

1. Експлуатація microgrid в допустимих межах (первинне і вторинне керування в обох режимах роботи).

2. Розподіл активної та реактивної потужності (первинне і вторинне керування в режимі підключення до мережі).

3. Безперебійне підключення та відключення від основної мережі (первинне і вторинне керування в обох режимах роботи).

4. Участь у ринку з оптимізацією локальної Microgrid системи та обмін електроенергією з мережею (третинне керування в ізолюваному режимі).

5. Безперебійне живлення чутливих навантажень, таких як медичне обладнання та комп'ютерні сервери (в обох робочих режимах).

6. Робота з "чорним пуском" (black start) у разі будь-якої загальної помилки (в ізолюваному режимі).

7. Підвищення продуктивності та надійності системи шляхом забезпечення підтримки систем акумулювання енергії (первинне і вторинне керування в обох режимах роботи).

З точки зору реалізації, системи керування Microgrid системи поділяється на дві категорії, централізовані та децентралізовані [14]. Кожна використовується в залежності від типу Microgrid системи, мережевих умов та рівню керування. В останніх дослідженнях серед різних структур систем керування, ієрархічна модель виявилася найбільш широко вживаною в централізованих та децентралізованих структурах. Ієрархічне керування має три рівні керування, включаючи первинне, вторинне і третинне (див. рис. 2)[15].

Загалом, система керування Microgrid повинна мати наступні характеристики:

Вихідне керування: напруги та струми блоків РГ повинні відслідковувати їх еталонні значення, а коливання повинні бути повністю затухаючими (первинне і вторинне керування в обох режимах роботи).

Балансування потужності: блоки РГ у Microgrid системи повинні мати можливості для компенсації раптового дисбалансу активної потужності та збереження відхилення частоти і напруги в прийнятному діапазоні (первинне і вторинне керування в обох режимах роботи).

Управління попитом (DSM): відповідні DSM методи повинні бути розроблені для управління навантаженням (третинне керування в обох режимах роботи).

Економічна диспетчеризація: належна диспетчеризація блоків РГ в локальних Microgrid системах знижує експлуатаційні витрати та збільшує загальний прибуток (первинне, вторинне і третинне керування в ізолюваному режимі).

Функції керування розосередженими енергоресурсами (DER) можуть виконувати локальні системи керування кожного агрегату [16]. Однак зі зростанням кількості об'єктів керування в Microgrid неможливо обійтися без автоматизованої інформаційно-керуючої системи, яка має здійснювати координуюче і оптимальне керування всіма розосередженими енергоресурсами, мінімізуючи витрати на первинне паливо, закупівлю енергії на ринках від «третьої сторони» і технічне обслуговування обладнання, підвищуючи доходи від продажу енергії та надання системних послуг (цінозалежне споживання, регулювання частоти і напруги). Системи відомі, як Distributed Energy Resource Management System (DERMS) відповідають за взаємодію з «загальною» енергосистемою, яку, в свою чергу, представляє система керування DMS енергетичної компанії [16].

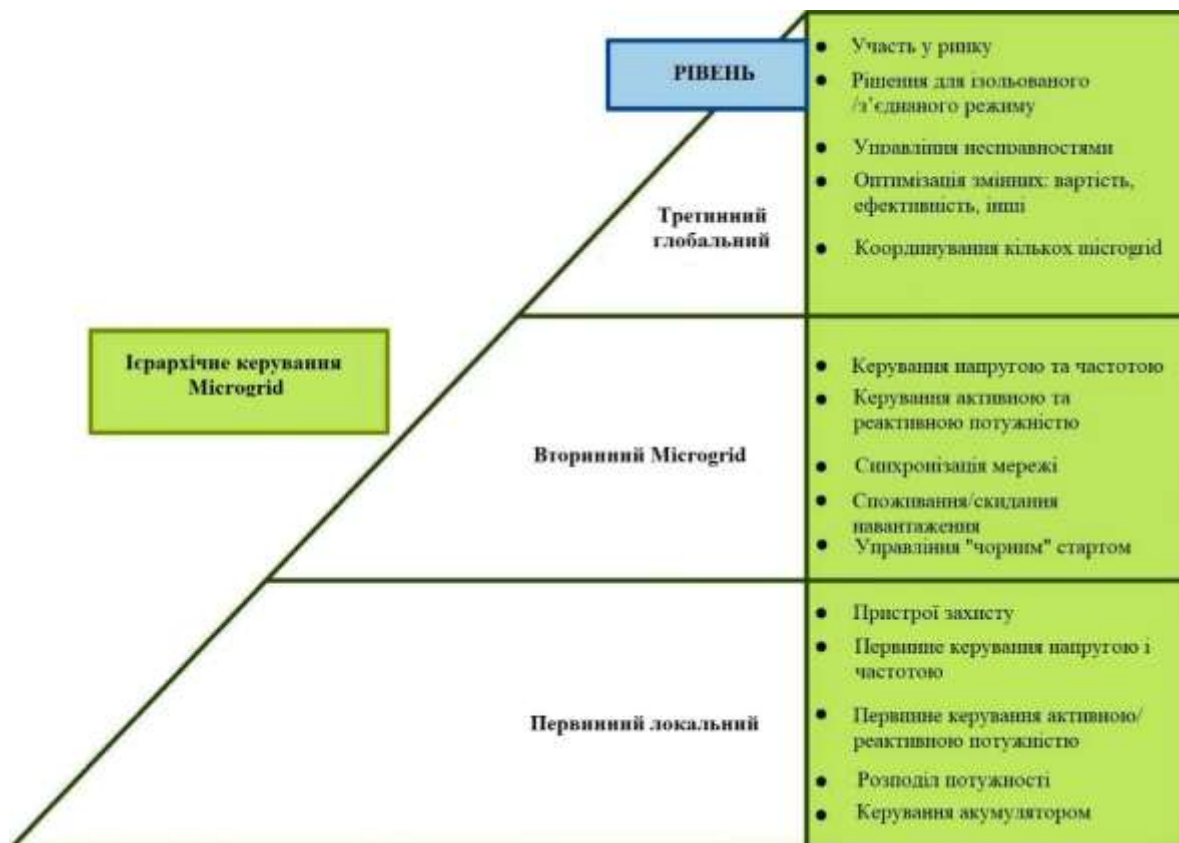


Рисунок 2 – Система керування для Microgrid систем – часові рамки та область дії

Перші технології DERMS з'явилися лише в 2014 році. Так, на початку 2017 року компанія Siemens запустила власну DERMS, що складається з програм збору і надання даних і візуалізації енергосистеми від планування до прогнозування. За основу взята адаптація програмних засобів системи керування Spectrum 7 Utilidata [16].

Для Microgrid та віртуальних електростанцій (VPP) система керування розосередженими енергоресурсами (DERMS) оптимально керує функціонуванням розосередженими енергоресурсами для надання мережеских послуг, полегшує альтернативи, дозволяє розосередженим енергоресурсам приймати участь на ринках. DERMS дозволяє підвищити ситуаційну обізнаність при збільшенні проникнення DER, забезпечуючи моделювання, агрегування та групування розосереджених енергоресурсів. DERMS також покращує використання розосереджених енергоресурсів, забезпечуючи їх зв'язок, прогнозування їх роботи, покращує послуги надійності мережі та керування обмеженнями розосереджених енергоресурсів. Виникає проблема побудови нових алгоритмів обліку та керування, коли при побудові системи керування необхідно, поряд з технічним (технологічним) контуром, використовувати економічний контур керування. Звичайно, на вищих рівнях ієрархії таких контурів буде «кілька», причому з'являється контур керування, в який включено людину, наприклад, диспетчера. Однак на самому нижчому рівні, а саме Microgrid – диспетчер відсутній. У цьому випадку функції, які покладаються на диспетчера на верхніх рівнях (коли існує необхідність багатоваріантних розрахунків за низкою, часто суперечливих, критеріїв та обмежень), покладено на систему керування (її ядро – контролер).

На сьогодні розроблено два основні підходи до залучення споживачів до керування навантаженням: неявне керування попитом (implicit demand response, price-based demand response), засноване на застосуванні різних видів диференційованих за часом тарифів на електроенергію або поведінкових стимулів; явне керування попитом (explicit demand response, incentive-based demand response, event-based demand response), що передбачає безпосереднє керування навантаженням споживача.

Для оптимального функціонування Microgrid на першому етапі важливо забезпечити баланс попиту та пропозиції з використанням (формуванням) відповідних функцій попиту та пропозицій, а також створення сучасних інноваційних бізнес-моделей Microgrid. Наприклад, два основних нових гравця представлені бізнес-моделлю E+ для досягнення цілі оптимізації енергопроцесів в Microgrid: активний споживач (prosumer) та АРМ (менеджер агрегованих активних споживачів, Aggregated Prosumers' Manager) [17, 18]. Просюмери є фізичними або юридичними особами, здатними створювати різні договірні відносини з АРМ, ОСП або агрегатор (Commercial Aggregator (CA)). АРМ може взаємодіяти з іншими

агентами в електроенергетичній системі та тісно співпрацює з ОСР для керування та оптимізації роботи розподільної мережі, пропонуючи допоміжні послуги, що стосуються якості параметрів режимів мережі або компенсації реактивної потужності.

Впровадження такої системи Smart-моніторингу для Microgrid систем вимагає трьох основних компонентів [17]:

1) *комунікаційна програмна платформа* – служить основою для оператора мережі для надсилання ринкових сигналів стороннім агрегаторам, клієнтам джерел РГ або напряму власникам джерел РГ. За допомогою відповідної програмної платформи і-й ОСР або сторонній агрегатор можуть безпосередньо керувати окремими джерелами РГ, надсилати сигнали споживачам і надсилати запити на надання послуг третіми сторонами.

2) *апаратна комунікаційна платформа* – дає змогу власникам джерел РГ реагувати на запити ОСР, агрегаторів третьої сторони, або клієнтів джерел РГ. Якщо джерело РГ відповідає на відповідний запит, комунікаційна платформа відстежує згенеровані РГ у мережу обсяги ел.ен. та надсилає дані назад до ОСР або стороннього агрегатора. Фотоелектричні модулі та акумуляторні батареї, оснащені счасними інверторами, сумісні з цими платформами, як і деякі пристрої, такі як інтелектуальні термостати та зарядні пристрої для електромобілів.

3) *обладнання джерел РГ* – Фотоелектричні системи, вітрові установки, СНЕ, електромобілі, розумна побутова техніка, дизельні генератори та ін. Тип джерела РГ, який має право брати участь в агрегації, залежить від типу комунікаційної платформи, регуляторних факторів і місця розташування (вимоги щодо розміщення, навколишнього середовища та інші вимоги для участі у процесі агрегування).

Саму процедуру агрегування для Microgrid системи можна формалізувати у вигляді відповідної ринкової моделі (рис. 2) у рамках побудови Microgrid системи на основі моделі SGAM [2, 9].

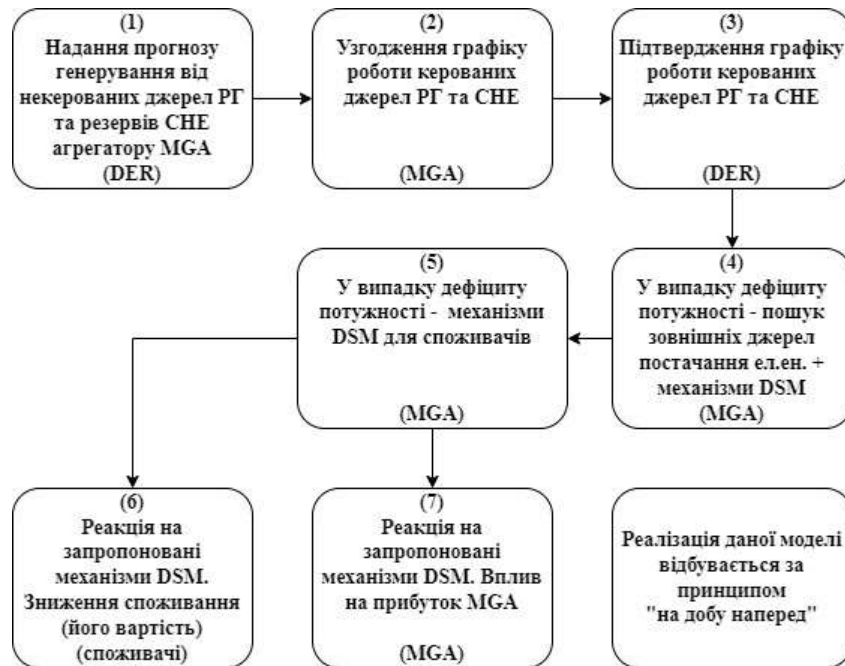


Рисунок 2 – Ринкова модель агрегування та взаємодії джерел РГ та СНЕ з оператором Microgrid

На рис. 3 зображена архітектура системи Smart-моніторингу Microgrid системи, котра враховує усі типи джерел РГ та СНЕ та особливості їх функціонування. Дана система працює неперервно в певних часових інтервалах $t \in [1, 2, \dots, T]$, забезпечуючи обмін інформаційними потоками, які дозволяють в свою чергу керувати енергопотоками забезпечуючи оптимальне функціонування системи моніторингу на всіх трьох рівнях, а відтак і оптимальну роботу Microgrid системи.

Універсальність такої системи Smart-моніторингу та відповідність її вимогам керування можна проілюструвати на прикладі Microgrid системи з джерелами РГ двох типів (тип Т1 та Т2). У якості типу Т1 оберемо некероване джерело енергії, - СФЕУ, а в якості джерела типу Т2 оберемо МГЕС. На Рис. 4, а) наведено прогнозні значення генерування електроенергії генераторами типу Т1 та Т2 та прогнозний графік навантаження відповідно до яких агрегатором (MGA) визначаються стратегії роботи джерел типів Т1 та Т2. На Рис. 4, б) наведено змодельовані графіки фактичної роботи генераторів типів Т1 та Т2 та фактичний графік навантажень, що дає змогу агрегатору/оператору Microgrid керувати режимами роботи джерел РГ у реальному часі та здійснювати розрахунки з кожним з агентів.



Рисунок 3 – Структура системи Smart-моніторингу Microgrid системи

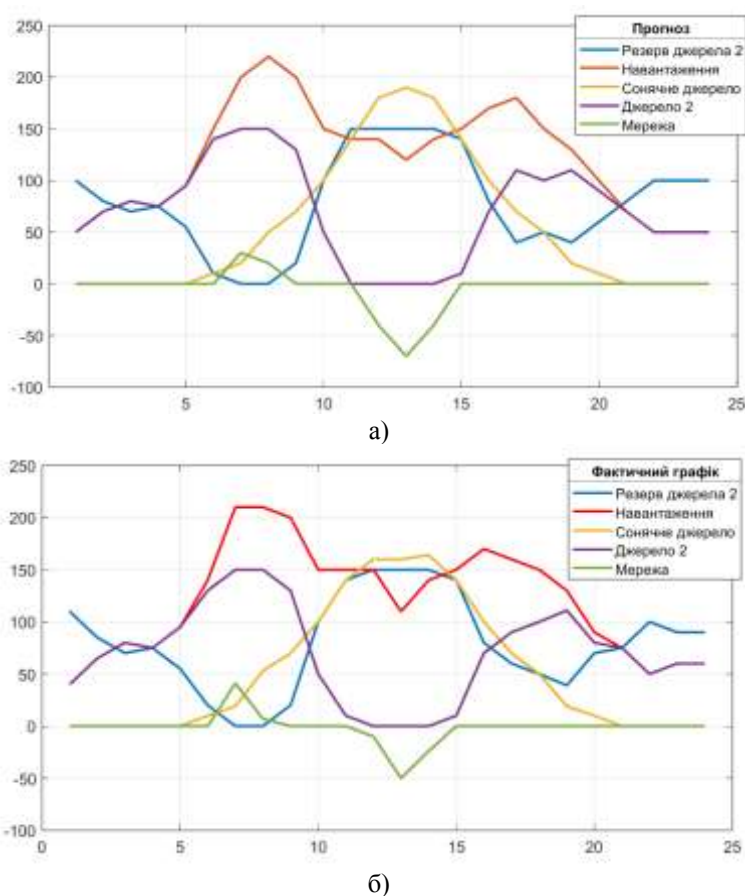


Рисунок 4 – Моделювання прогнозних (а) та фактичних (б) значень генерування та споживання електроенергії в Microgrid системі з РГ відповідно до наявної структури системи моніторингу

Результати моделювання наглядно ілюструють роботу системи Smart-моніторингу Microgrid запропонованої структури.

Висновки.

Запропонована структура системи Smart-моніторингу Microgrid системи є вигідною, оскільки: споживачі вже мають певну інфраструктуру для експорту електроенергії в мережу, тому надання допоміжних послуг для мережі є для них відносно дешевшим та вигідним; моніторинг енергоспоживання генерувальних установок і зв'язок з зовнішньою енергосистемою допомагає прогнозувати можливий

експорт/імпорт електроенергії оператором/агрегатором Microgrid системи до/з мережі. Також за допомогою запропонованої системи моніторингу можна отримати інформацію щодо стану заряду акумуляторів окремих СНЕ або активних споживачів (Prosumer), яка є корисною оператору Microgrid системи для оптимальної диспетчеризації; прямий контроль над ресурсами споживачів дає змогу системному оператору скористатися перевагами гнучкості попиту споживачів у режимі реального часу; агрегація різнотипних джерел РГ утворює розосереджений енергетичний ресурс для надання допоміжних послуг на ринку електричної енергії.

Список використаної літератури

1. Carpintero-Rentería, M., Santos-Martín, D., & Guerrero, J. M. (2019). Microgrids Literature Review through a Layers Structure. *Energies*, 12(22), 4381. doi:10.3390/en12224381
2. Денисюк С.П., Дерев'янюк Д.Г., Белоха Г.С. Синтез моделей локальних електроенергетичних систем з джерелами розосередженої генерації. *Технічна електродинаміка*. 2022. № 4. С. 60–69. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2022.04.048>
3. Blinov I.V., Trach I.V., Parus Ye. V., Derevianko D.H., Khomenko V.M. Voltage and reactive power regulation in distribution networks by the means of distributed renewable energy sources. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2022. No 2. Pp. 60–69. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2022.02.060>
4. Ackerman T. Knyazkin V. Interaction between distributed generation and the distribution network. *Transmission and Distribution Conference and Exhibition: Asia Pacific IEEE/PES*. – 2000. – Vol. 2. – P. 1357–1362.
5. Esposito G., Zaninelli D., Lazaroiu G. C., Golovanov N., Impact of embedded generation on the voltage quality of distribution networks. 2007 9th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation, Barcelona, Spain, 2007, pp. 1-6, DOI: <https://doi.org/10.1109/EPQU.2007.4424154>.
6. <https://www.iea.org/energy-system/renewables>
7. O. Kyrylenko et al. (eds.), *Power Systems Research and Operation, Studies in Systems, Decision and Control 512*, https://doi.org/10.1007/978-3-031-44772-3_10
8. Elmouatamid, A.; Ouladsine, R.; Bakhouya, M.; El Kamoun, N.; Khaidar, M.; Zine-Dine, K. Review of Control and Energy Management Approaches in Micro-Grid Systems. *Energies* 2021, 14, 168. <https://doi.org/10.3390/en14010168>
9. Денисюк С.П., Дерев'янюк Д.Г., Белоха Г.С., Зайченко С.В. Цінові моделі агрегування для Microgrid систем з розосередженими джерелами енергії. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2022. № 3. С. 7–12. ISSN 1813-5420. DOI: <https://doi.org/10.20535/1813-5420.3.2022.270225>
10. Goutam Dutta, Krishnendranath Mitra. A literature review on dynamic pricing of electricity. *Journal of the Operational Research Society* (2017) 68, 1131–1145.
11. Kirpes, B., Mengelkamp, E., Schaal, G. & Weinhardt, C. (2019). Design of a microgrid local energy market on a blockchain-based information system. *it - Information Technology*, 61(2-3), 87-99. <https://doi.org/10.1515/itit-2019-0012>
12. S. Denysiuk and D. Derevianko, "The Cost Based DSM Methods in Microgrids with DG Sources," 2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek), 2021, pp. 544-548, doi: 10.1109/KhPIWeek53812.2021.9570096.
13. F. Jamil, N. Iqbal, Imran, S. Ahmad and D. Kim, "Peer-to-Peer Energy Trading Mechanism Based on Blockchain and Machine Learning for Sustainable Electrical Power Supply in Smart Grid," in *IEEE Access*, vol. 9, pp. 39193-39217, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3060457.
14. Chung, I.Y., Liu, W.X., Cartes, D.A., Collins, E.G., Moon, S.I. (2010). Control methods of inverter-interfaced distributed generators in a microgrid system. *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 46(3): 1078-1088. <https://doi.org/10.1109/TIA.2010.2044970>
15. Villalón, A.; Rivera, M.; Salgueiro, Y.; Muñoz, J.; Dragičević, T.; Blaabjerg, F. Predictive Control for Microgrid Applications: A Review Study. *Energies* 2020, 13, 2454. <https://doi.org/10.3390/en13102454>
16. Chowdhury S.. *Microgrids and Active Distribution, Networks / S. Chowdhury, S. P. Chowdhury, P. Crossley // - London, UK, 2009.*
17. James T. Reilly, From microgrids to aggregators of distributed energy resources. The microgrid controller and distributed energy management systems, *The Electricity Journal*, Volume 32, Issue 5, 2019, Pages 30-34, ISSN 1040-6190, <https://doi.org/10.1016/j.tej.2019.05.007>.
18. J. P. Lopes, et al., "Defining control strategies for microgrids islanded operation," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 21, pp. 916-924, 2006.

D. Derevinko¹, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof, ORCID 0000-0002-4877-5601

O. Perehuda¹, master student

¹**National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"**

FEATURES OF CREATION OF THE SMART MONITORING SYSTEMS FOR MICROGRIDS

In this paper, an analysis of the main requirements for control systems in Microgrid is conducted. The main objectives of the implementation of Microgrid systems were determined and, based on the performed analysis, the

requirements for Smart-monitoring systems were systematized. The components of Smart-monitoring systems, which include: communication software platform, hardware communication platform and types of equipment of DG sources for Microgrid systems were analyzed. It is proposed to build Smart-monitoring systems for Microgrid systems on the basis of the SGAM model, taking into account various models of aggregation of different types of DG sources within the framework of Microgrid systems. The proposed structure of the Smart-monitoring system for Microgrid systems with various DG sources makes it possible to effectively aggregate DG sources and prosumers and to carry out effective dispatching of generating capacities based on market mechanisms of their interaction with consumers and among themselves.

Keywords: *Microgrid, monitoring systems, renewable energy sources, energy storage systems, prosumers.*

REFERENCES

1. Carpintero-Rentería, M., Santos-Martín, D., & Guerrero, J. M. (2019). Microgrids Literature Review through a Layers Structure. *Energies*, 12(22), 4381. doi:10.3390/en12224381
2. Denysiuk S.P., Derevianko D.H., Bielokha H.S. Syntez modelei lokalnykh elektroenerhetychnykh system z dzhерelamy rozoseredzhenoi heneratsii. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2022. № 4. S. 60–69. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2022.04.048>
3. Blinov I.V., Trach I.V., Parus Ye. V., Derevianko D.H., Khomenko V.M. Voltage and reactive power regulation in distribution networks by the means of distributed renewable energy sources. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2022. No 2. Pp. 60–69. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2022.02.060>
4. Ackerman T. Knyazkin V. Interaction between distributed generation and the distribution network. *Transmission and Distribution Conference and Exhibition: Asia Pacific IEEE/PES*. – 2000. – Vol. 2. – P. 1357–1362.
5. Esposito G., Zaninelli D., Lazaroiu G. C., Golovanov N., Impact of embedded generation on the voltage quality of distribution networks. 2007 9th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation, Barcelona, Spain, 2007, pp. 1-6, DOI: <https://doi.org/10.1109/EPQU.2007.4424154>.
6. <https://www.iea.org/energy-system/renewables>
7. O. Kyrylenko et al. (eds.), *Power Systems Research and Operation, Studies in Systems, Decision and Control* 512, https://doi.org/10.1007/978-3-031-44772-3_10
8. Elmouatamid, A.; Ouladsine, R.; Bakhouya, M.; El Kamoun, N.; Khaidar, M.; Zine-Dine, K. Review of Control and Energy Management Approaches in Micro-Grid Systems. *Energies* 2021, 14, 168. <https://doi.org/10.3390/en14010168>
9. Denysiuk S.P. Derevianko D.H., Bielokha H.S., Zaichenko S.V. Tsinovi modeli ahrehuvannia dlia Microgrid system z rozoseredzhenymy dzhерelamy enerhii. *Enerhetyka: ekonomika, tekhnolohii, ekolohiia*. 2022. № 3. S. 7–12. ISSN 1813-5420. DOI: <https://doi.org/10.20535/1813-5420.3.2022.270225>
10. Goutam Dutta, Krishnendranath Mitra. A literature review on dynamic pricing of electricity. *Journal of the Operational Research Society* (2017) 68, 1131–1145.
11. Kirpes, B., Mengelkamp, E., Schaal, G. & Weinhardt, C. (2019). Design of a microgrid local energy market on a blockchain-based information system. *IT - Information Technology*, 61(2-3), 87-99. <https://doi.org/10.1515/itit-2019-0012>
12. S. Denysiuk and D. Derevianko, "The Cost Based DSM Methods in Microgrids with DG Sources," 2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek), 2021, pp. 544-548, doi: 10.1109/KhPIWeek53812.2021.9570096.
13. F. Jamil, N. Iqbal, Imran, S. Ahmad and D. Kim, "Peer-to-Peer Energy Trading Mechanism Based on Blockchain and Machine Learning for Sustainable Electrical Power Supply in Smart Grid," in *IEEE Access*, vol. 9, pp. 39193-39217, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3060457.
14. Chung, I.Y., Liu, W.X., Cartes, D.A., Collins, E.G., Moon, S.I. (2010). Control methods of inverter-interfaced distributed generators in a microgrid system. *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 46(3): 1078-1088. <https://doi.org/10.1109/TIA.2010.2044970>
15. Villalón, A.; Rivera, M.; Salgueiro, Y.; Muñoz, J.; Dragičević, T.; Blaabjerg, F. Predictive Control for Microgrid Applications: A Review Study. *Energies* 2020, 13, 2454. <https://doi.org/10.3390/en13102454>
16. Chowdhury S.. *Microgrids and Active Distribution Networks* / S. Chowdhury, S. P. Chowdhury, P. Crossley // - London, UK, 2009.
17. James T. Reilly, From microgrids to aggregators of distributed energy resources. *The microgrid controller and distributed energy management systems*, *The Electricity Journal*, Volume 32, Issue 5, 2019, Pages 30-34, ISSN 1040-6190, <https://doi.org/10.1016/j.tej.2019.05.007>.
18. J. P. Lopes, et al., "Defining control strategies for microgrids islanded operation," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 21, pp. 916-924, 2006.

Надійшла: 13.02.2024

Received: 13.02.2024

М.Я. Островерхов¹, д-р техн. наук, проф., ORCID 0000-0002-7322-8052Д.С. Коломійчук¹, магістрант, ORCID 0009-0006-0441-8975М.Ю. Фальченко¹, аспірант, ORCID 0000-0002-0964-7164Г.Г. Большаков¹, аспірант, ORCID 0009-0002-3339-7625Г.В. Вещиков¹, аспірант, ORCID 0009-0002-0606-9765¹Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

КЕРУВАННЯ ШВИДКІСТЮ СИНХРОННОГО ДВИГУНА С ПОСТІЙНИМИ МАГНІТАМИ У КОВЗНОМУ РЕЖИМІ

У роботі розглянута низка алгоритмів керування швидкістю синхронного двигуна з постійними магнітами в ковзному режимі, які забезпечують астатизм першого, другого та третього порядку. У ковзному режимі система керування володіє властивостями, які недосяжні при застосуванні класичних неперервних алгоритмів керування. Алгоритми керування розроблено на основі методу зворотних задач динаміки у поєднанні з мінімізацією локальних функціоналів миттєвих значень енергії. Ідея методу полягає в зворотності прямого методу Ляпунова для дослідження стійкості. Замкнений контур керування має наперед задану функцію Ляпунова, в якості якої виступає миттєве значення енергії. Особливістю алгоритмів керування є відсутність у них параметрів об'єкта та операцій диференціювання, що полегшує їх практичну реалізацію. Система керування складається з двох регуляторів складових струму статора та регулятора швидкості двигуна. Всі регулятори працюють в ковзному режимі. Сигнали на виході регуляторів складових струму статора та швидкості змінюються стрибком від максимального до мінімального значення. Результати моделювання показали працездатність алгоритмів керування та високу якість керування. Траєкторія пуску двигуна сформована з характерних ділянок постійного, лінійнозростаючого та параболічного сигналу для визначення показників якості керування трьох синтезованих регуляторів швидкості.

Ключові слова: електропривод, синхронний двигун з постійними магнітами, алгоритм керування, ковзний режим.

Вступ

Синхронні двигуни з постійними магнітами мають широке застосовуються в електроприводах та електромеханічних системах різного призначення, зокрема в установках з високими вимогами до якості керування [1-5]. Внаслідок нагрівання обмоток двигуна або зміни кінематики механізму параметри електропривода можуть змінюватися. Параметри електропривода також можуть бути неточно визначені на основі існуючих методик. На локальні контури керування електропривода діють координатні збурення внаслідок внутрішніх електромеханічних взаємозв'язків електродвигуна. Ці параметричні та координатні збурення можуть призводити до недопустимого погіршення заданої якості керування координатами електропривода. В залежності від технологічних вимог алгоритми керування повинні забезпечувати відпрацювання заданих траєкторій руху без усталених похибок, зокрема у вигляді постійного, лінійнозростаючого або параболічного сигналу, що відповідає астатизму системи першого, другого або третього порядку за керуючою дією.

Вирішити задачу синтезу алгоритмів керування в умовах параметричних та координатних збурень можна декількома методами теорії автоматичного керування, зокрема: методи керування з великим коефіцієнтом підсилення розімкненої системи, адаптивні та оптимальні методи керування з ідентифікацією параметрів у реальному часі [6-9]; інтелектуальні методи керування [10-13]; методи зворотних задач динаміки у поєднанні з мінімізацією локальних функціоналів миттєвих значень енергій [14-16]; методи теорії систем із змінною структурою у ковзному режимі [17-20].

У ковзних режимах системи володіють властивостями, які недосяжні при застосуванні класичних неперервних алгоритмів керування. Синтез алгоритмів керування у ковзних режимах класичними методами пов'язано з труднощами при визначенні рівняння та практичній реалізації гіперповерхні переключення [1, 18, 20]. Зменшити труднощі синтезу можливо при застосуванні ідей методу зворотних задач динаміки у поєднанні з мінімізацією локальних функціоналів миттєвих значень енергії [14, 16]. В основу методу покладено ідею оборотності прямого методу Ляпунова з дослідження стійкості. Метод дозволяє знаходити закон керування, у якому замкнений контур має наперед задану функцію Ляпунова, в якості якої виступає миттєве значення енергії. Характерною особливістю оптимізації є знаходження не абсолютного мінімуму функціоналу якості, як у класичних системах, а деякого мінімального значення, що забезпечує допустиму за технічними умовами динамічну похибку системи. Отримані алгоритми керування забезпечують слабку чутливість до параметричних збурень, а також здійснюють динамічну декомпозицію взаємопов'язаної системи і не містять диференційних ланок, що забезпечує їх практичну реалізацію.

Мета та завдання

Метою роботи є розробка та дослідження алгоритмів керування швидкістю синхронного двигуна з постійними магнітами у ковзному режимі на основі концепції зворотних задач динаміки у поєднанні з мінімізацією локальних функціоналів миттєвих значень енергій, які забезпечують астатизм першого, другого та третього порядку. Для досягнення мети в роботі вирішено наступні завдання: отримано математичну модель синхронного двигуна відповідно до умов концепції зворотних задач динаміки; розроблено алгоритми керування швидкістю та складовими струму статора двигуна, що забезпечують роботу регуляторів у ковзному режимі; проведено дослідження алгоритмів керування та здійснено аналіз показників якості керування.

Матеріал і результати досліджень

Динамічна модель синхронного двигуна з постійними магнітами в системі координат $d-q$, яка орієнтована за магнітною віссю ротора, представляється відомою системою рівнянь (1) [4, 8, 15].

$$\begin{cases} L_d \frac{di_d}{dt} + R_s i_d = u_d + L_q Z_p \omega_r i_q; \\ L_q \frac{di_q}{dt} + R_s i_q = u_q - L_d Z_p \omega_r i_d - \psi_f Z_p \omega_r; \\ J \frac{d\omega_r}{dt} = M - M_c; \\ M = \frac{3}{2} Z_p [\psi_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q], \end{cases} \quad (1)$$

де i_d, i_q та u_d, u_q – струми та напруги статора за осями d та q відповідно; ω_r – кутова швидкість ротора; Z_p – кількість пар полюсів двигуна; J – момент інерції; M, M_c – електромагнітний момент двигуна та момент навантаження; ψ_f – потокозчеплення від постійних магнітів; L_d, L_q – індуктивності статора за осями d та q ; R_s – електричний опір статора.

Згідно з методом динамічної декомпозиції, запропонованим у [14], для вирішення задачі керування на основі концепції зворотних задач динаміки вихідна система рівнянь (1) перетворюється до системи виду (2).

$$\begin{cases} \frac{di_d}{dt} + \frac{R_s}{L_d} i_d = \frac{1}{L_d} u_d + \frac{1}{L_d} F_1; \\ \frac{di_q}{dt} + \frac{R_s}{L_q} i_q = \frac{1}{L_q} u_q + \frac{1}{L_q} F_2; \\ \frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{J} [M - M_c]; \\ M = \frac{3}{2} Z_p [\psi_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q]; \\ F_1 = L_q Z_p \omega_r i_q; \\ F_2 = -L_d Z_p \omega_r i_d - \psi_f Z_p \omega_r. \end{cases} \quad (2)$$

Координатні обурення F_1, F_2 трактуються як невизначені, проте обмежені за величиною $F_1 \leq F_1^0, F_2 \leq F_2^0$. Рівня керуючої напруги достатньо для їх компенсації $u_d > F_1^0, u_q > F_2^0$. Таким чином, взаємопов'язана нелінійна система 3-го порядку перетворюється на систему з 3-х лінійних рівнянь першого порядку. В результаті завдання керування об'єктом (1) зводиться до вирішення трьох локальних завдань керування лінійними підсистемами (2): керування струмами i_d, i_q за осями $d-q$ та швидкістю ω_r .

Функціональна схема системи векторного керування швидкістю з орієнтацією за полем ротора містить замкнутий контур регулювання струму i_d по осі d , замкнутий контур регулювання струму i_q по осі q та зовнішній до нього замкнутий контур регулювання швидкості ротора ω_r .

Бажана якість будь-якого замкнутого контуру керування згідно з концепцією зворотної задачі динаміки [14-15] задається звичайним диференціальним рівнянням наступного вигляду

$$\frac{d^r y}{dt^r} + \dots + \alpha_i \frac{d^i y}{dt^i} + \dots + \alpha_0 y = \beta_l \frac{d^l x^*}{dt^l} + \dots + \beta_j \frac{d^j x^*}{dt^j} + \dots + \beta_0 x^*. \quad (3)$$

За допомогою коефіцієнтів рівняння α_i та β_j задається бажаний характер і тривалість перехідного процесу вихідної координати у під час руху по заданій траєкторії x^* , де: x^* – диференційована за часом необхідну кількість разів функція, причому $l < r$. Порядок r рівняння (3) може бути різним для кожного замкнутого контуру керування згідно з вимогами до якості керування. Типово порядок r дорівнює або більше порядку об'єкта керування. Зв'язок між коефіцієнтами рівняння (3) і бажаними показниками якості керування, такими як час регулювання, вид перехідного процесу, перерегулювання легко встановлюється за допомогою відомих методів теорії автоматичного керування.

Модель локального об'єкта керування струмом i_d за керуючою дією на основі першого рівняння системи (2) представляється рівнянням, яке в операторній формі має вигляд

$$(s + a_{oid})i_d = b_{oid}u_d, \quad (4)$$

де $b_{oid} = \frac{1}{L_d}$, $a_{oid} = \frac{R_s}{L_d}$ – коефіцієнти рівняння; $s = d/dt$ – оператор Лапласа.

Ліва частини рівняння (4) має перший порядок $n=1$, а права нульовий $m=0$. Напряга керування може приймати тільки два фіксовані значення $+U_d$ або $-U_d$, тобто $u_d = \bar{u}_d = U_d \text{sign}(u_d)$.

Задачею синтезу є отримання бажаної якості керування замкнутого контуру регулювання струму i_d . Бажана якість задається диференціальним рівнянням замкнутого контуру виду (3), порядок якого дорівнює порядку рівняння (4), тобто $r=1$ та $l=0$

$$(s + \alpha_{oid})y_d = \alpha_{oid}i_d^*, \quad (5)$$

де i_d^* – заданий струм; y_d – вихідна координата при русі по заданій траєкторії струму.

Умова відсутності операцій диференціювання в алгоритмі керування виконується

$$\begin{aligned} r &\geq n + l - m - 1; \\ 1 &\geq 1 + 0 - 0 - 1. \end{aligned} \quad (6)$$

На основі рівняння (5) отримується бажана передавальна функція замкнутого контуру струму i_d

$$W_{id}^C(s) = \frac{y_d(s)}{i_d^*(s)} = \frac{\alpha_{oid}}{s + \alpha_{oid}}. \quad (7)$$

Відповідно до (7) передавальна функція розімкнутого контуру регулювання струму i_d має вигляд

$$W_{id}^R(s) = \frac{W_{id}^C(s)}{1 - W_{id}^C(s)} = \frac{\alpha_{oid}}{s}. \quad (8)$$

Аналіз функції (8) показує, що система керування струмом буде мати астатизм першого порядку $\nu=1$, а задана добротність за швидкістю дорівнює $D_\omega^z = \alpha_{oid}$.

Бажана тривалість монотонного перехідного процесу струму $t_{id} \approx 3 / \alpha_{oid}$ задається за допомогою єдиного коефіцієнта α_{oid} . Функція керуючої напруги u_d , повинна забезпечити якість керування струмом i_d , яка б наближалася до бажаної якості, заданої рівнянням (5). Ступінь наближення реального процесу керування струмом до бажаного оцінюється локальним функціоналом, який характеризує нормовану за індуктивністю миттєву енергію першої похідної магнітного поля, яка виступає функцією Ляпунова

$$G(u_d) = \frac{1}{2} [\dot{y}_d(t) - i_d(t, u_d)]^2. \quad (9)$$

Мінімізація функціоналу (9) здійснюється за градієнтним законом першого порядку

$$\frac{du_d(t)}{dt} = -\lambda_d \frac{dG(u_d)}{du_d}, \quad (10)$$

де $\lambda_d > 0$ – константа.

З урахуванням (4) похідна функціонала дорівнює

$$\frac{dG(u_d)}{du_d} = -\frac{1}{L_d} (\dot{y}_d - i_d). \quad (11)$$

Після підстановки (11) в (10) знаходиться алгоритм керування струмом i_d

$$\dot{u}_d(t) = k_d (\dot{y}_d - i_d), \quad (12)$$

де $k_d = \lambda_d / L_d$ – константа.

Умова збіжності процесу мінімізації функціоналу (9) при $t \rightarrow \infty$

$$\begin{aligned} \frac{dG(u_d)}{dt} &< 0; \\ G(u_d) &\rightarrow 0 \end{aligned} \quad (13)$$

виконується відповідно до правила знаків

$$\text{sign}(k_d) = \text{sign}(1/L_d). \quad (14)$$

Змінна \dot{y}_d в алгоритмі керування (12) є заданою похідною струму, яка визначається в реальному часі з рівняння (5) шляхом замикання системи керування зворотним зв'язком за струмом $y_d = i_d$

$$\dot{y}_d = \alpha_{oid}(i_d^* - i_d). \quad (15)$$

Алгоритм керування струмом i_d набуває остаточного вигляду після інтегрування обох частин (12) з урахуванням (14)

$$\begin{aligned} u_d(t) &= k_d(y_d - i_d); \\ y_d &= \alpha_{oid} \int (i_d^* - i_d) dt; \\ \bar{u}_d &= U_d \text{sign}(u_d). \end{aligned} \quad (16)$$

Для виникнення ковзного режиму при нульових початкових умовах повинна виконуватися наступна умова [16]

$$|(\alpha_{oid} - a_{oid})i_d| < |b_{oid}u_d|. \quad (17)$$

Синтез алгоритму керування струмом i_q здійснюється на основі другого рівняння системи (2), яке в операторній формі має вигляд

$$(s + a_{oiq})i_q = b_{oiq}u_q, \quad (18)$$

де $b_{oiq} = \frac{1}{L_q}$, $a_{oiq} = \frac{R}{L_q}$ – коефіцієнти рівняння.

Бажане рівняння замкнутого контуру регулювання струму i_q задається першого порядку та забезпечує астатизм першого порядку $\nu=1$

$$(s + \alpha_{oiq})y_q = \alpha_{oiq}i_q^*. \quad (19)$$

Процедура синтезу алгоритму керування струмом i_q здійснюється аналогічно до (9)-(16). В результаті отримується алгоритм керування наступного вигляду

$$\begin{aligned} u_q(t) &= k_q(y_q - i_q); \\ y_q &= \alpha_{oiq} \int (i_q^* - i_q) dt; \\ \bar{u}_q &= U_q \text{sign}(u_q). \end{aligned} \quad (20)$$

Синтез алгоритму керування швидкістю ω_r здійснюється на основі третього та четвертого рівняння системи (2), яке в операторній формі при $i_d=0$ має вигляд

$$s\omega_r = b_{o\omega}i_q^*, \quad (21)$$

де $b_{o\omega} = \frac{1}{J} \frac{3}{2} Z_p \Psi_f$ – коефіцієнт рівняння; i_q^* – заданий струм по осі q .

Для забезпечення астатизму першого порядку $\nu=1$ бажане рівняння замкнутого контуру регулювання швидкістю ω_r виду (3) має вигляд

$$(s + \alpha_{o\omega})y_\omega = \alpha_{o\omega}i_q^*. \quad (22)$$

Процедура синтезу алгоритму керування швидкістю ω_r здійснюється аналогічно до (9)-(16). Ступінь наближення реального процесу керування швидкістю до бажаного оцінюється локальним функціоналом виду (9), який характеризує нормоване за моментом інерції миттєве значення першої похідної кінетичної енергії. За результатами синтезу отримується алгоритм керування регулятора швидкості, який забезпечує астатизм першого порядку $\nu=1$ за керуючою дією

$$\begin{aligned} i_q^*(t) &= k_\omega(y_\omega - \omega_r); \\ y_\omega &= \alpha_{o\omega} \int (\omega_r^* - \omega_r) dt; \\ \bar{i}_q^* &= I_q^* \text{sign}(i_q^*). \end{aligned} \quad (23)$$

де I_q^* – струм керування, який приймає тільки два фіксовані значення $+I_q^*$ або $-I_q^*$.

За технологічними вимогами деяких механізмів алгоритм керування швидкістю повинен забезпечувати астатизм другого порядку $\nu=2$ за керуючою дією. В цьому випадку порядок бажаного рівняння замкнутого контуру виду (3) вибирається на одиницю більше від порядку об'єкту (21)

$$(s^2 + \alpha_{1\omega}s + \alpha_{o\omega})y_\omega = (\alpha_{1\omega}s + \alpha_{o\omega})\omega_r^*. \quad (24)$$

Після проведення синтезу аналогічно до (9)-(16) алгоритм керування регулятора швидкості, який забезпечує астатизм другого порядку $\nu=2$ за керуючою дією, приймає вигляд

$$\begin{aligned}
 i_q^*(t) &= k_\omega (y_\omega - \omega_r); \\
 y_\omega &= \int f_\omega dt; \\
 f_\omega &= \alpha_{0\omega} \int (\omega_r^* - \omega_r) dt + \alpha_{1\omega} (\omega_r^* - \omega_r); \\
 \bar{i}_q^* &= I_q^* \text{sign}(i_q^*).
 \end{aligned}
 \tag{25}$$

Якщо за технологічними вимогами алгоритм керування швидкістю повинен забезпечувати астатизм третього порядку $\nu=3$ за керуючою дією, то порядок бажаного рівняння замкнутого контуру виду (3) вибирається на два більше від порядку об'єкту (21)

$$(s^3 + \alpha_{2\omega} s^2 + \alpha_{1\omega} s + \alpha_{0\omega}) y_\omega = (\alpha_{2\omega} s^2 + \alpha_{1\omega} s + \alpha_{0\omega}) \omega_r^*.
 \tag{26}$$

Після проведення синтезу аналогічно до (9)-(16) алгоритм керування регулятора швидкості, який забезпечує астатизм третього порядку $\nu=3$ за керуючою дією, приймає вигляд

$$\begin{aligned}
 i_q^*(t) &= k_\omega (y_\omega - \omega_r); \\
 y_\omega &= \int f_{\omega 1} dt; \\
 f_{\omega 1} &= \int f_{\omega 0} dt + \alpha_{2\omega} (\omega_r^* - \omega_r); \\
 f_{\omega 0} &= \alpha_{0\omega} \int (\omega_r^* - \omega_r) dt + \alpha_{1\omega} (\omega_r^* - \omega_r); \\
 \bar{i}_q^* &= I_q^* \text{sign}(i_q^*).
 \end{aligned}
 \tag{27}$$

Особливістю алгоритмів керування струмом по осі d (16), струмом по осі q (20) та швидкістю (23), (25) або (27) є відсутність в них параметрів електродвигуна, що характерно для класичних алгоритмів керування. Розроблені алгоритми керування містять тільки коефіцієнти α_{0id} , α_{0iq} , $\alpha_{0\omega}$, $\alpha_{1\omega}$, $\alpha_{2\omega}$, за допомогою яких задається бажаний час та вид перехідних процесів струмів та швидкості. Швидкодія внутрішнього контуру струму по осі q повинна бути більшою за швидкодію зовнішнього контуру керування швидкістю для зменшення його впливу.

Проведено дослідження алгоритмів керування швидкістю синхронного двигуна з постійними магнітами у ковзному режимі шляхом моделювання. Параметри регуляторів струму (16) та (20) мають наступні значення: $\alpha_{0id}=1000$; $k_d=200$; $\alpha_{0iq}=1000$; $k_q=200$. Параметри трьох регуляторів швидкості (23), (25) та (27) відповідають динамічним властивостям фільтра Баттерворта 1-го, 2-го та 3-го порядку при забезпеченні однакового часу тривалості перехідної функції: регулятор (23) $\alpha_{0\omega}=100$; $k_\omega=200$, регулятор (25) $\alpha_{0\omega}=100^2$; $\alpha_{1\omega}=141$; $k_\omega=200$, регулятор (27) $\alpha_{0\omega}=100^3$; $\alpha_{1\omega}=20000$; $\alpha_{2\omega}=200$; $k_\omega=200$. Параметри синхронного двигуна представлено у табл. 1.

Таблиця 1 – Параметри синхронного двигуна з постійними магнітами

Параметр	Позначення	Значення
Номінальна потужність, кВт	P_n	9,42
Номінальний момент, Нм	M_n	20
Номінальна частота обертання, об/хв	n_n	4500
Номінальний струм, А	I_n	24,5
Номінальна напруга, В	U_n	220
Електричний опір статора, Ом	R_s	0,19
Індуктивність статора, мГн	$L_d = L_q$	2,2
Кількість пар полюсів	Z_p	4
Потокозчеплення магнітів, Вб	ψ_f	0,12256
Момент інерції, кг·м ²	J	0,0146

На рис. 1 показано сигнал завдання частоти обертання двигуна при пуску в холосту до значення 1000 об/хв. Сигнал представляє собою комбінацію постійного, лінійнозростаючого та параболічного сигналу для визначення показників якості керування трьох синтезованих регуляторів швидкості, які забезпечують астатизм першого, другого та третього порядку за керуючою дією. Сигнал складається з чотирьох характерних ділянок: в період від нуля і до 0,2 с, а також від 0,4 с і до 0,8 с він змінюється за параболічною залежністю; від 0,2 с і до 0,4 с – за лінійнонаростаючою залежністю; а від 0,6 с і до 0,8 с він є незмінним. На рис. 2 представлена похідна сигналу завдання частоти обертання двигуна, яка забезпечує формування заданої траєкторії швидкості, представленої на рис. 1.

На рис. 3 представлена похибка регулювання частоти обертання двигуна при роботі алгоритму керування швидкістю (23), який забезпечує астатизм 1-го порядку. При незмінному сигналі завдання на 4-

му етапі траєкторії розгону усталена похибка регулювання відсутня, що характерно для регуляторів з астатизмом 1-го порядку. При лінійнозростаючому сигналі завдання на 2-му етапі траєкторії розгону усталена відносна похибка регулювання становить 2,5 %. При параболічному сигналі завдання на 1-му та 2-му етапі траєкторії розгону відносна похибка регулювання змінюється в межах від нулю до 2,5 %.

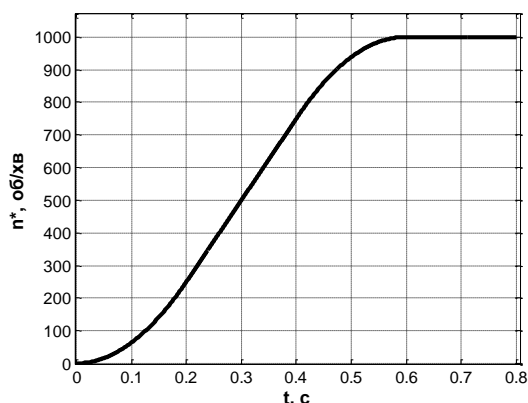


Рисунок 1 – Графік заданої частоти обертання двигуна при пуску

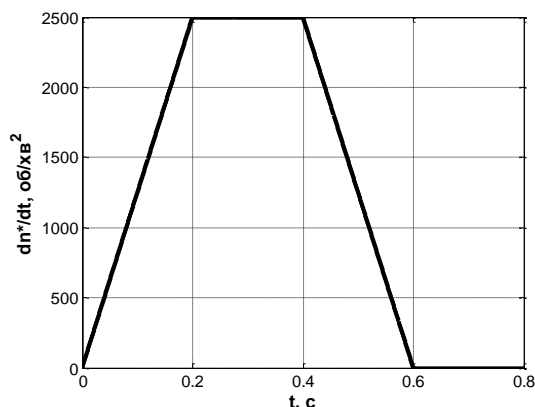


Рисунок 2 – Графік похідної заданої частоти обертання двигуна при пуску

На рис. 4 показана похибка регулювання частоти обертання двигуна при роботі алгоритму керування швидкістю (25), який забезпечує астатизм 2-го порядку. Похибка регулювання відсутня на 2-му етапі траєкторії розгону при лінійнозростаючому сигналі та 4-му етапі розгону при незмінному сигналі завдання, що характерно для регуляторів з астатизмом 2-го порядку. Під час параболічного сигналу завдання на 1-му та 3-му етапі траєкторії розгону усталене значення відносної похибки регулювання дорівнює 0,125 %.

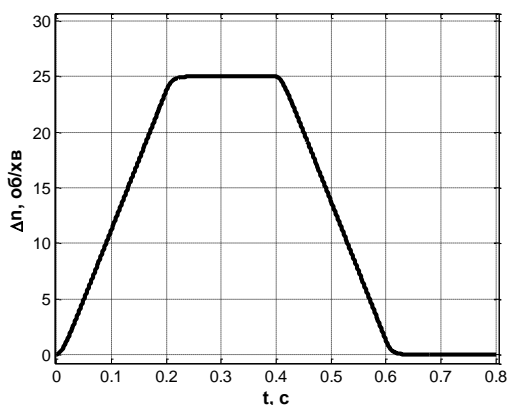


Рисунок 3 – Графік похибки регулювання частоти обертання з алгоритмом керування, що забезпечує астатизм 1-го порядку

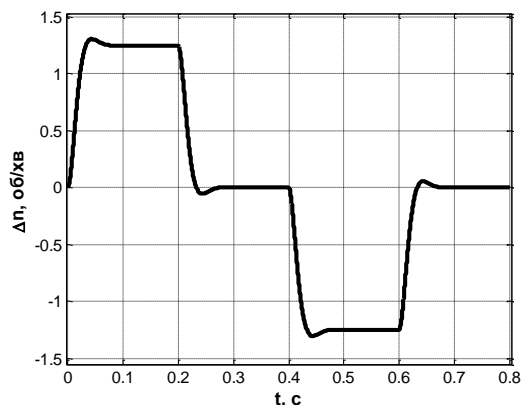


Рисунок 4 – Графік похибки регулювання частоти обертання з алгоритмом керування, що забезпечує астатизм 2-го порядку

На рис. 5 представлена похибка регулювання частоти обертання двигуна при роботі алгоритму керування швидкістю (27), який забезпечує астатизм 3-го порядку. Усталена похибка регулювання відсутня на всіх етапах траєкторії розгону двигуна, що характерно для регуляторів з астатизмом 3-го порядку. Максимальна динамічна відносна похибка на початку та в кінці етапів параболічного сигналу завдання становить 0,05 %.

На рис. 6 показано графік моменту двигуна під час розгону. На 2-му етапі траєкторії розгону при лінійнозростаючому сигналі завдання усталений момент двигуна становить 3,8 Нм.

На рис. 7 представлено характер зміни заданого струму по осі q , який формується на виході регулятора швидкості, що працює в ковзному режимі. Завдання струму змінюється стрибком від +49 А до -49 А, що дорівнює двократному номінальному значенню струму двигуна $I_q^* = 2I_H$.

На рис. 8 представлена напруга двигуна по осі q , яка є виходом регулятора струму по осі q . Регулятор струму працює у ковзному режимі. Напруга змінюється стрибком від +311 В до -311 В, що дорівнює номінальному амплітудному значенню $U_q = \sqrt{2}U_H$. Напруга двигуна по осі d змінюється аналогічно.

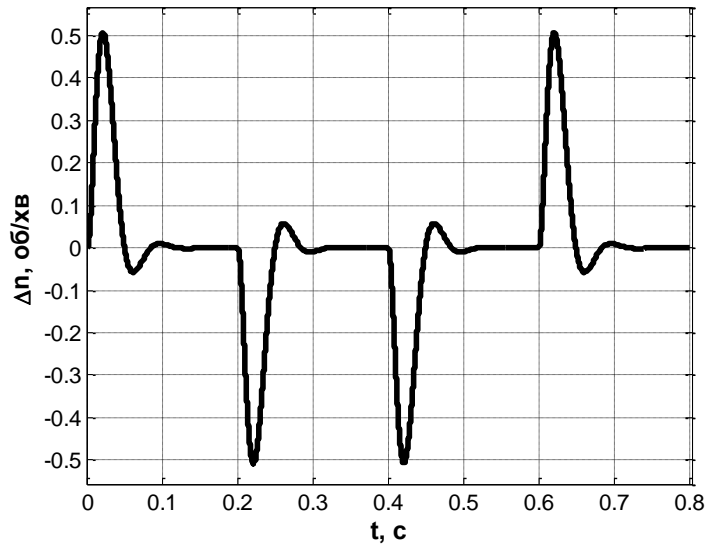


Рисунок 5 – Графік похибки регулювання частоти обертання з алгоритмом керування, що забезпечує астатизм 3-го порядку

Таким, чином, дослідження показали працездатність синтезованих алгоритмів керування швидкістю синхронного двигуна з постійними магнітами у ковзному режимі та високі показники якості керування. Особливістю алгоритмів керування є відсутність у них параметрів об'єкта та операцій диференціювання, що полегшує їх практичну реалізацію. Параметри регуляторів тільки містять коефіцієнти, за допомогою яких задається бажана тривалість та вид перехідних процесів струму і швидкості електродвигуна.

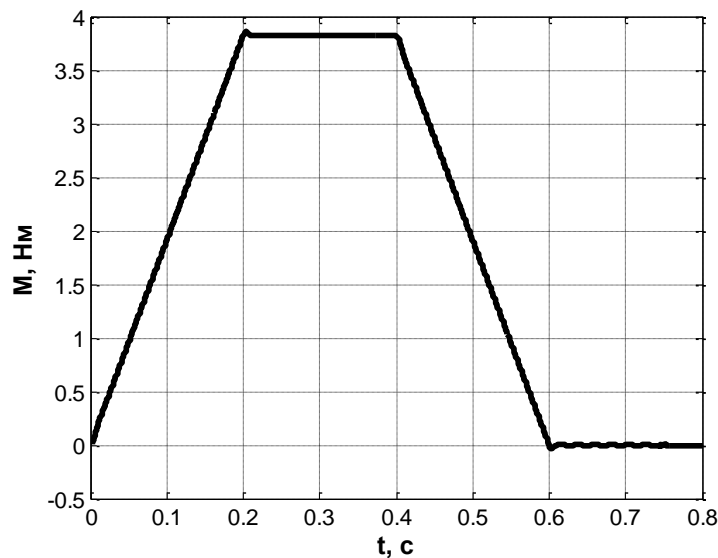


Рисунок 6 – Графік моменту синхронного двигуна

Висновки

1. Запропоновано метод синтезу алгоритмів керування швидкістю синхронного двигуна з постійними магнітами у ковзному режимі на основі концепції зворотної задачі динаміки у поєднанні з мінімізацією локальних функціоналів миттєвих значень енергії. Розглянуто алгоритми керування, які забезпечують відпрацювання заданих траєкторій руху з астатизмом 1-го, 2-го та 3-го порядку за керуючою дією. Метод забезпечує просту реалізацію регуляторів системи керування, в яких відсутні операції диференціювання. Сигнали на виході регуляторів складових струму статора та швидкості змінюються стрибком від максимального до мінімального значення. Особливістю регуляторів є відсутність в них параметрів синхронного двигуна, що характерно для класичних регуляторів. Параметри регуляторів містять тільки коефіцієнти, за допомогою яких задається бажана тривалість та вид перехідних процесів струму і швидкості електродвигуна.

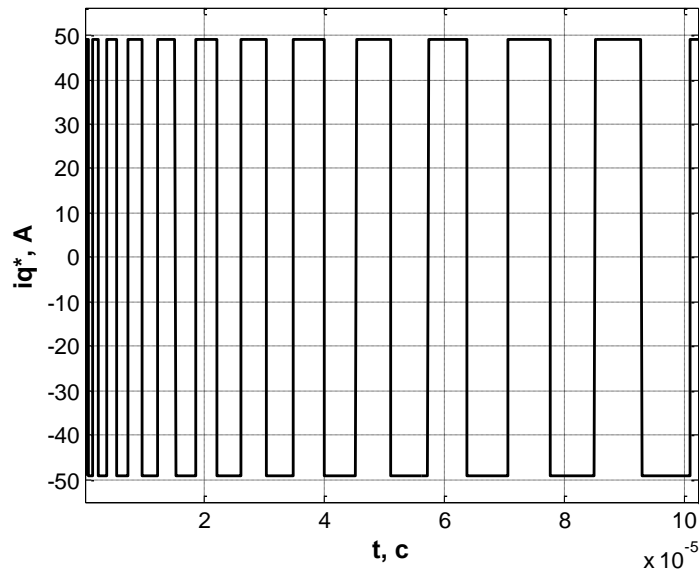


Рисунок 7 – Графік зміни струму завдання по осі q

2. Дослідження алгоритмів керування швидкістю синхронного двигуна з постійними магнітами у ковзному режимі здійснено шляхом моделювання. Результати моделювання показали працездатність алгоритмів керування. Трасекторія пуску двигуна сформована з характерних ділянок постійного, лінійнозростаючого та параболічного сигналу для визначення показників якості керування трьох синтезованих регуляторів швидкості, які забезпечують астатизм першого, другого та третього порядку. Алгоритм керування швидкістю з астатизмом 1-го порядку забезпечує нульову похибку регулювання тільки при незмінному сигналі завдання. При лінійнозростаючому сигналі завдання усталена відносна похибка регулювання становить 2,5 %, а при параболічному сигналі завдання похибка змінюється в межах від нуля до 2,5 %. Алгоритм керування швидкістю з астатизмом 2-го порядку забезпечує нульову усталену похибку регулювання при незмінному та лінійнозростаючому сигналі завдання, а при параболічному сигналі завдання усталена відносна похибка регулювання дорівнює 0,125 %. Алгоритм керування швидкістю з астатизмом 3-го порядку забезпечує нульову усталену похибку регулювання при незмінному, лінійнозростаючому та параболічному сигналі завдання, а максимальна динамічна відносна похибка становить 0,05 %.

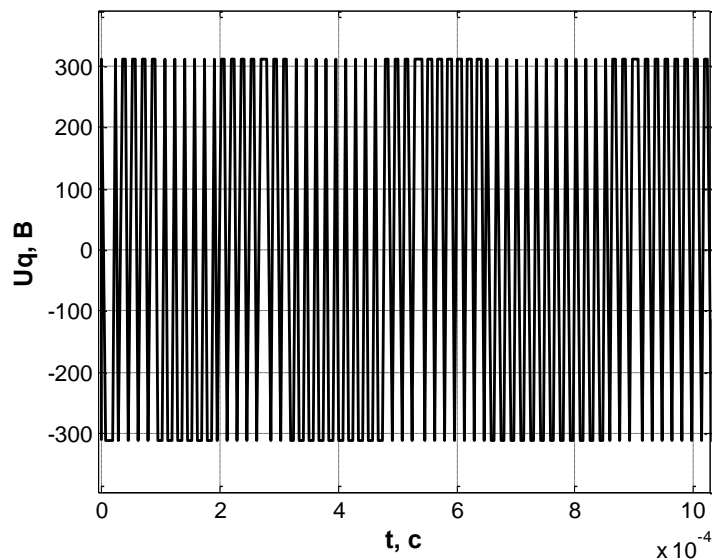


Рисунок 8 – Графік зміни напруги двигуна по осі q

Список використаної літератури

1. R. Zhang, Y. Xia, P. Zhu, G. Huang, Y. Zhang and X. Mi, "Speed control of Permanent Magnet Synchronous Motor system using quick-power reaching law based on sliding mode control," *2023 CAA Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes (SAFEPROCESS)*, Yibin, China, 2023, pp. 1-7, doi: 10.1109/SAFEPROCESS58597.2023.10295830.
2. M. Ostroverkhov, V. Chumack and E. Monakhov, "Synchronous Axial-Flux Generator with Hybrid Excitation in Stand Alone Mode", *2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*, Lviv, Ukraine, 2019, pp. 455-459. doi: 10.1109/UKRCON.2019.8879849.
3. Shchur I., Rusek A., Mandzyuk M. Power effective work of PMSM in electric vehicles at the account of magnetic saturation and iron losses // *Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review)*. – 2015. – N 1. – P. 199-202, doi:10.15199/48.2015.01.45.
4. Z. Li, S. Zhou, Y. Xiao and L. Wang, "Sensorless Vector Control of Permanent Magnet Synchronous Linear Motor Based on Self-Adaptive Super-Twisting Sliding Mode Controller," in *IEEE Access*, vol. 7, pp. 44998-45011, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2909308.
5. V. Osadchyy, O. Nazarova and V. Brylysty, "Laboratory Stand for Research of Energy Characteristics of Electric Vehicle Drives," *2021 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*, 2021, pp. 1-4, doi: 10.1109/MEES52427.2021.9598661.
6. B. Kuznetsov, I. Bovdai and T. Nikitina, "Robust Electromechanical Servo System Parametric Synthesis as Multi Criteria Game Decision Based on Particles Multi Swarm Optimization," *2019 IEEE 5th International Conference Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments (APUAVD)*, 2019, pp. 206-209.
7. B. Kuznetsov, I. Bovdai and T. Nikitina, "Multiobjective Optimization of Electromechanical Servo Systems," *2019 IEEE 20th International Conference on Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE)*, 2019.
8. S. -z. Zhang and Q. -l. Yang, "A robust sliding-mode control strategy of Permanent Magnet Synchronous Motor," *2010 2nd International Conference on Future Computer and Communication*, 2010, pp. V3-457-V3-460, doi: 10.1109/ICFCC.2010.5497551.
9. C. Li, J. Sun and Y. Guo, "Adaptive integral sliding mode control for permanent magnet synchronous motor speed regulation system," *2020 7th International Forum on Electrical Engineering and Automation (IFEAA)*, 2020, pp. 465-470, doi: 10.1109/IFEAA51475.2020.00103.
10. B. Prymak, S. Korol and M. Ostroverkhov, "Design of a Digital Following System of Welding Robot With a Visual Sensor," *IEEE EUROCON 2021 - 19th International Conference on Smart Technologies*, Lviv, Ukraine, 2021, pp. 66-70, doi: 10.1109/EUROCON52738.2021.9535643.
11. B. Prymak and M. Moreno-Eguilaz, "Characteristics of induction motor drives with torque maximization in field weakening region," *2017 IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*, Kyiv, Ukraine, 2017, pp. 508-513, doi: 10.1109/UKRCON.2017.8100292.
12. G. Panneerselvam, M. Annamalai, Y. H. Joo and P. Mani, "Fuzzy-Based Integral Sliding Mode Control for PMSM With Fractional Stochastic Disturbances," in *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, doi: 10.1109/TSMC.2023.3325043.
13. B. Sonkriwal, P. R. D and H. Tiwari, "Analysis of Sliding Mode, FUZZY-PI and PI Control Strategies for Permanent Magnetic Synchronous Motor Drive," *2023 IEEE 3rd International Conference on Sustainable Energy and Future Electric Transportation (SEFET)*, Bhubaneswar, India, 2023, pp. 1-6, doi: 10.1109/SeFeT57834.2023.10245741.
14. M. Ostroverkhov and M. Buryk, "Vector Control of Field Regulated Reluctance Motor", *2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*, Lviv, Ukraine, 2019, pp. 486-490. doi: 10.1109/UKRCON.2019.8879902.
15. N. Ostroverkhov and N. Buryk, "Control System with Field Weakening of Synchronous Motor Drive," *2020 IEEE Problems of Automated Electrodrive. Theory and Practice (PAEP)*, Kremenchuk, Ukraine, 2020, pp. 1-5, doi: 10.1109/PAEP49887.2020.9240903.
16. M. Ostroverkhov, V. Chibelis and M. Falchenko, "Synthesis of Control Algorithms for a Permanent Magnet Synchronous Motor in Sliding Mode," *2022 IEEE 4th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES)*, Kremenchuk, Ukraine, 2022, pp. 1-5, doi:10.1109/MEES58014.2022.10005704.
17. L. Xiang, W. Yan and J. Zhicheng, "Global Fast Terminal Sliding Mode Control System for Permanent Magnet Synchronous Motor Drive Under Disturbances," *2018 37th Chinese Control Conference (CCC)*, 2018, pp. 3092-3095, doi: 10.23919/ChiCC.2018.8484001.
18. X. Sun, H. Yu and X. Liu, "Design and Application of Sliding Mode Controller in PMSM Position Tracking Control Based on Adaptive Backstepping," *2018 Chinese Automation Congress (CAC)*, 2018, pp. 3507-3511, doi: 10.1109/CAC.2018.8623152.
19. D. Jin, L. Liu, Q. Lin and D. Liang, "Sensorless Control Strategy of PMSM with Disturbance Rejection Based on Adaptive Sliding Mode Control Law," in *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, doi: 10.1109/TTE.2023.3327144.

20. J. Hu, H. Lu and X. Tang, "Flux-weakening Control of Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Sliding Mode Active Disturbance Rejection Control," *2022 9th International Forum on Electrical Engineering and Automation (IFEEA)*, Zhuhai, China, 2022, pp. 833-837, doi: 10.1109/IFEEA57288.2022.10037973.

M. Ostroverkhov¹, Dr. Sc. (Eng.), Prof., ORCID 0000-0002-7322-8052

D. Kolomiichuk¹, master student, ORCID 0009-0006-0441-8975

M. Falchenko¹, Ph. D. student ORCID 0000-0002-0964-7164

H. Bolshakov¹, Ph. D. student ORCID 0009-0002-3339-7625

H. Veshchikov¹, Ph. D. student ORCID 0009-0002-0606-9765

¹National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

SPEED CONTROL OF PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR IN SLIDING MODE

The paper examines a series of speed control algorithms for a synchronous permanent magnet motor in sliding mode, providing asymptotic stability of the first, second, and third order. In the sliding mode, the control system exhibits properties that are unattainable with classical continuous control algorithms. The control algorithms are developed based on the inverse dynamics method combined with the minimization of local instantaneous energy functionals. The key idea of the method lies in the reversibility of the direct Lyapunov method for stability analysis. The closed-loop control system has a predefined Lyapunov function, represented by the instantaneous energy. Notably, the control algorithms do not require knowledge of the object's parameters or differentiation operations, which facilitates their practical implementation. The regulator parameters consist solely of coefficients used to specify the desired duration and shape of current and motor speed transient processes. The vector speed control system comprises two controllers for the stator current components and the motor speed controller. All regulators operate in sliding mode. The output signals of the stator current component controllers and speed vary discontinuously from maximum to minimum values. Simulation results demonstrate the effectiveness and high-quality performance of the control algorithms. To determine the control performance indicators for the three synthesized speed controllers, the motor startup trajectory is formed from characteristic segments of constant, linearly increasing, and parabolic signals. The speed control algorithm with a first-order asymptote ensures zero tracking error only for a constant reference signal. With a linearly increasing reference signal, the steady-state relative tracking error is 2,5 %, while for a parabolic reference signal, the error varies between zero and 2,5 %. The second-order asymptotic speed control algorithm ensures zero steady-state tracking error for constant and linearly increasing reference signals, and for a parabolic reference signal, the steady-state relative tracking error is 0,125 %. The third-order asymptotic speed control algorithm ensures zero steady-state tracking error for constant, linearly increasing, and parabolic reference signals, with a maximum dynamic relative tracking error of 0,05 %.

Keywords: *electrical drive, synchronous motor with permanent magnets, control algorithm, sliding mode.*

References

1. R. Zhang, Y. Xia, P. Zhu, G. Huang, Y. Zhang and X. Mi, "Speed control of Permanent Magnet Synchronous Motor system using quick-power reaching law based on sliding mode control," *2023 CAA Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes (SAFEPROCESS)*, Yibin, China, 2023, pp. 1-7, doi: 10.1109/SAFEPROCESS58597.2023.10295830.
2. M. Ostroverkhov, V. Chumack and E. Monakhov, "Synchronous Axial-Flux Generator with Hybrid Excitation in Stand Alone Mode", *2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*, Lviv, Ukraine, 2019, pp. 455-459. doi: 10.1109/UKRCON.2019.8879849.
3. Shchur I., Rusek A., Mandzyuk M. Power effective work of PMSM in electric vehicles at the account of magnetic saturation and iron losses // *Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review)*. – 2015. – N 1. – P. 199-202, doi:10.15199/48.2015.01.45.
4. Z. Li, S. Zhou, Y. Xiao and L. Wang, "Sensorless Vector Control of Permanent Magnet Synchronous Linear Motor Based on Self-Adaptive Super-Twisting Sliding Mode Controller," in *IEEE Access*, vol. 7, pp. 44998-45011, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2909308.
5. V. Osadchyy, O. Nazarova and V. Brylysty, "Laboratory Stand for Research of Energy Characteristics of Electric Vehicle Drives," *2021 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*, 2021, pp. 1-4, doi: 10.1109/MEES52427.2021.9598661.

6. B. Kuznetsov, I. Bovdvi and T. Nikitina, "Robust Electromechanical Servo System Parametric Synthesis as Multi Criteria Game Decision Based on Particles Multi Swarm Optimization," *2019 IEEE 5th International Conference Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments (APUAVD)*, 2019, pp. 206-209.
7. B. Kuznetsov, I. Bovdvi and T. Nikitina, "Multiobjective Optimization of Electromechanical Servo Systems," *2019 IEEE 20th International Conference on Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE)*, 2019.
8. S. -z. Zhang and Q. -l. Yang, "A robust sliding-mode control strategy of Permanent Magnet Synchronous Motor," *2010 2nd International Conference on Future Computer and Communication*, 2010, pp. V3-457-V3-460, doi: 10.1109/ICFCC.2010.5497551.
9. C. Li, J. Sun and Y. Guo, "Adaptive integral sliding mode control for permanent magnet synchronous motor speed regulation system," *2020 7th International Forum on Electrical Engineering and Automation (IFEAA)*, 2020, pp. 465-470, doi: 10.1109/IFEAA51475.2020.00103.
10. B. Pryymak, S. Korol and M. Ostroverkhov, "Design of a Digital Following System of Welding Robot With a Visual Sensor," *IEEE EUROCON 2021 - 19th International Conference on Smart Technologies*, Lviv, Ukraine, 2021, pp. 66-70, doi: 10.1109/EUROCON52738.2021.9535643.
11. B. Pryymak and M. Moreno-Eguilaz, "Characteristics of induction motor drives with torque maximization in field weakening region," *2017 IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*, Kyiv, Ukraine, 2017, pp. 508-513, doi: 10.1109/UKRCON.2017.8100292.
12. G. Panneerselvam, M. Annamalai, Y. H. Joo and P. Mani, "Fuzzy-Based Integral Sliding Mode Control for PMSM With Fractional Stochastic Disturbances," in *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, doi: 10.1109/TSMC.2023.3325043.
13. B. Sonkriwal, P. R. D and H. Tiwari, "Analysis of Sliding Mode, FUZZY-PI and PI Control Strategies for Permanent Magnetic Synchronous Motor Drive," *2023 IEEE 3rd International Conference on Sustainable Energy and Future Electric Transportation (SEFET)*, Bhubaneswar, India, 2023, pp. 1-6, doi: 10.1109/SeFeT57834.2023.10245741.
14. M. Ostroverkhov and M. Buryk, "Vector Control of Field Regulated Reluctance Motor", *2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*, Lviv, Ukraine, 2019, pp. 486-490. doi: 10.1109/UKRCON.2019.8879902.
15. N. Ostroverkhov and N. Buryk, "Control System with Field Weakening of Synchronous Motor Drive," *2020 IEEE Problems of Automated Electrodrive. Theory and Practice (PAEP)*, Kremenchuk, Ukraine, 2020, pp. 1-5, doi: 10.1109/PAEP49887.2020.9240903.
16. M. Ostroverkhov, V. Chibelis and M. Falchenko, "Synthesis of Control Algorithms for a Permanent Magnet Synchronous Motor in Sliding Mode," *2022 IEEE 4th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES)*, Kremenchuk, Ukraine, 2022, pp. 1-5, doi:10.1109/MEES58014.2022.10005704.
17. L. Xiang, W. Yan and J. Zhicheng, "Global Fast Terminal Sliding Mode Control System for Permanent Magnet Synchronous Motor Drive Under Disturbances," *2018 37th Chinese Control Conference (CCC)*, 2018, pp. 3092-3095, doi: 10.23919/ChiCC.2018.8484001.
18. X. Sun, H. Yu and X. Liu, "Design and Application of Sliding Mode Controller in PMSM Position Tracking Control Based on Adaptive Backstepping," *2018 Chinese Automation Congress (CAC)*, 2018, pp. 3507-3511, doi: 10.1109/CAC.2018.8623152.
19. D. Jin, L. Liu, Q. Lin and D. Liang, "Sensorless Control Strategy of PMSM with Disturbance Rejection Based on Adaptive Sliding Mode Control Law," in *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, doi: 10.1109/TTE.2023.3327144.
20. J. Hu, H. Lu and X. Tang, "Flux-weakening Control of Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Sliding Mode Active Disturbance Rejection Control," *2022 9th International Forum on Electrical Engineering and Automation (IFEAA)*, Zhuhai, China, 2022, pp. 833-837, doi: 10.1109/IFEAA57288.2022.10037973.

Надійшла: 13.11.2023
Received: 13.11.2023

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ФУНКЦІОНУВАННЯ СИСТЕМИ ПЕРЕТВОРЮВАЧА ЧАСТОТИ В СУДНОВІЙ АВТОНОМНІЙ ЕНЕРГЕТИЧНІЙ СИСТЕМІ

В статті показано процес побудови моделі функціонування системи керування перетворювачем частоти для суднової автономної електроенергетичної системи. Дана задача вирішувалась для спрощення математичного описання вказаного перетворювача частоти для суднової автономної електроенергетичної системи. В результаті отримано математичну множину ймовірних комбінацій робочих станів силових ключів і відповідні значення узагальнених векторів напруги автономного інвертора при використанні широтно – імпульсної модуляції. Проведене на основі цього моделювання підтвердило відповідність отриманих значень фазної напруги автономного інвертора реальним енергетичним процесам. Показано, що важливим є подальше дослідження технічних та методичних факторів підвищення енергетичної ефективності та точності математичного опису реальних ланок енергетичних систем, що забезпечить процес більш якісного дослідження енергетичних процесів в них.

Ключові слова: математичне описання, ефективність, режими роботи перетворювача частоти, перетворювач частоти, автономний інвертор напруги.

Вступ. Режим роботи транспортного перетворювача частоти визначає ступінь використання потужності та всієї сили тяги, надійність і економічність його в конкретних умовах експлуатації судна, що є актуальною задачею. Намагання поліпшення використання тягової потужності й сили тяги супроводжується вдосконалюванням режимів керування енергетичною установкою, раціональним використанням паливно-енергетичних ресурсів на рух судна та забезпечення власних потреб.

Дослідженню питання раціонального керування перетворювачами частоти, використанню енергетичних ресурсів присвячено багато робіт [1-7], що пояснюється важливістю даної прикладної задачі та актуалізує важливість даного питання. Проте з розвитком сучасних засобів побудови перетворювачів частоти, розвитком наукової бази створення систем керування енергетичним установками засобів транспорту дана задача постійно отримує більш нові та сучасні рішення.

Мета та завдання. Метою даної статті є побудова моделі функціонування системи перетворювача частоти в судновій автономній електроенергетичній системі.

Завданням статті є розвиток інженерно-технічних підходів, що сприятимуть скороченню та спрощенню опису системи перетворювача частоти в судновій автономній електроенергетичній системі.

Матеріал і результати досліджень.

Для дизель – генераторного перетворювача частоти використовуються в якості напівкерованих силових ключів транзистори різних типів, приклади їх використання наведено на рис. 1 [1-4].

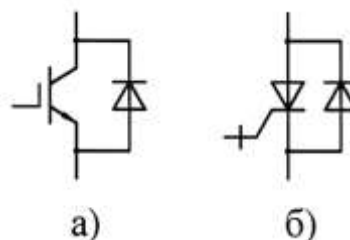


Рисунок 1 - Використання різних типів транзисторних ключів для автономного інвертора напруги на основі: а) IGBT; б) GTO (або IGCT).

На рис. 2 зображена схема перетворювача частоти, яка розповсюджена у застосуванні в судновій дизель-генераторній енергетичній системі змінного струму [5,6], яка виконана на IGBT силових ключах.

Автономний інвертор напруги під'єднаний до шини постійного струму, яка шунтована конденсаторним фільтром С. Він, використовується для компенсації реактивної потужності навантаження, його застосування є характерною особливістю цієї схеми.

При побудові схеми автономного інвертора напруги на основі IGBT, використовуючи досвід застосування цих перетворювачів частоти [1-6], стає зрозуміло, що це дає ряд переваг в порівнянні з іншими видами схем для суднових систем:

- легкість керування з невеликим власним використанням потужності;
- можливість до керованого запирання;
- висока робоча частота.

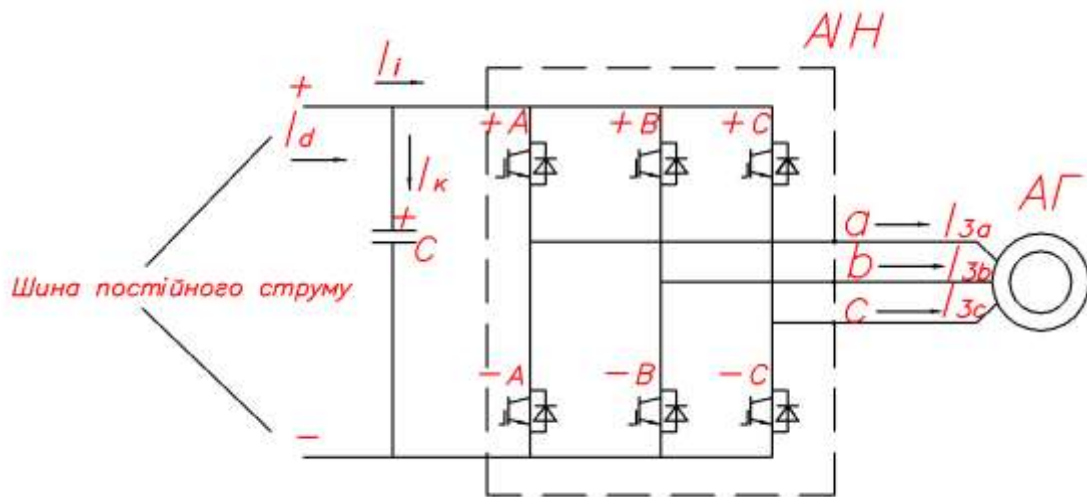


Рисунок 2 - Функціональна схема перетворювача частоти суднової дизель-генераторної енергетичної системи на основі автономного інвертора напруги

З рис. 2 бачимо, що до схеми автономного інвертора напруги входять шість транзисторів, які шунтовані діодами, це необхідно для отримання провідності струму активно – індуктивного навантаження, яким є асинхронний генератор. Для того, щоб перетворити постійну напругу в змінну трифазну, необхідно зробити перемикання транзисторів, перемикання яких повинно проходити у певній послідовності. Водночас, три транзистори повинні бути відкриті у кожен момент часу в кожній з фаз автономного інвертора напруги по черзі, а інші закриті.

Коли від системи керованих інверторів приходить керуючий імпульс на базу транзистора, в схемі відбувається ввімкнення транзисторів. Від заданих параметрів транзисторів залежить, яку змінну напругу та якої форми можливо отримати, в ідеальному випадку – синусоїдальна форма змінної напруги на виході, а якщо збільшувати чи зменшувати частоту подачі імпульсів на ключі перетворювача, можливо регулювати її частоту, це і є основна відмінність від тиристорного інвертора, в якому вихідна напруга не має можливості регулювання її частоти.

В таблиці 1 наведемо конкретні значення статорних напруг U_{sa} , U_{sb} , U_{sc} , а також значення вектору статорної напруги асинхронного генератора у показниковій формі, в залежності від постійної напруги на вході інвертору U_d , для комбінацій робочих силових ключів трифазного автономного інвертора напруги, які можуть мати як відкритий, так і закритий стан:

$$\vec{U}_{s(l)} = U_{s(l)} e^{j\theta_{s(l)}}, \quad (1)$$

Логічно, що якщо жити розглянути вище трифазний автономний інвертор напруги від асинхронного генератора, сума всіх можливих комбінацій спрацювання силових ключів, положення яких відрізняються, та показників фазних статорних напруг, дорівнює семи.

Натуральне число $l = 1, 2, \dots, 7$ визначає собою умовне позначення номера варіанту комбінацій значень фазних статорних напруг асинхронного генератора U_{sa} , U_{sb} , U_{sc} і відповідних створюваних узагальнених векторів статорної напруги (1) асинхронного генератора. У таблиці 1 позначкою "плюс" позначені відкриті положення станів силових ключів, а позначкою "мінус" – закриті стани силових ключів в автономному інверторі напруги, згідно з їх зображенням на рис. 2.4.

Загалом значення векторів статорної напруги асинхронного генератора можливо знайти з виразу [1]:

$$\vec{U}_{s(l)} = \frac{2}{3} \left\{ 1 - \left[\frac{l}{7} \right] \right\} U_d e^{j(l-1)\frac{\pi}{3}}, \quad (2)$$

Таблиця 1 - Можливі комбінації станів силових ключів і відповідні значення узагальнених векторів вихідної напруги трифазного автономного інвертора напруги при широтно – імпульсній модуляції

№	Значення фазних статорних напруг			$\bar{U}_{s(l)}$	Комбінація силових ключів					
	Usa	Usb	Usc		-A1	+A2	-B1	+B2	-C1	+C2
1	$\frac{2U_d}{3}$	$-\frac{U_d}{3}$	$-\frac{U_d}{3}$	$\frac{2}{3}U_d$	+	-	-	+	-	+
2	$\frac{U_d}{3}$	$\frac{U_d}{3}$	$-\frac{2U_d}{3}$	$\frac{2}{3}U_d e^{j\pi/3}$	+	-	+	-	-	+
3	$-\frac{U_d}{3}$	$\frac{2U_d}{3}$	$-\frac{U_d}{3}$	$\frac{2}{3}U_d e^{j2\pi/3}$	-	+	+	-	-	+
4	$-\frac{2U_d}{3}$	$\frac{U_d}{3}$	$\frac{U_d}{3}$	$\frac{2}{3}U_d e^{j\pi}$	-	+	+	-	+	-
5	$-\frac{U_d}{3}$	$-\frac{U_d}{3}$	$\frac{2U_d}{3}$	$\frac{2}{3}U_d e^{j4\pi/3}$	-	+	-	+	+	-
6	$\frac{U_d}{3}$	$-\frac{2U_d}{3}$	$\frac{U_d}{3}$	$\frac{2}{3}U_d e^{j5\pi/3}$	+	-	-	+	+	-
7	0	0	0	0	+	-	+	-	+	-
					-	+	-	+	-	+

Під час синтезу математичної моделі суднової дизель-генераторної енергетичної системи силові ключі перетворювача частоти вважаємо ідеальними, тобто вони не мають власного опору у відкритому стані та значення їхнього опору прямує до нескінченності в закритому стані, та час їх перемикання – миттєвий.

Якщо розглянути станом на сьогоднішній день швидкодіючі силові ключі на основі IGBT, GTO (IGCT), то можливо зробити висновок, що вони застосовуються для створення статичних перетворювачів частоти, а їх характеристики лише в частині, яка наведена нижче, наближені до параметрів ідеальних ключів:

– відносно невеликі величини часу зрізу (затримки, фронту) їх переключення, якщо порівнювати з фактичними часовими довжинами провідного і непровідного станів зазначених ключів, при широтно – імпульсній модуляції;

– щодо невеликих значень струмів, які просочуються через зачинені ключі, якщо порівнювати їх зі значенням струму при відкритому (робочому) положенні.

Використовуючи закон керування ключами силового перетворювача, визначимо вхідні та вихідні параметри перетворення електричної енергії, а саме, якість вихідної напруги автономного інвертора напруги суднової дизель-генераторної енергетичної системи. При цьому необхідно врахувати, що вирішальне значення має послідовність поводження в цілому автономного інвертора напруги, як ланки замкненої системи автоматичного керування, а не лише фактор якісного гармонійного складу сформованої вихідної напруги для живлення асинхронного генератора, та фактор забезпечення високого ККД.

В результаті моделювання перетворювача частоти з початковими даними, показаними в [7], зібраного за розробленою моделлю, встановлено фазну напругу автономного інвертора напруги, показану на рис. 3, що повністю відповідає реальним енергетичним процесам [7].

Висновки

Було проведено побудову моделі функціонування системи перетворювача частоти в судновій автономній електроенергетичній системі задля скорочення та спрощення опису системи перетворювача частоти в судновій автономній електроенергетичній системі. В результаті отримано математичне рівняння щодо визначення можливих комбінацій станів силових ключів і відповідні значення узагальнених векторів вихідної напруги трифазного автономного інвертора напруги при широтно – імпульсній модуляції. Проведене моделювання підтвердило адекватність отриманих значень фазної напруги автономного інвертора напруги, реальним енергетичним процесам.

Важливим є подальше дослідження технічних та методичних факторів підвищення енергетичної ефективності та точності математичного опису реальних ланок енергетичних систем, що забезпечить процес більш якісного дослідження енергетичних процесів в них.

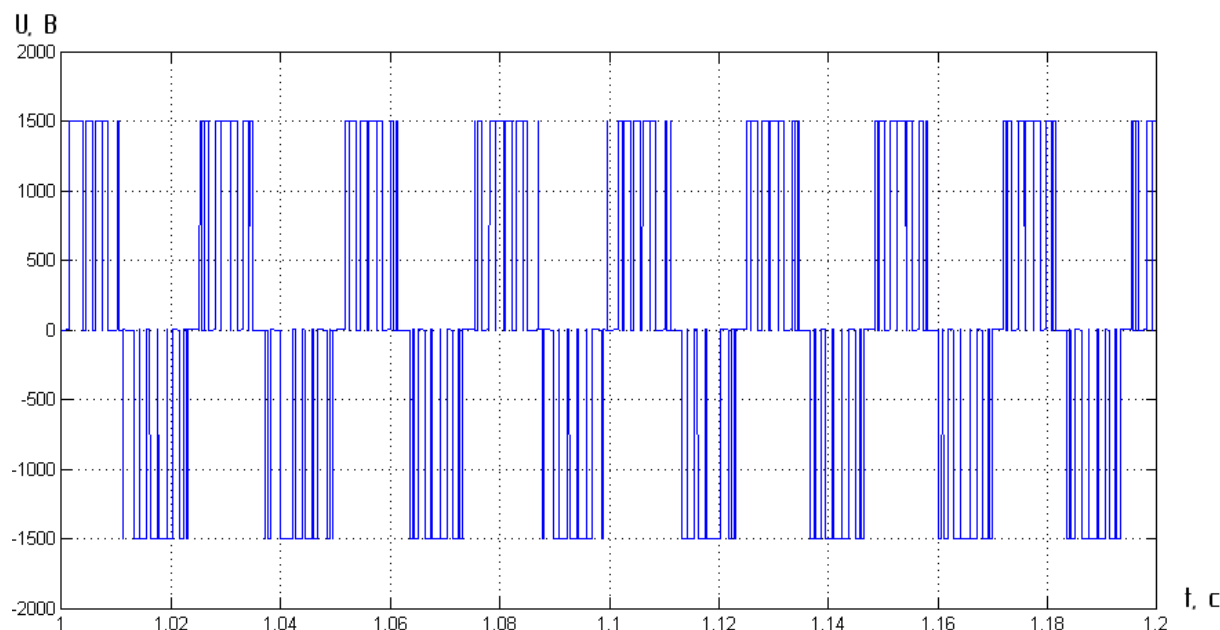


Рисунок 3 - Фазна напруга автономного інвертора напруги

Список використаної літератури

1. Пивняк Г. Г. Современные частотно-регулируемые асинхронные электроприводы с широтно-импульсной модуляцией / Пивняк Г. Г., Волков А. В. – Днепропетровск, 2006. – 421 С.
2. Hierholzer M. Laska. 3rd generation of 1200 V IGBT modules / Hierholzer M. Laska, Th. Loddenkotter M. Munzer, M. Pfirsch F. Schaffer, C. Schmidt Th. // Industry Applications Conference, 1999. Thirty-Fourth IAS Annual Meeting. Conference Record of the 1999 IEEE. – 1999. – Vol. 3. – P. 1787–1792.
3. James P. Forsyth. Accelerated testing of IGBT power modules to determine time to failure / James P. Forsyth // Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2010), 5th IET International Conference. – 2010. – P. 1–4.
4. Khanna V. Power IGBT Modules / Khanna V. // Insulated Gate Bipolar Transistor IGBT Theory and Design. – 2005. – P. 465–498.
5. Komatsu K. Yatsu. New IGBT modules for advanced neutral-point-clamped 3-level power converters / Komatsu K. Yatsu, M. Miyashita, S. Okita, S. Nakazawa, H. Igarashi, S. Takahashi, Y. Okuma, Y. Seki, Y. Fujihira // Power Electronics Conference (IPEC), 2010 International. – 2010. – Vol. 1. – P. 523–527.
6. Kusko A. Control Means for Minimization of Losses in AC and DC Motor Drives / A. Kusko, D. Galler. // IEEE Trans. on Industry Applications. – 1983. – Vol. 19. – № 4. – P. 561–570.
7. Кулагін Д. О. Проектування систем керування тяговими енергетичними установками моторвагонних поїздів : монографія. Бердянськ : ФО-П Ткачук О. В., 2014. 154 с.

I. Maslov¹, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof, ORCID 0000-0003-1759-6077

D. Kulagin², Dr. Sc. (Eng.), Prof., ORCID 0000-0003-3610-4250

¹Danube Institute of the National University "Odesa Maritime Academy"

²National University "Zaporizhzhya Polytechnic"

MATHEMATICAL MODEL OF THE FREQUENCY CONVERTER SYSTEM OPERATION IN A SHIP'S AUTONOMOUS POWER SYSTEM

The article shows the process of building a model of the frequency converter control system for a ship's autonomous power system. This task was solved to simplify the mathematical description of the frequency converter for the ship's autonomous power system. As a result, a mathematical set of probable combinations of operating states of power switches and the corresponding values of generalised voltage vectors of the autonomous inverter using pulse width modulation were obtained. The modelling carried out on the basis of this data confirmed

the correspondence of the obtained values of the phase voltage of the autonomous inverter to real energy processes. It is shown that it is important to further study the technical and methodological factors of increasing energy efficiency and the accuracy of the mathematical description of real links of power systems, which will ensure the process of a more qualitative study of energy processes in them.

Key words: *mathematical description, efficiency, operating modes of a frequency converter, frequency converter, autonomous voltage inverter.*

References

1. Modern frequency-controlled asynchronous electric drives with pulse width modulation / Pivnyak G. G., Volkov A. V. - Dnipro, 2006. - 421 p.
2. Hierholzer M. Laska. 3rd generation of 1200 V IGBT modules / Hierholzer M. Laska, Th. Loddenkotter M. Munzer, M. Pfirsch F. Schaffer, C. Schmidt Th. // Industry Applications Conference, 1999. Thirty-Fourth IAS Annual Meeting. Conference Record of the 1999 IEEE. - 1999. - Vol. 3. - P. 1787-1792.
3. James P. Forsyth. Accelerated testing of IGBT power modules to determine time to failure / James P. Forsyth // Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2010), 5th IET International Conference. - 2010. - P. 1-4.
4. Khanna V. Power IGBT Modules / Khanna V. // Insulated Gate Bipolar Transistor IGBT Theory and Design. - 2005. - P. 465-498.
5. Komatsu K. Yatsu. New IGBT modules for advanced neutral-point-clamped 3-level power converters / Komatsu K. Yatsu, M. Miyashita, S. Okita, S. Nakazawa, H. Igarashi, S. Takahashi, Y. Okuma, Y. Seki, Y. Fujihira // Power Electronics Conference (IPEC), 2010 International. - 2010. - Vol. 1. - P. 523-527.
6. Kusko A. Control Means for Minimisation of Losses in AC and DC Motor Drives / A. Kusko, D. Galler // IEEE Trans. on Industry Applications. - 1983. - Vol. 19. - No. 4. - P. 561-570.
7. Kulagin D. O. Design of control systems for traction power plants of motor-car trains : monograph. Berdiansk: FP-P Tkachuk O. V., 2014. 154 c.

Надійшла: 02.12.2023

Received: 02.12.2023

ANALYSIS OF TOPOLOGY OF THE AUTOTRANSFORMER FORWARD-FLYBACK CONVERTER FOR PHOTOVOLTAIC PANEL

The analysis of converters controlling only a part of the output power in photovoltaic systems was carried out. The architecture of distributed tracking of the maximum power is considered, which is one of the most promising solutions for overcoming the shortcomings associated with a decrease in the energy efficiency of photovoltaic panels. The topology of the autotransformer forward-flyback converter for photovoltaic panel is given. The principle of operation of the converter and the flow of current in the circuit during switching are presented. The method of calculating the output power of the converter in the DMPPT architecture with a series connection, in which the circuit voltage is fixed by the central inverter, depends on the generated power of the photovoltaic panels connected to one circuit, is obtained. The power generated by photovoltaic panels was calculated depending on the state of their shading.

Keywords: *autotransformer, efficiency, forward-flyback converter, photovoltaic panel, power losses, solar power plant.*

Introduction

The efficiency of solar energy production remains low due to the limitation of the efficiency of solar cells, which are the basis of photovoltaic (PV) systems of electricity production [1, 2].

One of the most important goals of PV power plants is to obtain the maximum possible energy. Due to phenomena related to solar power plant systems, phenomena of decreasing energy efficiency of PV panels usually occur. The most common reasons for reducing energy efficiency are shadows, dirt, temperature changes, etc. [3, 4]. Thus, due to this problem, the power produced by the PV plant can be significantly reduced.

The architecture of distributed maximum power point tracking (DMPPT) is one of the most promising solutions to overcome the shortcomings associated with the reduction of energy efficiency of photovoltaic panels [5, 6]. This architecture has a DC-DC converter designed to track the maximum power point of each PV panel. To provide the greatest flexibility, the converter must be able to step up and down the voltage.

Another desirable characteristic of the converters used in the DMPPT architecture is high efficiency, but one of the main disadvantages is the high cost due to the large number of used converters [7, 8].

Analysis of Recent Research and Publications

In scientific studies, some authors have obtained high efficiency of converters that control only part of the output power, for example, converters with a series connection, converters with parallel power processing, or converters with direct energy transfer [9, 10]. However, for use in PV systems, such topologies of converters are inefficient.

The papers [11, 12] give general approaches that are used for various purposes, for example, to reduce the load, distribute power in proportion to the generator ratings, and increase the service life of batteries. However, for modular sub-panel PV converters, the DC bus voltage is not regulated according to the load change.

There are also some studies devoted to topologies capable of both increasing and decreasing the output power in PV panels [13, 14]. These topologies have the effect of increasing efficiency. But because the intensity of sunlight hitting the panel varies with season, time and weather, the efficiency gains of the system itself are limited.

Thus, the issue of the further search for highly efficient and inexpensive converters of electrical energy is an actual unsolved task.

Purpose and Objectives of the Study

The purpose of the study is to analyze the system of energy conversion at solar power plants through the use of distributed tracking of the maximum power of the photovoltaic panel, which will make it possible to increase the energy efficiency of the converter. To achieve this purpose, the following tasks are set:

- consider the architecture of distributed tracking of the maximum power of the photovoltaic panel;
- present the topology of the autotransformer forward-flyback converter;
- give the results of calculating the power generated by photovoltaic panels.

Main Material of the Study

In the architecture of photovoltaic installations of distributed tracking of maximum power, PV panels are isolated from each other, reducing the impact of negative phenomena on electricity generation [15, 16].

One of the influences on electricity production is the shadow on the PV panel [17, 18]. In Fig. 1 show a comparison of the characteristics of an unshaded and 3/4 shaded PV panel.

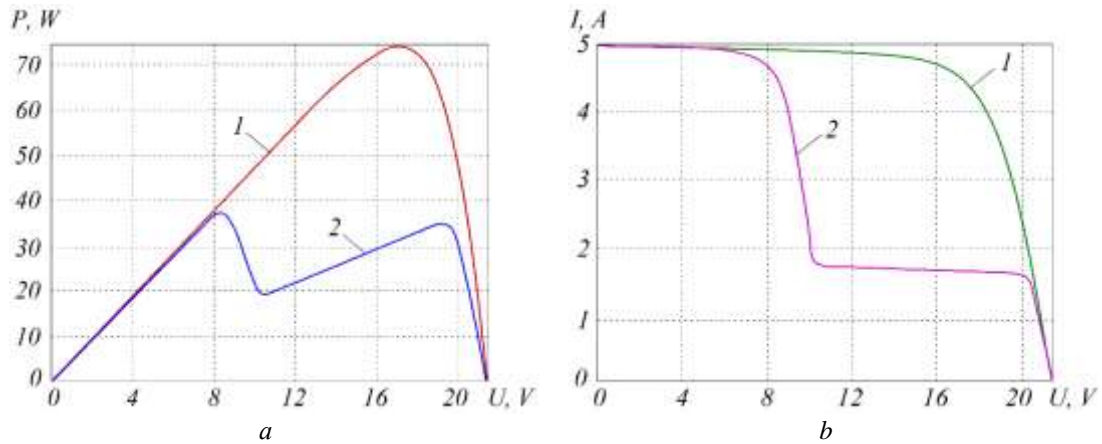


Figure 1 – Features of the photovoltaic panel:
 a – power produced by the photovoltaic panel; b – current-voltage characteristics of photovoltaic elements; 1 – unshaded; 2 – 3/4 shaded

As can be seen, there is only one maximum power point for the unshaded PV panel, while the 3/4 shaded PV panel has two maximum power points. In this case, in addition to reducing the power, the influence of the shadow also changes the absolute voltage. Because of this behavior, if the DC-DC converter is only able to step up or step down the output voltage, some PV panels may not operate at their maximum power point, even in DMPPT architectures.

Since the lowest efficiency is achieved when the PV panels are shaded, more PV panels per circuit are required if the DC converter is only capable of stepping down the voltage. On the contrary, when using a step-up converter, fewer photovoltaic panels per circle and more circles are needed [19, 20].

So, to get more flexibility regarding the number of PV panels in circuit, a voltage converter is needed that can both step up and step down the output voltage.

In Fig. 2 shows the topology of the autotransformer forward-flyback converter for PV panel.

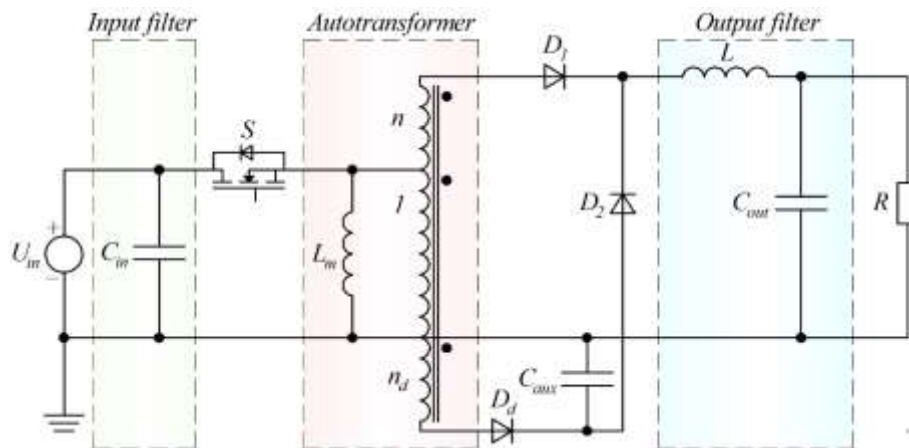


Figure 2 – Electrical diagram of the autotransformer forward-flyback converter

The main component of the topology of the autotransformer forward-flyback converter. The method of connecting the autotransformer has two important consequences. On the one hand, due to the fact that the magnetizing inductance of the autotransformer L_m demagnetizes the output filter, its size can be reduced. On the other hand, there is a path when switch S is turned on with direct energy transfer from the input source to the output filter without magnetic treatment by the autotransformer. Thus, the efficiency of the converter increases, since only part of the energy is processed magnetically. This principle is similar to converters of serial connection.

During switching on, part of the current transmitted to the load comes directly from the input source U_{in} (direct energy transfer), and the other part is magnetically processed by the autotransformer. While the switch S is on, the inductor of the output filter L and the magnetizing inductance of the autotransformer L_m accumulate energy.

During turn-off, the inductor of the output filter L gives the stored energy to the load through the diode D_2 . On the other hand, the magnetizing inductance of the autotransformer L_m gives the accumulated energy to the auxiliary capacitor C_{aux} and the output filter through the demagnetization winding, the demagnetization diode D_d and the diode D_2 .

Input voltage, output voltage and voltage on the auxiliary capacitor C_{aux} are represented by U_{in} , U_{out} and U_{Caux} , respectively. The variables I_L and I_{Lm} denote the current through the output inductance L and the magnetizing inductance L_m . The coefficient of turns of the autotransformer of the secondary-primary side is denoted by n and of the demagnetizing winding is denoted by n_d . The conductivity mode is determined by the filter current of the inductor I_L . The value of the duty cycle is represented by T . In order to calculate the transfer function, the input-output voltage balance is performed per second.

$$\left[(1+n) \cdot U_{in} - U_{out} \right] \cdot T = (U_{out} - U_{Caux}) \cdot (1-T); \quad (1)$$

$$U_{Caux} = \frac{n_d \cdot T}{1-T} \cdot U_{in}; \quad (2)$$

$$\frac{U_{out}}{U_{in}} = (1+n+n_d) \cdot T. \quad (3)$$

As can be seen, the transfer function of the output voltage is similar to the function of the step-down converter, but it is multiplied by $(1+n+n_d)$. The voltage increase factor depends on the value of the transformation factor of the autotransformer. These parameters also affect the overvoltages of the components of the autotransformer forward-flyback converter. Therefore, both parameters must be chosen carefully to minimize overvoltages in the converter components.

During operation, direct energy transfer occurs in the autotransformer forward-flyback converter. The output power is determined by the expression:

$$P_{out} = U_{out} \cdot I_{out} = (1+n+n_d) \cdot T \cdot U_{in} \cdot I_{out} = T \cdot U_{in} \cdot I_{out} + (n+n_d) \cdot T \cdot U_{in} \cdot I_{out} = P_n + P_m. \quad (4)$$

The ratio between the power transmitted by the magnetic field P_m and the power transmitted directly by P_n is calculated from expression (4):

$$\frac{P_m}{P_n} = n + n_d. \quad (5)$$

Thus, the percentage share of direct and magnetic transfer power is kept constant regardless of the output power and the ratio of output to input voltage. These power percentages depend only on the transmission values of n and n_d . This fact differs from other series-connected converters, such as series-inverting, where the higher the ratio of the output voltage to the input voltage, the lower the percentage of forward power transferred.

The percentage ratios P_n , P_m relative to the output power are defined as:

$$P_n = \frac{1}{1+n+n_d} \cdot P_{out}; \quad (6)$$

$$P_m = \frac{n+n_d}{1+n+n_d} \cdot P_{out}. \quad (7)$$

Thus, the smaller the gear ratio, the smaller the percentage of power that is magnetically processed by the autotransformer. Therefore, lower gear ratios are desirable for higher efficiency. However, because low values of the transformation factor imply high voltage loads and a lower voltage rise factor, a trade-off between the percentage of direct power transfer, voltage loading and voltage rise factor must be reached to achieve an optimal design.

For the calculation, let's take a solar power plant with an average power of 100 kW. In the DMPPT architecture, the choice of central inverter and PV panel is crucial. The inverter will fix the circuit voltage, while depending on the characteristics of the PV panel, the circuit will consist of different number of PV panels. The characteristics of the PV panel are also very important for the design of the DC converter. The FREESUN LVT FS0100 from Power Electronics can be used as a central inverter. For this inverter, the nominal input voltage is 600 V, so it will also be the circuit voltage U_k . On the other hand, the PV panel SKJ60P6L from Silicon, capable of generating up to 225 W, was chosen.

Once the circuit voltage is set and the PV panels are selected, there are many options for configuring the PV panels. The chosen distribution of PV panels for a medium capacity solar power plant consists of a total of 450 PV panels distributed in 25 circles with 18 PV panels in each.

As shown in Fig. 1, the shadow effect in the PV panel changes the current-voltage characteristic of the PV cells, and can also drastically reduce the power produced by the PV panel. In addition, depending on the number and position of the shaded panels, as well as the percentage of shading, the characteristics of the PV panel will change.

The paper considers three options for shading PV panels. In the first option, there are no shaded PV panels, so all PV panels in the circuit generate maximum power. For the second option, the percentage of shaded PV panels is 25 %, and for the third option, it is 30 %. Assuming that all PV panels generate maximum power regardless of the shading condition, the input voltage and power of the converter are established. The output power of a DC-DC converter in a series-connected DMPPT architecture, in which the circuit voltage is fixed by the central inverter, depends on the generated power of the PV panels connected to the same circuit.

$$U_{out_i} = U_k \cdot \frac{P_{f_i}}{P_k}, \tag{8}$$

where P_k is the power generated by the entire circuit; P_{f_i} is the power generated by the analyzed PV panel.

The shading effect involves a reduction in voltage and power at the point of maximum power. The values obtained for the photovoltaic panel depending on the percentage of shaded modules are shown in Table 1.

Table 1 – The shading effect of the photovoltaic panel

Parameter	Panel option 1 (100 % / 0 %)		Panel option 2 (75 % / 25 %)		Panel option 3 (70 % / 30 %)	
	unshaded	shaded	unshaded	shaded	unshaded	shaded
Output power P_{out} , W	225	–	225	67.5	225	67.5
Input voltage U_{in} , V	29.3	–	29.3	15	29.3	15
Output voltage U_{out} , V	33.3	–	40.4	12.12	42.19	12.66
Circuit current I_k , A	6.75	–	5.57	5.57	5.33	5.33

As can be seen from Table 1, regardless of the converter topology, the higher the percentage of shaded PV panels, the less power can be produced. Increasing the efficiency of the converter means that more energy can be produced at the solar plant through the use of autotransformer forward-flyback converter.

The main features of the proposed converter are high efficiency and the ability to both increase and decrease the output voltage relative to the input voltage.

Conclusions

On the basis of the conducted research, the following conclusions can be drawn:

- the advantage of the maximum power distributed tracking photovoltaic installations is that the PV panels are isolated from each other, reducing the impact of negative phenomena on power generation;
- the main component of the topology of autotransformer forward-flyback converter, due to which the efficiency of the converter increases, since only part of the energy is processed magnetically;
- the output power of forward-flyback converter in a series-connected DMPPT architecture depends on the generated power of PV panels connected to the same circuit, with the ability to either step up or step down the output voltage relative to the input.

Acknowledgement

The article was prepared as part of the support of the grant of young scientists of Ukraine "Development of scientific bases for improving energy efficiency and improving the quality of electricity in electricity networks" (State Registration Number 0121U109440).

References

1. Khan A., Siddiki A., Rahman R. Solar PV system for self-consumption. *2022 IEEE International IOT, Electronics and Mechatronics Conference (IEMTRONICS)*. 2022. P. 1–8. DOI: 10.1109/IEMTRONICS55184.2022.9795847.
2. Sivapriyan R., Elangovan D, Kiran B., Madan R. Recent research trends in solar photovoltaic systems. *2020 5th International Conference on Devices, Circuits and Systems (ICDCS)*. 2020. P. 215–220. DOI: 10.1109/ICDCS48716.2020.243584.
3. Dobrea M., Bichiu S., Opris I., Vasluianu M. The energy efficiency of a prosumer in a photovoltaic system. *2020 IEEE 26th International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME)*. 2020. P. 412–416. DOI: 10.1109/SIITME50350.2020.9292256.
4. Keteng J. Photovoltaic optimal configuration of net zero energy building based on whole-process energy efficiency. *2022 IEEE 5th International Electrical and Energy Conference (CIEEC)*. 2022. P. 4842–4847. DOI: 10.1109/CIEEC54735.2022.9846453.
5. Gharechahi A., Shahrezayi A., Hamzeh M., Afjei E. Increasing of harvested power in DMPPT-based PV systems by a new scan method. *2022 13th Power Electronics, Drive Systems, and Technologies Conference (PEDSTC)*. 2022. P. 592–597. DOI: 10.1109/PEDSTC53976.2022.9767236.

6. Ge Z., Li X., Wang R., Yang T., Ding S. An investigation on maximum power region for distributed maximum power point tracking in PV systems. *2022 2nd International Conference on Electrical Engineering and Control Science (IC2ECS)*. 2022. P. 134–138. DOI: 10.1109/IC2ECS57645.2022.10088010.
7. Nerubatskyi V. P., Plakhtii O. A., Tugay D. V., Hordiienko D. A. Method for optimization of switching frequency in frequency converters. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2021. No. 1 (181). P. 103–110. DOI: 10.33271/nvngu/2021-1/103.
8. Balato M., Liccardo A., Petrarca C. Dynamic Boost Based DMPPT Emulator. *Energies*. 2020. Vol. 13, No. 11. 2921. DOI: 10.3390/en13112921.
9. Nerubatskyi V., Plakhtii O., Hordiienko D. Adaptive modulation frequency selection system in power active filter. *2022 IEEE 8th International Conference on Energy Smart Systems (ESS)*. 2022. P. 341–346. DOI: 10.1109/ESS57819.2022.9969261.
10. Plakhtii O., Nerubatskyi V., Hordiienko D. Research of operating modes and features of integration of renewable energy sources into the electric power system. *2022 IEEE 8th International Conference on Energy Smart Systems (ESS)*. 2022. P. 133–138. DOI: 10.1109/ESS57819.2022.9969337.
11. Nerubatskyi V., Hordiienko D. Analysis of the control system of a wind plant connected to the AC network. *Power engineering: economics, technique, ecology*. 2023. No. 1. P. 87–91. DOI: 10.20535/1813-5420.1.2023.276028.
12. Junglas S., Hubracht A., Maas J. Small and scalable high voltage push-pull converter for feeding dielectric elastomer transducers (DET). *International Conference and Exhibition on New Actuator Systems and Applications*. 2022. P. 1–4.
13. Choi J. S., Kim J. H., Rim C. T. Incidence solar power analysis of PV panels with curved reflectors. *2017 IEEE 18th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL)*. 2017. P. 1–6. DOI: 10.1109/COMPEL.2017.8013320.
14. Shavolkin O., Shvedchikova I. Improvement of the three-phase multifunctional converter of the photoelectric system with a storage battery for a local object with connection to a grid. *2020 IEEE Problems of Automated Electrodrive. Theory and Practice (PAEP)*. 2020. P. 1–6. DOI: 10.1109/PAEP49887.2020.9240789.
15. Barcellona S., Barresi M., Piegari L. MMC-based PV three-phase system with distributed MPPT. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2022. Vol. 37, No. 3. P. 1567–1578. DOI: 10.1109/TEC.2022.3167786.
16. Wang Q., Yao W., Fang J., Xu M. Dynamic characteristics analysis of distributed PV plants with panel-level DC optimizers under severe partial shading conditions. *2022 7th Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE)*. 2022. P. 1909–1915. DOI: 10.1109/ACPEE53904.2022.9784079.
17. Jahnvi B. P., Mathew R. K., Ashok S. Effect of shading on financial performance of solar photovoltaic system. *2022 1st International Conference on Sustainable Technology for Power and Energy Systems (STPES)*. 2022. P. 1–5. DOI: 10.1109/STPES54845.2022.10006450.
18. Alam M., Gul M., Muneer T. Self-shadow analysis of bifacial solar photovoltaic and its implication on view factor computation. *2021 IEEE Green Energy and Smart Systems Conference (IGESSC)*. 2021. P. 1–5. DOI: 10.1109/IGESSC53124.2021.9618684.
19. Kumar A. N., Prasad A. V., Ramesha M., Kumari T. S. The photovoltaic system step-up converter. *2021 5th International Conference on Electronics, Communication and Aerospace Technology (ICECA)*. 2021. P. 260–266. DOI: 10.1109/ICECA52323.2021.9676122.
20. Plakhtii O., Nerubatskyi V., Hordiienko D. Efficiency analysis of DC-DC converter with pulse-width and pulse-frequency modulation. *2022 IEEE 41st International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*. 2022. P. 571–575. DOI: 10.1109/ELNANO54667.2022.9926762.

В.П. Нерубацький¹, канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0002-4309-601X

Д.А. Гордієнко¹, аспірант, ORCID 0000-0002-0347-5656

¹Український державний університет залізничного транспорту

АНАЛІЗ ТОПОЛОГІЇ АВТОТРАНСФОРМАТОРНОГО ПРЯМОХОДОВОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ДЛЯ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ ПАНЕЛІ

Представлено аналіз перетворювача, який контролює лишечастину вихідної потужності фотоелектричної системи. Розглянуто архітектуру розподіленого моніторингу максимальної потужності, яка є одним з найбільш перспективних рішень для подолання недоліків, пов'язаних з мінливою енергоефективністю фотоелектричних панелей. Представлено топологію автотрансформаторного прямоходового перетворювача постійного струму для фотоелектричних панелей. Показано принцип роботи перетворювача і протікання струму в колі під час комутації. У послідовно з'єднаній архітектурі DMPPT, деннапруга контуру фіксується центральним інвертором, отримано методику розрахунку вихідної потужності перетворювача в залежності від потужності, що генерується фотоелектричними панелями, підключеними до контуру. Розраховано потужність, що генерується затінювальною стінкою фотоелектричної панелі.

Ключові слова: автотрансформатор, ККД, прямоходовий перетворювач, фотоелектрична панель, втрати потужності, сонячна електростанція.

Надійшла: 13.11.2023

Received: 13.11.2023