

Міністерство освіти і науки України
Український державний університет науки та технологій
Кафедра «Автоматика та телекомунікації»

ДОВІДКА

про відсутність плагіату у випускній кваліфікаційній роботі

За результатами перевірки випускної кваліфікаційної роботи (ВКР) здобувача вищої освіти освітнього ступеня (ОС) «магістр»

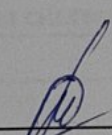
Борякін Андрій Олександрович

(прізвище, ім'я, по батькові)

на тему: Модернізація системи електропостачання за рахунок впровадження сонячних батарей

в роботі не виявлено порушень академічної доброчесності.

Керівник ВКР



(підпис)

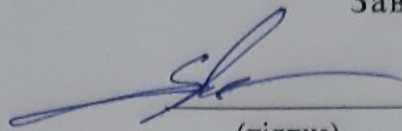
Сердюк Тетяна Миколаївна
(прізвище, ім'я, по батькові)

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Українській державний університет науки і технологій

Кафедра «Автоматика та телекомунікації»

«ДО ЗАХИСТУ»
Завідувач кафедри



(підпис)

Гаврилюк В.І.

(ПБ)

20 21 р. 12 « 16 »

ДИПЛОМНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня «магістр»

Галузь знань 15 «Автоматизація та приладобудування»

Спеціальність 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

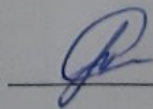
Освітня програма «Автоматика та автоматизація на транспорті»

Тема: Модернізація системи електропостачання за рахунок впровадження сонячних батарей

Theme: Modernization of the power supply system with the applying solar cells

Керівник дипломної роботи

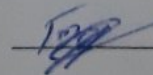
доцент



Сердюк Т. М.

Студент групи

АТ1922



Борякін А.О.

Student

АТ1922



Boriakin Andrii

Дніпро
2021

Українській державний університет науки і технологій

Факультет «Комп'ютерні технології і системи»

Кафедра «Автоматика та телекомунікації»

Спеціальність
Освітня
програма

151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»
«Автоматика та автоматизація на транспорті»

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Завідувач кафедри АТ

Гаврилук В.І.

« _____ » _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

до дипломної роботи на здобуття освітнього ступеню «магістр»

Борякін Андрій Олександрович

(прізвище, ім'я та по батькові)

1. **Тема роботи** Модернізація системи електропостачання за рахунок впровадження сонячних батарей

Затверджена наказом по університету № 630 ст від « 19 » 10 2020 р.

2. Термін подання студентом закінченої роботи 01.12.2021

3. Вихідні дані до роботи станція з кількість стрілок - 53; кількість підходів до станції - 5; схильність до сніжних заметів - присутня; кліматична зона – волога, електрична тяга

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Назва розділу	Обсяг %	Кількість креслень
1. Аналіз систем електропостачання залізниць України. Шляхи модернізації	30	
2. Впровадження сонячних батарей як джерел резервного електроживлення	60	
3. Модернізація схеми електроживлення поста ец за рахунок впровадження акумуляторів нового покоління	100	
4. Підвищення якості електроенергії, що споживається тяговими споживачами		

Студент

Науковий керівник

РЕФЕРАТ

Відомості про обсяг пояснювальної записки: 68 сторінок, 5 таблиць, 17 рисунків, 37 джерел літератури.

Ключеві слова: сонячні панелі, акумуляторні батареї, система тягового електропостачання, модернізація.

Об'єкт проектування: система тягового електропостачання

Мета магістерської роботи: Модернізація системи електропостачання за рахунок впровадження сонячних батарей.

В першому розділі виконано аналіз систем тягового електропостачання і оцінено шляхи модернізації.

В другому розділі розроблено схему паралельно-последовного підключення сонячних панелей, які можливо встановити на даху поста ЕЦ для забезпечення резервного електроживлення.

В третьому розділі виконано розрахунки системи резервного електроживлення пристроїв сигналізації, централізації та блокування.

В четвертому розділі описані питання якості електричної енергії і шляхи їх підвищення.

Галузь застосування: системи керування рухом поїздів на залізничному транспорті.

Висновок. Впровадження модернізованої системи електроживлення пристроїв СЦБ за рахунок застосування сонячних панелей і акумуляторів нового покоління дозволить знизити експлуатаційні витрати, підвищити якість електричної енергії, надійність електроживлення та безпеку руху поїздів.

ЗМІСТ

Вступ	5
1. Аналіз систем електропостачання залізниць України. Шляхи модернізації	7
1.1. Система тягового електропостачання постійного струму 3 кВ	8
1.2. Схема тягової підстанції постійного струму 3 кВ	10
1.3. Система тягового електропостачання змінного струму 25 кВ	12
1.4. Схема тягової підстанції змінного струму 25 кВ	14
1.5. Впровадження нових ресурсо-зберігаючих технологій в системах електропостачання	15
1.6. Висновки за розділом	17
2. Впровадження сонячних батарей як джерел резервного електроживлення	18
2.1. Сонячні батареї. Аналіз характеристик і можливостей щодо впровадження в системах електропостачання залізниць України	18
2.2. Моделювання річної роботи акумуляторної батареї	28
2.3. Висновки за розділом	34
3. Модернізація схеми електроживлення поста ЕЦ за рахунок впровадження акумуляторів нового покоління	35
3.1. Розрахунок навантаження на панелі електроживлення поста ЕЦ заданої станції	35
3.1.1. Розрахунок перетворювачів панелі ПВП1М-ЕЦК	35
3.1.2. Розрахунок акумуляторної батареї 24В	38
3.2. Резервне електроживлення автошлагбаумів	44
3.3. Використання сонячних батарей як резервного джерела для живлення вхідних світлофорів	49
3.4. Висновки за розділом	49
4. Підвищення якості електроенергії, що споживається тяговими споживачами	50
4.1. Параметри якості електроенергії	50
4.2. Підвищення якості електроенергії в розподільчих мережах тягових і не тягових споживачів	60
4.3. Висновки за розділом	62
Висновки	64
Література	65

ВСТУП

Останнім часом кожна галузь, яка бере участь у життєдіяльності людини, демонструє нововведення та задає сучасні вектори напряму розвитку галузі.

Наприклад, вже нікого не здивувати автомобілями з гібридним двигуном (двигун внутрішнього згоряння суміщений з електродвигуном) або всевітньо відомими електромобілями Tesla. Рясна наявність електроніки (різноманітність вбудованих датчиків, камер та інше) не є нововведенням.

Без перебільшення можна порівняти історію розвитку людства з розвитком енергетики. Першими джерелами енергії були саме поновлювані, м'язова сила людей і тварин, вітряні потоки, течія річок перетворені на механічну силу.

З розвитком людства змінилися і джерела одержання енергії, а саме використання корисних копалин, таких як кам'яне вугілля, нафту або ядерне паливо.

Постійно зростаючі потреби електроенергії покривалися модернізацією технологій переробки палива чи збільшення споживання ресурсів. Але згодом такий тип одержання електроенергії і в таких масштабах став виявляти негативні ефекти: хімічні, теплові, радіоактивні. У сумі з підвищенням складності видобутку та обробки палива всі ці фактори спонукало людство розвивати альтернативні способи отримання електроенергії.

Залізнична галузь так само не стоїть на місці та розвивається. Галузь містить безліч техніки, локомотиви, стрілки, світлофори, всілякі блокування, шлагбауми, станції та інше, що вимагає електричної енергії, частину якої можна отримати шляхом перетворення енергії тепла, що випромінюється сонцем в електричну енергію. Іншими словами, частину залізничної техніки, що вимагає електрики як живлення, можна перевести, повністю або частково, на альтернативне джерело енергії, тим самим почати економити бюджетні

кошти на витрати електроживлення, розвантажити електростанції та лінії передачі енергії до джерел споживання.

Впровадження в залізничну галузь альтернативного джерела енергії у вигляді сонячних панелей відкриває багато шляхів для розвитку галузі як зараз, так і в майбутньому.

Отже, тема магістерської дипломної роботи: «Модернізація системи електропостачання за рахунок впровадження сонячних батарей» є актуальною.

1. АНАЛІЗ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ЗАЛІЗНИЦЬ УКРАЇНИ. ШЛЯХИ МОДЕРНІЗАЦІЇ

Історично склалося так, що з моменту впровадження електричної тяги та загальної електрифікації країн, і до сьогоднішнього дня, в залізничних перевезеннях шукалися шляхи модернізації підвищення ефективності, зменшення втрат та підвищення ККД в електрифікованих вузлах залізничного транспорту.

На сьогоднішній день вже було впроваджено покращення в деякі вузли, але дослідження та роботи в галузі модернізації електропостачання ведуться щороку, у різних країнах та у різних департаментах.

З моменту електрифікації і до сьогодні вже було проведено такі роботи:

- підвищення коефіцієнта корисної дії електродвигунів внаслідок переходу на асинхронні тягові приводи;

- підвищення енергоефективності за рахунок впровадження нових мікроелектронних компонентів, які мають більшу продуктивність, менші габарити, меншу масу, підвищений термін експлуатації, мультифункціональні (1 елемент включає функціональність n-ї кількості інших елементів), порівняно зі своїми застарілими аналогами;

- вдосконалення системи рекуперації;

- впровадження сучасних, ефективніших, перетворювачів змінного струму;

- впровадження системи автоматизованого керування рухомим складом. Дана система дозволяє зняти частину навантаження з машиніста, за рахунок компонування елементів відображення параметрів стану важливих вузлів локомотива та параметрів, які можуть впливати на рух складу, більш компактні та інформативні групи, а також частина параметрів може аналізуватися мікропроцесорною системою та замінювати набір параметрів на виведений коефіцієнт. Частина функціоналу може бути виведена у автоматизовані вузли. Така система дозволяє скоротити час прийняття

рішень машиністом, але варто відзначити, що важливі рішення системи мають бути схвалені машиністом, до змін параметрів вузлів активного рухомого складу.

Важливо, що дуже багато досліджень ведеться у сфері рекуперації. Дані поліпшення дозволяють повертати до 5...10% електроенергії, що є непоганим «кешбеком» на тлі витрат на електроживлення залізниці.

1.1. Система тягового електропостачання постійного струму 3 кВ

Історично склалося, що система тягового електропостачання постійного струму постала першою. Цьому сприяло розвиток науки і промисловості, а саме виникнення галузей, де використовували повсюдно техніку, що вимагає джерело постійного струму. До цієї техніки також відноситься двигун постійного струму, що мав кращі характеристики, ніж інші двигуни, на той момент.

На даний момент існує багато різних модифікацій системи тяги постійного струму. По суті їх відмінності полягають тільки за рівнем підведеної напруги до електрорухомого складу. Структурна системи тягового електропостачання постійного струму дана на рис.1.1.

Електроживлення тягової мережі найчастіше забезпечується підключенням до шин 110 або 220 кВ. У свою чергу через знижувальний трансформатор, напруга знижується до 10 кВ. Після перетворення напруги, до шини 10 кВ, підключаються тяговий трансформатор і випрямляч, які виражають собою перетворювач. Випрямляч перетворює вхідний змінний струм на постійний напругою 3,3 кВ.

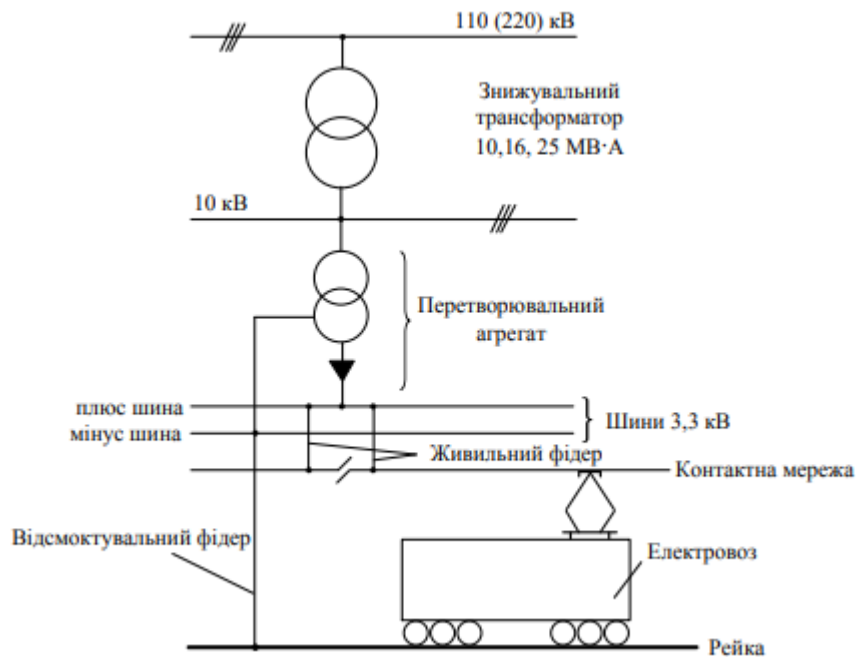


Рис.1.1. Принципова схема системи тягового електропостачання 3 кВ

Недоліки системи тягового електропостачання постійного струму 3,3 кВ:

- при використанні електротяги постійного струму виникає інтенсивна корозія металу, підземних кріплень та споруд. Виніс металу на рік може становити до 9 кг;
- втрата електроенергії може становити до 20 %.
- через значне струмове навантаження, потрібно будувати додаткові підстанції. Мінімальна відстань між підстанціями постійного струму становить 15..20 км. Цей аспект вносить додаткові витрати на зведення конструкцій, а також вимагає використання великого перерізу мідного проводу з еквівалентним перерізом 200-250 мм² на колію при інтенсивному русі на дільниці.

Переваги системи:

- рівномірне завантаження тягових двигунів постійного струму;
- старт і пуск тягових двигунів вносять незначний вплив на електромережу;

- незначний електромагнітний вплив на сусідні системи через використання постійного струму, що використовуються в електрифікації залізниці.

- ця система дозволяє більш просто та раціонально вирішувати питання, пов'язані з рекуперацією.

1.2. Схема тягової підстанції постійного струму 3 кВ

Схема тягової підстанції постійного струму 3 кВ показана на рис.1.2.

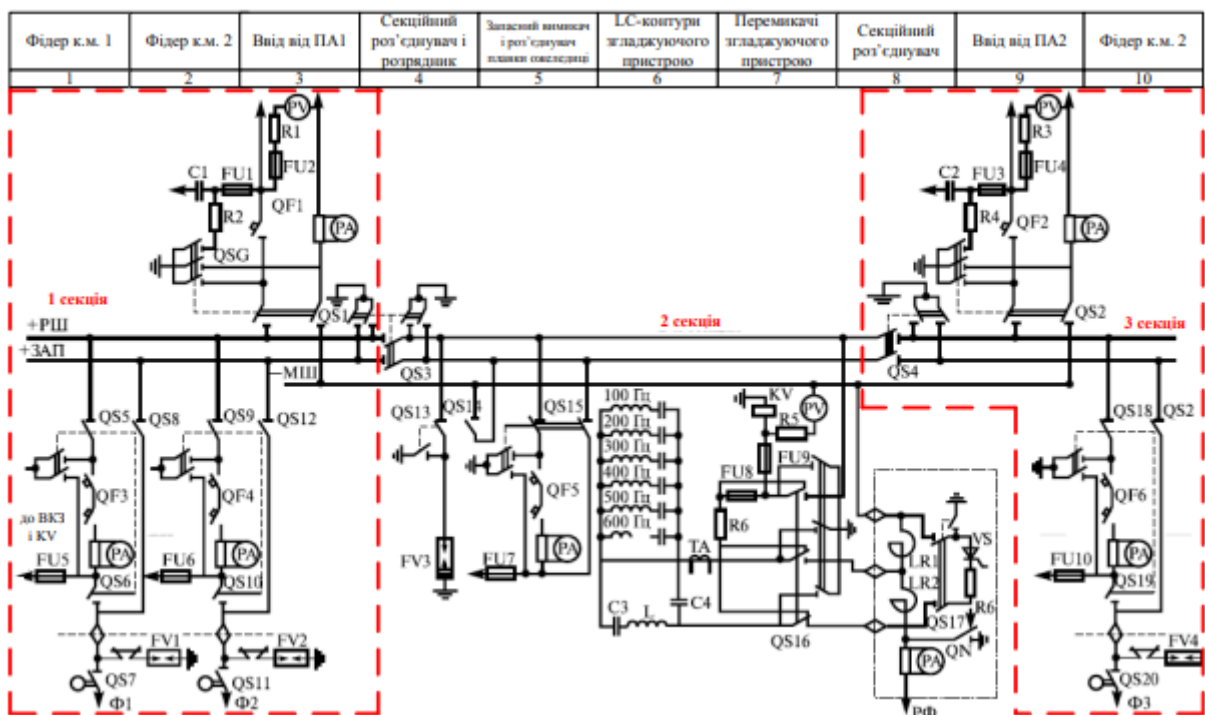


Рис.1.2. Схема тягової підстанції постійного струму

На рис.1.2 дано схему розподільного пристрою тягової підстанції постійного струму 3,3 кВ. Схема розділена на 3 секції, а також включає 3 шини, робочу, запасну і мінусову. У всі трисекції включаються робоча та запасна шини, але мінусова не входить до жодної секції. До першої секції підключають трансформатор, випрямляч та фідер контактної мережі. До другої секції підключають запасний вимикач, пристрій, що згладжує, і розрядник. До третьої секції підключають другий перетворюючий компонент

(трансформатор та випрямляч) та третій фідер контактної електричної мережі. Від мінусової шини (МШ) відводиться рейковий фідер, оскільки саме ним електричний струм повертається на підстанцію.

Недоліки:

- пускова просадка при пуску та розгоні локомотива, як вже вказувалося, одним із недоліків системи тяги постійного струму;

- значне споживання електрики для забезпечення потреб тягових споживачів До власних потреб відносять системи охолодження трансформаторів в спекотну пору року, пристрої та апаратура обігріву масляних вимикачів (якщо станція не була переобладнана на новіші вимикачі) і шаф з розподільною апаратурою;

- виділення територій для розміщення тягових підстанцій і всієї системи електропостачання, як показано на рис.1.3.

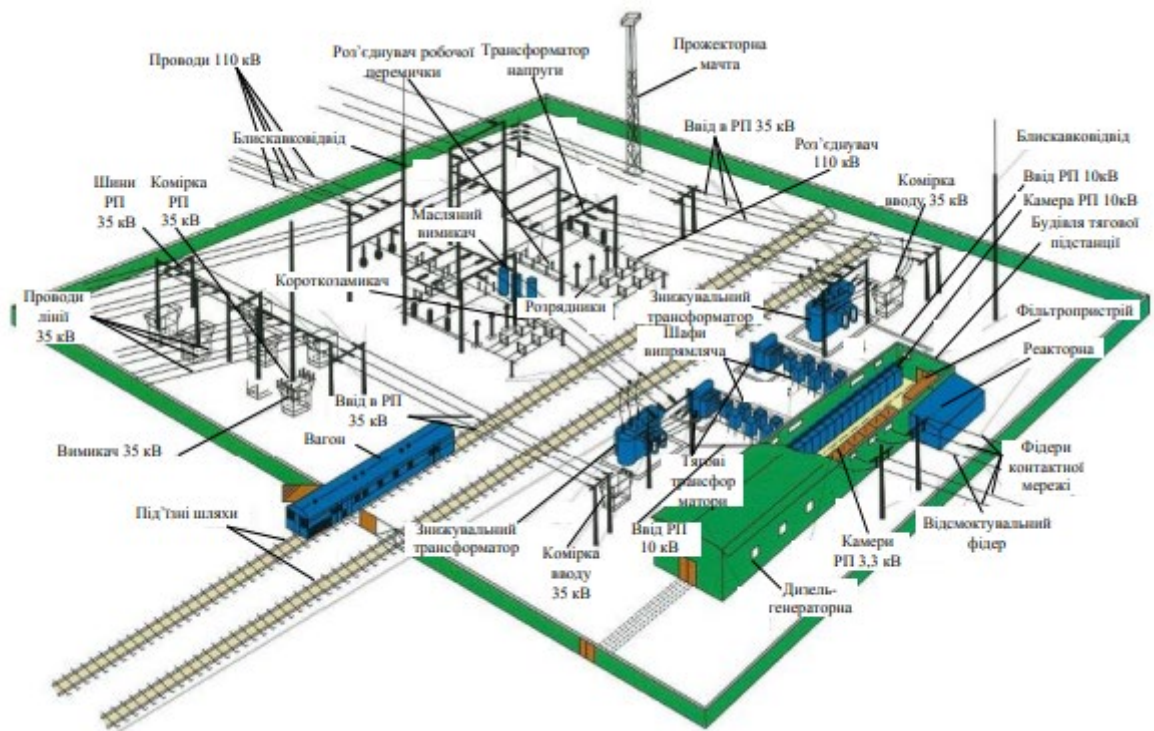


Рис.1.3. Зовнішній вигляд тягової підстанції постійного струму

1.3. Система тягового електропостачання змінного струму 25 кВ

В наш час, на електрифікованих ділянках залізниці з використанням змінного струму, найбільшого поширення набула система, що використовує електричний струм з напругою 25 кВ та 50 Гц. Аналогічні зарубіжні системи можуть використовувати струм з напругою 25 кВ частотою 50 або 60 Гц або 11-15 кВ та частотою 16 та 25 Гц.

Принципова схема тягового електроживлення змінного струму представлена на рис.1.4.

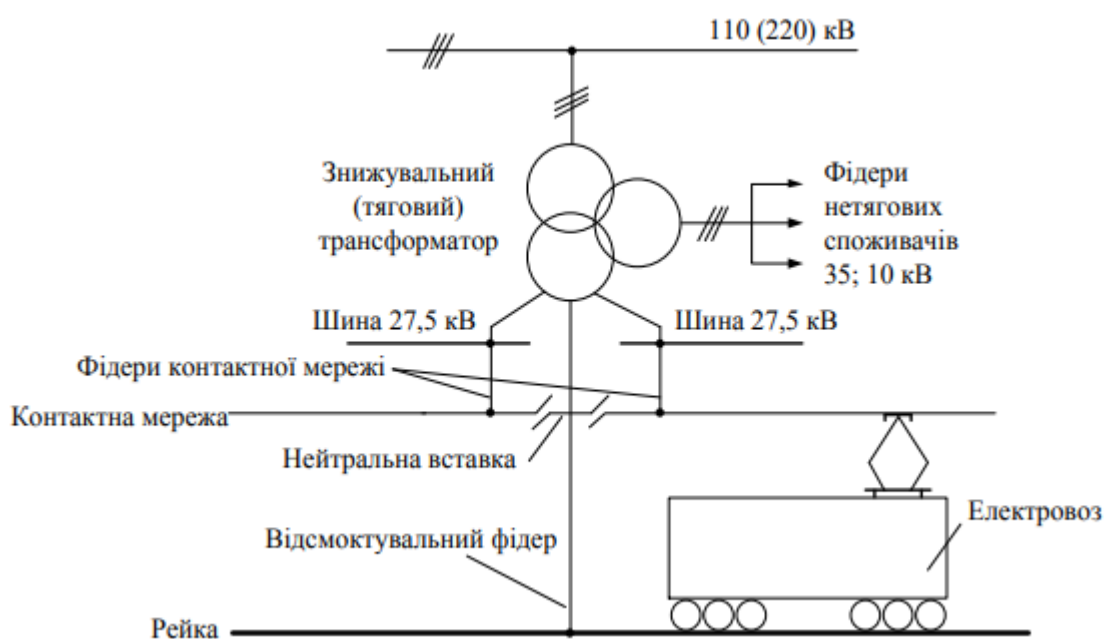


Рис 1.4. Принципова схема тягового електроживлення змінного струму 25 кВ 50 Гц

Така система є більш простою, в порівнянні з системою тягового електропостачання постійного струму, оскільки у цій системі застосовується лише один тяговий трансформатор і не використовують випрямляч. Живлення дільниць є однофазним. При застосуванні двигунів постійного струму з послідовним збудженням на локомотивах встановлюють трансформатор і випрямляч, при асинхронних тягових двигунах –

трансформатор і систему керування швидкістю обертання роторів двигунів на IGBT-транзисторах, окрім комутаційної апаратури.

Ця система забезпечує тягових споживачів нестандартною напругою 25 кВ, що дозволило впровадити комутаційну апаратуру (вимикачі, роз'єднувачі) з номінальною напругою 35 кВ.

Для живлення тягової мережі використовують підключення від шини 110 (220) кВ через зазначений вище трансформатор. Первинна обмотка – обмотка високої напруги 110 (або 220) кВ. Вторинна обмотка – обмотка низької або середньої напруги 27,5 кВ, яка використовується для живлення контактної мережі. Третинна обмотка – обмотка середньої або низької напруги 10кВ, яка використовується для живлення нетягових споживачів.

До шини, з напругою 27,5 кВ підключають фідери контактної мережі, при цьому фази А і забезпечують енергією різні плечі підстанції, а фаза «с» підключається до рейок.

Система тягового електроживлення змінного струму є перспективнішою та повсюдно використовується при побудові нових вузлів електрифікованої залізниці України.

Недоліки системи тягового електропостачання змінним струмом 25 кВ:

- ця система є джерелом електромагнітних перешкод, які впливають на апаратуру СЦБ, особливо на апаратуру і лінії зв'язку;
- реалізація механізму рекуперації складніша;
- здійснює значний вплив на зовнішню систему електропостачання;
- чутливість до якості електроенергії (у кривій споживаного струму можуть бути вищі гармоніки);
- несиметричний режим роботи групи трифазних трансформаторів здійснює погіршення показників якості енергії і через це знижується доступна для споживання потужність.

Переваги системи тягового електропостачання змінним струмом 25 кВ:

- система значно простіша;
- коротший термін будівництва;

- використання контактної мережі з меншим перерізом (95-125 мм²) і, як наслідок, зменшення потреби у кольорових металах.

- більш висока напруга для передачі електроенергії до локомотивів дозволяє збільшити відстань між тяговими підстанціями до 40...60 км і зменшити втрати електричної енергії і напруги.

Слід зазначити, що впровадження системи тягового електропостачання змінним струмом 25 кВ з екрануючим і підсилюючим проводами дозволяє значно знизити електромагнітний вплив на суміжні пристрої і системи і відповідно зменшити витрати електричної енергії. При цьому схема тягової підстанції залишається тією ж самою. Екрануючий провід з'єднується з рейковою мережею, а підсилюючий з контактною мережею.

1.4. Схема тягової підстанції змінного струму 25 кВ

Схема тягової підстанції змінного струму 25 кВ приведена на рис.1.5.

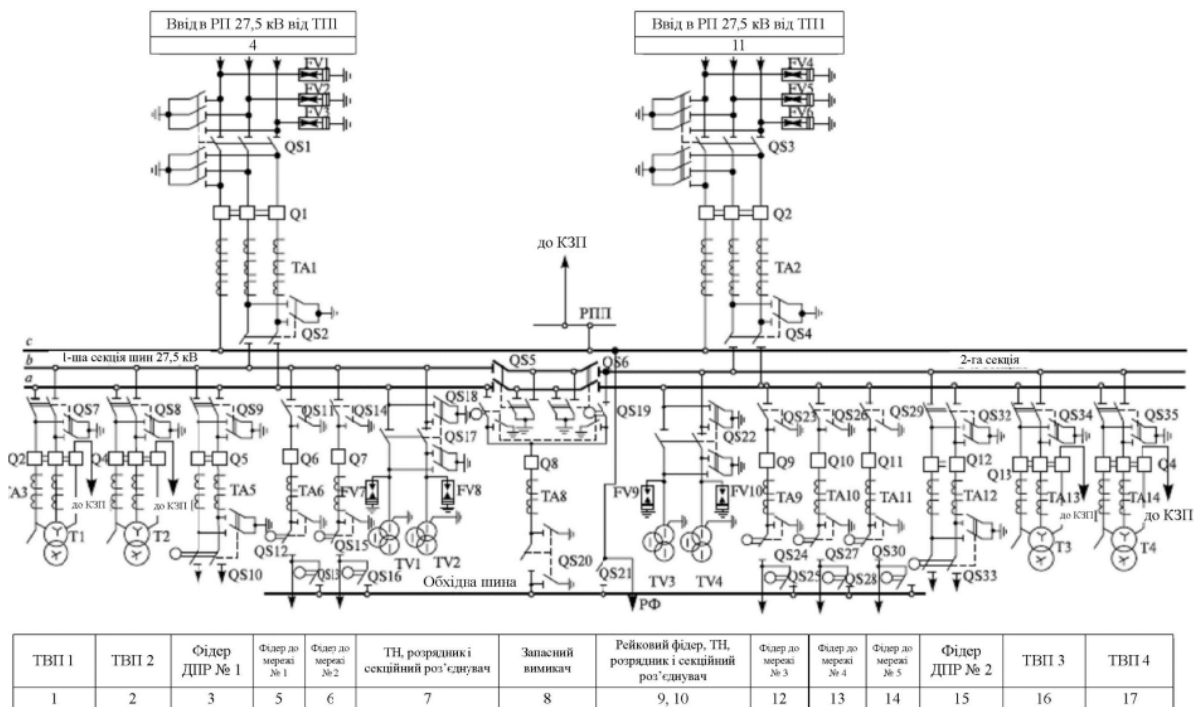


Рис.1.5. Схема РП тягової підстанції 27,5 кВ

Живлення даної системи, так само, реалізується від робочої системи шин. Фази А і В секціонуються та розділені спеціальними роздільниками QS5 та QS6 у яких присутні заземлюючі ніжки. Система роз'єднувачів дозволяє безпечно розділяти секції для виконання будь-якого ремонту на секціях, а також самих роздільників, з відключенням тільки секції, яка ремонтується.

На відміну від фази А і В, фаза не входить до складу секцій (не секціонується). Вона має зв'язок із заземлюючим контуром підстанції, тяговою рейкою, яким йде «відсмоктувальна» лінія (повітряний рейковий фідер). Таке підключення прибирає один з недоліків інших схем, відсутність навантаження тяговими струмами, а також виникнення різниці потенціалів між РПП і КЗП повністю виключаються.

Недоліки цієї системи вже були перераховані раніше. Але як і в схемі тягового електропостачання постійного струму, вразлива точка даної схеми, є забезпечення енергією самої апаратури. Тож у разі виникнення перерв в електропостачанні через аварійний випадок або з інших причин, до системи підключаються аварійні генератори, які так само схильні до фізичного зносу і вимагають своєчасного обслуговування та палива, що потребує бюджетних коштів.

1.5. Впровадження нових ресурсо-зберігаючих технологій в системах електропостачання

Хотілося б звернути увагу на нестачу електрифікації залізниці з історичного боку. Під час всесвітніх відкриттів та на старті впровадження електрифікації в залізницю, запити керівників держав та темпи впровадження дуже сильно скорочували час на аналіз та планування систем електропостачання. У давнину джерело, до якого підключалася залізниця, вже могло використовуватися для підпитки інших промислових об'єктів або житлових секторів. Згодом споживачі розширювали виробництво (або

житловий сектор) завширшки (збільшення обсягів і темпів виробництва за рахунок впровадження більшої кількості застарілої та неоптимізованої техніки, а не сучасної, більш продуктивної та менш вимогливої до електроживлення). Цей аспект призвів до перебоїв, а також до потреби зведення нових вузлів розподілу електроенергії, що в сукупності з поспіхом, так само призвело до менш логічних та оптимізованих планувань, аналізу та досліджень.

Більш основною проблемою електроживлення залізниці є технічний стан рухомого складу як пасажирських перевезень, так і вантажних, а також вузли, що відповідають за передачу і конвертацію електричного струму. Більшість тягових підстанцій застаріли та працюють у застарілим обладнанням (більше 25 років), що веде до значних втрат при передачі, згладжуванні та конвертації енергії. Також застарілий пасажирський рухомий склад, де використовуються старі технології та матеріали все ще використовується на залізниці, з мінімальним технічним ремонтом та модернізацією. Все це веде не лише до підвищених витрат на харчування та обслуговування залізниці електрикою, а й до зменшення безпеки руху пасажирських і вантажних перевезень.

Модернізація електропостачання залізниці України має починати насамперед з оновлення систем електропостачання, апаратури, парку рухомого складу. Використання сонячних батарей до деяких вузлів електрифікації залізниці може бути збитковими чи малоефективними.

Але навіть на цьому фоні є ділянки, де модернізація вузлів та впровадження додаткових (альтернативних) джерел електромережі буде не надто затратними, а місцями підвищуватимуть надійність пересування залізницями України.

1.6. Висновки за розділом

Система резервного електроживлення тягових підстанцій і їх власних потреб, пристроїв СЦБ потребує модернізації за рахунок впровадження необслуговуваних акумуляторів нового покоління: гелевих кислотних або Li-ion замість кислотних стаціонарних, що потребують спеціальних експлуатаційних умов і додаткове обслуговування, є небезпечними.

Встановлювати сонячні панелі на даху тягових підстанцій не є раціональним через значний електромагнітний вплив ліній електропередач і силового обладнання.

Але доцільним є оновлення системи резервного електроживлення пристроїв СЦБ. Для досягнення поставленої мети необхідно:

- проаналізувати режим та умови роботи акумуляторів і сонячних панелей;
- оцінити можливість впровадження акумуляторних батарей нового покоління і сонячних панелей в якості резервного джерела електроживлення для поста ЕЦ, вхідних світлофорів, автошлагбауму;
- підвищити параметри якості електричної енергії в тягових мережах.

2. ВПРОВАДЖЕННЯ СОНЯЧНИХ БАТАРЕЙ ЯК ДЖЕРЕЛ РЕЗЕРВНОГО ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ

2.1. Сонячні батареї. Аналіз характеристик і можливостей щодо впровадження в системах електропостачання залізниць України

Для початку аналізу треба з'ясувати, що таке сонячні батареї і як вони працюють [26-37].

Історично склалося, що нинішні сонячні панелі є першим науковим відкриттям у сфері альтернативного джерела енергії, який перетворює енергію, випромінювану сонцем на електричну.

Першим таким винаходом були сонячні колектори (сонячні термальні електростанції), в яких електрика вироблялася шляхом нагрівання води до точки кипіння, під сконцентрованим сонячним променям, виділення пари з води та обертання турбіни, яка у свою чергу виробляє електричну енергію. Даний підхід має місце, але за такої технології є великі втрати, як тепло, так і втрати внаслідок тертя механізмів у турбіні.

Сучасні сонячні панелі працюють за іншим принципом. Вони складаються з кола фотоелементів, які перетворюють сонячну енергію безпосередньо на електричний струм. Такий процес називається фотоелектричним ефектом.

Дане явище відкрив французький фізик Олександр Едмон Беккерель в середині XIX століття. Через півстоліття, спираючись на роботу Олександра Беккереля, був створений перший фотоелемент, що діє, російським вченим Олександром Столетовим. Альберт Ейнштейн детальніше вивчив цей феномен і кількісно описав у своїх роботах у XX столітті [1].

Принцип дії сонячних панелей такий. Як говорилося раніше, сонячна панель складається з фотоелементів, які в свою чергу є напівпровідниками. Напівпровідниковий матеріал – матеріал, в атомах якого є зайві електрони (n-тип) або недолік електронів (p-тип). Напівпровідниковий фотоелемент –

елемент, що складається з 2х шарів напівпровідникових матеріалів із різною провідністю. Як катод використовують n-шар, а анода – р-шар.

Принцип роботи такої схеми дуже простий, зайві електрони n-шару залишають свої атоми і переходять у р-шар, такий ефект можливий лише під освітленням панелей сонячним світлом. Таким чином, використовуючи навантаження, можна реалізувати цикл переходу електронів з одного шару в інший. Під навантаженням можна розуміти не тільки джерело прямого споживання електроенергії, а й джерело накопичення енергії (перетворюючи електричну енергію на хімічну) — таку як акумуляторна батарея. Схема, що пояснює роботу сонячної панелі дана на рис. 2.1.

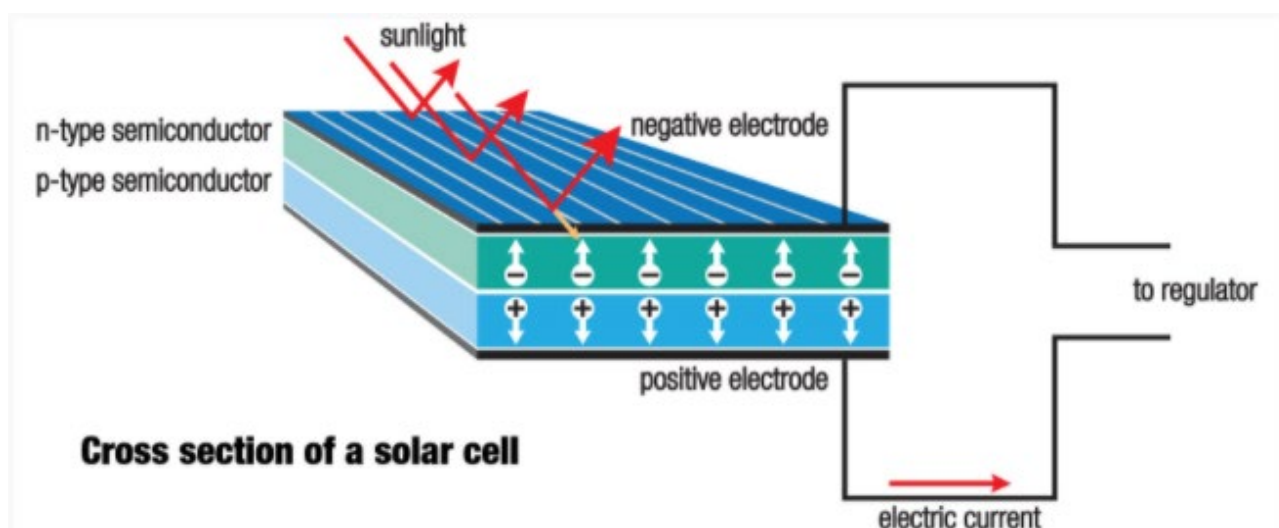


Рис 2.1. Графічна схема, що демонструє роботу сонячної панелі

Першим фотоелектричним матеріалом був селен, але його ККД був настільки малий (менше одного відсотка), що матеріал не стали використовувати для виробництва сонячних панелей.

25 квітня 1948 року фахівці компанії Bell Laboratories заявили про створення сонячної панелі на основі кремнію. На той час це було відкриттям, оскільки ця сонячна панель мала ефективність 6%.

У результаті можна сказати, що навіть на початку зародження фотоелектричних елементів вже були суперечки та дослідження в галузі

хімічних елементів, які можна використовувати для сонячних панелей для досягнення максимального коефіцієнта корисної дії. Дані дослідження проводяться і до сьогодні.

Таблиця 2.1

Характеристика елементів сонячних панелей

Тип	Коефіцієнт фотоелектричного перетворення, %
<i>Кремнієві</i>	24,7
Коефіцієнт фотоелектричного перетворення, %	
Коефіцієнт фотоелектричного перетворення, %	
Коефіцієнт фотоелектричного перетворення, %	
Коефіцієнт фотоелектричного перетворення, %	10,4
<i>III-V</i>	
GaAs (кристалічний)	25,1
GaAs (тонкоплівковий)	24,5
GaAs (полікристалічний)	18,2
InP (кристалічний)	21,9
<i>Тонкі плівки халькогенідів</i>	
CIGS (фотоелемент)	19,9
CIGS (субмодуль)	16,6
CdTe (фотоелемент)	16,5
<i>Аморфний/Нанокристалічний кремній</i>	
Si (аморфний)	9,5
Si (нанокристалічний)	10,1
<i>Фотохімічні</i>	
На базі органічних барвників	10,4
На базі органічних фарбників (субмодуль)	7,9
<i>Органічні</i>	
Органічний полімер	5,15
<i>Багатошарові</i>	
GaInP/GaAs/Ge	32,0
GaInP/GaAs	30,3
GaAs/CIS (тонкоплівковий)	25,8
a-Si/mc-Si (тонкий субмодуль)	11,7

Фотоелектричний елемент або фотоелектричний перетворювач (ФЕП) в єдиному екземплярі виробляє дуже мало електрики, а значить для збільшення електроенергії такі елементи об'єднують у групи.

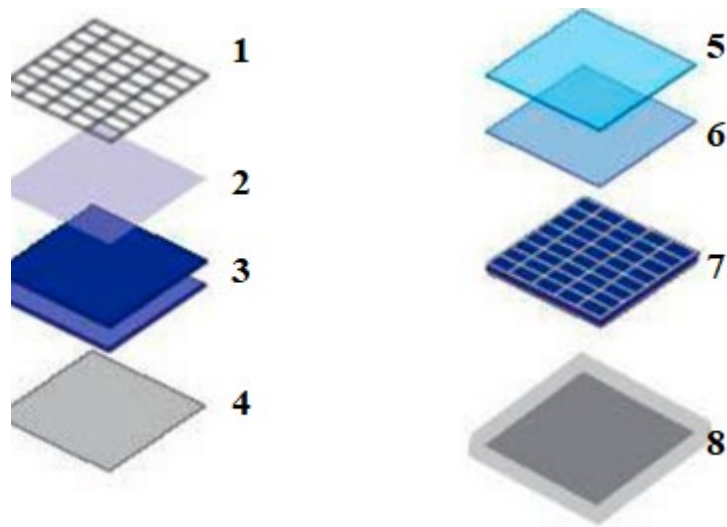


Рис. 2.2. Декомпозиційна схема сонячного модуля.

Умовні позначення: 1 – пластини провідника, 2 – покриття анти відблиску, 3 – кремній n- і р-типу, 4 - металева підкладка, 5 – скляне покриття, 6 - антибліковий лист, 7 – фотоелемент, 8 – каркас.

У конкретних випадках використання одного сонячного модуля покриває конкретні потреби, але найчастіше модулі, що складаються з фотоелектричних елементів, поєднують ще більші схеми — сонячні батареї.



Рис. 2.3. Формування сонячної батареї із базових фотоелементів

Умовні позначення: 1 - сонячна батарея, 2 – модуль, 3 - фотоелектричний елемент.

Реалізація підключення пристроїв [26-31].

В наш час найбільшу популярність набули схеми, що складаються з:

- 1) Сонячної батареї
- 2) Контролера заряду
- 3) Акумуляторні батареї.
- 4) Інвертору.

Монтажні роботи виконують у такому порядку:

- 1) Акумулятори підключають до контролера (він контролює стан акумуляторних батарей від перезаряду та від повного розряду).
- 2) До контролера підключаються сонячні батареї.
- 3) Інвертор, який перетворює напругу, що знімається з акумуляторних батарей у потрібну напругу, яка потрібна споживачеві, підключається до АКБ.
- 4) Схема модернізується з потреб системи для якої зводиться сонячна електростанція і може містити запобіжники, реле, різні споживачі енергії та інше.

Схема, що приведена на рис.2.4, дозволяє використовувати електричну енергію, що сгенерована за допомогою сонячних батарей безпосередньо в споживача без основного живлення. Ця схема має право на життя, але її варто впроваджувати лише на тих ділянках залізниці, які мають слабкі потреби у електроживленні і мають провідну позицію у регулюванні рухом.

Важливо знати, навантаження, що резервується, це ті споживачі, які повинні в будь-який час функціонувати, резервне освітлення, пульти управління, системи зв'язку та інше. Не навантаження, що не резервується, — це ті споживачі, знеструмлення яких, не впливає на функціонування залізничного транспорту.

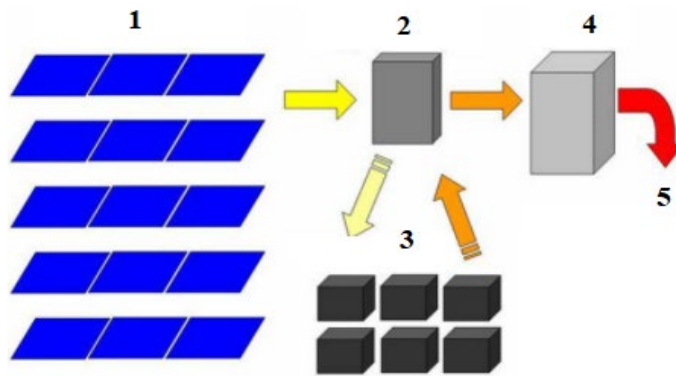


Рис. 2.4. Схема підключення системи перетворення сонячної енергії споживача. Умовні позначення: 1 – сонячні батареї, 2 – контролер, 3 – акумулятор, 4 – інвертор, 5 – вузли залізниці.

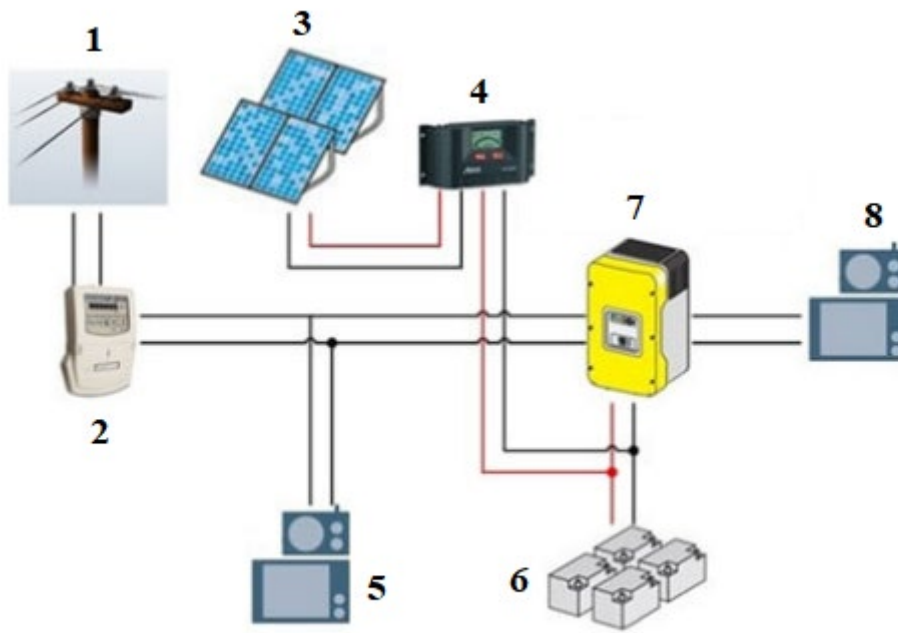


Рис. 2.5. Схема підключення системи перетворення сонячної енергії до споживача паралельно до основної мережі. Умовні позначення: 1 – основне джерело електроенергії (Мережа), 2 – лічильник, 3 – сонячна батарея, 4 – контролер, 5 – навантаження не резервується, 6 – акумуляторні батареї, 7 – інвертор, 8 – навантаження, що резервується.

При проектуванні системи електропостачання за допомогою сонячних батарей, за потреби, потрібно ретельно вибрати електронні компоненти [32-37].

Сучасні контролери та інвертори мають функцію лічильника або виходи для підключення зовнішніх джерел управління та зняття показань.

Таким чином, при потребі можна використовувати сучасний пристрій, для контролю за станом електромережі, проводити статистичний аналіз роботи сонячних батарей і контролювати весь вузол, до якого підключені ці сонячні батареї.

Схеми підключення.

Кожен вузол у системі має свої вольт амперні характеристики та свої граничні значення. Ситуація, в якій споживач оптом купує сонячні батареї та акумулятори без теоретичних знань у галузі електрики – неприпустимі [27-31].

Сонячні панелі мають такі характеристики:

– номінальна напруга сонячної батареї - як правило 12В або 24В, але існують і винятки.

– Напруга при піковій потужності V_{mp} – напруга, при якій панель видає максимальну потужність.

— Напруга холостого ходу V_{xx} - напруга без навантаження (важливо при виборі контролера заряду АКБ).

— Максимальна напруга в системі V_{dc} – визначає максимальну кількість панелей, об'єднаних разом.

— Струм I_{mp} - струм при максимальній потужності панелі.

— Струм I_{sc} - струм короткого замикання, максимально можливий струм панелі.

Дані характеристики можуть змінюватися в залежності від типу осередків, які використовуються в сонячній батареї, розміру батареї та інше.

Також необхідно узгодити вхідні та вихідні параметри струму між сонячними батареями, контролером, акумуляторами та інвертором.

Сонячні панелі та акумулятори також відповідають законам паралельного та послідовного з'єднання провідників.

Для досягнення необхідних показників сонячні панелі або акумуляторні батареї можна з'єднувати паралельно, послідовно або використовувати змішаний спосіб підключення.

Залежно від того, яка схема підключення сонячних панелей буде обрана, будуть визначатися характеристики системи сонячних панелей і підбиратися відповідний контролер заряду.

Для прикладу візьмемо 2 сонячні панелі, які можна було б встановити на даху поста ЕЦ для забезпечення резервної постійної напруги 24 В на виході, та зробимо розрахунки [26-31].

1) Послідовне з'єднання сонячних панелей показано на рис.2.6.

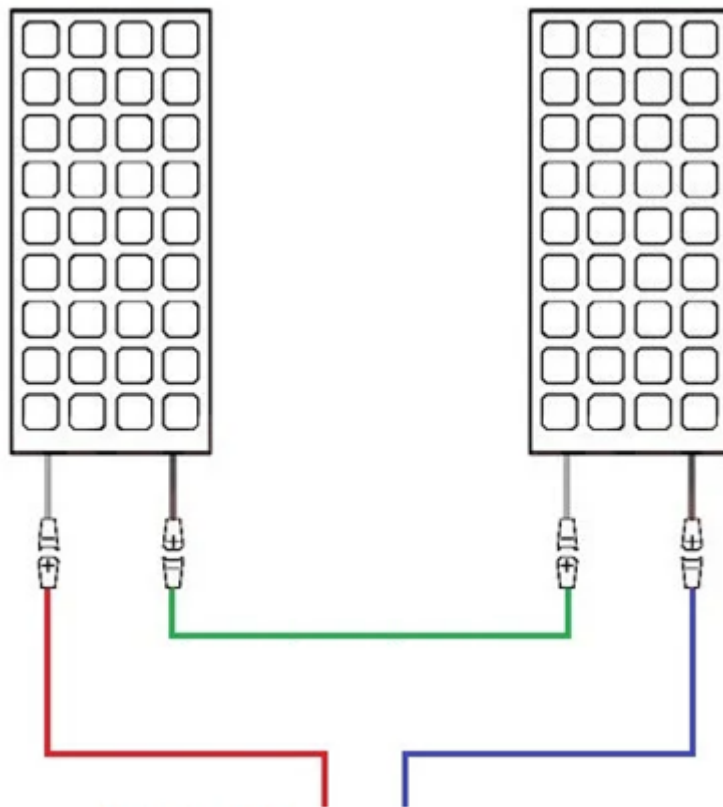


Рис. 2.6. Послідовне з'єднання двох сонячних панелей

Характеристики сонячної панелі:

- номінальна напруга сонячної батареї $U_{\text{вих}} = 12\text{В}$;
- напруга при піковій потужності $V_{\text{mp}} = 18.46\text{ В}$;
- напруга холостого ходу $U_{\text{oc}} = 22.48\text{В}$;
- напруга максимальна в системі $V_{\text{dc}} = 1000\text{В}$;

– струм у точці максимальної потужності $I_{mp} = 5.42A$;

– струм короткого замикання $I_{sc} = 5.65A$

Розрахунок вихідних параметрів:

$U_{вих} = U_{вих} \text{ 1 панелі} \cdot \text{кількість панелей}$

$U_{вих} = 12V \cdot 2 = 24V$

$I_{mp} = 5,42 \text{ A}$ при послідовному з'єднанні вихідний струм дорівнює струму однієї панелі

$U_{хх} = V_{хх} \text{ однієї панелі} \cdot \text{кількість панелей}$

$U_{хх} = 22.48V \cdot 2 = 44,96 \text{ V}$

2) Паралельне з'єднання

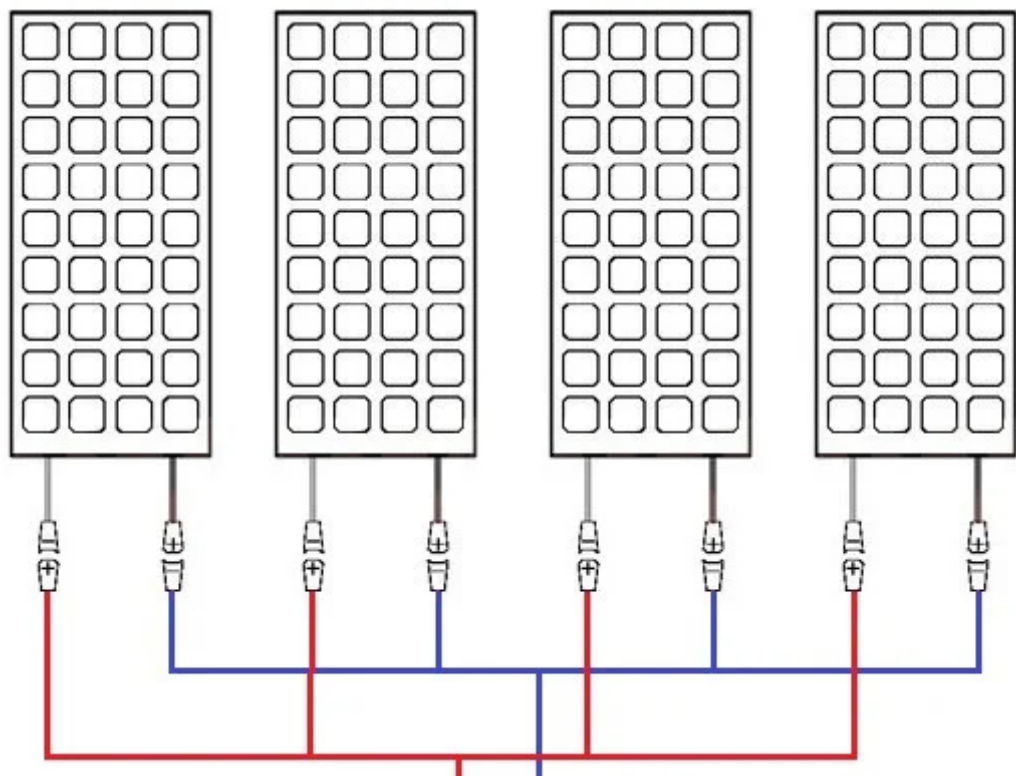


Рис.2.7. Паралельне з'єднання чотирьох сонячних панелей.

Характеристики сонячних панелей залишаються ті ж самі.

Розрахунок вихідних параметрів:

$U_{вих} = U_{вих} \text{ однієї панелі}$

$U_{вих} = 12V$

$I_{mr} = I_{mr} \text{ однієї панелі} \cdot \text{кількість панелей}$

$I_{mr} = 5.42 \cdot 4 = 21.68 \text{ A}$

$U_{xx} = 22.48 \text{ V}$

3) Послідовно-паралельне з'єднання сонячних панелей.

В нашому випадку для забезпечення постійного струму резервування 28,28 А напругою 24 В необхідно застосувати послідовно-паралельне з'єднання батарей при чому 2 ланцюга будуть з'єднані послідовно, в кожному з котрих 6 сонячних панелей будуть підключені паралельно між собою.

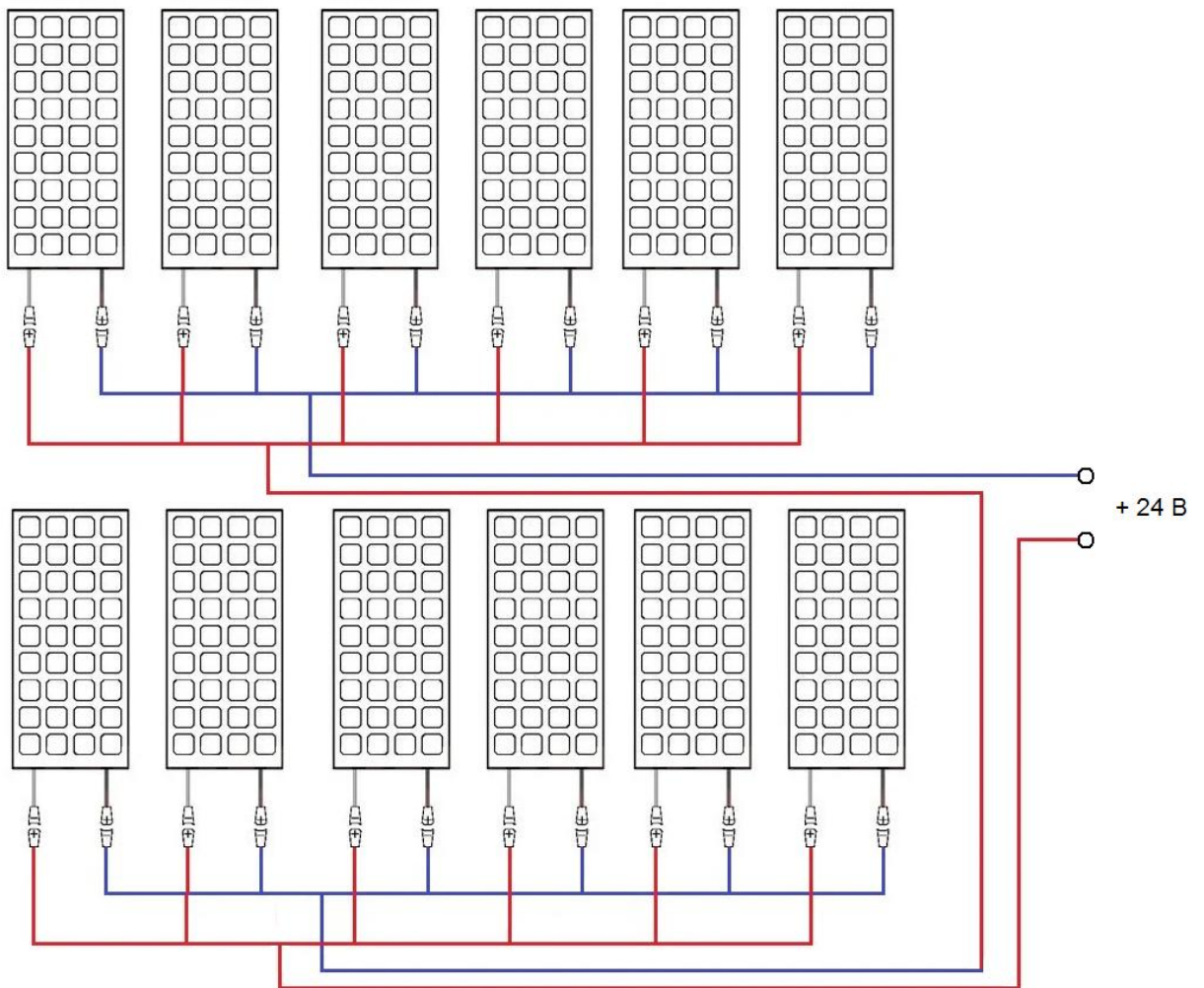


Рис.2.8. Послідовно-паралельне з'єднання сонячних панелей

Характеристики сонячних панелей залишаються ті ж самі.

Розрахунок вихідних параметрів:

$U_{\text{вих}} = \text{сумі } U_{\text{вих}} \text{ двох послідовно з'єднаних панелей}$

$$U_{\text{вих}} = 12 \cdot 2 = 24\text{В}$$

$$U_{\text{хх}} = 22.48 \cdot 2 = 44,96 \text{ В}$$

$$I_{\text{mr}} = 5.42 \cdot 6 = 32,52 \text{ А}$$

Комбінуванням схем підключення панелей і АКБ можна підлаштовувати вхідні та вихідні параметри під параметри електроніки, що використовуються у схемі.

Впровадження та використання сонячних батарей у системи електропостачання залізниці України дозволить заощадити кошти, що виділяються на електропостачання вузлів залізниці, а також реалізувати додаткові джерела живлення або використовувати дані схеми для резервного живлення в аварійних випадках або короточасних ремонтах. Завдяки комбінуванню сонячних панелей та АКБ можна досягти необхідних параметрів для потрібних електроспоживачів, що дозволить використовувати базову схему у різних вузлах електропостачання. Також нарощування чи зменшення схеми відповідає базовим електричним законам, що дозволяє проводити операції зі зміни схеми без кардинального зміни даної схеми, розрахунки проводяться у мінімальні терміни, а заміна окремих компонентів може здійснюватися модульно. Іншими словами, при поломці сонячної панелі або виході з ладу АКБ або іншого вузла системи, можлива повна заміна модуля в найкоротші терміни, без кардинального пере налаштування системи та в найкоротші терміни.

2.2. Моделювання річної роботи акумуляторної батареї

Сонячна батарея або фотоелектрична система ділиться на типи:

- резервні системи живлення.
- системи, які з'єднані з основною електричною мережею.

- автономні системи.

Для розрахунків візьмемо резервні системи живлення. Для отримання потрібних вихідних характеристик панелі з'єднують між собою, така система називається фотоелектричним генератором. При підключенні панелей важливо дотримуватися їх вихідних параметрів, тобто потрібно вибирати максимально схожі за своїми характеристиками панелі. При відсотковому збільшенні різниці в характеристиках зростає і відсоток втрат, так за 11% розбіжності втрати становлять ~6,6%.

Так само при складанні системи важливо врахувати всі ризики у вигляді, переразряду, перезаряду АКБ, КЗ, температурні ризики (зміна вхідних та вихідних показників зі зміною температури). Сучасні контролери харчування покривають своїм функціоналом більшість ризиків.

Для прикладу була взята сонячна панель доступна для замовлення LG LG320N1C-G4 NeON2 G4 320W CELLO 12BB, Mono (рис.2.9).

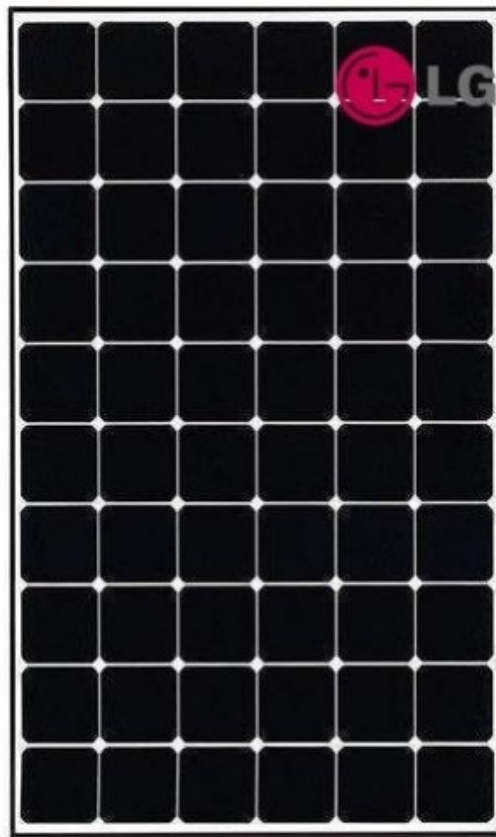


Рис.2.9. Сонячна панель LG LG320N1C-G4 NeON2 G4 320W

Характеристики сонячної панелі LG LG320N1C-G4 NeON2 G4 320W

Характеристика	Позначення	Значення
Максимальна потужність	P1	320 Вт
Максимальна напруга	U _{max}	33,6 В
Максимальний струм	I _{max}	9,53 А
Струм короткого замикання	I _{kz}	10,5 А
Максимальна напруга системи	U _{max}	40,9 В
Вага	m	17 кг
Довжина	l	1,64 м
Ширина	b	1 м
Товщина	h	40 мм
Загальна площа	S	1,64 м ²

Виходячи з базових правил послідовного та паралельного з'єднання, то можна сказати, що вихідний струм системи визначається числом сонячних панелей, підключених паралельно, а вихідна напруга — числом панелей, підключених послідовно.

Маючи інформацію про передбачувану потужність усієї системи (для розрахунку візьмемо 15000 Вт), визначаємо необхідну кількість панелей:

$$N = \frac{P}{P_1}, \quad (2.1)$$

$$N = \frac{9600}{320} \approx 47 \text{ шт.}$$

де P - потужність усієї системи, Вт.

P₁ – потужність однієї панелі, Вт

Перерахунок кількості сонячних панелей, з урахуванням способу підключення.

Кількість сонячних панелей, з'єднаних послідовно,

$$N_{pos} = \frac{U_{in}}{U_{max}} \quad (2.2)$$

$$N_{pos} = \frac{230}{33,6} \approx 7 \text{ шт.}$$

де U_{in} - вхідна напруга встановленого інвертора, В; U_{max} - напруга сонячної панелі, В.

Потужність послідовно з'єднаних панелей,

$$P_{pos} = N_{pos} * P_1 \quad (2.3)$$

$$P_{pos} = 7 * 250 = 2240 \text{ Вт}$$

Кількість панелей, з'єднаних паралельно,

$$N_{par} = \frac{P_{max}}{P_{pos}} \quad (2.4)$$

$$N_{par} = \frac{15000}{2240} = 7 \text{ шт.}$$

де P_{max} – потужність системи, Вт.

Загальна кількість панелей у системі,

$$N = N_{par} * N_{pos} \quad (2.5)$$

$$N = 7 * 7 = 49 \text{ шт.}$$

Загальна площа панелей,

$$S_{zag} = S * N_{\text{б}} \quad (2.6)$$

$$S_{zag} = 1,64 * 49 = 80,36 \text{ м}^2$$

Відстань між рядами сонячних панелей,

$$L = h * \sin \frac{((180 - (\theta + \beta)) * \frac{\pi}{180})}{\sin(\frac{\theta * \pi}{180})} \quad (2.7)$$

$$L = 1,64 * \sin \frac{((180 - (45 + 15,5)) * \frac{3,14}{180})}{\sin(\frac{15,5 * 3,14}{180})} \approx 3,42 \text{ м}$$

де θ – кут нахилу сонячної панелі; β - оптимальний кут нахилу сонця.

Схема розміщення рядів сонячних панелей показана на рис.2.10.



Рис.2.10. Схема розміщення сонячних панелей

Діаграма розподілу інтенсивності сонячної радіації протягом доби для різних місяців року для регіону м. Дніпро та Дніпропетровської області показана на рис.2.11 [33-37].

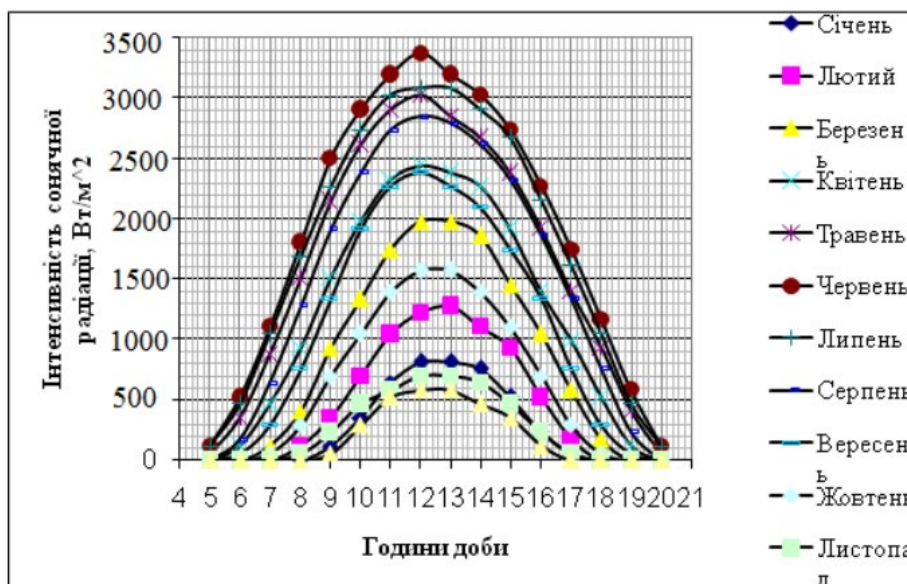


Рис.2.11. Діаграма розподілу інтенсивності сонячної радіації протягом доби для різних місяців року для регіону м. Дніпро

З урахуванням діаграми розподілу інтенсивності сонця у різний час та різні місяці, використовуючи онлайн калькулятор, то отримуємо такі розрахунки [34 - 36].

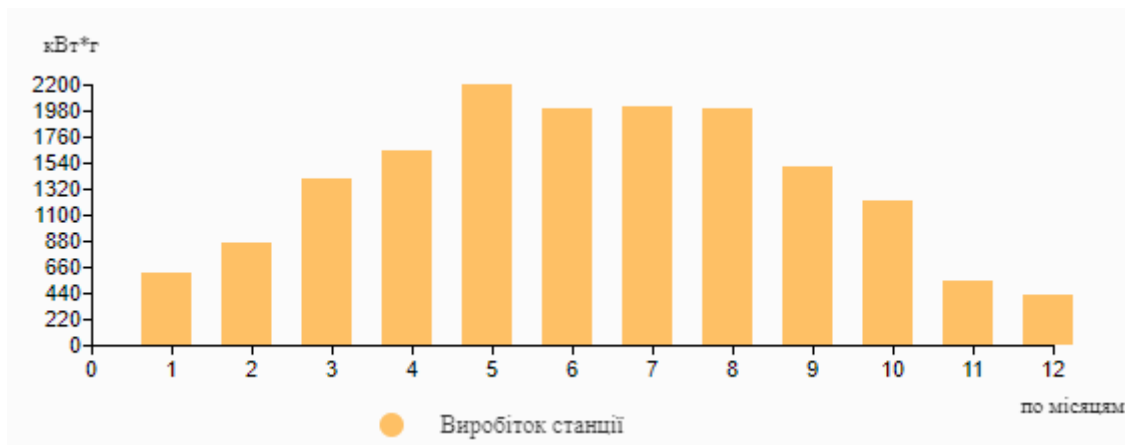


Рис.2.12. Графік виробітку електрики сонячною електростанцією по місяцях

Проаналізувавши графік, ми можемо отримати таку інформацію, що сонячна станція потужністю 15 кВт, що займає площу 80,36 м², має показник 16446,85 кВт*годину.

Варто враховувати, що цей показник є розрахунковим і фактичне значення може бути іншим. На середньорічне значення можуть впливати

багато факторів, кут установки панелі, спрямованість панелі, освітленість місцевості, чистота лицьової сторони сонячної панелі, якість монтажу електричного обладнання, запиленість повітря та інше.

2.3. Висновки за розділом

Розрахована схема паралельно-послідовного підключення сонячних панелей, які можливо встановити на даху поста ЕЦ для забезпечення резервного електроживлення постійної напруги 24 В. Їх кількість становить 12. Струм резервування 32 А.

Досліджено роботу сонячних батарей в Дніпропетровській області протягом року.

3. МОДЕРНІЗАЦІЯ СХЕМИ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ ПОСТА ЕЦ ЗА РАХУНОК ВПРОВАДЖЕННЯ АКУМУЛЯТОРІВ НОВОГО ПОКОЛІННЯ

3.1. Розрахунок навантаження на панелі електроживлення поста ЕЦ заданої станції

3.1.1. Розрахунок перетворювачів панелі ПВП1М-ЕЦК

Вихідні дані: кількість стрілок – 53; кількість підходів до станції – 5; маршрутні покажчики – відсутні, схильність до сніжних заметів – присутня; кліматична зона – волога.

При безбатарейній системі живлення ЕЦ від перетворювачів (інверторів) типу ИТ-0,3-24, установлених на панелі ПВП1М-ЕЦК, одержують живлення (у випадку відключення всіх джерел змінного струму) наступні навантаження гарантованого змінного струму: станційні блоки дешифраторів кодового автоблокування прилягаючих до станції блок-ділянок; схеми зміни напрямку руху і контролю прилеглих перегонів (при організації двостороннього руху поїздів); схеми ДСН на прилеглих перегонах; схеми ДСН на станції; схеми огороження поїздів.

Номінальні (максимальні) потужності цих навантажень приведені в розрахунковій табл. 3.1.

Розрахунок потужності перетворювачів виконується за результатами розрахунку максимальної потужності навантажень S_M , ВА,

$$S_M = \sqrt{(\Sigma P_M)^2 + (\Sigma Q_M)^2}, \quad (3.1)$$

$$S_M = \sqrt{246,5^2 + 149^2} = 288,03 \text{ ВА.}$$

Приймаємо перетворювачі потужністю 300 Вт.

Розрахунок навантажень перетворювача ППВ1М

Навантаження	Вимірювач	Потужність навантаження		Кількість одиниць виміру	Максимальна потужність навантажень	
		P , Вт	Q , вар		P , Вт	Q , вар
Схема зміни напрямку (блок ДСПН-2)	Підхід	12,7	6,0	5	63,5	30
Схема ДСН	Пост ЕЦ	36,5	5,0	1	36,5	5
Станційні дешифратори автоблокування	Підхід	16,6	16,8	5	83	84
Схема ДСН на перегоні (блок ДСПН-2)	Підхід	12,7	6,0	5	63,5	30
Всього		–	–		246,5	149

Треба мати на увазі, що навантажувальна здатність перетворювачів істотно залежить від коефіцієнта потужності навантаження

$$\cos\varphi_M = \frac{\Sigma P_M}{S_M}, \quad (3.2)$$

$$\cos\varphi_M = \frac{246,5}{288,03} = 0,856.$$

Реальний коефіцієнт потужності виявився меншим 0,9, тому навантаження на перетворювач повинно бути зменшене.

Припустиме в цьому випадку навантаження, яке можна підключити до перетворювача визначається за формулою:

$$P_{\text{доп}} = \frac{1,76 \cdot P_{\text{ном}}}{1 + \frac{1,57 \cdot \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_M}}{\cos \varphi_M}}, \quad (3.3)$$

$$P_{\text{доп}} = \frac{1,76 \cdot 300}{1 + \frac{1,57 \cdot \sqrt{1 - 0,856^2}}{0,856}} = 270,91 \text{ Вт.}$$

Оскільки потужність навантаження менша ніж $P_{\text{доп}}$, то залишаємо перетворювачі потужністю 300 Вт.

Визначаємо коефіцієнт завантаження перетворювачів:

$$K_{\text{н}} = \frac{P_{\text{н}}}{P_{\text{ном}}}, \quad (3.4)$$

де $P_{\text{ном}}$ – номінальна потужність перетворювачів з урахуванням його настройки на максимальну потужність навантаження

$$K_{\text{н}} = \frac{246,5}{300} = 0,822.$$

Коефіцієнт потужності впливає не тільки на використання встановленої потужності перетворювачів, але також і на їх коефіцієнт корисної дії (ККД). Тому ККД перетворювачів визначається з урахуванням коефіцієнта потужності η_{φ} та завантаження $\eta_{\text{н}}$ [12]:

$$\eta_{\text{п}} = \frac{\eta_{\varphi} \cdot \eta_{\text{н}}}{0,82}, \quad (3.5)$$

$$\eta_{\text{п}} = \frac{0,77 \cdot 0,82}{0,82} = 0,77.$$

Із урахуванням величин $P_{\text{н}}$ та $\eta_{\text{п}}$ визначається струм перетворювачів $I_{\text{п}}$, який споживається перетворювачем від батареї, і складає

$$I_{\text{п}} = \frac{P_{\text{н}}}{\eta_{\text{п}} \cdot U_{\text{б}}}, \quad (3.6)$$

де $U_{\text{б}}$ – номінальна напруга акумуляторної батареї, яка складає 24 В.

$$I_n = \frac{246,5}{0,77 \cdot 24} = 13,34 \text{ A}$$

3.1.2. Розрахунок акумуляторної батареї 24В

Розрахунок батареї полягає у визначенні її ємності і виборі типу акумуляторів СК по індексу.

При визначенні ємності акумуляторів варто виходити з умов експлуатації батареї в основному і додатковому режимах резервування [12,13].

Основний режим резервування відповідає живленню протягом 2 годин від батареї всіх гарантованих навантажень ЕЦ в аварійних умовах при відключенні джерел змінного струму, у тому числі і ДГА.

Споживачами гарантованого живлення від батареї в цьому випадку є:

- 1) релейна апаратура ЕЦ (витрата струму I_{α} у розрахунку на одну стрілку складає 0,262 А) ;
- 2) прилади живильної установки – реле, блоки, сигналізатори заземлень та ін. (споживаний приладами струм $I_{рп}$ не залежить від кількості стрілок і в цілому на посту ЕЦ складає 0,432 А) ;
- 3) контрольні лампочки на табло і панелях живлення – контролю фідерів, роботи перетворювача і т. п. (споживаний лампочками струм $I_{лп}$ у розрахунку на посту ЕЦ дорівнює 0,175 А) ;
- 4) контрольні лампочки повторювачів вхідних світлофорів на табло (споживаний струм $I_{лс}$ у розрахунку на один підхід може бути прийнятий рівним 0,090 А);
- 5) перетворювачі ИТ по гарантованому живленню кіл змінного струму (споживаний від батареї перетворювачем струм $I_{п}$).

Розрядний струм батареї у режимі основного резервування, А,

$$I_{\text{бо}} = I_{\alpha} \cdot n_c + I_{\text{лс}} \cdot n_{\text{вх}} + I_{\text{рп}} + I_{\text{лп}} + I_{\text{п}}, \quad (3.7)$$

де n_c – число стрілок ЕЦ, $n_{\text{вх}}$ – число підходів до станції.

$$I_{\text{бо}} = 0,262 \cdot 53 + 0,09 \cdot 5 + 0,432 + 0,75 + 13,34 = 28,28 \text{ А.}$$

Розрахунковий час $t_{\text{бо}} = 2$ год основного резервування обрано з урахуванням часу усунення можливої несправності ДГА.

Якщо протягом двох годин несправність ДГА не усунута, батарея переводиться з основного режиму резервування на додатковий. Це досягається відключенням від батареї релейних пристроїв ЕЦ (шляхом вилучення запобіжників на стативах).

Розрядний струм батареї у додатковому режимі резервування

$$I_{\text{бд}} = I_{\text{бо}} - I_{\text{а}} \cdot n_{\text{с}}, \quad (3.8)$$

$$I_{\text{бд}} = 28,28 - 0,262 \cdot 53 = 14,39 \text{ А.}$$

При встановленій тривалості місцевого акумуляторного резерву червоних вогнів вхідних світлофорів на 12 годин тривалість додаткового режиму $t_{\text{бд}}$ контрольної батарея 24 В прийнята рівною 10 годинам [12,13].

В умовах розглянутого режиму експлуатації акумуляторної батареї фактична її розрядна ємність складе:

$$Q_{\text{ф}} = I_{\text{бо}} \cdot t_{\text{бо}} + I_{\text{бд}} \cdot t_{\text{бд}}, \quad (3.9)$$

$$Q_{\text{ф}} = 28,28 \cdot 2 + 14,39 \cdot 10 = 200,52 \text{ А} \cdot \text{год.}$$

Ємність акумуляторів, яка гарантується заводом, характеризується номінальним значенням $Q_{\text{н}}$. Однак із підвищенням інтенсивності розряду і зниженням температури електроліту ємність, що віддається акумуляторами, зменшується. Тому фактична ємність $Q_{\text{ф}}$ перераховується до номінальних умов. Таке перерахування проводиться за формулою

$$Q_{\text{р}} = \frac{Q_{\text{ф}}}{K_{\text{с}} \cdot p \cdot [1 + K_{\text{т}}(t - 25^{\circ})]}, \quad (3.10)$$

де $Q_{\text{р}}$ – розрахункова номінальна ємність батареї;

$K_{\text{с}}$ – коефіцієнт зниження ємності акумуляторів від старіння. Для пристроїв СЦБ $K_{\text{с}} = 0,85$ [2];

p – коефіцієнт інтенсивності розряду, який показує яку частину номінальної ємності в процентах можна отримати від акумулятора в даному режимі розряду. Величина цього коефіцієнту залежить від часу розряду батареї t_{pp} струмом основного режиму $I_{\text{бo}}$;

K_t – температурний коефіцієнт ємності. Для акумуляторів типу СК $K_t = 0,008$;

t – температура електроліту під час розряду батареї. При розрахунках слід прийняти $t = +15^\circ\text{C}$ (температура акумуляторного приміщення поста ЕЦ, [12]).

Значення розрахункового коефіцієнта інтенсивності розряду p варто визначити за режимом розряду батареї струмом $I_{\text{бo}}$ як найбільш несприятливим ($I_{\text{бo}} > I_{\text{бд}}$) для батареї.

У такому випадку розрахункова можлива тривалість розряду батареї t_{pp} струмом основного режиму $I_{\text{бo}}$ складе

$$t_{pp} = \frac{Q_{\Phi}}{I_{\text{бo}}}, \quad (3.11)$$

$$t_{pp} = \frac{200,52}{28,28} = 7,09 \text{ год.}$$

За отриманим значенням t_{pp} розрахункового режиму розряду визначаємо коефіцієнт інтенсивності розряду акумуляторів p за даними [12], $p = 0,9$.

$$Q_p = \frac{200,52}{0,85 \cdot 0,9 \cdot [1 + 0,008(15 - 25)]} = 284,91 \text{ А} \cdot \text{год.}$$

За номінальною розрахунковою ємністю Q_p визначаємо тип акумуляторів СК: їхній індексний номер і паспортна номінальна ємність Q_n [7].

Приймаємо акумулятор типу СК-8 з ємністю 288 А·год.

В даний час питання електропостачання постів ЕЦ та інших станційних приміщень (ДСП, релейних будок), а також перегінних пристроїв СЦБ вирішуються відповідно до вимог нормативних документів, затверджених МШС: інструкцій ЦЕ-462, ЦЕ-191, ЦЕ-881, ВНТП-86. Ці документи

базуються в основі своїй на вимогах ПУЕ [15]. При цьому живлення передбачається від суміщених або спеціальних комплектних трансформаторних підстанцій (КТП), а іноді і від власних фідерів 0,4 кВ [1].

На перегонах електропостачання здійснюється від спеціальних ліній: ВЛ СЦБ, ВЛ ПЕ, ДПР [6, 9, 10].

Станційні пристрої автоматики магістрального залізничного транспорту (пости електрифікованої (ЕЦ) і диспетчерської (ДЦ) централізації) в основному отримують електроенергію від трифазних трансформаторних підстанцій з вторинною напругою 380/220 В і глухозаземленою нейтраллю. Проектування пристроїв електропостачання та заземлення здійснюється відповідно до затверджених нормативними документами та чинним ГОСТам.

Резервне живлення при безбатарейній системі електропостачання поста ЕЦ (при відключенні двох фідерів) здійснюється від акумуляторної батареї. В даний час для резервного живлення станційних і перегінних пристроїв залізничної автоматики застосовуються кислотно-свинцеві акумулятори типу СК-6, СК-8, СК-10 або АБН-72, АБН-80. Дані акумулятори можуть забезпечити струм розряду до 185 А, і тому дуже довго їм не було альтернативи як резервного харчування стрілок і світлофорів, особливо на великих станціях з кількістю стрілок від 30 до 100 і вище [6, 9, 10].

Пропонується в якості альтернативного джерела постійного струму використати літій-залізофосфатні акумулятори (Lithium Iron Phosphate - Li-FePO₄) – це один з нових видів літійєвих акумуляторів з номінальною напругою 3,2 ... 3,3 В на один елемент. Питома щільність енергії літій-залізофосфатні акумуляторів в 3 ... 5 рази вище, ніж у свинцево-кислотних акумуляторів, і при цьому вони можуть забезпечити високу швидкість розряду струмом до 10С [19].

Основні особливості та характеристики Li-FePO₄ акумуляторів:

- тривалий термін експлуатації. Літій-залізофосфатні акумулятори забезпечують понад 2000 циклів «заряд-розряд» (при заряді і розряді струмом в 1Qном). Після 1000 циклів «заряд-розряд» струмом 1Qном

зниження ємності акумуляторів Li-FePO₄ складає всього 10%, а після 2000 циклів залишається приблизно 80% ємності від початкового значення. Після цього акумулятор можна експлуатувати і далі, але зі зниженою ємністю;

- допускають високу швидкість розряду струмом: тривалий розряд до 2С і коротко-тимчасовий розряд до 10Qном;

- допускають високий струм заряду до 0,5С, що значно зменшує час заряду акумулятора (1 ... 2 години). При струмі заряду 0,5Qном літій-залізофосфатні акумулятор за 30 хвилин заряджається до 80% від своєї номінальної ємності;

- окремі елементи літій-залізофосфатні акумуляторів, також як і кислотно-свинцеві акумулятори, можна включати паралельно і послідовно для збільшення ємності і напруги акумуляторних батарей;

- високий рівень безпеки літій-залізофосфатні акумуляторів. На відміну від Li-Ion-акумуляторів в них відсутність небезпека спалаху або вибуху при заряді або короткому замиканні;

- широкий діапазон робочих температур від -10 до + 60 ° С;

- практично під час всього процесу розряду літій-залізофосфатні акумулятори забезпечують постійне номінальної-ве значення напруги 3,2 ... 3,3 В;

- відсутність токсичності виробництва літій-залізофосфатні акумуляторів, так як всі сировину, що використовується при виробництва, є екологічно чистим і не отруєє навколишнє середовище.

В даний час літій-залізофосфатні акумулятори широко застосовуються для живлення електротранспорту (електричні велосипеди та мотоцикли, електровізки), для резервного живлення базових станцій в системах мобільної зв'язку, для автономного живлення електроінструментів та інших пристроїв в яких використовуються електродвигуни, а також у джерелах живлення на сонячних батареях для накопичення енергії (системи забезпечення електроенергією житла).

Для автономного живлення переносної апаратури випускаються одноелементні акумулятори з номінальною напругою третьому 3,2 В, і

ємністю від 600 мА·год. (вага 15 г) до 36 А·год (вага 900 г). Акумулятори даного типу можна використовувати для живлення радіостанцій, датчиків, вимірювальних приладів. Для резервного живлення станційної апаратури і автономного живлення електричних транспортних засобів випускаються акумуляторні збірки з номінальним напругою 6, 9, 12, 24, 36 і 48 В, і ємністю від 10 А · год (вага 500 г) до 200 А·год (вага 78 кг). Акумулятори даного типу підходять в якості заміни кислотно-свинцевих акумуляторів для резервного живлення станційних і перегінних пристроїв залізничної автоматики, оскільки можуть забезпечити струми розряду до 200 А.

До недоліків літій-залізофосфатні акумуляторів можна віднести те, що вони поки трохи поступаються по щільності енергії літій-полімерним акумуляторам. Вони не сумісні з зарядними пристроями для літій-іонних акумуляторів, оскільки максимально допустима напруга повного заряду літій-залізофосфатних акумуляторів складає 3,7 В, а у Li-Ion- і Li-Pol-акумуляторів номінальна напруга заряду складає 4,2 В.

Для створення зарядних пристроїв літій-залізофосфатних акумуляторів можна застосовувати контролери заряду LiFePO₄-акумуляторів компанії Texas Instruments, які побудовані на основі контролерів для Li-Ion- і Li-Pol-акумуляторів, зі зміною рівнів напруг, до яких необхідно заряджати літій – залізофосфатні акумулятори [19-25].

Одноелементні літій-железофосфат-ні акумулятори з номінальною напругою 3,2 В, і ємністю від 600 мА·год (вага 15 г) до 36 А·год (вага 900 г) можна використати для живлення радіостанцій, датчиків, вимірювальних приладів.

Для резервного живлення стаціонарної апаратури і автономного живлення електричного транспорту випускаються акумуляторні збірки з номінальною напругою 6, 9, 12, 24, 36 і 48 В, і ємністю від 10 А год (вага 500 г) до 200 А·год (вага 78 кг). Такі акумулятори можуть бути впроваджені для резервного живлення станційних і перегінних пристроїв залізничної автоматики, оскільки можуть забезпечити струми розряду до 200 А, що

характерно для станцій з числом стрілок від 30 до 100.

Літій-залізофосфатні акумулятори, як один з нових видів літєвих акумуляторів з номінальною напругою 3,2 ... 3,3 В на один елемент, мають питому щільність енергії в 3 ... 5 рази вище, ніж у свинцево-кислотні акумуляторів, і при цьому вони можуть забезпечити високу швидкість розряду струмом до 10С, є дорогими і вимагають використання спеціальних зарядних пристроїв, які несумісні із зарядними пристроями літій-іонних і літій-полімерних акумуляторів.

Застосування літєвих акумуляторів в пристроях СЦБ та зв'язку дозволить покращити умови праці електромеханіків, що пов'язано з виключенням такого шкідливого чинника, як вплив парів або бризок сірчатої кислоти на обладнання та обслуговуючий персонал і, отже, підвищити безпеку, скоротити місце для розміщення обладнання, полегшити працю і, таким чином, вивільнити певну кількість електромеханіків.

3.2. Резервне електроживлення автошлагбаумів

Зараз на Україні в якості резервного джерела живлення пристроїв залізничної автоматики широке розповсюдження знайшли свинцеві акумуляторні батареї (АБ) типу АБН-72, АБН-80 ємністю 72 і 80 А·год відповідно і стаціонарні типу С і СК ємністю 216...360 А·год. Місце застосування АБН-72, АБН-80 – батарейні шафи вхідних світлофорів, переїзна сигналізація, інколи пост електричної сигналізації (ЕЦ), стаціонарних свинцевих акумуляторів – пост ЕЦ. АБ працюють, як правило, у буферному режимі з постійним чи імпульсним підзарядом. Однією з найбільших переваг даного режиму є можливість використання акумуляторів невеликої ємності, які дають можливість автономної роботи акумулятору до трьох годин. Інший режим роботи акумуляторів «заряд-розряд». Основною його перевагою є висока якість вихідної напруги, але цей спосіб заряду акумуляторів має низький ККД (лише 50%), викликає необхідність в

постійному догляді за акумуляторами, кількість та ємність акумуляторних батарей значно зростає через необхідність двох чи більше груп акумуляторів, а термін дії скорочується у порівнянні з буферним режимом заряду. Отже в пристроях сигналізації, централізації та блокування використовується буферний режим роботи акумуляторних батарей.

Метою науково-дослідної роботи є вирішення завдання поліпшення параметрів якості електричної енергії і полегшення умов праці обслуговуючого персоналу за рахунок модернізації системи резервного електропостачання пристроїв залізничної автоматики, а саме: аналіз можливості застосування сонячних батарей і гелієвих свинцевих акумуляторів нового покоління закритого типу на пристроях переїзної сигналізації.

Перспективним є впровадження сонячних батарей на переїздах. Акумуляторні батареї забезпечують роботу електроприводів автошлагбаумів і резервування вогнів переїзних світлофорів при відключенні змінного струму. Для пристроїв переїзної сигналізації з автошлагбаумами використовуються АБ на 28 В, без автошлагбауму – на 14 В. Потужність пристроїв переїзної сигналізації з автошлагбаумом визначається потужністю двигуна постійного струму типу СЛ-571к, яка складає 95 Вт, або двигуна змінного струму типу АІР56В4Б 180 Вт та двох лампочок світлофору типу ЖС-12 30 Вт. Таким чином, необхідно передбачити резервування навантаження потужністю 125 або 48 Вт. Двигуни типу СЛ-571к є застарілими. Потужність пристроїв переїзної сигналізації без автошлагбауму враховує потужність двох ламп переїзної сигналізації і дзвінка при напрузі живлення 24 В – 9,6 Вт і при 12 В – 4,8 Вт. Отже потужність, яку необхідно резервувати, 40 або 35 Вт.

При розрахунках потужності сонячних панелей одним з найважливіших факторів є рівень інсоляції місцевості. Найбільший рівень інсоляції у центральній та південній Україні, тому найбільш вигідно буде використовувати запропонований спосіб резервування електроживлення на

перегонах саме цієї місцевості. Кращим вибором фотоелемента такої панелі буде монокристалічний тип, оскільки він має більшу потужність на одиницю площі ніж полікристалічний. Проте і коштує дорожче. Так, полікристалічні сонячні батареї коштують 0,32...0,42 \$/Вт, а монокристалічні – 0,5...0,6 \$/Вт. Не менш важливим є температурний коефіцієнт потужності – зменшення потужності, при збільшенні температури навколишнього середовища. Він сильно залежить від якості фотоперетворювачів. На даний момент деякі панелі мають термін експлуатації до двадцяти років, за цей час вони встигнуть себе окупити і навіть принести прибуток.

Пропонується також замінити акумуляторні батареї зі свинцевих типу АБН-72 (АБН-80), яких потрібно 7 або 14 одиниць для забезпечення рівня напруги 14 або 28 В на гелеві свинцеві закритого типу, наприклад, VENTURA VG-12-100 Gel з номінальною напругою 14 В, ємністю 100 А·год з максимальним струмом до 30 А і вартістю близько 200 \$. Перевагами гелевих акумуляторів є: низький саморозряд, виключено явище витікання електроліту при ушкодженні корпусу, кількість циклів заряд/розряд – 600...1000. Але вони більш чутливі до коротких замикань, потребують високої якості зарядки і коштовні. Середня вартість сонячних батарей потужністю 100... 150 Вт – 1500...4000 грн. Вартість АБН-80 близько 2800...3000 грн.

Отже, вартість системи резервного електроживлення для одного пристрою переїзної сигналізації з автошлагбаумом, який побудовано на акумуляторах АБН-80, близько 42000 грн., без автошлагбауму – 21000 грн. При впровадженні нової системи резервування на сонячних батареях для одного пристрою переїзної сигналізації з автошлагбаумом і двигуном типу СЛ-571к необхідно забезпечити 125 Вт і використати два гелевих акумулятори 14 В з'єднаних послідовно для забезпечення напруги 28 В. Тобто вартість сонячних батарей складатиме 1750 грн., двох акумуляторів – 11200 грн., загальна вартість запропонованої системи на один пристрій переїзної сигналізації – 12950 грн. на 2018 р. При резервуванні автоматичної

переїзної сигналізації (АПС) з автошлагбаумом і двигуном типу АІР56В4Б 18 Вт вартість сонячних батарей складатиме 672 грн., двох АБ – 11200 грн., загальна вартість – 11872 грн. Для пристроїв АПС без автошлагбауму можна використати одну акумуляторну батарею на 14 В і сонячні монокристалічні батареї потужністю 40 Вт, отже вартість установки становитиме 6160 грн. проти 21000 грн. за умовою використання семи АБН-80, тобто в три рази дешевше.

На станціях такий спосіб резервування буде менш вигідним, оскільки загальне навантаження значно більше і складає близько 40...60 кВА, потужність пристроїв гарантованого живлення – 12...48 кВА в залежності від кількості стрілок на крупних станціях. Потужність пристроїв гарантованого живлення постійної напруги 700...850 Вт. Напруга живлення АБ 24 В, ємність 216...360 А·год. Отже потужність резервування, яку необхідно забезпечити, важко буде досягти одними сонячними панелями.

Наприклад, вартість дванадцяти АБ ємністю 216 А·год типу С-6 чи СК-6 складає близько 60000 грн. Вартість двох гелевих акумуляторів на 12 В сучасного зразку для забезпечення напруги 24 В складатиме близько 26000 грн., а сонячних батарей на 750 Вт – 10500 грн. Тобто загальна вартість установки 36500 грн. проти 60000 грн. Але окрім АБ і панелей сонячних батарей необхідно передбачити впровадження ще кількох додаткових пристроїв для перетворення електроенергії й дослідити питання електромагнітної сумісності сонячних панелей з пристроями зовнішнього та місцевого електропостачання. Тим не менш, не зважаючи на витрати, заощадження будуть неймовірні.

Отже при непередбачених аварійних ситуаціях в системі зовнішнього електроживлення пристрої залізничної автоматики все одно матимуть особисте джерело електроенергії.

3.3. Використання сонячних батарей як резервного джерела для живлення вхідних світлофорів

Біля вхідних світлофорів станції встановлюється батарейна шафа з двома акумуляторами типу АБН-72 чи АБН-80, номінальною ємністю 72 чи 80 А·год, номінальною напругою живлення 2,2 В кожна. Акумулятори з'єднуються між собою послідовно. Тобто забезпечують напругу резервування 14 В. Вони встановлюються в батарейній шафі.

Вартість системи резервного електроживлення для одного вхідного світлофора, який побудовано на акумуляторах АБН-80, близько 21000 грн. При впровадженні нової системи резервування на сонячних батареях для одного вхідного світлофора потужністю 35 Вт і його апаратури необхідно забезпечити 62 Вт і використати, наприклад, один гелевий акумулятор 14 В для забезпечення напруги 14 В. Вартість сонячних батарей складатиме 1750 грн., акумулятора – 5600 грн., загальна вартість запропонованої системи на один вхідний світлофор – 7350 грн., тобто в три рази дешевше чим при використанні АБН-80.

3.4. Висновки за розділом

Впровадження акумуляторних батарей нового покоління разом із сонячними батареями для забезпечення резервного електроживлення пристроїв СЦБ таких як пост ЕЦ, вхідні світлофори, авто шлагбауми є економічно доцільним.

Модернізація системи електроживлення пристроїв СЦБ таким шляхом дозволить підвищити параметри якості електричної енергії.

4. ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ, ЩО СПОЖИВАЄТЬСЯ ТЯГОВИМИ СПОЖИВАЧАМИ

4.1. Параметри якості електроенергії

Якість електроенергії – відповідність рівня напруги і частоти деяким значенням, встановлених Держстандартами ДСТУ EN 50160-201і відповідними нормативами [16 – 20]. В даному розділі узагальнимо та порівняємо основні терміни та вимоги до якості електричної енергії на підставі згаданих вище нормативних документів.

До основних параметрів якості електричної енергії відносять:

1) змінення напруги електропостачання (відхилення напруги або поросійські «отклонение напряжения»):

$$\delta U = \frac{U - U_{\text{НОМ}}}{U_{\text{НОМ}}} \cdot 100\%, \quad (4.1)$$

де U – діюче значення напруги прямої послідовності або просто діюче значення напруги, $U_{\text{НОМ}}$ – номінальна напруга. Відхилення напруги спостерігаються при її зміні напруги зі швидкістю менше ніж 1 % за секунду.

$$U = \frac{1}{3} (U_{\text{AB}(1)} + U_{\text{BC}(1)} + U_{\text{AC}(1)}), \quad (4.2)$$

де $U_{\text{AB}(1)}, U_{\text{BC}(1)}, U_{\text{AC}(1)}$ – діючі значення міжфазних напруг основної частоти.

Через зміни навантажень в часі, зміни рівня напруги та інших факторів змінюється величина падіння напруги в елементах мережі і, отже, рівень діючого значення напруги U в даний момент часу t . В результаті виявляється, що в різних точках мережі в один і той же момент часу, а в одній точці – в різні моменти, відхилення напруги різні.

Нормальна робота електроприймачів в мережах напругою до 1 кВ забезпечується за умови, що відхилення напруги на їх вході не перевищують $\pm 5\%$ (нормальне значення) і $\pm 10\%$ (максимальне значення). У мережах напругою 6...36 кВ встановлюється максимальне відхилення напруги $\pm 10\%$.

Через те, що кількість користувачів, які отримують електроенергію безпосередньо від мереж високої напруги, є обмеженою та, зазвичай, вони мають індивідуальні контракти, то в стандарті ДСТУ EN 50160:2014 не наведено норми на змінення напруги електропостачання [19].

2) коливання напруги характеризують флікером або швидкою зміною напруги (або по-російськи «размах изменения напряжения»):

$$pU = \frac{U_{min} - U_{max}}{U_{max}} \cdot 100\% , \quad (4.3)$$

Колівання напруги спостерігаються при її зміні зі швидкістю більше ніж 1 % за секунду.

Значення коливання напруги мають ті ж самі норми, що і відхилення напруги з єдиною відмінністю: тривалість процесу менше однієї хвилини. Нормально допустимим коливанням напруги вважається діапазон в 5%, тобто: $\pm 5\%$ (наприклад, для мереж до 1000 В від 209 В до 231 В). Гранично допустимим коливанням напруги вважається діапазон $\pm 10\%$ (від 198 В до 242 В).

До розмахів зміни напруги відносять поодинокі зміни напруги будь-якої форми з частотою повторення від двох разів на хвилину (1/30 Гц) до одного разу на годину, що мають середню швидкість зміни напруги більше 0,1 % в секунду (для ламп розжарювання) і 0,2 % в секунду для інших приймачів.

Швидкі зміни напруги викликаються ударним режимом роботи двигунів металургійних прокатних станів, тягових установок залізниць, лугових сталеплавильних печей, зварювальної апаратури, а також частими пусками потужних короткозамкнених асинхронних електродвигунів, коли їх пускова реактивна потужність становить кілька відсотків від потужності короткого замикання.

Флікер або мерехтіння (flicker) Відчуття нестійкості зорового сприйняття, спричинене світловим подразником, яскравість або спектральний розподіл якого коливається в часі [IEV 161-08-13]. Колівання напруги зумовлюють зміни світлового потоку ламп, які можуть створювати

зорове явище. Флікер, величина якого перевищує певний поріг, стає подразнювальним. Роздратування збільшується дуже швидко із зростанням амплітуди коливань. Але навіть дуже малі амплітуди за певних частот повторення можуть бути дратівливими [19].

Показник флікера

$$P_{lt} = \sqrt[3]{\sum_{i=1}^{12} \frac{P_{sti}^3}{12}} \leq 1, \quad (4.4)$$

де P_{sti} – показник короткочасного флікера, який вимірюється протягом 10 хв. P_{st} має бути не більше 1,38 (або 1 – для приміщень з лампами розжарювання і там, де необхідні значні зорові зусилля) протягом 100 % часу вимірювання, P_{lt} – показник довгочасного флікера, який обчислюють за даними 12 вимірів, які були зроблені протягом двох годин.

Основні вимоги, що пред'являються до коливань напруги, обумовлюються намірами захистити зір людини. Встановлено, що найбільша чутливість ока до мерехтіння світла спостерігається при 8,7 Гц. Тому для ламп розжарювання, які забезпечують робоче освітлення при значних зорових напруженнях, розмах напруги допускається не більше 0,3 %, для побутових ламп накалювання – 0,4 %, для люмінесцентних ламп та інших електроприймачів – 0,6 %.

Для зниження розмаху зміни напруги в освітлювальній мережі застосовують роздільне живлення приймачів освітлювальній мережі і силового навантаження, поздовжню ємнісну компенсацію мережі живлення, синхронні електродвигуни (компенсатори) та штучні джерела реактивної потужності (реактори або конденсаторні батареї, струм яких формується за допомогою керованих вентилів для отримання необхідної реактивної потужності).

3) сумарний коефіцієнт гармонічних спотворень СКГС (\overline{NEAN}) або коефіцієнт несинусоїдальності:

$$K_v = \frac{1}{U_{ном}} \sqrt{\sum_{n=2}^N U_n^2} \cdot 100 \% = \frac{U_{v\Sigma}}{U_1} \cdot 100 \%, \quad (4.5)$$

де $U_{v\Sigma}$ - діюче значення напруги від усіх гармонік, існуючих в цій напрузі;
 U_1 - напруга першої гармоніки (50 Гц); N - порядок останньої з врахованих гармонійних складових, U_n - діюче значення n-й ($n = 2, \dots, N$) гармонійної складової напруги.

Під час роботи потужних випрямних і перетворювальних установок встановлених на тягових підстанціях чи підприємствах, а також дугових печей і установок для зварювання, тобто нелінійних елементів, відбувається скривлення кривих струму і напруги. Несинусоїдальні криві струму і напруги містять гармонійні коливання, які мають різні частоти. Промислова частота $f=50$ Гц є основною і зветься першою. Це нижча гармоніка, всі інші по відношенню до неї – вищі гармоніки і мають частоти $f_n = 50 \cdot n$, Гц.

Вищі гармоніки в системі електропостачання викликають додаткові втрати енергії, скорочують термін служби конденсаторних батарей, електродвигунів і трансформаторів, призводять до труднощів при налагодженні релейного захисту та сигналізації, а також експлуатації електроприводів з тиристорним керуванням і т. п.

Для зниження вищих гармонік застосовуються силові індуктивно-ємнісні фільтри, які налаштовані в резонанс на певну гармоніку. З метою виключення гармонік нижчих частот застосовують перетворювальні установки з великим числом фаз.

Нормальні і максимальні значення $K_v = K_{нсU}$ не повинні відповідно перевищувати: в електричній мережі напругою до 1 кВ – 5 і 10 %, в електричній мережі 6...20 кВ – 4 і 8 %, в електричній мережі 35 кВ – 3 і 6 %, в електричній мережі 110 кВ і вище 2 і 4 %.

Раніше вважалось, що напруга є якісної, якщо $K_v \leq 5 \%$. Зараз СКГС напруги електропостачання (ураховуючи всі гармоніки до 40-ої включно)

мають бути меншими чи рівними 8 %. Обмеження порядку гармонік до 40 є загальноприйнятим [19].

5) Напряга гармоніки (harmonic voltage) – синусоїдальна напряга з частотою, яка пропорційна з цілим множителем основній частоті (50 Гц) напруги електропостачання.

Напруги гармонік можуть бути оцінені через відносну амплітуду напруги окремої гармоніки U_h , віднесеною до напруги основного складника U_1 , де h — це порядок гармоніки, або через сумарний коефіцієнт гармонічних спотворень СКГС (\overline{NEAN}), який обчислюють за формулою:

$$\overline{NEAN} = \sqrt{\sum_{h=2}^{40} (U_h)^2}, \quad (4.6)$$

б) Коефіцієнту n -й гармонійної складової напруги непарного (парного) порядку $K_{U(n)}$ або як вказано в ДСТУ EN 50160:2014 відносна амплітуда напруги окремої гармоніки U_h . Коефіцієнт n -ої гармонійної складової напруги $K_{U(n)}$ представляє собою відношення діючого значення n -ї гармонічної складової напруги до діючого значення напруги основної частоти 50 Гц і має дорівнювати $K_{U(n)} = \frac{U_n}{U_{\text{ном}}} \cdot 100\% \leq 8\%$ протягом 95 % часу за тиждень.

За нормальних робочих умов протягом кожного тижневого періоду 95 % середньоквадратичних значень напруги кожної гармоніки, усереднених на 10-ти хвилинному проміжку, мають бути меншими чи рівними значенням, що їх наведено в таблицях для низької, середньої та високої напруг [19]. Резонанси можуть спричинювати вищі напруги окремих гармонік.

Результати порівняння норм на коефіцієнт n -ої гармонійної складової напруги $K_{U(n)}$ за держстандартами ГОСТ 13109-97 і ДСТУ EN 50160:2014 були такими, як наведено в табл. 4.1.

Таблиця 4.1

Норми на коефіцієнт n-ї гармонійної складової напруги $K_{U(n)}$ для різного рівня напруг за стандартами ГОСТ 13109-97 і ДСТУ EN 50160:2014

$K_{U(n)}$ за ГОСТ 13109-97				СКГС (\overline{NEAN}) за ДСТУ EN 50160:2014
протягом 95 % часу вимірювання		протягом 100 % часу вимірювання		8% протягом 95 % часу за тиждень
0,38 кВ	8 %	0,38 кВ	12 %	
6...20 кВ	5 %	6...20 кВ	8 %	
35 кВ	4 %	35 кВ	6 %	
110...330 кВ	2%	110...330 кВ	3 %	

Проаналізував стандарт ДСТУ EN 50160:2014 було з'ясовані норми на відносні величини амплітуд низької, середньої та високої напруг для різних гармонік до 25-го порядку.

7) Напряга інтергармоніки (interharmonic voltage) – синусоїдальна напруга з частотою, коефіцієнт пропорційності якої до основного складника напруги електропостачання не є цілим числом.

Рівень інтергармонік в енергосистемах низької і середній напрузі (1...35 кВ) збільшується внаслідок науково-технічного прогресу і впровадження нових перетворювачів частоти й систем регулювального обладнання. Інтергармоніки низького рівня ведуть до зростання флікера і суттєво впливають на системи, в яких використовують змодульовані тональні послілки.

Через низькі частоти (200...500 Гц), які обумовлені наявністю індуктивності і ємності в схемах заміщення при яких виникає резонанс в мережах високої напруги допуски для напруг інтергармонік не встановлено, а їх вплив незначний.

Таблиця 4.2

Величини гармонік до 25-ого порядку в точках приєднання у відношенні до напруги U_1 основною частотою 50 Гц для низької, середньої та високої напруг

Непарні напруги				Парні напруги	
не кратні 3		кратні 3			
Порядок h	Відносна амплітуда $U_h, \%$	Порядок h	Відносна амплітуда U_h	Порядок h	Відносна амплітуда U_h
5	6,0 / 5,0	3	5,0 / 3,0	2	2,0 / 1,9
7	5,0 / 4,0	9	1,5 / 1,3	4	1,0
11	3,5 / 3	15	0,5 / 0,5	6...24	0,5 / 0,5
13	3,0 / 2,5	21	0,5 / 0,5		
17	2,0 / на розгляді				
19	1,5 / на розгляді				
23	1,5 / на розгляді				
25	1,5 / на розгляді				

Примітка: Величини значень відносної амплітуди гармонік U_h наведено у чисельнику для низької та середньої напруг, а в знаменнику – для високої напруги

Питання виникнення інтергармонік в живлячій напрузі потребує більш детального наукового дослідження.

8) Відхилення частоти:

$$\Delta f = f - f_{\text{НОМ}} \text{ або } q f = \frac{f - f_{\text{НОМ}}}{f_{\text{НОМ}}} \cdot 100\% , \quad (4.7)$$

Раніше нормувалось відхилення частоти нормувалось більш жорстко. Перш за все зміна частоти живлячої напруги впливає на режими роботи електрообладнання, швидкість обертання роторів асинхронних короткозамкнених електродвигунів, технологічний процес різних виробництв (наприклад, прокатних станів) і, як наслідок, на техніко-економічні показники роботи промислових підприємств.

Електромагнітна складова збитку обумовлена збільшенням втрат активної потужності в електричних мережах і зростанням споживання активної та реактивної потужностей. Відомо, що зниження частоти на 1% збільшує втрати в електричних мережах на 2%.

Технологічна складова збитків спричинені в основному недовипуску промисловими підприємствами своєї продукції і вартістю додаткового часу роботи підприємства для виконання завдання. Згідно з експертними оцінками значення технологічного збитку на порядок вище електромагнітного.

Ступінь впливу частоти на продуктивність ряду механізмів може бути виражена через споживану ними активну потужність.

Також чутливі до зниження частоти живлячої напруги двигуни власних потреб електростанцій. Зниження частоти призводить до зменшення їх продуктивності, супроводжується зниженням потужності генераторів і подальшим дефіцитом активної потужності. Має місце, так звана, лавина частоти.

Лампи розжарювання, печі опору, дугові електричні печі на зміну частоти практично не реагують.

Відхилення частоти негативно впливає на роботу електронної техніки: відхилення частоти більш +0,1 Гц призводить до яскравості і геометричним фоновим спотворень телевізійного зображення, зміни частоти від 49,9 до 49,5 Гц викликає майже чотириразове збільшення допустимого розмаху телевізійного сигналу до фонові завади. Зміна частоти до 49,5 Гц потребує

суттєвого посилення вимог до відношення сигнал / фонова перешкода у всіх ланках телевізійного тракту.

Також жорсткі вимоги до частоти мережі висувають електродвигуни, трансформатори, реактори зі сталевим магнітопроводом, де зниженням частоти викликає додатковий нагрів сталевих сердечників.

Для запобігання загальносистемних аварій, викликаних зниженням частоти передбачаються спеціальні пристрої автоматичного частотного розвантаження (АЧР), що відключають частину менш відповідальних споживачів. Після ліквідації дефіциту потужності, наприклад після включення резервних джерел живлення, спеціальні пристрої частотного автоматичного повторного включення (ЧАПВ) включають раніш відключені споживачі і нормальна робота енергосистеми відновлюється.

Отже, підтримка нормальної частоти, що відповідає вимогам стандарту є не тільки технічною, а і науковою задачею, основний шлях вирішення якої – введення генеруючих потужностей з метою створення резервів потужності в мережах енергопостачальних організацій і розробка математичних моделей і алгоритмів з підтримки частоти на заданому ДСТУ рівні.

За Держстандартом ГОСТ 13109-97 1997 року відхилення частоти Δf протягом 95 % часу вимірювання $\Delta f = \pm 0,2$ Гц (нормально допустиме значення) та протягом 100 % часу вимірювання $\Delta f = \pm 0,4$ Гц (гранично допустиме значення).

За ДСТУ EN 50160:2014:

- для систем, які синхронно підключено до системи зовнішнього електропостачання: 50 Гц $\pm 1\%$ протягом 99,5 % часу за рік; 50 Гц +4%...-6% протягом 100 % часу вимірювання;

- для систем, які без синхронного підключення до системи зовнішнього електропостачання: 50 Гц $\pm 2\%$ протягом 95 % часу за тиждень; 50 Гц $\pm 15\%$ протягом 100 % часу вимірювання.

За рівнями напруги (низька напруга – до 1 кВ, середня напруга – від 1 до 35 кВ, висока напруга – від 36 до 150 кВ) існують такі стандарти щодо

відхилення частоти [19]: номінальна частота напруги електропостачання має бути 50 Гц. За нормальних робочих умов середнє значення частоти основного складника напруги, яку виміряно на проміжку 10 с, має бути для систем, які синхронно підключено до об'єднаної енергосистеми; $50 \text{ Гц} \pm 1 \%$ (тобто 49,5...50,5 Гц) протягом 99,5 % часу за рік; $50 \text{ Гц} + 4 \dots - 6\%$ (тобто 47...52 Гц) протягом 100 % часу вимірювання; для мереж без синхронного підключення до об'єднаної енергосистеми (тобто систем типу «енергетичний острів»): $50 \text{ Гц} \pm 2 \%$ (тобто 49...51 Гц) протягом 95 % часу за тиждень; $50 \text{ Гц} \pm 15 \%$ (тобто 42,5...57,5 Гц) протягом 100 % часу вимірювання.

9) Провали напруги і перенапруги.

Причиною провалів напруги є аварійні ситуації. Перенапруги виникають через перемикання або відключення навантаження, природні явища, які є випадковими і які важко передбачити. Розподіл випадків перенапруги протягом року може бути нерівномірним.

В мережах низької і середньої напруги традиційно поріг початку провалу напруги дорівнює 90 % від номінальної напруги, поріг початку перенапруги – 110 % від номінальної напруги. Величина гістерезису звичайно дорівнює 2 %, рекомендовані правила встановлення величини гістерезису наведено в EN 61000-4-30:2009, 5.4.2.1 [19]. При цьому слід розглядати лінійну напругу у чотирипровідних (між проводом і нейтраллю) і трипровідних (між лінійними проводами) системах, в однофазних мережах також лінійну напругу в залежності від типу підключення між проводом і нейтраллю або між лінійними проводами.

Оцінювання провалів напруги треба провадити відповідно до EN 61000-4-30 залежить від цілі оцінювання. Частіше за все використовується поліфазне узагальнення результатів, яке передбачає подію з однаковою тривалістю і остаточною напругою. Також можна використовувати правила, які описані в IEC/TR 61000-2-8, 4.3.2.4 Класифікація провалів напруги.

В системах високої напруги оцінювання перенапруг треба провадити відповідно до EN 61000-4-30. В основі методу аналізу перенапруг для

трифазних систем лежить поліфазне узагальнення результатів, яке передбачає визначення еквівалентної події й характеризується однаковою залишковою напругою. Також узагальнюють події в часі і використовують правила рекомендовані в IEC/TR 61000-2-8.

10) Небаланс напруг або напруга зворотної послідовності.

Раніше за ГОСТ 13109-97 нормувалося коефіцієнт несиметрії напруг за зворотної послідовності K_{2U} , який повинен протягом 95 % часу вимірювання 2% та протягом 100 % часу вимірювання 4% від напруги прямої послідовності (основного складника). За ДСТУ EN 50160-2014 висуваються більш жорсткі вимоги і допускається лише 3 % від напруги прямої послідовності (основного складника) [17, 19].

Взагалі для систем з низькою, середньою та високою напругою за нормальних робочих умов протягом кожного тижневого періоду 95 % середньоквадратичних значень складника зворотної послідовності напруги електропостачання, усереднених на 10-ти хвилинному проміжку, мають бути в межах 0...2 % від складника напруги прямої послідовності. В стандарті [19] наведено значення тільки для складника зворотної послідовності, тому що ця складова стосується можливих взаємних впливів підключеного до системи устаткування.

4.2. Підвищення якості електроенергії в розподільчих мережах тягових і нетягових споживачів

Технічні заходи щодо підвищення якості електричної енергії спрямовані на забезпечення виконання умов електромагнітної сумісності системи електроживлення, прокладки кабелів, заземлення, грозозахисних приладів, обмеження комутаційних перенапруг, а також на усунення перешкод, що створюються випрямлячами і електромагнітними пристроями.

При проектуванні системи електроживлення технологічних установок або пристроїв автоматизації, що задовольняє електромагнітній сумісності, необхідно:

- а) забезпечити якість електричної енергії;
- б) виключити взаємний вплив приладів через систему електроживлення;
- в) виключити вплив елементів пристроїв великої потужності, таких як дугові печі, зварювальні агрегати, преси, перетворювачі вентильні.

Для забезпечення електромагнітної сумісності використовують:

- фільтри низьких частот;
- додаткові шунтуючі резонансні контури, налаштованих на вищі гармоніки;
- динамічні компенсаційні пристрої для згладжування імпульсного навантаження;
- симетрування мережі реактивними елементами;
- підключення потужних споживачів до мережі більш високої напруги.

При проектуванні системи електроживлення пристроїв вимірювань, управління і регулювання необхідно враховувати такі особливості:

- велика кількість компонентів малої потужності вимагає підвищеної якості напруги живлення;
- споживачі можуть мати мережеві елементи з некерованими випрямлячами і захисними конденсаторами великої ємності. Їх робота супроводжується значними пусковими струмами, а в стаціонарних режимах – імпульсними струмами, які заважають нормальному функціонуванню інших споживачів.

Для забезпечення електромагнітної сумісності і підвищення надійності системи електропостачання, використовують:

- мережеві заводопригнічуючі фільтри для згладжування перехідних напруг;
- стабілізатори напруги для вирівнювання коливань напруги і пригнічення вищих гармонік;

- системи безперебійного живлення, які вмикають при зменшенні і зникненні напруги мережі. Статична система безперебійного живлення складається з випрямляча, акумулятора-накопичувача енергії та інвертора і підключається на період від декількох хвилин до декількох годин;

- дизель-генераторні агрегати (ДГА), які вмикаються при тривалих перервах в електропостачанні і для живлення електроспоживачів першої і особливо важливої першої категорії.

Слід зазначити, що норми на електромагнітну сумісність (ЕМС) потребують корегування і подальшої розробки. В даний час нормують граничні значення показників якості електроенергії, які іноді називають показниками ЕМС обладнання. Для забезпечення ЕМС обладнання необхідно мати комплекс взаємно узгоджених норм, що застосовуватимуться як при проектуванні, так і при експлуатації електричних мереж і підприємств.

В системах електропостачання багатьох підприємств норми якості електроенергії не виконуються, що призводить до значних економічних збитків і соціальних витрат через:

- відставання зростання генеруючих потужностей і розвитку електричних мереж від зростання електричних навантажень;

- не налагоджена робота системи електропостачання з новим технологічним обладнанням і компенсуючими пристроями;

- відставання електротехнічної промисловості у випуску достатньої кількості і номенклатури технічних засобів з контролю і автоматичного регулювання напруги.

Усунення останнього недоліку є особливо актуальним у зв'язку зі специфічними властивостями електроенергії як товарної продукції: її не можна складувати, процес вироблення, передачі і споживання йде безперервно і одночасно. Так як не можна повернути назад постачальнику неякісну продукцію, то необхідно забезпечити безперервний контроль і автоматичне регулювання якості електроенергії на всіх рівнях ієрархії електроенергетичної системи.

4.3. Висновки за розділом

На основі проведеного аналізу можна зробити такі висновки:

- тягове навантаження, пов'язане з роботою високошвидкісної залізниці, носить коливальний характер і є джерелом вищих гармонік і струмів зворотної послідовності, що здійснює негативний вплив на енергосистему в цілому;
- система тягового електропостачання інтегрується в енергосистему з великою потужністю короткого замикання, що дозволяє нівелювати вплив тягового навантаження на якість електроенергії;
- найбільш істотним фактором, що впливає на якість електроенергії, є небаланс трифазного струму, обумовлений тягової навантаженням.

Коефіцієнт небалансу за струмом при наявності великого тягового навантаження може досягати 90%. Тому повинен проводитися моніторинг цього показника. Крім того, слід брати до уваги можливий вплив цього небалансу за рахунок релейного захисту. Динамічний розвиток високошвидкісних залізниць може привести до значного підвищення частки тягового навантаження. При цьому виникає необхідність створення більш надійних систем електропостачання, що вимагає тісної взаємодії між мережевими операторами і залізничними компаніями для вирішення проблем, пов'язаних з будівництвом і експлуатацією високошвидкісних ліній.

Розглянуто алгоритм управління системою тягового електропостачання, який дозволяє підвищити надійність роботи електромережі та якість електроенергії в ній. Отримані результати дозволяють говорити про доцільність застосування запропонованого підходу на практиці.

ВИСНОВКИ

Система резервного електроживлення тягових підстанцій і їх власних потреб, пристроїв СЦБ потребує модернізації за рахунок впровадження необслуговуваних акумуляторів нового покоління: гелевих кислотних або Li-ion замість кислотних стаціонарних, що потребують спеціальних експлуатаційних умов і додаткове обслуговування, є небезпечними.

Встановлювати сонячні панелі на даху тягових підстанцій не є раціональним через значний електромагнітний вплив ліній електропередач і силового обладнання. Але доцільним є оновлення системи резервного електроживлення пристроїв СЦБ. Для досягнення поставленої мети необхідно:

Проаналізовано режими та умови роботи акумуляторів і сонячних панелей. Оцінено можливість впровадження акумуляторних батарей нового покоління і сонячних панелей в якості резервного джерела електроживлення для поста ЕЦ, вхідних світлофорів, автошлагбауму. За рахунок цього очікується підвищення параметрів якості електричної енергії в тягових мережах.

Розрахована схема паралельно-послідовного підключення сонячних панелей, які можливо встановити на даху поста ЕЦ для забезпечення резервного електроживлення остійної напруги 24 В. Їх кількість становить 12. Струм резервування 32 А.

Досліджено роботу сонячних батарей в Дніпропетровській області протягом року.

ЛІТЕРАТУРА

1. Марквард К.Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог. – М.: Транспорт, 1982. – 528 с.
2. Бондаренко В. О. Анализ энергоэффективности режимов работы электрических систем с тяговыми нагрузками / В.О. Бондаренко, И.В. Доманский, Г.Н. Костин // Электротехніка і Електромеханіка, 2017, №1, 54 – 62 с.
3. Доманський І.В. Електрифікація залізниць – джерело підвищення енергетичної ефективності процесу перевезень // Залізничний транспорт України. – 2014. – №1. – С. 19-23, 31-33.
4. Правила улаштування системи тягового електропостачання залізниць України. № ЦЕ-0009: Затв. Наказ Укрзалізниці 24.12.2004 р., № 1010-ЦЗ. / Мін-во трансп. та зв'язку України. – К., 2005. – 80 с.
5. Доманський І.В. Системний аналіз зовнішнього електропостачання тягових підстанцій залізниць // Електротехніка і електромеханіка. – 2013. – №3. – С. 54-63. doi: 10.20998/2074-272X.2013.3.10.
6. Шидловский А.К., Кузнецов В.Г., Николаенко В.Г. Оптимизация несимметричных режимов систем электроснабжения // К.: Наукова думка, 1987. – 174 с.
7. Железко Ю.С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии // М.: ЭНАС, 2009. – 456 с.
8. Бородулин Б.М., Герман Л.А., Николаев Г.А. Конденсаторные установки электрифицированных железных дорог // М.: Транспорт, 1983. – 183 с.
9. Герман Л.А., Гончаренко В.П. Современная схема продольной емкостной компенсации в системе тягового электроснабжения // Вестник РГУПС. – 2013. – №2. – С. 12-17.
10. Герман Л.А., Серебряков А.С., Максимова А.А. Фильтрокомпенсирующие установки в тяговых сетях переменного тока // Вестник ВНИИЖТ. – 2016. – Т.75. – №1. – С. 26-34.

11. Крюков А.В. Электрические нагрузки нетяговых потребителей. /Иркутск: ИрГУПС, 2014. – 149 с.
12. Гаврилюк, В. І. Електроживлення систем залізничної автоматики, телемеханіки та зв'язку [Текст]: монографія / В. І. Гаврилюк, В. Г. Сиченко, Т. М. Сердюк; за заг. ред. В. І. Гаврилюка; Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2016. – 193 с.
13. Электрическая энергия. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения: ГОСТ 13109-97. [Введ.01.01.2000]. – К.: Изд-во стандартов, 1998; Госстандарт Украины, с доп. и попр., 1999. – 31 с.
14. Методика вимірювання якості електричної енергії в системах електропостачання загального призначення: СОУ-Н ЕЕ40.1-37471933-55:2011 [Чинна з 31.10.2011]. - К.: Міненерговугілля, 2012. – 98 с.
15. Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності: ДСТУ EN 50160:2014 (EN 50160:2010, IDT). [Чинний з 1.10.2014]. - К.: Держстандарт України, 2014. – 27 с.
16. Межгосударственный стандарт ГОСТ ИЕС 61000-4-30 – 2017 Электромагнитная совместимость (ЭМС). Часть 4-30. Методы испытаний и измерений. Методы измерений качества электрической энергии (ИЕС 61000-4-30:2015, IDT). Москва: Стандартиформ, – 2018. – 61 с.
17. Правила улаштування електроустановок. - Видання офіційне. Міненерговугілля України. - Х. : Вид-во «Форт», 2017. – 760 с.
18. Правила технічної експлуатації залізниць України [Текст]: Наказ № 258 від 25.07.2006, зареєстр. в Мін-ві Юстиції України від 25.10.2006 р. від № 1143/13017 ./ Мінпаливенерго України. – К., 2006.
19. ЦШ-0042: Пристроїв сигналізації, централізації та блокування. Технологія обслуговування [Текст]: Наказ № 347-ЦЗ від 26.04.2006/ Міністерство транспорту. – К., 2006.
20. Інструкція з технічного обслуговування і ремонту пристроїв електропостачання систем сигналізації, централізації та блокування

- (СЦБ) ЦЕ-0033 [Текст]: Затв. Наказ Укрзалізниці від 09.02.2012. №048-Ц на заміну ЦЕ-0002. –К., 2012. – 53 с.
- 21.ЦШ-0060: Інструкція з технічного обслуговування пристроїв сигналізації, централізації та блокування [Текст]: Наказ № 090-ЦЗ від 07.10.2009 / Міністерство транспорту. – К., 2009.
- 22.Рябова Л. Ю., Запорожець О. С., Лях Є. В., Черненко О. В. Резервне електроживлення пристроїв залізничної автоматики [Текст]// Тези 79-ої Всеукраїнської конференції студентів та молодих вчених 2019 р. «Інформаційно-управляючі технології і системи на залізничному транспорті» - Д.: Вид-во ДНУЗТ, 2019.–С. 53-54.
- 23.Сердюк Т. М. , Сердюк К. М. , Пушкарьов Є. О. , Борякін А. О. Дослідження електромагнітної сумісності рейкових кіл з системою тягового електропостачання // Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту: Тези 81 Міжнародної науково-практичної конференції (м. Дніпро, 2021 р.) – Д.: ДНУЗТ, 2021. – С. 389-390.2
24. Кузнецов В.Г. Развитие теоретических основ энергосбережения в системах электропостачання тяги поїзд і в постійного струму. Автореф. дисерт. на здоб. наук. ст. д.т.н. Спец. 05.22.09 – електротранспорт. Дніпро – 2012, 38 с. Режим доступа: <http://eadnurt.diit.edu.ua/bitstream/123456789/1335/3/Kuznetsov.pdf>
- 25.Губський П.В. Підвищення енергетичної ефективності системи тягового електропостачання при швидкісному русі. Дисерт. на здоб. наук. ст. д.т.н. Спец. 05.22.09 – електротранспорт. Дніпро – 2019, 209 с. Режим доступу: <http://ndch.diit.edu.ua/upload/%D0%97%D0%B0%D1%89%D0%B8%D1%82%D1%8B/%D0%93%D1%83%D0%B1%D1%81%D0%BA%D0%B8%D0%B9/%D0%94%D0%B8%D1%81%D0%B5%D1%80%D1%82%D0%B0%D1%86%D1%96%D1%8F%20%D0%93%D1%83%D0%B1%D1%81%D1%8C%D0%BA%D0%B8%D0%B9.pdf>
26. Солнечные панели это - «АГАТ ЕЛЕКТРО» Режим доступу: <http://agatelektro.com.ua/solnechnye-sistemy/solnechnye-paneli-eto>

27. Как устроены и работают солнечные батареи – Recycle. Режим доступа:
<https://recyclemag.ru/article/kak-ustroeny-i-rabotajut-solnechnye-batarei>
28. Солнечные батареи. Виды и устройство. Работа и применение. Режим доступа:
<https://electrosam.ru/glavnaja/jelektrooborudovanie/jelektropitanie/solnechnye-batarei/>
29. Схемы монтажа и способы подключения солнечных батарей. Режим доступа: <https://sovet-ingenera.com/eco-energy/sun/sxemy-i-sposoby-podklyucheniya-solnechnyx-batarej.html>
30. Схема подключения солнечных панелей к аккумулятору, контроллеру и инвертору Режим доступа: <https://energo.house/sol/shema-podklyucheniya-solnechnyh-batarej.html>
31. Схема подключения солнечных батарей: сборка системы с аккумулятором. Режим доступа: <https://sovet-ingenera.com/eco-energy/sun/sxema-podklyucheniya-solnechnyx-batarej.html>
32. Обновление оборудования и устройств электроснабжения ОАО «РЖД» - Транспортная газета ЕВРАЗИЯ ВЕСТИ. Режим доступа:
<http://eav.ru/publ1.php?publ1d=2015-09a04>
33. Solar trains: what are they and how do they work? Режим доступа:
<https://tomorrow.city/a/solar-trains-what-are-they-and-how-do-they-work>
34. 963 railway stations solarised, 550 more to get rooftop solar panels soon: Indian Railways - The Economic Times. Режим доступа:
<https://economictimes.indiatimes.com/industry/transportation/railways/963-railway-stations-solarised-550-more-to-get-rooftop-solar-panels-soon-indian-railways/articleshow/77853689.cms?from=mdr>
35. Vijayawada station becomes Indian Railways' first station to be covered with 130 kWp solar panels; details - The Financial Express. Режим доступа:
<https://www.financialexpress.com/infrastructure/railways/vijayawada-station-becomes-indian-railways-first-station-to-be-covered-with-130-kwp-solar-panels-details/2285772/>

36. Indian Railways SWR pursues Mission Solar religiously; provides solar panels at 108 stations, 7 service buildings - The Financial Express. Режим доступа: <https://www.financialexpress.com/infrastructure/railways/indian-railways-swr-pursues-mission-solar-religiously-provides-solar-panels-at-108-stations-7-service-buildings/2348637/>
37. К вопросу о возможности применения солнечной энергии на тяговых подстанциях железнодорожного транспорта. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30548706>