

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ТЕХНОЛОГІЙ ТА
ДИЗАЙНУ

Факультет мехатроніки та комп'ютерних технологій

Кафедра інформаційних та комп'ютерних технологій

ДИПЛОМНА БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

на тему

Автоматизація процесу керування резервним електроживленням

Виконав студент групи БА-19

спеціальності 151

Автоматизація та комп'ютерно-
інтегровані технології

Довгуля В.В.

Науковий керівник Лебеденко Ю. О.

Рецензент _____

Київ 2023

КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ТЕХНОЛОГІЙ ТА ДИЗАЙНУ

Інститут, факультет Мехатроніки та комп'ютерних технологій

Кафедра Інформаційних та комп'ютерних технологій

Спеціальність 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

Освітня програма Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри ІКТ

« ____ » _____ 2023 р.

ЗАВДАННЯ

НА ДИПЛОМНУ БАКАЛАВРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Довгулі Владиславу Валерійовичу

1. Тема роботи: Автоматизація процесу керування резервним електроживленням

Науковий керівник роботи Лебеденко Ю.О. к.т.н., доц.,

затверджені наказом вищого навчального закладу від 08.11.2023 року

№ 224-уч.

2. Строк подання студентом роботи 22.06.23 року

3. Вихідні дані до роботи: Система повинна здійснювати опитування датчиків щільності та температури, інтервал вимірювання значень параметрів не повинен перевищувати 1 с. Точність регулювання температури не гірше $\pm 1^{\circ}\text{C}$. Час регулювання не більше 10 с, перерегулювання не більше 20 %.

4. Зміст дипломної роботи (перелік питань, які потрібно розробити) Вступ; Розділ 1 Аналітичний огляд комбінованих автономних енергетичних установок; Розділ 2 Проектування автоматизованої системи керування резервним електроживленням ; Розділ 3 Математичне моделювання процесів в комбінованій автономній енергосистемі; Висновки

5. Дата видачі завдання _____ 2023 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів дипломної бакалаврської роботи	Термін виконання	Примітка про виконання
1	Вступ	24.04.2023	
2	Розділ 1 Аналітичний огляд комбінованих автономних енергетичних установок	01.05.2023	
3	Розділ 2 Проектування автоматизованої системи керування резервним електроживленням	09.05.2023	
4	Розділ 3 Математичне моделювання процесів в комбінованій автономній енергосистемі	20.05.2023	
5	Висновки	30.05.2023	
6	Оформлення дипломної бакалаврської роботи (чистовий варіант)	03.06.2023	
7	Здача дипломної бакалаврської роботи на кафедру для рецензування (за 14 днів до захисту)	08.06.2023	
8	Перевірка дипломної бакалаврської роботи на наявність ознак плагіату (за 10 днів до захисту)	12.06.2023	
9	Подання дипломної бакалаврської роботи на затвердження завідувачу кафедри (за 7 днів до захисту)	15.06.2023	

Студент _____

Владислав ДОВГУЛЯ
(підпис)

Науковий керівник _____

Юрій ЛЕБЕДЕНКО
(підпис)

АНОТАЦІЯ

ДОВГУЛЯ В.В. Автоматизація процесу керування резервним

електроживленням – Рукопис.

Дипломна бакалаврська робота за спеціальністю 151 - Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології. – Київський національний університет технологій та дизайну, Київ, 2023 рік.

У даній роботі проведено дослідження та розробку методів та систем для ефективного керування системою резервного електроживлення.

Аналізуються сучасні системи резервного електроживлення, їх розповсюдженість та основні протоколи керування. Здійснюється огляд існуючих алгоритмів керування та визначаються їх переваги та недоліки.

Розробляються нові алгоритми та вдосконалюються існуючі для забезпечення швидкого та надійного переключення на резервне електроживлення. Розглядаються критерії надійності, енергоефективності та оптимального використання резервних джерел енергії.

Створюються системи керування, що включають апаратне та програмне забезпечення. Розробляються сенсори, контролери та інтерфейси для забезпечення автоматичного контролю та керування резервним електроживленням.

Проводиться тестування та валідація розроблених систем. Здійснюються експерименти, моделювання та аналіз результатів для перевірки працездатності та ефективності систем керування.

Отримані результати дозволяють покращити процес керування резервним електроживленням, забезпечуючи надійну та швидку реакцію на відмови основного електроживлення та забезпечуючи безперебійну роботу критичних систем.

Підготовлено функціональну та електричну схеми системи автоматизації, електричні схеми дизеля та генератора, а також схеми алгоритмів роботи.

Ключові слова: автономна електроенергетична система, система керування, дизельна електростанція, автоматичне ввімкнення резерву, гарантоване електропостачання, потужність.

ABSTRACT

Dovgulya V.V. Automation of the backup power supply management process - Manuscript.

Diploma bachelor's thesis on specialty 151 - Automation and computer-integrated technologies. – Kyiv National University of Technology and Design, Kyiv, 2023.

In this work, research and development of methods and systems of effective control of the backup power supply system was carried out.

Modern back-up power supply systems, their distribution and basic management protocols are analyzed. An overview of existing control algorithms and their advantages and disadvantages begins.

New algorithms are being developed and ideally exist to ensure fast and reliable switchover to backup power. The criteria of reliability, energy efficiency and optimal use of reserve energy sources are considered.

Management systems are created, including hardware and software. Sensors, controllers and interfaces are being developed to provide automatic control and management of backup power supply.

The developed systems are tested and validated. Experiments, simulations and analysis of the results were carried out to check the operability and efficiency of the control system.

The obtained results help to improve the process of managing the backup power supply, ensuring a reliable and fast response to the failure of the main power supply and ensuring the uninterrupted operation of critical systems.

Functional and electrical diagrams of automation systems, electrical diagrams of diesel and generator, as well as diagrams of work algorithms have been prepared.

Keywords: microcontroller, electroenergy system, control system, generator aggregate, power plant, power

ЗМІСТ

ВСТУП.....	3
1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД КОМБІНОВАНИХ АВТОНОМНИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК.....	10
1.1 Перспективи комбінованих автономних систем електропостачання	
1.2 Структура комбінованих систем електропостачання	
1.3 Функції підсистем комбінованого електропостачання	
1.3.1 Сонячні батареї	
1.3.2 Вітроенергетичні установки	
1.3.3 Дизель-генераторні установки	
1.3.4 Підсистема гарантованого електропостачання	
1.3.5 Пристрої автоматичного включення резерву	
1.3.6 Особливості використання генераторів в автономних вітроенергетичних установках	
1.3.7 Підсистема стабілізації параметрів електричної енергії із статичними перетворювачами	
2. ПРОЕКТУВАННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ РЕЗЕРВНИМ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯМ.....	40
2.1. Розробка структури	
2.2. Вибір елементної бази	
2.3. Вибір програмного забезпечення для проектування	
2.4. Опис принципової схеми	
3. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ В КОМБІНОВАНІЙ АВТОНОМНІЙ ЕНЕРГОСИСТЕМІ.....	49
ВИСНОВОК.....	59
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	62

ВСТУП

Сьогодні енергетика України вимагає значного споживання традиційних джерел енергії (нафти, газу, вугілля, атомної енергії), проте їх використання пов'язане із виникненням ряду труднощів, серед яких теплове, хімічне, радіоактивне забруднення навколишнього середовища та вичерпність їх запасів. Рівень забруднення атмосфери невинно зростає, що призводить до руйнування біосфери. І хоча є багато сучасних технологій, що дадуть змогу ще багато років забезпечити людство атомною енергією, однак це не вирішить таких проблем, як зберігання відходів, наслідки від аварій та теплового і радіаційного забруднення. Тому, одним з найважливіших завдань, яке стоїть перед паливно-енергетичним комплексом України, є максимальне використання власних енергетичних ресурсів, до яких, насамперед, належать нетрадиційні та альтернативні джерела енергії.

У середині ХХ ст. використання альтернативних джерел енергії було незначним, проте енергетична криза 70-х років минулого століття, Чорнобильська катастрофа 1986 року та катастрофа на АЕС «Фукусіма-1» в Японії 2011 року докорінно змінили погляди людства на альтернативні джерела енергії. При цьому, різке загострення взаємопов'язаних енергетичних і екологічних проблем – Монреальський протокол 1987 року з проблеми озонобезпеки і Кіотський протокол 1997 року (з проблем емісії парникових газів і глобального потепління), викликало значний інтерес до можливостей сонячних систем для тепло- та холодопостачання. Одним з перших проєктів Міжнародного Енергетичного Агентства ІЕА була програма сонячного нагрівання і охолодження, що існує з 1977 року й донині.

Разом з тим, в останні роки Європейське Співтовариство вимагає від країн, які прагнуть до неї вступити, збільшення частки альтернативних джерел енергії в національному виробництві енергії до 6 %, а до 2030 року – до 20 %. Для прикладу, в Україні цей показник використання альтернативних видів енергії знаходиться на рівні 0,7 %. Тому, одним із завдань, які стоять перед Україною на шляху до вступу в ЄС, є інтенсифікація використання потенціалу альтернативних джерел, зокрема сонячної енергії, оскільки при переведенні 10 % індивідуальних споживачів на сонячне теплопостачання в регіонах України можна зекономити 0,17 млн т у.п./рік. При ефективному використанні сонячного випромінювання потужністю 4 300 МДж/м² на рік можна забезпечити потреби споживачів в опаленні до 25 %, у гарячому водопостачанні – до 50 %, у

кондиціюванні – до 75 %. Заміна традиційних котелень сонячними установками дає можливість замінити і зекономити органічне паливо, знизити об'єм теплових викидів і викидів продуктів згоряння у довкілля, вирішити низку соціальних проблем у районах, де немає централізованого енергопостачання тощо.

Актуальність теми. Проблема відмови від традиційного і переходу на альтернативне енергозабезпечення потреб промислових споживачів та житлово-комунального комплексу досліджена багатьма авторами наукових робіт, в яких розкриті питання, пов'язані з побудовою систем енергозабезпечення на базі альтернативних джерел енергії, розглянуто ключові засади створення таких енергосистем.

Дослідження має на меті розробку автоматизованої системи керування технологічним процесом миття тари, що є інноваційним напрямком розвитку у сфері харчового виробництва

Об'єктом дослідження є системи резервного електроживлення: вивчення технічних характеристик, принципів роботи та параметрів систем резервного живлення, таких як дизельні генератори, UPS (унітерруптоване живлення) тощо.

Предмет дослідження - аналіз сучасних систем резервного електроживлення: розгляд існуючих рішень, технологій та протоколів, використовуваних для керування резервним електроживленням, розробка алгоритмів керування: створення нових алгоритмів або вдосконалення існуючих для оптимізації процесу автоматичного переключення на резервне електроживлення, враховуючи критерії надійності, швидкості переключення та оптимального використання резервних джерел енергії.

Проте, через складність процесів енергоперетворення в таких «гібридних» системах енергозабезпечення, деякі питання ефективного функціонування окремих елементів у складі таких систем науковцями висвітлені недостатньо та потребують продовження досліджень у цьому напрямі. Зокрема, з метою підвищення ефективності відбору, накопичення та використання енергії альтернативних джерел, не розкритим залишається питання дослідження процесів перетворення та акумуляції енергії в акумулюючих пристроях, що входять до складу згаданої системи.

З огляду на зазначене, науковий потенціал нашої країни повинен бути максимально орієнтований на розробку нових і модернізацію існуючих технологій генерації теплової та електричної енергії. При цьому, як один із

перспективних напрямів розвитку енергопостачання об'єктів господарювання різного призначення, варто відмітити можливість створення енергетично самодостатніх комплексів та нових типів «гібридних» систем автономного енергозабезпечення на основі як традиційних, так і альтернативних джерел енергії. Однак, як відомо, використання енергії цих джерел ускладнюється стохастичним характером її надходження, внаслідок чого постає потреба в забезпеченні безперебійної роботи вказаних систем. Стабільність та надійність функціонування таких комбінованих систем можуть бути досягнуті як за рахунок включення до їх складу традиційних джерел живлення, так і з використанням акумуляторів енергії різних типів, що дає змогу не лише підвищити ефективність використання теплової та електричної енергії, а й знизити її вартість.

З усіх типів існуючих конструкцій теплоакумуляторів найбільш перспективними є акумулятори теплоти з фазовими або хімічними перетвореннями акумуляуючого матеріалу, які дозволяють забезпечити високу щільність накопиченої енергії і стабільну температуру на виході з теплового акумулятора. До недоліків таких акумуляційних апаратів можна віднести їх високу вартість та трудомісткість виготовлення теплообмінної поверхні.

Одним з можливих шляхів удосконалення такого обладнання, як найбільш перспективний, варто відзначити варіант створення акумулятора енергії, в якому поєднані ємнісне та акумуляування теплоти фазових перетворень акумуляуючого матеріалу з використанням двох джерел первинної енергії, а саме: теплової та електричної. За такого підходу вдається не лише підвищити ступінь накопичення енергії, але й зменшити виробничі площі, що займає акумуляційне обладнання, скоротити енергетичні затрати на процес енергозабезпечення споживачів в цілому. Таким чином, з'являється можливість знизити вартість акумуляованої енергії порівняно з використанням декількох окремих незалежних джерел енергії, способи накопичення енергії яких поєднані в такому обладнанні.

Відповідно до цього, виникає необхідність проведення фізичного моделювання процесів тепло- і масопереносу при акумуляуванні енергії, що дасть змогу розробити нові або вдосконалити існуючі конструкції теплових акумуляторів. Окремою важливою задачею є створення комбінованих систем енергозабезпечення, що включають пристрої для акумуляування теплової та електричної енергії, з використанням альтернативних джерел енергії. Також, для здійснення вибору ефективних параметрів енергогенеруючого обладнання й

аккумуляторів енергії, важливим є встановлення енергетичних взаємозв'язків між компонентами такої системи.

Системи безперебійного гарантованого електроживлення - це системи, які в нормальному режимі забезпечують живлення від джерела електроживлення (з пригасовуванням високочастотних перешкод, стабілізацією рівня вихідної напруги і частоти), а так само є захистом від збитку, який можуть завдати робочим комплексам різні види збоїв централізованого електропостачання.

Дедалі очевиднішою стає неминучість глобальної енергетичної кризи в найближчі роки, наслідки якої можуть бути не гіршими за фінансову кризу і в перспективі призвести до втрати незалежності багатьох країн світу, на користь «Великих країн, що захищають» свої корисні копалини та розвивають поле альтернативної енергетики.

Для вирішення економічних та екологічних проблем вже сьогодні мають бути реалізовані відповідні рішення щодо використання відновлюваних ресурсів енергії (ВДЕ).

1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД КОМБІНОВАНИХ АВТОНОМНИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК.

1.1 Перспективи комбінованих автономних систем електропостачання.

Комбінована система автономного електропостачання (CASE) є однією з найперспективніших технологій в енергетичній сфері. Вони поєднують різні джерела енергії та технології для забезпечення стабільного та незалежного електропостачання.

Основні ідеї спільної автономної системи електропостачання:

- Використання відновлюваної енергії: когенерація може поєднувати сонячні панелі, вітрові турбіни, гідроелектрогенератори та інші відновлювані джерела енергії для виробництва електроенергії. Це допомагає зменшити залежність від традиційних джерел енергії, таких як вугілля чи нафта, а також допомагає зменшити викиди парникових газів і забруднення навколишнього середовища.

- Енергозбереження: ТЕЦ може використовувати різні методи для збереження надлишку енергії, отриманої з відновлюваних джерел енергії. Наприклад, це може бути акумуляторна технологія, системи утримання води на великій висоті або системи зберігання водневої енергії. Це дозволяє КАСЕ постачати електроенергію у періоди, коли відновлювальні джерела не забезпечують достатньо енергії.

- Резервне живлення та незалежність: КАСЕ можуть бути використані як резервне джерело живлення у випадку відмови централізованої мережі або аварії. Вони забезпечують незалежне постачання електроенергії для будинків, офісів, малих селищ та інших об'єктів. Крім того, КАСЕ можуть бути використані в віддалених та важкодоступних районах, де підключення до централізованої електромережі є недоцільним або неможливим.

- **Енергетична ефективність:** КАСЕ дозволяють раціонально використовувати енергію шляхом оптимального поєднання різних джерел та технологій. Наприклад, використання сонячних панелей в денний час, вітрових турбін у вітрову погоду та збереження надлишкової енергії дозволяє забезпечити оптимальну енергетичну ефективність системи.

Однак, для широкого впровадження КАСЕ ще потрібно вирішити деякі технічні, економічні та правові аспекти. Наприклад, розробка ефективних та економічно вигідних технологій збереження енергії, створення надійних систем управління та координації, а також врегулювання відповідних нормативних актів.

У всьому світі вже проводяться дослідження та розробки у галузі комбінованих автономних систем електропостачання, і можна очікувати, що ці технології будуть далі розвиватися та впроваджуватися в майбутньому.

1.2 Структура комбінованих систем електропостачання

Структура комбінованих систем електропостачання може значно варіюватися залежно від конкретного проекту та вимог. Однак, основні компоненти КАСЕ можуть включати:

- **Відновлювальні джерела енергії:** Комбіновані системи електропостачання зазвичай використовують відновлювальні джерела енергії, такі як сонячні панелі, вітрові турбіни, гідрогенератори тощо. Ці джерела забезпечують незалежну електропостачання і виробляють зелену енергію.

- **Система збереження енергії:** Комбіновані системи часто включають системи збереження енергії, які дозволяють зберігати надлишкову енергію, вироблену відновлювальними джерелами, для використання в періоди зниженої виробництва енергії або під час пікових навантажень. Такі системи можуть включати батареї, суперконденсатори, системи збереження водороду тощо.

- **Контролери та управління:** Комбіновані системи потребують ефективного контролю та управління для оптимального використання різних

джерел енергії. Це включає контролери збереження енергії, системи керування потужністю, алгоритми розподілу навантаження тощо.

- **Перетворювачі:** Для забезпечення сумісності різних джерел енергії та навантажень КАСЕ можуть використовувати перетворювачі, які забезпечують відповідну форму та напругу електроенергії для кожного пристрою.

- **Резервне джерело живлення:** В деяких випадках КАСЕ можуть мати резервне джерело живлення, таке як дизельний генератор або система підключення до централізованої мережі, для забезпечення постійної доступності електропостачання у випадку відмови або недостатнього виробництва відновлювальних джерел.

Це загальна структура комбінованих систем електропостачання, але конкретна реалізація може бути різною в залежності від потреб, технологій та умов конкретного проекту.

1.3 Функції підсистем комбінованого електропостачання

Функції підсистем комбінованого електропостачання включають різні аспекти, які забезпечують ефективну роботу системи та задоволення вимог користувачів. Основні функції підсистем комбінованого електропостачання можуть включати наступне:

- **Виробництво електроенергії:** Підсистема виробництва електроенергії включає відновлювальні джерела енергії, такі як сонячні панелі, вітрові турбіни, гідрогенератори тощо. Їх основною функцією є виробництво електроенергії для задоволення енергетичних потреб системи.

- **Система збереження енергії:** Ця підсистема відповідає за зберігання надлишкової електроенергії, яку виробляють відновлювальні джерела. Функція системи збереження енергії полягає у забезпеченні неперервного постачання електроенергії в періоди, коли виробництво енергії з відновлювальних джерел недостатнє або відсутнє.

- **Керування та контроль:** Ця підсистема відповідає за керування та контроль за роботою всіх компонентів комбінованої системи електропостачання.

Вона включає системи управління, контролери, сенсори та програмне забезпечення, які забезпечують оптимальну роботу системи, відповідають на зміни у виробництві та споживанні електроенергії, регулюють навантаження та забезпечують ефективне використання ресурсів.

- Перетворювачі та розподільча мережа: Ці підсистеми відповідають за перетворення та розподіл електроенергії у відповідній формі та напрузі для підключення до електрообладнання та навантаження. Вони забезпечують ефективну трансформацію та розподіл електроенергії в межах системи.

- Резервне джерело живлення: Деякі комбіновані системи електропостачання можуть мати резервне джерело живлення, таке як дизельний генератор або підключення до централізованої мережі. Ця підсистема має функцію забезпечення надійного живлення в разі відмови основних джерел енергії або в ситуаціях пікового навантаження.

Це лише загальний огляд функцій підсистем комбінованого електропостачання, і конкретні функції можуть відрізнятися залежно від проекту та вимог.

1.3.1 Сонячні батареї

Сонячна батарея - це сукупність фотоелектричних перетворювачів (фотоелементів) - напівпровідникових пристроїв, які безпосередньо перетворюють сонячну енергію в постійний струм, на відміну від сонячних колекторів, які нагрівають матеріали - теплоносії.

Різноманітні пристрої, що дозволяють перетворювати сонячне випромінювання в тепло і електрику, є предметом сонячної науки (від грецького Λλος Геліос — Сонце). Виробництво фотоелементів і сонячних колекторів йде різними напрямками. Сонячні батареї бувають різних розмірів: від вбудованих у крихітні калькулятори до тих, що займають дахи автомобілів і будинків.

Як правило, сонячна електростанція включає одну або кілька сонячних панелей, інвертор, а в деяких випадках і акумулятори, а також сонячний трекер.

Ефективність фотоелементів і модулів

Потужність потоку сонячного випромінювання на вході в атмосферу Землі (AM0), становить близько 1366 ват[9] на квадратний метр (див. також AM1, AM1.5, AM1.5G, AM1.5D[10][11]). У той же час, питома потужність сонячного випромінювання в Європі в дуже хмарну погоду навіть удень може[12] бути менше 100 Вт / м². За допомогою поширених промислово вироблених сонячних батарей можна перетворити цю енергію в електрику з ефективністю 9-24 %. У 2020 році, ціна на сонячні панелі впала до 0,15 — 0,33 дол / Вт, залежно від типу і потужності панелі[13]. У 2019, собівартість електрики, що генерується промисловими сонячними станціями, досягла 0,068 USD за кВт * год[14]. В 2021 році оптова ціна на сонячні елементи знизилася до 0,07 — 0,08 дол/Вт[15].

Фотоелементи і модулі діляться залежно від типу: монокристалічні, полікристалічні, аморфні (гнучкі, плівкові).

У 2009 році компанія Spectrolab (дочірня фірма Boeing) продемонструвала сонячний елемент з ефективністю 41,6 %[16]. У січні 2011 року очікувалося надходження на ринок сонячних елементів цієї фірми з ефективністю 39 %[17]. У 2011 році каліфорнійська компанія Solar Junction домоглася ККД фотоелемента розміром 5,5 × 5,5 мм в 43,5 %, що на 1,2 % перевищило попередній рекорд[18].

У 2012 році компанія Morgan Solar створила систему Sun Simba з поліметилметакрилату (оргскла), германію та арсеніду галію, об'єднавши концентратор з панеллю, на якій встановлено фотоелемент. ККД системи при нерухомому положенні панелі склав 26-30 % (в залежності від пори року і кута, під яким знаходиться Сонце), в два рази перевищивши практичний ККД фотоелементів на основі кристалічного кремнію[19].

У 2013 році компанія Sharp створила тришаровий фотоелемент розміром 4 × 4 мм на індієвий-галій-арсенідній основі з ККД 44,4 %[20], а група фахівців з Інституту систем сонячної енергії суспільства Фраунгофера, компаній Soitec, CEA-Leti і Берлінського центру імені Гельмгольца створили використовуючий лінзи Френеля фотоелемент з ККД 44,7 %, перевершивши своє власне досягнення в 43,6 %[21]. У 2014 році Інститут сонячних енергосистем Фраунгофер створив сонячні батареї, в яких завдяки фокусуванню лінзою світла на дуже маленькому фотоелементі ККД склав 46 %[22][23]. У 2014 році іспанські вчені розробили фотоелектричний елемент з кремнію, здатний перетворювати в електрику інфрачервоне випромінювання Сонця[24].

Перспективним напрямком є створення фотоелементів на основі наноантен, що працюють на безпосередньому випрямленні струмів, що наводяться в антені малих розмірів (близько 200—300 нм) світлом (тобто електромагнітним випромінюванням частоти близько 500 ТГц). Наноантени не вимагають дорогої сировини для виробництва і мають потенційний ККД до 85 % [25][26].

Також, в 2018 році, з відкриттям флексо-фотовольтаїчного ефекту, виявлена можливість збільшення ККД фотоелементів [27]. За рахунок продовження життя гарячих носіїв (електронів) теоретичну межу їх ефективності підняли з 34 відразу до 66 відсотків.

Фактори, що впливають на ефективність фотоелектричних елементів

Характеристики структури фотоелектричного елемента спричиняють зниження продуктивності панелі зі збільшенням температури.

Часткове затемнення панелі призводить до падіння вихідної напруги через втрати від неосвітлених елементів, які починають діяти як паразитне навантаження. Обійти цей недолік можна, встановивши байпас на кожен фотоелемент в панелі. У похмурі дні, за відсутності прямого сонячного світла, панелі, які використовують лінзи для концентрації випромінювання, стають вкрай неефективними, оскільки ефект лінз зникає.

З експлуатаційних характеристик фотоелектричних панелей видно, що для досягнення максимальної ефективності необхідний правильний вибір опору навантаження. Для цього фотоелектричні панелі не підключаються безпосередньо до навантаження, а замість цього використовується контролер керування фотоелектричною системою для забезпечення оптимального режиму роботи панелей.

Недоліки сонячних батарей

- Потрібно використовувати велику площу.
- Сонячні електростанції не працюють вночі, неефективні у вечірній час, коли припадає пік споживання електроенергії.
- Незважаючи на навколишню чистоту отриманої енергії, самі фотоелементи можуть містити токсичні речовини [30].

Сонячні електростанції критикували за високу вартість, а також за низьку стабільність складних галогенідів свинцю та токсичність цих сполук. Зараз

активно розробляються безсвинцеві напівпровідники на основі вісмуту [31] і сурми для сонячних елементів.

Через низький ККД (у кращому випадку до 20%) сонячні елементи можуть сильно нагріватися. Решта 80% сонячної енергії нагрівають сонячні елементи до середньої температури близько 55°C. З кожним підвищенням температури фотоелектричного елемента на 1°C його ефективність падає на 0,5%.

Активні елементи систем охолодження (вентилятори або насоси), які перекачують холодоагент, споживають значну кількість енергії, вимагають періодичного обслуговування і знижують надійність всієї системи. Пасивні системи охолодження мають дуже низьку продуктивність і не можуть впоратися із завданням охолодження сонячних батарей[32] .

1.3.2 Вітроенергетичні установки

Вітроенергетика – далеко не нова галузь енергетичного забезпечення, проте в нинішніх умовах вона набуває все більш виражені риси перспективного напрямку для подальшого розвитку. Поки ще складно говорити про універсальні концепції технічної реалізації вітрових генераторів, але успіхи у використанні окремих інженерних рішень дають підстави вважати, що в недалекому майбутньому з'явиться і єдина уніфікована конструкційна модель. На даний же момент в світі використовується кілька видів вітроенергетичних установок, кожен з яких має свої сильні сторони.

Загальний принцип роботи вітрогенераторів.

Як і більшість сучасних альтернативних джерел енергії, вітрогенератор функціонує за рахунок сили, діючої в результаті природного процесу. Мова йде про потоки вітру, що утворюються в результаті нерівномірного нагрівання земної поверхні Сонцем. Майже всі вітрогенераторні установки працюють за наступним принципом: повітряні потоки обертають колесо на спеціальному валу з лопатями, транслюючи таким чином крутний момент генератора або акумуляторної блоку. В умовах стабільності та достатньої сили руху повітря вітряки для вироблення електроенергії здатні забезпечувати коефіцієнт корисної дії на рівні 45-50 %. Як раз мінливістю вітру і його сили обумовлено широке різноманіття конструкцій вітрогенераторів, які розраховуються у тому числі виходячи з конкретних кліматичних умов застосування.

Основні переваги вітрогенераторів

Оцінювати ефективність роботи вітряків можна як у порівнянні з традиційними джерелами енергії, так і на тлі генераторів, що працюють на поновлюваних безкоштовних ресурсах. Найбільш вираженими перевагами таких систем, які і дають надію на їх успішний розвиток в майбутньому, є наступні фактори:

- Енергія вітру сама по собі не тільки поновлюється, але і доступна для акумуляції і обробки.
- Економічна вигода. Однозначних оцінок щодо конкретних економічних показників поки що не може бути в силу різноманіття систем, що працюють з різною продуктивністю. Але можна говорити про видатні результати, які демонструють окремі проекти. Наприклад, скільки коштує кіловат електроенергії від морського великого вітряка? Мова може йти про діапазоні 2-12 крб. за 1 кВт·год.
- Екологічна чистота. Робота вітрогенераторних станцій не передбачає шкідливих викидів, що забруднюють атмосферу.
- Компактність. Установка вітряка навіть в промисловому форматі не може порівнюватися з традиційними енергетичними станціями. Багато в чому це пов'язано з автономністю і незалежністю таких систем від допоміжних комунікацій і ресурсів.

Горизонтально-осьові генератори.

Конструктивна схема таких вітряків передбачає наявність електричного генератора, редуктора, лопатей і вежі зі станиною. Конфігурація лопатей реалізується таким чином, що повітряні потоки потрапляють у лійку, що створює момент кручення. Важливою умовою роботи таких вітряків для вироблення електроенергії є здатність підлаштовуватися під характеристики руху потоків (напрямок і сила). Для цього конструкції забезпечуються механізмами повороту і нахилу лопатей по відношенню до земної поверхні. У найбільш розвинених моделях застосовуються і контролери з автоматичним управлінням. Що стосується реалізації вітроколеса, то частіше в горизонтальних схемах застосовується трилопатева конфігурація. Причому у цілях підвищення продуктивності генераторів інженери прагнуть нарощувати розміри функціонально-приймальні частини, що, приміром, пояснює і сучасну тенденцію переходу від пластику і легких металів до дорогих композитним елементів при виготовленні конструкцій.

Вертикально-осьові генератори

У таких генераторів є вагома перевага перед горизонтальними конструкціями, яке полягає у відсутності необхідності додаткових засобів контролю та управління установкою. Тобто у процесі роботи вітряк з вертикальною віссю ніяк не підлаштовується під рух потоків. Ця особливість взаємодії з повітряними масами одночасно знижує напруга в лопатях вітрогенератора і скорочує гіроскопічні навантаження. Генератор з редуктором, що формують двигун установки, можуть розташовуватися у підставі вежі конструкції без ризиків пошкодження або виходу з ладу. Але чому ж при описаних достоїнства вертикальні установки не повністю витіснили горизонтальні вітряки? На жаль, у таких моделей є й істотні мінуси. Оскільки вітроколесо не орієнтується на потоки вітру і завжди працює у вузькому спектрі діапазонів захоплення енергії, то логічно знижується і продуктивність генератора. Тому для підтримки достатньої потужності вертикальних вітряків потрібно їх масове використання з охопленням великих площ, що не завжди можливо.

Конструкції на базі ротора Дар'є

Вітроелектричні генератори з вертикальним пристроєм робочого колеса базуються на схемі ротора Савоніуса або Дарині. Але і в цій групі є свої варіації та сучасні модифікації. Найбільш перспективною розробкою останнього часу вважається гелікоїдної турбіна Горлова, створена в 2001 р. Вона є свого роду продовженням концепції ротора Дар'є, але в більш спрощеному вигляді. Спіралеподібні вертикальні лопасті дозволяють виробляти енергію з потоків води і повітря при мінімальній активності. Сьогодні такі генератори використовуються як на спеціалізованих вітрових фермах, так і в складі гідроелектростанцій.

Вітрогенератори з потокоусилителями

Теж в деякому роді продовження класичних конструкцій вітряків, але з поправкою на нинішні високотехнологічні умови експлуатації. Модифікації з потокоусилителями відрізняються наявністю одного або декількох жолобів, які призначені для концентрації повітряних потоків. Аеродинамічні конусоподібні елементи у вигляді тих самих жолобів збирають потоки на великій площі, орієнтуючи їх в одну точку напрямки і збільшуючи тим самим швидкість руху лопатевої системи. Складність використання вітроенергетичних установок з потокоусилителями полягає в тому, що вони вимагають застосування додаткової елементної групи. Більш того, домогтися істотного підвищення продуктивності

в таких системах вдається тільки за рахунок підключення допоміжних джерел енергії, що не завжди економічно виправдовується.

Особливості промислових вітрогенераторів.

Вітряки промислового призначення мають два принципові відмінності – великі розміри і високу енергетичну потужність. З цих особливостей відбуваються як переваги, так і недоліки станцій такого типу. Що стосується конструкції, то досить сказати, що висота сучасних промислових вітряків може досягати 150-200 м, а мах лопатей – більше 100 м. Для утримання такої масивної конструкції виробляються масштабні будівельні роботи з влаштування фундаменту майданчики. Висока потужність також вимагає ускладнення функціональної інфраструктури. Так, для управління процесом перетворення енергії застосовуються контролери вітрогенератора, що забезпечують облік поточного заряду акумуляторного блоку. Крім того, в електротехнічній начинці таких установок передбачаються інвертори і системи захисту від коротких замикань.

Особливості побутових вітрогенераторів

Прості вітряки можна не просто використовувати вдома, але і збирати вручну. Як правило, це малорозмірні установки висотою не більше 10 м, здатні працювати на потужності 0,5-5 кВт. В якості пасивного джерела енергії для побутових приладів або окремих груп електротехнічних пристроїв такий варіант себе цілком виправдує. Втім, компактні вітроенергетичні установки у великій кількості сьогодні застосовуються і великими компаніями для живлення виробничих потужностей. На базі ферм міні-вітряків формуються досить продуктивні і надійні системи, які можуть конкурувати і з високопотужними поодинокими генераторами.

Особливості морських вітрогенераторів

Популярність такого типу вітряків обумовлена декількома перевагами перед станціями, які розміщуються на суші. Головним чином мова йде про більш стабільних умов роботи, так як у видаленні від берегової лінії потоки вітру не зустрічають перешкод. При цьому конструкції вітроенергетичних установок морського типу поділяються на дві групи – опорні і плавучі. Перші встановлюються на мілководді з класичною опорою в ґрунті під водою. Плавучі станції, відповідно, мають власну плаваючу платформу з фіксацією за допомогою якорів і інших морських пристосувань.

1.3.3 Дизель-генераторні установки

Дізельна електростанція (дизель-генераторна установка, дизель-генератор) — нерухома або пересувна енергетична установка, обладнана одним або декількома електричними генераторами з приводом від дизельного двигуна внутрішнього згоряння. Також існують пересувні резервні електроагрегати з приводом від бензинового двигуна — бензиноелектричний агрегат або бензинова електростанція, газопоршневі електростанції та газотурбінні електростанції.

Складові (див. схему 1.1)

Мотор. Двигун є джерелом механічної енергії, щоби запустити генератор і виробляти електрику. Здебільшого, дизельні двигуни є найбільш використовуваними через їх механічні, екологічні й економічні вигоди.

Блок керування двигуна. Контролер двигуна є механічним пристроєм (відцентровий регулятор), призначеним для підтримки постійної частоти обертання двигуна задля вимог навантаження. Швидкість двигуна, безпосередньо пов'язано з вихідною частотою генератора змінного струму, отже будь-яка зміна швидкості його обертання, впливає на частоту вихідного струму.

Електрична система. Власна електрична система двигуна, має 12 В або 24 В, постійної напруги (мінус на землі). Система містить: електричний стартер, акумуляторні батареї та датчики робочих й аварійних сигналів. Переважно, двигун має датчик тиску мастила, температури та електричне навантаження на генератор. У пересувних електростанціях невеликої потужності, для збудження електрорушійної сили у нерухомих обвитках статора, використовуються постійні (найчастіше неодимові) магніти, а у генераторах великої потужності, для живлення обмоток збудження на роторі (електромагнітів), використовується, так зване, пряме збудження від акумуляторних батарей, а після досягнення номінальних обертів, генератор переходить на самозбудження крізь напівпровідникові випрямлячі.

Система охолодження. Охолодження двигуна, може здійснюватися за допомогою води, мастила або повітря. Система повітряного охолодження складається з потужного вентилятора холодного повітря, що проходить уздовж систем двигуна. Система охолодження вода / мастило містить радіатор, із вбудованим вентилятором, задля охолодження складових дизельного двигуна.

Генератор змінного струму. Вихідна електрична енергія, виробляється за допомогою електромашинного генератора, з самозбудженням, та саморегулюванням струму, отже й, магнітного поля збудження.

Паливний бак. Дизель-генератор має паливний бак ємністю, зазвичай, на не менше 8 годин роботи за повного навантаження.

Віброізоляція. Генератор, здебільшого, оснащено пристосуваннями проти двигіння, які призначено для зменшення вібрації від двигуна-генератора. Ці амортизатори, зазвичай, розташовуються між базовим двигуном, генератором, приладовою панеллю та рамою.

Глушник і вихлопна система. На двигуні встановлено глушник та вихлопну трубу для зниження рівня шуму й відведення продуктів згоряння.

Система керування. Може передбачати ручне або автоматичне керування дизель-електростанцією. Система ручного керування, зазвичай містить ключі керування задля попереднього створення тиску мастила та увімкнення стартера і має прилади, котрі надають докладні дані про систему, яку встановлено на генераторі. Автоматична система керування, може підтримувати дизель-генератор у робочому стані та забезпечити його автоматичний запуск та зупинку у разі надзвичайних подій (знеструмлення).

Вихідний автоматичний вимикач. Для захисту генератора, переважно, використовують автоматичний вимикач.[2]

Види

Синхронний і асинхронний

Відрізняються за способом отримання електромагнітного поля, потрібного для вироблення електроенергії. Асинхронні, є більш надійними та довговічними і не створюють радіоперешкод, але вони погано витримують тривалі навантаження, на відміну від синхронних.

Однофазні та трифазні

Трифазні, здатні видавати напругу як 220В, так і 380В, а однофазні лише одну із них. До того-ж, трифазні електростанції мають більш високий ККД (коефіцієнт корисної дії).

Переносні, пересувні, нерухомі

Розрізняються за здатністю свого переміщення, зовнішніми розмірами, вагою.

Застосування

Такі електростанції та установки, застосовуються як основні, резервні або аварійні джерела електроенергії, для споживачів одно- або трифазного змінного

струму, для енергозабезпечення вахтових селищ, виробництва, установок зв'язку, польових аеродромів та аеропортів, польових шпиталів, дачних будинків, для електроживлення тепловозів, підводних човнів та іншої техніки, а також як силова установка кар'єрних самоскидів, армійських транспортних засобів, автомобілів з гібридними дизель-електричними двигунами тощо.

Але, попри наявність наприклад, надійного аварійного електрогенератора з двигуном внутрішнього згорання, він не здатний забезпечити миттєве живлення дуже відповідальних пристроїв. У лікарнях, банках та на інших важливих підприємствах такі цінні кілька хвилин можуть бути питанням життя або смерті. Для цього розроблено ДБЖ (джерела безперервного живлення), щоб усунути цю прогалину завдяки забезпеченню негайного підхоплення зниклого енергопостачання, після чого воно передає справи головному резервному джерелу електроенергії так швидко, щойно він буде спроможний видавати сталу електроенергію.[3]

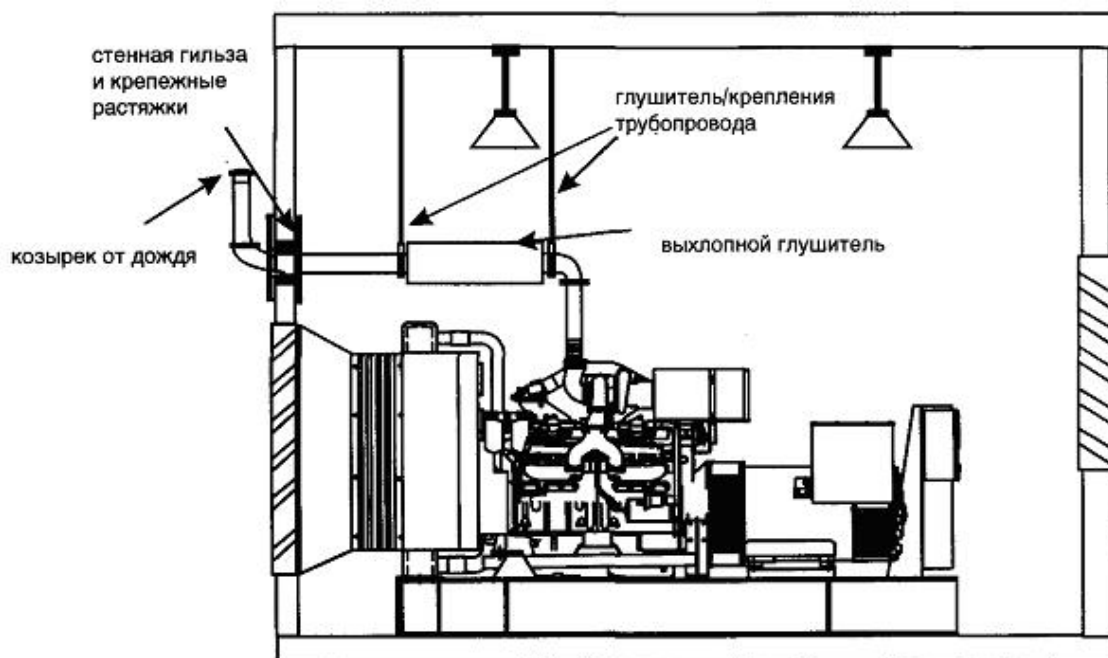


Рис. 1.1 Складові дизель-генераторної установки

1.3.4 Підсистема гарантованого електропостачання

Врятувати обладнання, що працює від електроенергії, від шкідливого впливу зовнішньої мережі не так просто. Для цього краще використовувати безперебійні джерела живлення, що діють за принципом подвійного перетворення. Багато хто вважає, що стабілізатори та фільтри можуть вирішити всі проблеми, проте це не так.

Джерела безперебійного живлення із подвійним перетворенням на 100 відсотків роблять безпечною роботу обладнання, навіть коли зовнішня мережа дає велике навантаження на нього. Це зумовлюється тим, що вхідна напруга не впливає на рівень вхідного.

Спочатку такі системи вводилися в експлуатацію на великих підприємствах, щоб звести до мінімуму ризик пошкодження дорогого обладнання, проте зараз це рішення використовується і в повсякденному житті пересічних людей. Якщо встановити неякісну систему живлення пристроїв, то ризик буде невиправданий, втрати можуть у разі перевищити економію.

Безперебійні джерела протягом певного відрізка часу можуть виробляти чисте живлення і підтримувати живлення навантаження. Тільки батарея, встановлена на ДБЖ, впливає на час, який може працювати автономно, без зовнішньої мережі. У більшості випадків, акумулятор, який ставиться на такі системи, не є особливо ємним, оскільки його мета лише в тому, щоб гарантувати живлення протягом коротких перебоїв енергії. Якщо збільшити ємність, то зрозуміло, зросте і вартість такої комплектації.

Якщо передбачаються довгі перебої у електропостачанні, тим більше оптимально підключити генераторну установку найчастіше це дизельні станції, вони можуть працювати довго в автономному режимі.

Часто їх прирівнюють до бензинових, проте такі способи працювати не більше трьох, у кращому разі, чотирьох годин. Якщо використовувати ДЖБ та ДДУ, то вийде система гарантованого електроживлення, вона зможе на 100% забезпечити незалежність від зовнішньої електричної мережі. Також існує безліч відмінних та ефективних рішень із застосуванням альтернативної сонячної енергії, яка служить заміною енергії, взятої із зовнішньої мережі, за правильною оптимізації, така система заощадить не тільки гроші на купівлю енергії у комунальних служб, а й знизить багато ризиків. Ця установка може бути використана майже будь-де, починаючи від дач і котеджів і закінчуючи лікарнями та заводами.

Принцип роботи складається з чотирьох основних пунктів:

Перший. Якщо енергія береться із зовнішньої мережі, то дизельна генераторна установка стоятиме в сплячому режимі, проте при цьому лежить відповідальність за контроль рівня напруги у вхідній мережі. У той же час, харчування забезпечуватиметься ДБЖ. На джерело безперебійного живлення подається змінний струм, який змінюється на постійний, і використовується для забезпечення потрібного рівня заряду акумуляторів, а потім повертається назад в змінний стан і віддається споживачеві для заряджання потрібного обладнання.

Другий: Якщо контролер ДДУ помітив збій, який відбувається у зовнішній мережі та спостерігається повна тимчасова відсутність живлення, дизельний генератор запускається. Саме постачання енергії все ще лежить на ДБЖ, який забирає енергію у акумуляторів, перетворюючи постійний струм на змінний і відправляючи його на потреби обладнання.

Три. Коли струм у зовнішній електричній мережі так і не з'явився, то дизельний генератор включається на потрібну потужність і перемикає АВР, відбувається перемикавання навантаження, що знаходиться на зовнішній мережі, на користь генератора. Харчування також йде завдяки ДБЖ. На джерело безперебійного живлення подається змінний струм, який змінюється на постійне, і використовується для забезпечення потрібного рівня заряду акумуляторів, а потім повертається назад в змінний стан і віддається споживачеві для заряджання потрібного обладнання.

Чотири. Як тільки контролер дизельного генератора побачить, що зовнішня мережа відновилася і що вже якийсь час надходить енергія, він дозволить навантаженню піти від генератора назад на зовнішню мережу.

1.3.5 Пристрої автоматичного включення резерву

Блок автоматичного введення резерву (АВР) — Будь-яка енергоспоживаюча система на 100% не може бути захищена від зовнішніх і внутрішніх впливів, що впливають на її стабільну роботу. Щоб забезпечити її безперебійне функціонування при проблемах з енергопостачанням, використовуються додаткові незалежні джерела струму. АВР - керуючий блок, який перемикає і розподіляє енергію при відключенні основних джерел струму.

Що собою являє АВР?

Пристрій Автоматичного введення резерву (АВР) - це сукупність блоків, об'єднаних в єдину систему і складаються з 2 частин:

Логічної, що включає реле, контролер, який можна налаштовувати вручну або за допомогою мікропроцесора, панелі для індикації та управління приладом. Комунікаційної.

Розподільчий може мати від 1 до 3-4 введень. Один основний (від якого працює пристрій) і 1-3 додаткових, які подають струм споживачеві при відключенні основного. Від їх кількості залежить надійність живлення навантаження. Також велике значення має швидкість перемикання між джерелами живлення.

Класифікація АВР

АВР класифікуються залежно від:

- Кількості резервних джерел живлення;
- Типу мережі - найчастіше це трифазного живлення, але зустрічаються моделі і для однофазних мереж;
- Клас напруги - блок може застосовуватися в мережах з напругою до і вище 1000 В;
- Потужності приєднаного споживача;
- Часу спрацьовування комунікаційної апаратури.

Типи схем роботи

Автоматичні пристрої підрозділяються на кілька типів, в залежності від дії:

Одностороннього - при відмові головного живильного введення відбувається перемикання на резервний, а при відновленні напруги в основній мережі блок перемикає все назад.

Двосторонні - в цьому типі немає поділу на основний і резервний блок, так як вони рівнозначні, і від якої лінії відбувається живлення системи не має значення.

На 3 привода - в схемі з 3 фазами перемикання відбувається, наприклад, на 2-й, якщо вона несправна або відзначається «перекіс фази», то на 3-й. Вони можуть не включати контролера з відкладеним запуском - т.е. Все 3 введення рівнозначні і незалежні. При включенні в схему програмованого контролера приводи можуть мати різне значення - 1 рівнозначний і 2 аварійних або 2 рівнозначних і 1 резерв.

На 4 привода з каскадним пуском - коли аварійні лінії живлять генератори високої потужності, їх одночасне включення призведе до стрибка напруги, тому їх включають послідовно - каскадом.

З відновленням - при появі напруги в основному джерелі струму він вмикається через певний проміжок часу, а резервний відключається. Таким чином, невеликий проміжок часу обидва працюють паралельно. У разі, коли це неприпустимо, спочатку відключається резервний, а потім підключається відновлений головний.

Автоматичний ВР - необхідний пристрій, що забезпечує безперебійне надходження енергії на споживання обладнання.(див. схему 1.2)

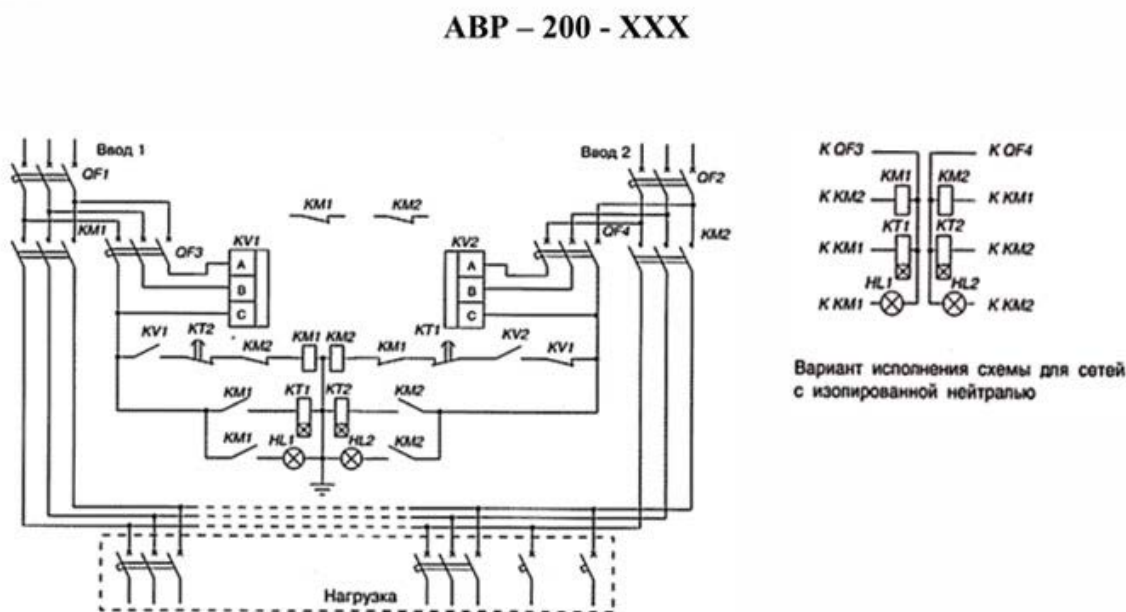


Рис. 1.2 – Схема АВР

1.3.6 Особливості використання генераторів в автономних вітроенергетичних установках

Перспективний напрямок розвитку ВДЕ на Україні пов'язаний з вітроенергетикою, яка може стати економічно рентабельною за рахунок зниження питомих капітальних витрат на будівництво ВЕУ та правильного вибору комплектуючих елементів.

У перших ВЕУ всіх типів і потужностей, як генеруючу одиницю, використовували асинхронну машину (АМ). Дійсно, АМ є найпростішими на етапах розрахунку, проектування, виготовлення та обслуговування, найнадійнішими, найдешевшими та найлегшими машинами (кВт/кг). Але при використанні в автономному генераторному режимі вони потребують джерела

реактивної енергії, що знижує надійність ВЕУ. Оцінка вибору електрогенератора в залежності від діапазону встановленої потужності, від впливу швидкості вітру та стійкості «троянди вітрів» для конкретного регіону повинна виконуватись для вибору високих енергетичних параметрів, високої надійності та ККД. Для розрахування потужності асинхронного генератора (АГ), встановленого у ВЕУ, складемо рівняння балансу активних потужностей, Вт:

де C_p — коефіцієнт використання енергії вітру;
 ρ – щільність повітря ($\rho=1,23$ кг/м³ при температурі $t=15$ °С про і атмосферному тиску 760 мм рт. ст.);
 v – середня швидкість вітру (встановлюють за даними гідрометцентру окремого регіону), м/с;
 D – зовнішній діаметр вітроколеса, м;
 η_{el} – ККД електричного генератора, в.о.;
 η_{mech} – ККД механічної частини ВЕУ, в.о.

Швидкість вітру в момент часу t має випадковий характер і визначається на підставі спостережень та/або прогнозується з певною точністю. При розгляді енергетичних

$$P = C_p \cdot \frac{\rho \cdot v^3}{2} \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot \eta_{el} \cdot \eta_{mech}$$

співвідношень майже завжди вважають, що коефіцієнт потужності АГ постійний.

Рівняння балансу потужностей для автономної системи електропостачання з АГ із системою самозбудження при включенні в коло обмотки статора конденсаторів представимо у вигляді:

де I_s , I_N , I_k – струм обмотки статора АГ, струм навантаження та конденсаторів, А;

ω_s - кутова частота напруги генератора, 1/с;

L – індуктивність навантаження, Гн;

C , C_k – ємність конденсаторів, що шунтують і компаундують, Ф;

φ_s , φ — фазові кути зсуву напруг генератора та навантаження;

m_s – кількість фаз обмотки статора генератора;

$\cos\varphi_{AG}$ — коефіцієнт потужності генератора;

Q_{AG} – реактивна потужність генератора, квар:

$$Q_{AG} = m_s \cdot U_s \cdot I_s \cdot \sin \varphi_{AG}$$

Рівняння (1) – рівняння балансу активних потужностей. Воно виконується для кожної автономної системи з АГ зі самозбудженням. Наступні рівняння (2-5) виражають

баланс реактивних потужностей при активно-індуктивному навантаженні і при використанні в генераторній установці тільки конденсаторів, що шунтують або компаундують. Рівняння балансу реактивної потужності є правильним для автономної системи

лише тому випадку, якщо вирівнювання частоти автономної системи не застосовується вставка «випрямлювач-інвертор».

Якщо дана вставка є, то баланси реактивної потужності складають окремо для АГ з колом його збудження і окремо для автономного кола з компенсаторами реактивної потужності. Це допомагає забезпечити якості електроенергії.

При спільній паралельній роботі генераторів на загальне активно-індуктивне навантаження їх активні потужності складаються, а реактивна потужність системи дорівнює сумарній реактивній потужності встановлених конденсаторів.

Для роботи асинхронної машини у генераторному режимі необхідне джерело реактивної потужності. Значення ємності, необхідної для збудження генератора при заданій частоті, дорівнює, Φ :

$$C = \frac{1}{[(2\pi \cdot f_s)^2 \cdot (L_s + L_m)]'}$$

де L_s та L_m – відповідно індуктивність обмотки статора і намагнічуючого контуру генератора, Гн.

У загальному випадку ємність, яка необхідна для отримання напруги на генераторі при заданому значенні навантаження, може бути розрахована:

- запишемо баланс реактивної потужності АГ, що працює на автономну систему,

$$m_s \cdot U_s \cdot I_s \cdot \cos \varphi_{AG} = m_N \cdot U_N \cdot I_N \cdot \cos \varphi_N \quad (1)$$

$$m_s \cdot \left[\frac{I_k^2}{\omega_s \cdot C} - I_N^2 \cdot \omega_s \cdot L \right] = Q_{AG} \quad (2)$$

$$m_s \cdot \frac{I_k^2}{\omega_s \cdot C} = Q_{AG} \quad (3)$$

$$m_s \cdot \frac{I_k^2}{\omega_s \cdot C} + I_N^2 \left[\frac{1}{\omega_s \cdot C_k} - \omega_s \cdot L \right] = Q_{AG}, \quad (4)$$

$$\frac{m_s}{\omega_s} \cdot \left(\frac{I_k^2}{C} + \frac{I_k^2}{C_k} \right) = Q_{AG}. \quad (4)$$

вар:

$$Q_C = m_s \cdot \frac{U_C^2}{X_C} = Q_{AG} + Q_N = P_{AG} \cdot \operatorname{tg}\varphi_{AG} + P_N \cdot \operatorname{tg}\varphi_N;$$

де Q_C – необхідна реактивна потужність конденсаторів, вар;

Прийmemo $P_{AG}=P_N$, тоді, Ом:

$$X_C = \frac{1}{\omega_s \cdot C} = \frac{1}{2\pi \cdot f_s \cdot C}.$$

Звичайно, значення ємності, яка необхідна для роботи АГ, якщо приводний двигун (лопати ВЕУ) обертається зі змінною частотою обертання, Φ :

$$C = \frac{P_N \cdot (\operatorname{tg}\varphi_{AG} + \operatorname{tg}\varphi_N)}{2\pi \cdot f_s \cdot m_s \cdot U_C^2},$$

де P_N – активна потужність, що передається від АГ до споживача, Вт;

U_C – напруга конденсаторів, що підключені до АГ, Φ ;

f_s – частота напруги АГ, Гц;

φ_{AG} та φ – відповідно кути здвигу фаз між напругою і струмом АГ та навантаження, ел.град.;

$U_{AG}=U_C$ – напруга на виводах АГ і, відповідно, на навантаженні, В.

Дослідження показали, що автономні АГ доцільно використовувати при значеннях $n_{AG}/n_N \geq 0,9$, де n_N – синхронна частота обертання асинхронної машини (об/хв).

При менших n_{AG} необхідна ємність для роботи асинхронної машини в генераторному режимі швидко зростає, і генератор майже повністю завантажується реактивним струмом.

В наш час значний інтерес викликає можливість використання в енергетиці електрогенераторів із постійними магнітами. Розвиток технологій дозволяє постійним магнітам конкурувати з генераторами зі звичайною електромагнітною системою збудження, а надійність та відсутність втрат дозволяють говорити про їхню перевагу.

Тому в діапазоні потужностей від 1 кВт до 50 кВт все більшого поширення набувають синхронні генератори (СГ) з постійними магнітами (СГПМ), які мають високий ступінь автономності, надійності, вони прості у виконанні та мають досить високий ККД.

Поки що вони дорогі у виготовленні, але переваги в експлуатації відповідають сучасній тенденції розвитку техніки.

Тож при виборі типу генератора, що встановлюється в ВЕУ, необхідно враховувати особливості його експлуатації, потужність, вести оцінку і враховувати економічні

показники і технічні можливості виробництва, на якому передбачається випускати ВЕУ або окремо генератор.

Порівняння енергетичних характеристик генераторів багатьма дослідниками (активна потужність, напруга і частота) показує, що для ВЕУ малої потужності (5-10 кВт) доцільно використовувати не артеріальну гіпертензію з КЗ ротором, а СГПМ. Найбільш ефективна робота ВЕУ із СГПМ при малих швидкостях вітру. Слід пам'ятати, що АГ з КЗ ротором має меншу надійність, ніж СГПМ через обов'язкову комплектацію конденсаторними батареями. Але СГПМ має гірші енергетичні параметри, ніж АГ з КЗ ротором, при різких змінах швидкості вітру.

Слід пам'ятати, що потрібна серйозна аргументація вибору типу генератора, тому що вибір вимагатиме значних матеріальних вкладень в організацію їх виробництва: наукових розробок, створення нових технологічних процесів та оснащення, випробувальних стендів, підготовки інженерно-технічного персоналу та робітників. Тому для України, на наш погляд, більш прийнятним є використання класичних типів генераторів або генераторів спеціального, але більш традиційного виконання, що теж є визначальним фактором вибору типу генератора.

В цілому для ВЕУ можливі не тільки АГ з к.з. ротором або СГПМ, тобто синхронні генератори з магнітоелектричним збудженням (із збудженням від постійних магнітів), також можливе використання:

- синхронні генератори з електромагнітним збудженням;
- асинхронні генератори із фазним ротором;
- асинхронізовані синхронні генератори;
- спеціальні СГ: індукторні, генератори з кігтеподібним ротором та деякі інші.

Кожен із зазначених типів генераторів має переваги та недоліки.

Використання СГПМ довгі роки стримувалось великою вартістю та складною технологією виготовлення постійних магнітів.

Натепер значно поширюється. Цьому сприяє створення нового покоління постійних магнітів з високими техніко-економічними показниками, що мають високу коерцитивну силу та можливість її довго зберігати. Такі магніти

дозволяють отримати в робочій зоні (повітряному зазорі) значення магнітної індукції до 0,8-0,9 Тл, що в деяких випадках навіть перевищує значення індукції, що отримується при електромагнітному збудженні.

1.3.7 Підсистема стабілізації параметрів електричної енергії із статичними перетворювачами

Класифікація перетворювачів параметрів електричної енергії.

Перетворювачі ділять на дві основні групи:

1. перетворювачі змінної напруги (які живляться від джерел змінної напруги);
2. перетворювачі постійної напруги (які живляться від джерел постійної напруги).

До перетворювачів змінної напруги відносять: випрямлячі, перетворювачі частоти з безпосереднім зв'язком, перетворювачі числа фаз, регулятори (стабілізатори) змінної напруги.

До перетворювачів постійної напруги відносять: автономні інвертори, широтно-імпульсні перетворювачі постійної напруги (регулятори, стабілізатори), транзисторні стабілізатори постійної напруги неперервної та імпульсної дії, перетворювачі постійної напруги однієї величини в постійну напругу іншої величини (конвертори). Перераховані перетворювальні пристрої виконують роль електронних трансформаторів, які сполучають джерело електричної енергії із споживачем, або поєднують одну систему напруг з іншою.

Перетворювачі, побудовані з окремих простих перетворювачів, що перераховані вище, утворюють багатокаскадну перетворювальну систему.

До складу напівпровідникових перетворювачів, як правило, входять трансформатори, а також реактивні елементи електричного кола (дроселі і конденсатори), які виконують функцію гальванічної розв'язки, а також фільтрації струмів і напруг, які протікають в елементах перетворювальної системи.

Розрізняють зворотні і незворотні перетворювачі. Незворотні перетворювачі забезпечують передавання енергії тільки в одному напрямку і пов'язують систему живлення із системою споживання енергії. Зворотні перетворювачі можуть передавати енергію у двох напрямках. Вони з'єднують дві системи, які містять як джерела, так і споживачів електричної енергії і здійснюють обмін енергією між цими системами в обох напрямках. Зворотні

перетворювачі з'єднують систему змінної напруги із споживачами, які на певних етапах роботи можуть ставати джерелами електричної енергії. Наприклад, двигуни постійного струму під час гальмування працюють в генераторному режимі. Для використання цієї енергії застосовують режим рекуперативного гальмування, при якому енергія від навантаження передається до мережі живлення. До групи зворотних перетворювачів відносять також перетворювачі, у яких на певних інтервалах періоду здійснюється повертання реактивної енергії навантаження (наприклад дроселя) до джерела живлення.

Розрізняють реверсивні і нереверсивні перетворювачі. У нереверсивних перетворювачах полярність напруги на стороні споживача постійного струму незмінна. У реверсивних перетворювачах полярність напруги на виході перетворювача може змінюватися у процесі регулювання напруги на навантаженні (наприклад, електрична машина в прокатному стані та ін.).

Випрямлячі і інвертори ділять на однофазні і багатofазні, керовані і некеровані. Перетворювальні системи можуть бути як одноканальні, так і багатоканальні по входу і виходу, нерегульовані і регульовані (стабілізовані).

За способом формування і регулювання вихідної напруги (струму) перетворювачі ділять на однозонні і багатозонні. В однозонних перетворювачах формування вихідної напруги здійснюється за рахунок імпульсно-часової модуляції всієї вхідної напруги шляхом її періодичного підключення і відключення,

У багатозонних перетворювачах формування вихідної напруги здійснюється за рахунок часткової імпульсно-часової модуляції у межах однієї зони, напруга якої у ціле число раз менша за величину вихідної напруги.

За характером роботи силових ключів перетворювачі ділять на однокітні і двокітні.

В однокітних перетворювачах комутація (включення і виключення) ключових елементів відбувається один раз за період змінної напруги.

У двокітних перетворювачах комутація відбувається два рази за період (один раз за півперіод).

Області застосування перетворювачів.

Випрямлячі широко застосовують у кольоровій металургії (виробництво алюмінію та інших металів), хімічній промисловості (крекінг метану та ін.), на залізничному і міському транспорті (мережа живлення постійного струму), електрозварюванні, гальванотехніці, для заряджання акумуляторів,

електроерозійної обробки металів, у джерелах вторинного електроживлення (ДВЕЖ) радіоелектронної апаратури, ЕОМ, засобів автоматики, вимірювальній техніці та інших технічних пристроях і системах. Крім того, випрямлячі є складовою частиною у перетворювачах частоти з ланкою постійного струму.

Інвертори застосовують для живлення споживачів електричної енергії змінного струму. Первинним джерелом при цьому є або електрична мережа постійного струму, або акумуляторні батареї, сонячні батареї та інші джерела постійного струму. Інвертори застосовують також в системах передавання електричної енергії постійним струмом. Вони є складовою частиною в багатоланкових перетворювачах частоти з ланкою постійного струму.

Перетворювачі частоти застосовують для електроприводу змінного струму, електротермії, живлення радіоелектронної апаратури, а також світлотехнічних пристроїв.

Широтно-імпульсні перетворювачі (регулятори) постійної і змінної напруги застосовують для стабілізації і регулювання напруги приладових комплексів, для швидкодіючих прецизійних тахометричних слідкуючих систем, для електрохімії, підйомно-транспортних засобів, тягових електроприводів гірничодобувної промисловості, електромобілів, міського електротранспорту.

Перетворювачі числа фаз застосовують для перетворення однофазної напруги у трифазну і навпаки (наприклад для рухомого складу змінного струму).

Напівпровідникові перетворювачі широко використовуються як комутаційна апаратура і статичні коректори (регулятори) реактивної потужності.

2. ПРОЕКТУВАННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ РЕЗЕРВНИМ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯМ.

Автоматизовані резервні системи керування живленням є невід'ємною частиною сучасних інженерних систем, що забезпечує безперебійне електропостачання у разі збою основного електропостачання. Система включає такі компоненти, як резервне джерело живлення, пристрій керування, датчик, алгоритм автоматичного перемикавання та сигналізація. Розробка автоматичної резервної системи керування живленням вимагає аналізу вимог, вибору оптимальних компонентів і розробки ефективних алгоритмів для забезпечення надійності та швидкодії системи.

2.1 Розробка структури.

Розроблення системи керування резервним живленням є важливим етапом проектування, оскільки вона забезпечує автоматичне перемикавання на резервне джерело живлення в разі відмови основного джерела живлення. Основні етапи розроблення системи керування резервним живленням містять у собі

1. Визначення архітектури системи:

На цьому етапі визначається загальна структура системи керування, включно з блоками керування, каналами зв'язку, датчиками та пристроями. Архітектура має враховувати вимоги системи до надійності, часу відгуку та інших функціональних характеристик.

2. Розроблення алгоритмів автоматичного перемикавання

На основі аналізу вимог та архітектури системи має бути розроблено алгоритм автоматичного перемикавання. Алгоритм визначає умови перемикавання, послідовність роботи і реакцію системи на збої в мережі. Має бути гарантовано швидке і безперебійне перемикавання на резервне джерело.

3. Вибір і конфігурація обладнання керування

Для реалізації системи управління необхідно вибрати і налаштувати відповідне обладнання управління, наприклад, програмовані логічні контролери (ПЛК), реле і контактори. Керуюче обладнання виконує команди алгоритму перемикавання та керує процесом перемикавання джерела живлення.

4. Реалізація комунікаційної інфраструктури

Для забезпечення взаємодії між компонентами системи керування має бути реалізована інфраструктура зв'язку. Це може бути дротовий або

бездротовий зв'язок, наприклад, Ethernet, RS-485, Modbus або Profibus. Комунікаційна інфраструктура дає змогу передавати дані між пристроями керування, датчиками та іншими компонентами системи.

5. Встановлення системи сигналізації та моніторингу

Для керування та контролю стану системи резервного живлення необхідно встановити систему сигналізації та моніторингу. Пристрої сигналізації відображають стан первинного і вторинного джерела живлення, а система моніторингу дає змогу відстежувати параметри системи в режимі реального часу й отримувати повідомлення про несправності та переривання.

6. Тестування та перевірка системи

Після встановлення системи управління її слід ретельно протестувати, щоб переконатися, що вона працює правильно, швидко реагує і виявляє можливі несправності. Тестування містить імітацію несправностей і перевірку роботи алгоритмів автоматичного перемикавання. Після виявлення несправностей систему налагоджують і оптимізують.

2.2. Вибір елементної бази.

Вибір компонентної інфраструктури системи керування резервним живленням є важливим етапом проектування. Компоненти системи мають бути надійними, сумісними один з одним і відповідати вимогам системи. Ключові чинники, які необхідно враховувати під час вибору бібліотеки компонентів, включають в себе

- Пристрій керування:

Для управління системою можуть використовуватися керуючі пристрої: програмовані логічні контролери (ПЛК), мікроконтролери або інші пристрої, здатні керувати процесом. Вибір керуючого обладнання залежить від таких вимог, як швидкість реакції, обчислювальна потужність та інтерфейси зв'язку.

- Датчики.

Датчики вимірюють різні параметри системи, такі як напруга, струм і температура. Вибір датчика залежить від таких вимог, як точність вимірювання, діапазон вимірювання та інтерфейс зв'язку.

- Комутаційні пристрої:

Комутаційні пристрої використовуються для перемикання між основним і резервним живленням. Існують реле, контактори та електронні комутаційні пристрої. Вибір комутаційного обладнання повинен забезпечувати надійне перемикання і враховувати потужність системи.

- **Комунікаційні інтерфейси:**

Інтерфейси зв'язку необхідні для забезпечення взаємодії між компонентами системи. Інтерфейси зв'язку включають дротові (наприклад, Ethernet, RS-485) або бездротові (наприклад, Wi-Fi, Bluetooth) методи зв'язку. Інтерфейс зв'язку має бути обраний відповідно до таких вимог, як швидкість передавання даних, відстань і взаємодія з іншими системами.

- **Резервне джерело живлення:**

Резервним джерелом живлення може бути акумулятор, дизельний генератор або інше джерело енергії. Під час вибору резервного джерела живлення слід враховувати вимоги до потужності, термін служби батареї та доступність палива або енергії.

- **Сигнали тривоги:**

Стан системи можна контролювати за допомогою світлових, звукових або інших типів сигнальних пристроїв. Вибір сигнального пристрою залежить від таких вимог, як видимість, чутливість та інтерфейс із системою управління.

Вибір елементів має ґрунтуватися на аналізі вимог до системи, ефективності, надійності та вартості компонентів. Найкращий вибір дасть змогу побудувати функціональну й ефективну систему керування резервним живленням.

2.3. Вибір програмного забезпечення для проектування.

При виборі програмного забезпечення для проектування системи керування резервним електроживленням слід враховувати різні фактори, такі як функціональність, сумісність, надійність та доступність. Ось декілька популярних програмних засобів, які можуть бути використані:

1. **PLC-програмування:**

Якщо для системи керування використовується програмований логічний контролер (ПЛК), вибір програмного забезпечення для його програмування є важливим. Найпоширенішими програмними пакетами для ПЛК-програмування є Siemens TIA Portal, Allen-Bradley RSLogix, Schneider Electric Unity Pro та Codesys. Вони надають інструменти для розробки логіки керування, налаштування комунікацій та діагностики ПЛК.

2. SCADA-системи:

SCADA-системи (Supervisory Control and Data Acquisition) використовуються для нагляду, керування та збору даних з системи керування. Деякі популярні SCADA-системи включають Wonderware System Platform, Siemens WinCC, Inductive Automation Ignition та Schneider Electric Vijeo Citect. Вони надають графічні інтерфейси для моніторингу системи, створення алармів та збору даних для аналізу.

3. Моделювання та симуляція:

Деякі програми дозволяють моделювати та симулювати роботу системи керування перед його фізичною реалізацією. Наприклад, MATLAB/Simulink, LabVIEW, Dymola та OpenModelica надають можливості для створення моделей, виконання симуляцій та аналізу роботи системи до її реалізації.

4. Протоколи зв'язку:

Для комунікації між різними компонентами системи керування можуть використовуватись специфічні протоколи зв'язку, такі як Modbus, Profibus, Ethernet/IP тощо. Вибір програмного забезпечення повинен підтримувати ці протоколи та мати засоби для конфігурування та управління комунікаційними параметрами.

5. Бази даних та зберігання даних:

Якщо система керування потребує зберігання та обробки великої кількості даних, необхідно вибрати відповідне програмне забезпечення для баз даних, такі як MySQL, Microsoft SQL Server, Oracle, MongoDB тощо. Вони надають засоби для зберігання та обробки даних з системи керування.

Вибір програмного забезпечення залежить від конкретних вимог проекту, бюджету та досвіду команди проектування. Рекомендується провести детальний аналіз функціональних вимог та перевірити сумісність обраного програмного забезпечення з апаратною частиною системи керування.

2.4. Опис принципової схеми.

Автоматичний запуск резервного джерела живлення за допомогою Atmega8.

Система автоматичного запуску - це пристрій, який автоматично керує набором генераторів для резервного живлення з функцією запуску ДБЖ (резервної батареї). Схема автоматичного резервного джерела живлення контролює напругу в мережі й автоматично запускає, зупиняє та перемикає навантаження генератора. Давайте складемо схему пристрою.

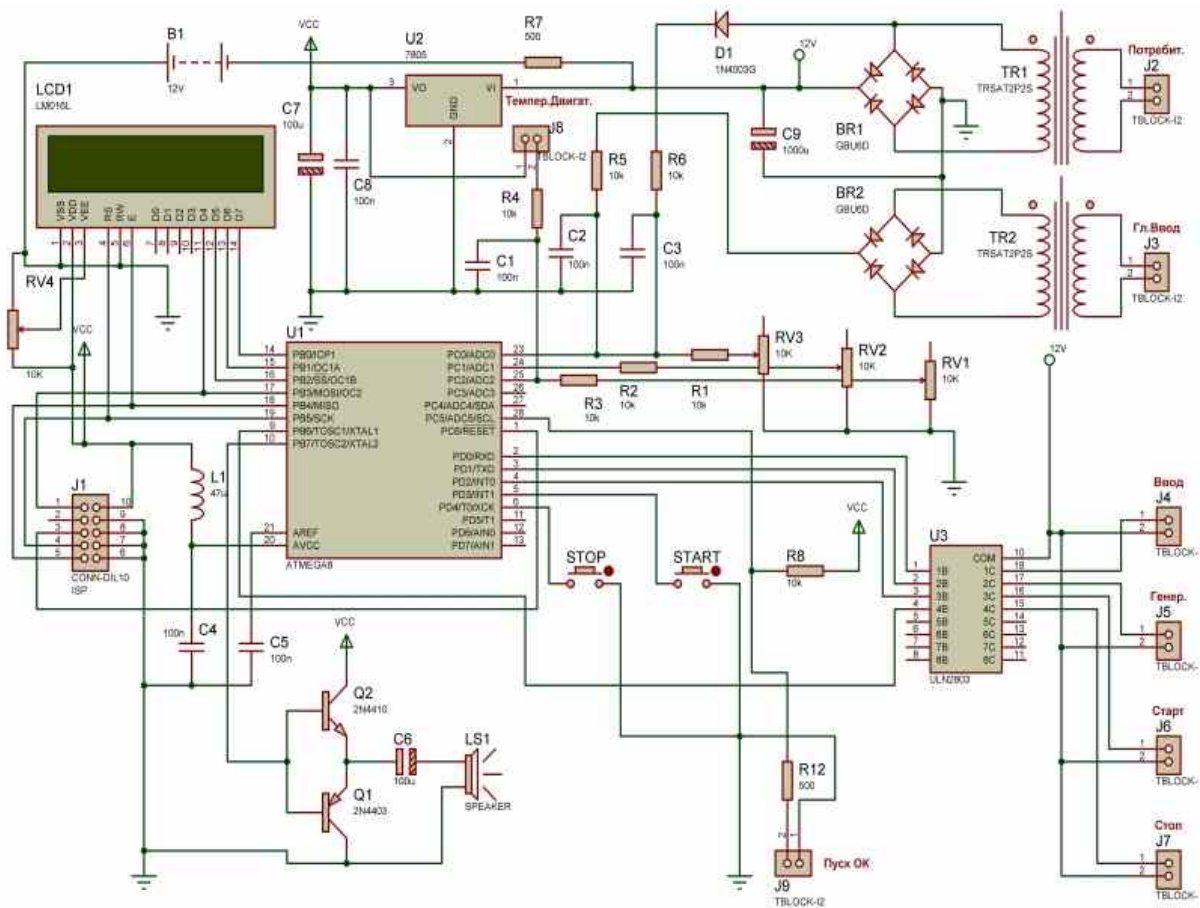


Рисунок 2.1 – Схема контролера

Візьмемо, наприклад, такі пристрої

1. Контролює напругу на вході в будинок і перемикає живлення на генератор, якщо вона нижче 160 вольт
2. При перемиканні на генератор: п'ять разів запускає генератор; якщо запуск пройшов успішно, то генератор деякий час прогрівається
3. За наявності напруги на входній клемі: подати звуковий сигнал, потім почекати, вимкнути генератор і вимкнути подачу живлення на входну клему

4. Можливість дистанційного керування генератором.

5. Максимальна безпека обладнання, вимкненого від мережі (контактор генератора розміщений на відстані 25 м від блока керування, там же розташований генератор).

Це лише блок керування, виход під'єднано до буферного реле.

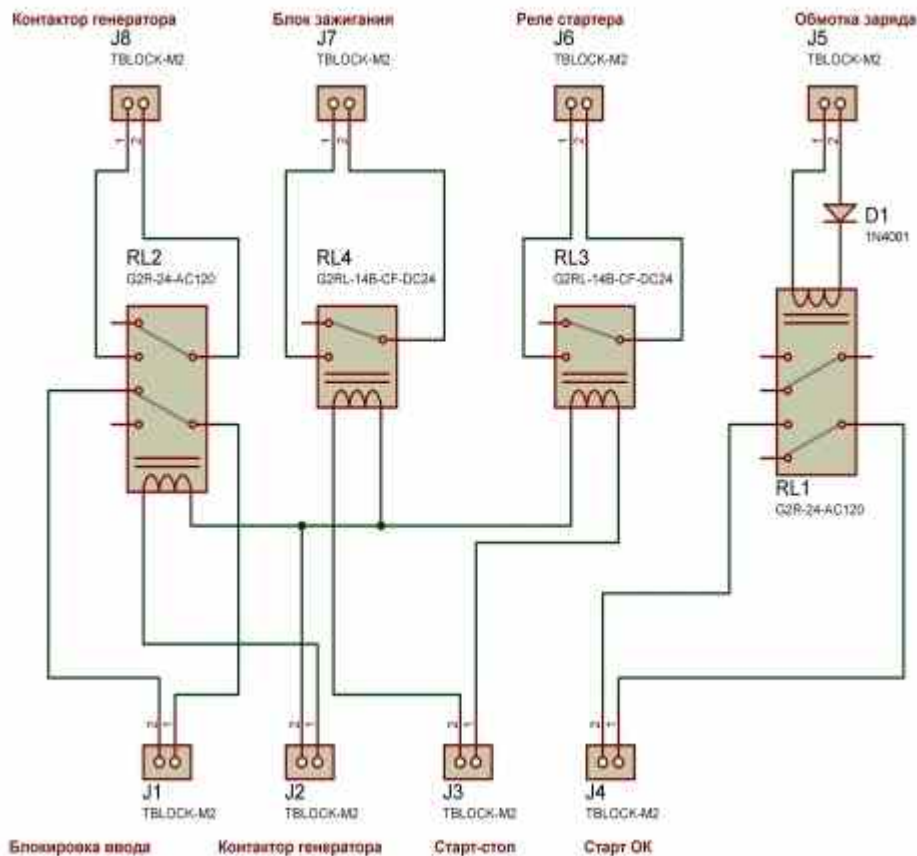


Рис. 2.2 Схема з'єднань

Оскільки трансформатор було взято з іншого пристрою (який зазвичай не виділяє тепла під час роботи), значення опорів резисторів дільника напруги для входу АЦП були не такими, як показано на схемі, а підібрані індивідуально. Якщо використовуються інші трансформатори, напруга дільника напруги має бути змінена в програмі.

У програмі використовуються тільки дві кнопки, UP і RIGHT, для виконання таких функцій

- У режимі живлення:

Генератор запускає тест, перемикає живлення, потім вимикає звук і переходить у нормальний режим. Зупинка вручну запущеного генератора.

- У режимі живлення генератора:

Ручний запуск генератора після п'яти невдалих спроб автоматичного запуску. Перехід у режим очікування напруги без запуску генератора.

Логіка роботи проста і помітна у вихідному коді застосунку (34)

Через двадцять секунд після подачі живлення в ланцюг вмикається вхідний контактор. Потім пристрій переходить у режим контролю вхідної напруги. У цьому режимі можна перевірити роботу резервного входу. Якщо напруга падає нижче 160 вольт, подається звуковий сигнал і виводиться повідомлення; через 30 секунд сигнал скасовують, потім слідує п'ятихвилинна пауза, після закінчення якої знову вимірюється вхідна напруга. Якщо протягом цього періоду напруга не нормалізується, вхідний контактор відключається і робиться спроба запуснути генератор. Запуск генератора контролюється реле, під'єднаним до обмотки акумулятора генератора, яке з'єднує свої нормально розімкнуті контакти з портом контролера. З інтервалом в 15 секунд (чекаючи відкриття повітряної заслінки генератора); якщо генератор не запускається протягом п'яти спроб, пристрій перемикається в режим вибору ручного управління (або повторить спробу запуску генератора, або дочекайтеся появи напруги на вході). Якщо генератор успішно запущено, почекайте 1 хвилину, щоб двигун прогрівся, і увімкніть контактор генератора. Після появи напруги на вході подайте сигнал на 30 секунд, потім зробіть паузу на 20 секунд і виміряйте вхідну напругу. Якщо вона в нормі, вимкніть контактор генератора, зупиніть генератор і увімкніть вхідний контактор.

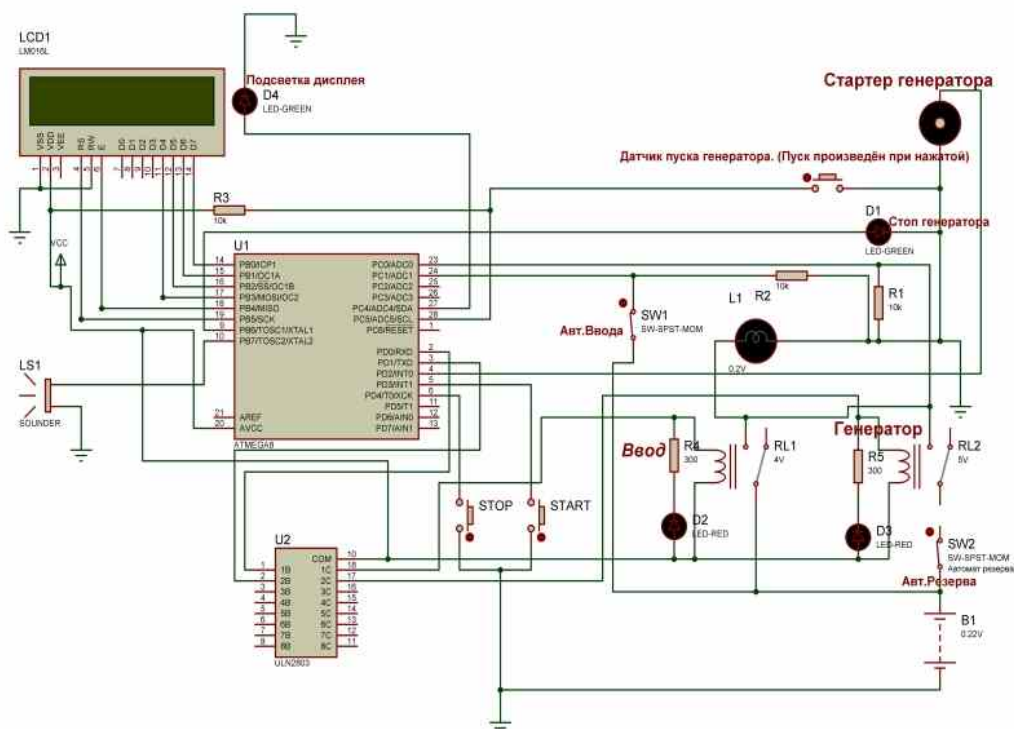


Рис. 2.3 Схема системи керування

Використовуваний генератор - Stark PSG6500EL зі стартером і соленоїдом повітряної заслінки (з простим реле часу для утримання заслінки деякий час після запуску двигуна) Метод моделювання в Proteus.

3. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ В КОМБІНОВАНІЙ АВТОНОМНІЙ ЕНЕРГОСИСТЕМІ.

Моделювання як інструмент дослідження в галузі силової електроніки останніми роками знаходить дедалі ширше застосування. У літературі представлено різні інструменти моделювання та об'єкти моделювання [2]. Останніми роками розробники дедалі частіше використовують пакети моделювання Matlab Simulink з ширшими можливостями.

Моделювання дизель-генератора як частини автономної електростанції комбінованого циклу.

Розглянемо модель системи моніторингу та управління для електростанції комбінованого циклу, що складається з одного синхронного генератора, який у режимі реального часу отримує інформацію про стан електростанції, кількість виробленої електроенергії та максимальну потужність. Керування моделлю здійснюється через COM-порт.

Модель SG показано на рис. 3.1.

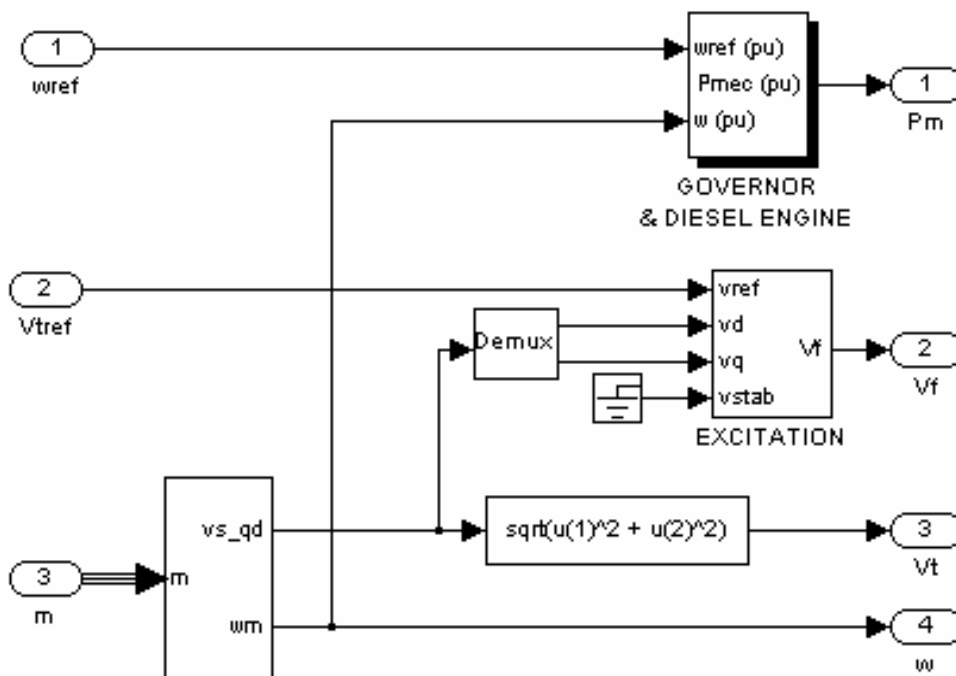


Рис. 3.1 – Модель контрольованого встаткування

Вона містить модель дизельного двигуна, систему збудження генератора, перемикачі, навантаження різної потужності (10 кВт, 16 кВА і 21 кВА), блок вимірювання сигналів і блок, пов'язаний із COM-портом.

Вхідними сигналами для блоку дизельного двигуна є необхідна швидкість (w_{ref}) (у віддалених блоках) і фактична швидкість (w_m). Вихідним сигналом є сигнал, що відповідає потужності, яку виробляє дизельний двигун (P_m). На систему збудження подається опорна напруга (V_{tref}) і фактична напруга статора (v_{s_dq}). На виході виходить сигнал (V_f), який керує збудженням синхронного генератора.

Модель дизеля описується наступними передатними функціями [3]:

$$H_c(p) = \frac{k \cdot (1 + T_3 \cdot p)}{1 + T_1 \cdot p + T_1 \cdot T_2 \cdot p^2},$$

$$H_a(p) = \frac{1 + T_4 \cdot p}{p \cdot (1 + T_5 \cdot p) \cdot (1 + T_6 \cdot p)}.$$

де $H_c(p)$ – передатна функція регулятора;

$T_1 - T_3$ – постійні часу регулятора,

$H_a(p)$ – передатна функція актуатора,

$T_4 - T_6$ – постійні часу актуатора.

Блок “Diesel Engine Speed & Voltage Control” показаний на рис. 3.2

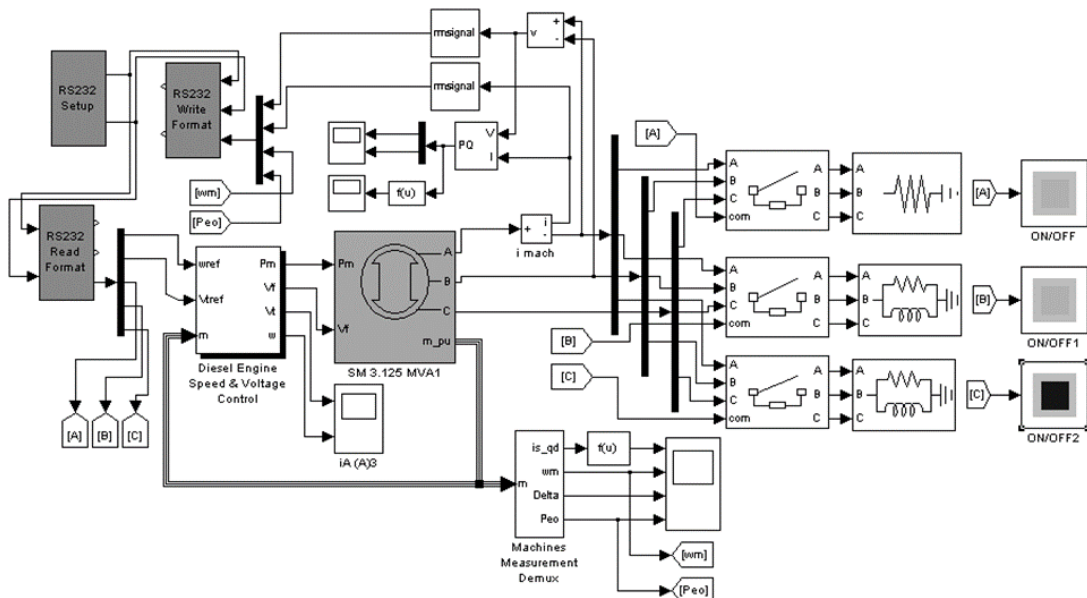


Рис. 3.2 – Моделі дизеля й системи збудження генератора

Генератор представлений моделлю синхронної машини з демпферною обмоткою. Параметри машини задаються в системі відносних одиниць. Потужність генератора 60 кВт, лінійна напруга на статорі 380 В. Генератор має 2 пари полюсів (номінальна частота обертання 1500 об/хв). Для визначення

змінних машини з вихідного вектора вимірюваних величин використовується блок Machines Measurement Demux.

Математичний опис синхронного генератора в осях d й q, представлено в наступному виді :

$$\begin{cases} U_d = -R_a I_d + \frac{d\psi_d}{dt} - \psi_q \Omega, \\ U_q = -R_a I_q + \frac{d\psi_q}{dt} + \psi_d \Omega, \\ U_f = R_f I_f + \frac{d\psi_f}{dt}, \\ \psi_d = (-L_{ad} I_d + M_{afd} I_f) - L_{as} I_d, \\ \psi_q = (-L_{aq} I_q) - L_{as} I_q, \\ \psi_f = \left[-\frac{3}{2} M_{afd} I_d + (L_f - L_{fs}) I_f \right] + L_{fs} I_f, \end{cases}$$

де ψ_d , ψ_q – потокозчеплення фаз статора по поздовжній і поперечній осях;

ψ_f – потокозчеплення контуру збудження;

U_d , U_q , I_d , I_q – складові напруги й струми статора по поздовжній і поперечній осях.

Рівняння руху СГ має вигляд:

$$M_\delta = J \frac{d\Omega}{dt} + \frac{3}{2} (\psi_q I_d - \psi_d I_q),$$

$$J_\kappa \frac{d\omega_\kappa}{dt} = M_T + M_\kappa,$$

де J_κ – момент інерції;

ω_κ – кутова швидкість ротора турбокомпресора;

$M_T = M_T(\omega, \omega_\kappa, B_\zeta)$ – крутний момент дизеля;

ω – кутова швидкість вала дизеля;

B_ζ – годинна витрата палива двигуна;

$M_\kappa = M_\kappa(Q, \omega_\kappa)$ – момент опору компресора;

Q – витрата повітря через компресор.

На основі наведених вище рівнянь побудована модель синхронного генератора (рис.3.1). При роботі СГ на окреме навантаження приймаємо допущення, що активний опір статора мало в порівнянні з активним опором навантаження $r_a \ll r_n$. Крім того, вплив величин $\frac{d\psi_d}{dt}, \frac{d\psi_q}{dt}, L_n \frac{di_d}{dt}, L_n \frac{di_q}{dt}$ на перехідні електромеханічні процеси в статорі генератора несуттєвий й ними можна зневажити при подальшому розгляді.

Для розробки макромодуля навантаження необхідно перетворити рівняння статичного навантаження й представити в наступному виді:

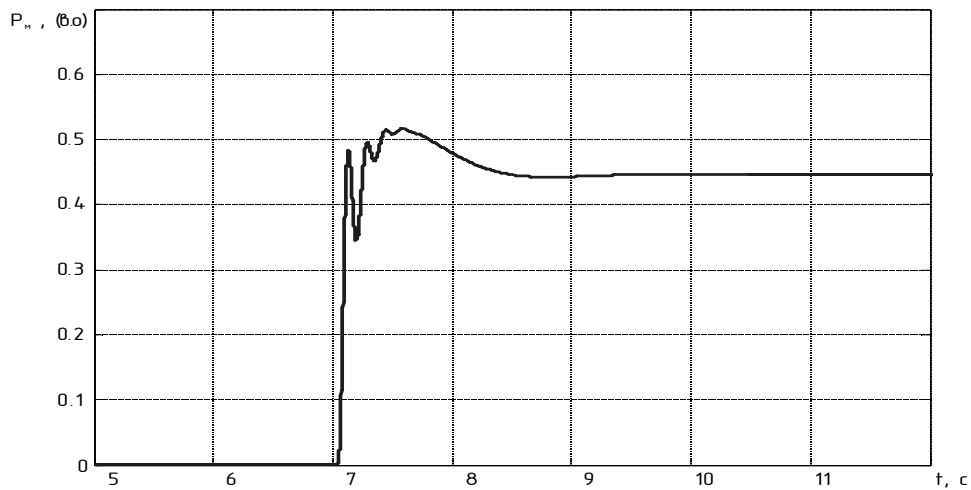
$$\begin{aligned} p i_{dn} &= \frac{\omega_a}{x_n + x_{kn}} \left\{ U_{do} - \left[(r_n + r_{kn}) i_{dn} - (x_n + x_{kn}) i_{qn} \right] \right\}, \\ p i_{qn} &= \frac{\omega_a}{x_n + x_{kn}} \left\{ U_{qo} - \left[(r_n + r_{kn}) i_{qn} + (x_n + x_{kn}) i_{dn} \right] \right\}, \end{aligned} \quad (3.1)$$

де i_{dn}, i_{qn} – складові струми статичного навантаження по осях;

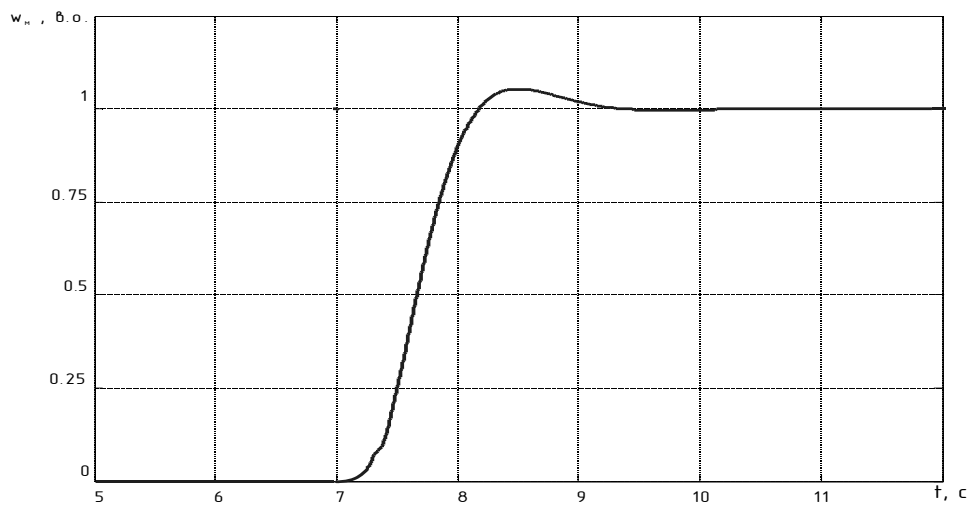
r_{kn}, x_{kn} – складові опори автомата й траси кабелю, що з'єднує статичне навантаження із ГРЩ.

Під час розрахунку моделі ви можете вибирати між безперервним або дискретним, змінним або фіксованим кроком методом інтегрування; більшість методів зі змінним кроком, доступних у Simulink, дають добрі результати для лінійних систем. Однак схеми з нелінійними елементами вимагають методів розв'язання жорстких систем. Найкраща швидкість для нелінійних систем досягається за допомогою методів ode23tb або ode15s з використанням параметрів за замовчуванням. Вибір абсолютної похибки залежить від

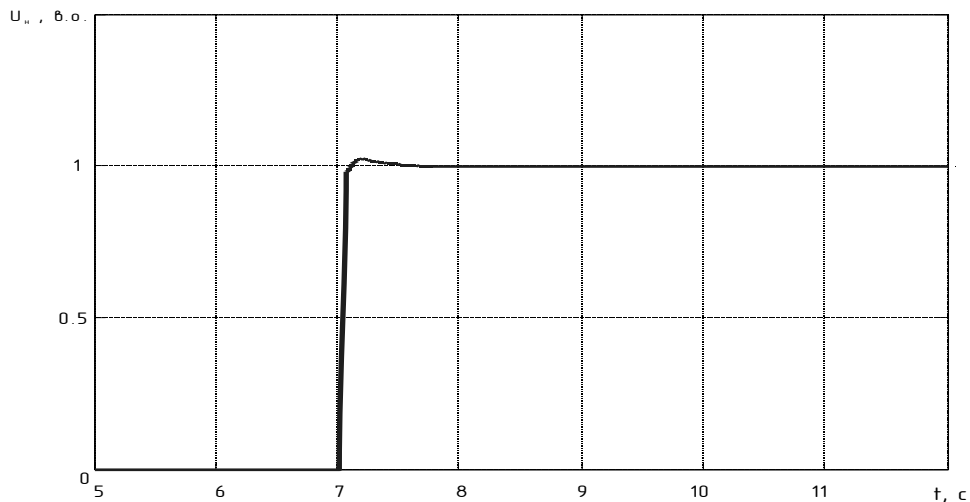
максимального значення сигналу, очікуваного в ланцюзі.



а)

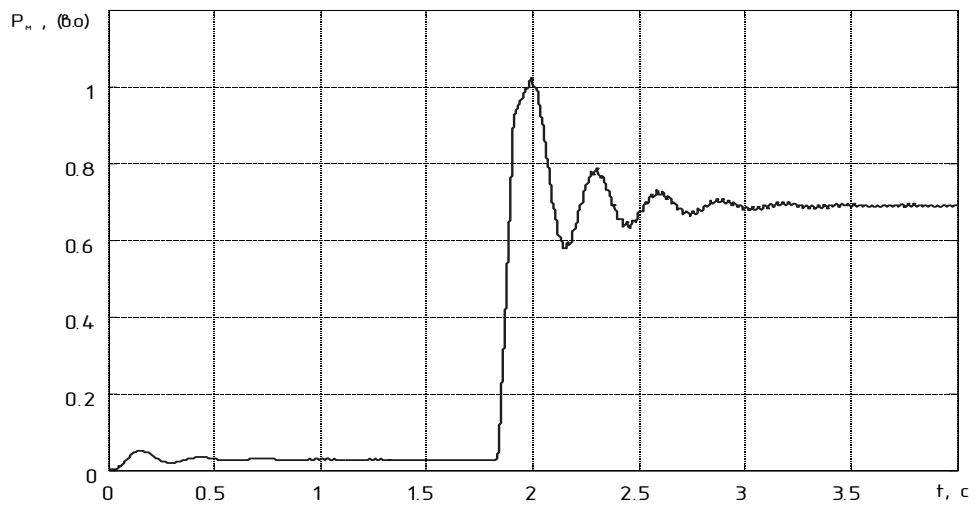


б)

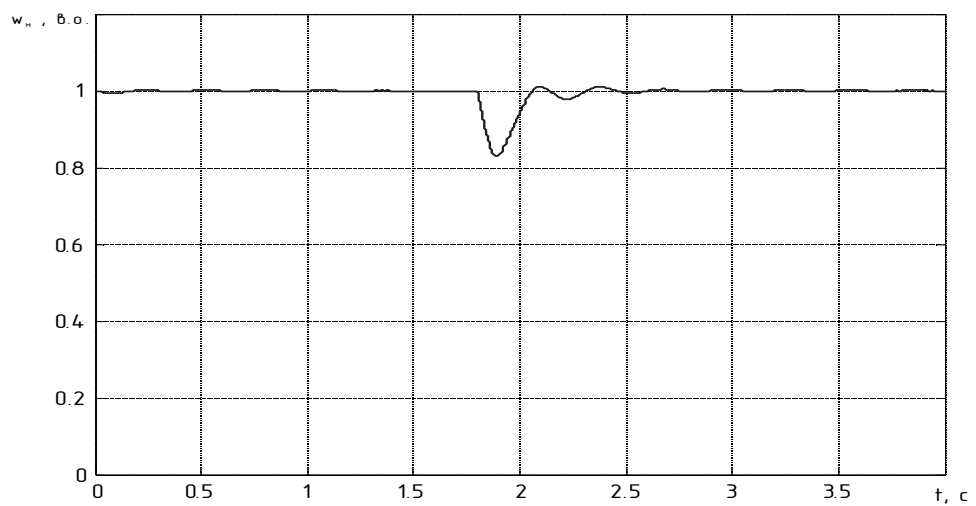


в)

Рис. 3.3 – Результати моделювання запуску дизель-генераторної електростанції
а) потужність P_m ; б) швидкість w_m ; в) напруга U_n ;



б)



в)

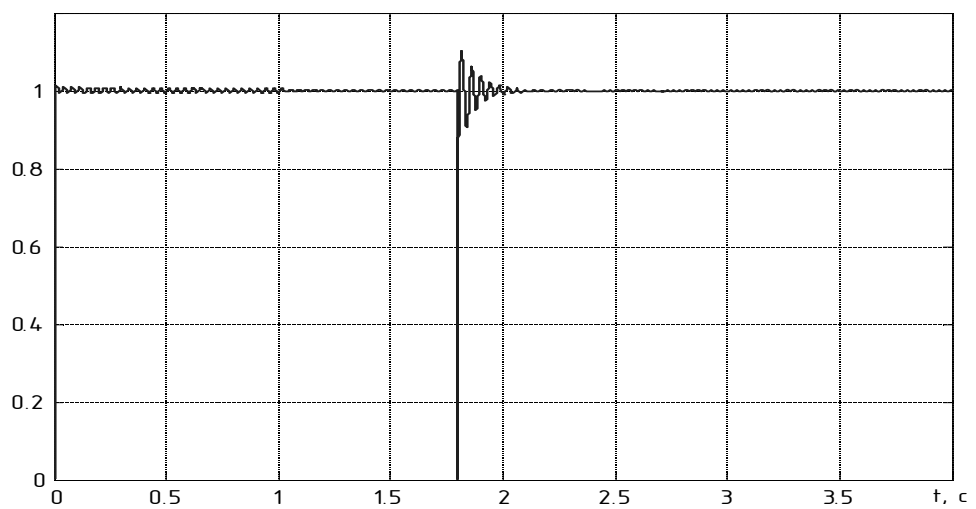


Рис. 3.4 – Результати моделювання накиду активного навантаження
 а) потужність P_n ; б) швидкість w_n ; в) напруга U_n

Співвідношення, що рекомендується, тут складає 0.01 0.001 максимального значення сигналу [4]. Наприклад, якщо значення струмів і напруг схеми становлять тисячі ампер або вольт, то абсолютна погрішність може бути обрана 0.1 [1].

Для моделювання управління і моніторингу використовувалися два комп'ютери, з'єднані послідовними портами за допомогою нуль-модемних кабелів. Під час моделювання панелі керування (рис. 3.2) використовувалися бібліотеки 'Dial and Gauge Blockset' і 'RS485 Blockset'. У цьому прикладі бібліотеки для роботи з COM-портами представлені блоками: 'RS485 setup', 'RS485 write format' і 'RS485 read format'.

Список практичних завдань, які можуть бути вирішені за допомогою створеного програмного комплексу, дуже широкий і не обмежується наведеним вище переліком. Паралельна робота декількох генераторів, процеси синхронізації генераторів, розподіл активної/реактивної потужності та моделювання аварійних ситуацій (коротке замикання, обрив фази) можливі за допомогою Matlab, що дає змогу дистанційно керувати обладнанням, наприклад, електростанціями, а також системами моніторингу. При цьому дані можуть передаватися як через послідовний інтерфейс RS485, так і через локальну мережу Ethernet. Таке управління дає змогу видалити персонал із зони роботи обладнання, тим самим покращуючи умови праці на виробничому майданчику.

Моделювання вітрових турбін як частини автономної електростанції комбінованого циклу

Як приклад див. рисунок 3.5, на якому показано щоденну роботу вітроелектростанції, побудованої на базі дизель-генератора номінальною потужністю 15 кВт, 13 вітротурбін потужністю 50 кВт і 40 буферних акумуляторних батарей загальною ємністю 90 кВт-год.

Використання вітро-дизельних систем електропостачання дає змогу заощаджувати паливо і подовжує термін служби двигунів дизельних генераторів. Для моделювання використовували стохастичні та статистичні моделі навантажень автономних споживачів та енергії повітряного потоку, а також енергетичні моделі вітрогенераторів і дизельних електростанцій.

Розрахунки засвідчили, що забезпечення розумного енергетичного балансу в автономних ВТГ та відповідне підвищення енергоефективності потребує ретельного коригування встановленої потужності ВТГ, ВТГ та АБ з урахуванням вітрового режиму в місці розташування електростанції та

прогнозного графіка електричних навантажень. Однак, навіть за раціонального вибору способу ВЕС, існує надлишок електроенергії, що виробляється ВТГ, який не може бути повністю використаний акумуляторними накопичувачами енергії, тому автономній ВЕС потрібне регулююче навантаження для коригування режиму виробництва та споживання енергії в режимі, коли електроенергія, що виробляється ВТГ, перевищує поточну потужність навантаження. Така ситуація матиме місце.

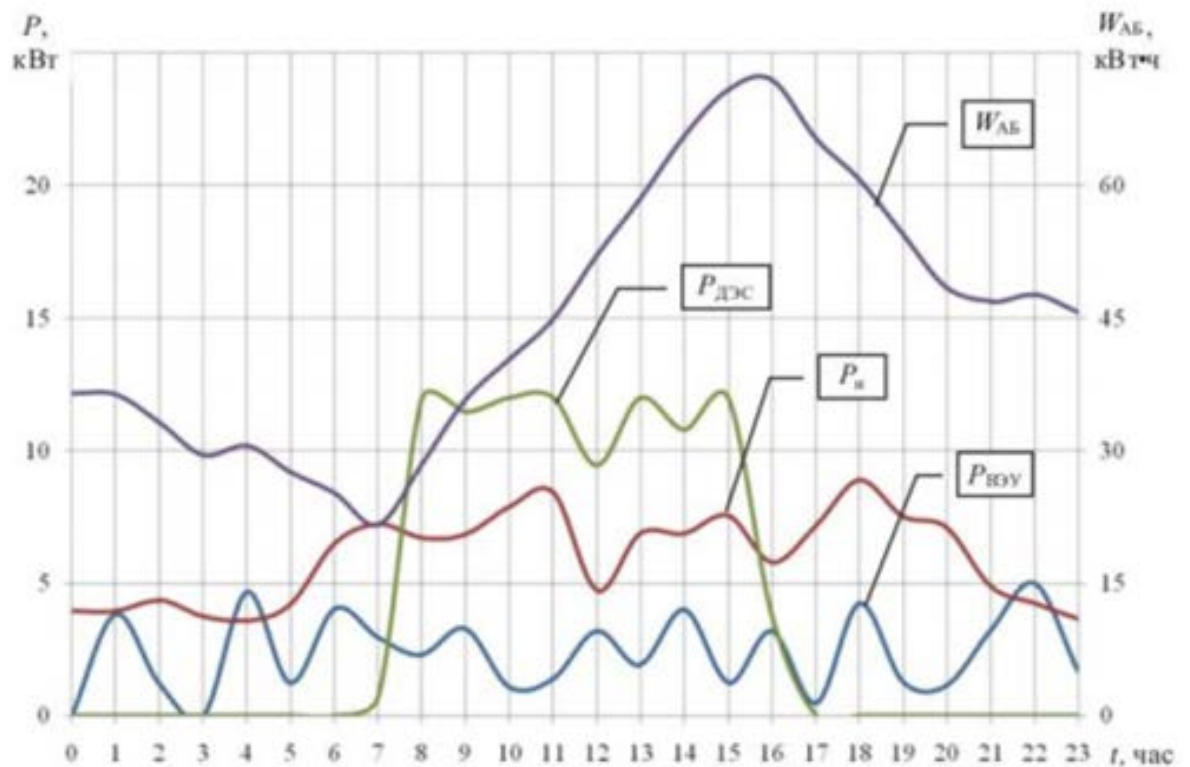


Рис. 3.5 – Добовий робочий режим ВДЕС з буферним накопичувачем енергії

На малюнку 3.6 представлено добовий режим роботи ВТГ, отриманий у результаті алгоритмічного математичного моделювання з баластними навантаженнями.

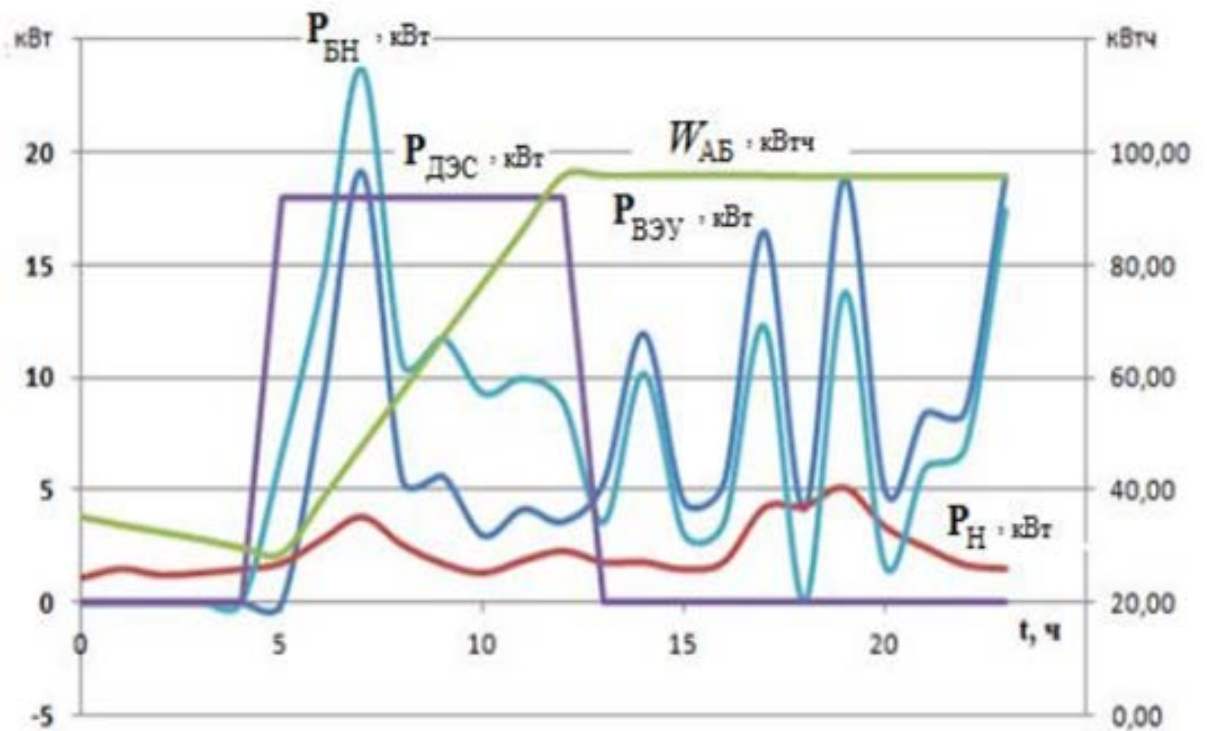


Рис. 3.6 – Оптимізований добовий робочий режим ВДЕС з буферним накопичувачем енергії і баластної навантаженням

Методика вибору оптимального варіанта побудови ВДЕС заснована на розрахунку і порівняльному аналізі енергетичних характеристик автономної електростанції, призначеної для електропостачання конкретного споживача з географічною прив'язкою до місця її розміщення. Поліпшення енергетичних характеристик ВДЕС досягається за рахунок раціонального вибору встановлених потужностей генеруючих і акумулюючих джерел, визначених параметрами вітрового режиму в місці розміщення електростанції і характером електричного навантаження споживача, а також оптимального управління потоками енергії в замкнутій енергетичній системі, що забезпечує єдина система управління робочими режимами. Так як раціональне співвідношення встановлених потужностей ДЭС, ВЕУ і БНЕ не є типовим, а визначається індивідуально для кожної ВДЕС з урахуванням конкретних умов її розміщення та експлуатації, як критерій вибору основного силового обладнання доцільно використовувати техніко-економічні показники.

ВИСНОВКИ

Під час виконання дипломної роботи був проведений огляд процесу генерації електричної енергії в комбінованих енергетичних системах, проаналізовані існуючі підходи до автоматизації процесу, виявлено їх особливості, недоліки, на підставі чого вказані напрями створення систем гарантованого електропостачання.

Виконано аналіз проблематики забезпечення безперебійного живлення електротехнічного устаткування та підходів до забезпечення їх якісного електропостачання. Розглянуто структури систем гарантованого електропостачання, що містять джерела безперебійного живлення, нетрадиційні джерела енергії та дизель-генераторні установки, сформульовано вимоги до інформаційно-вимірювальних систем та комутаційного обладнання.

Вирішено актуальну науково-технічну задачу, яка полягає в розробці системи комплексного енергозабезпечення споживачів із застосуванням альтернативних джерел та комбінованого акумулятора енергії вдосконаленої конструкції, що дає змогу підвищити ефективність процесу енергоживлення споживачів тепловою й електричною енергією та скоротити енергетичні затрати на процес енергозабезпечення в цілому. Основні науково-технічні результати проведених досліджень полягають у наступному:

1. Проаналізовано основні варіанти побудови існуючих систем комплексного енергозабезпечення споживачів, серед іншого, від альтернативних джерел енергії, виявлено низьку ефективність використання їх потужності та високу вартість одиниці отриманої енергії. У результаті запропоновано систему комплексного енергозабезпечення споживачів із застосуванням альтернативних джерел та комбінованих акумуляторів енергії, яка є ефективною для використання в різних кліматичних зонах нашої країни.

2. Для запропонованої системи комплексного енергозабезпечення споживачів отримано вихідні дані щодо вибору ефективних параметрів її компонентного складу залежно від кліматичних умов розміщення та потужності побутового споживача. Встановлено, що для забезпечення ефективної роботи автономного живлення споживачів номінальною електричною потужністю 2000 Вт упродовж 24 годин та піковою (до 2-х годин) потужністю 5000 Вт, система має складатися з фотоелектричної панелі з активною площею геліополя 7,7–8,9 м² та 12-вольтового акумулятора електричної енергії номінальною ємністю 315–365 А•год, а за теплової потужності навантаження 700 Вт – з сонячного

колектора площею 4,5–5,8 м² та одного акумулятора теплоти фазового переходу потужністю 8 кВт.

3. Теоретично обґрунтовано та експериментально підтверджено доцільність включення акумуляторів теплової та електричної енергії до складу запропонованої системи й визначено енергетичну ефективність від їх застосування. Встановлено, що при акумулюванні енергії альтернативних джерел, або пільгової електричної енергії в нічний період доби, її вартість зменшується на 40–50 %, а теплової енергії – на 52–66 %.

4. Розроблено вдосконалену конструкцію акумулятора теплоти фазового переходу з хвилеподібним дном та додатковими багатоярусними електричними підігрівачами, що забезпечило зменшення його масогабаритних показників на 10–15 %, підвищення коефіцієнта корисного використання маси акумулюючого матеріалу – на 36 % та збільшення тривалості роботи акумулятора в режимі «розряд» – на 86 % за однакової теплової потужності зі зразком-аналогом.

5. На основі числових розрахунків процесів тепломасообміну в акумуляторі теплоти вдосконаленої конструкції встановлено параболічну залежність між граничним радіусом R радіального поширення теплоти в масиві акумулюючого матеріалу та геометричними параметрами теплообмінної поверхні – зовнішнім діаметром d_z нагрівальної труби $1,45d_{тр.з.} \geq R \geq 1,25d_{тр.з.}$, що уможливорює проведення «зарядки» і «розрядки» апарата з максимальною ефективністю.

6. Експериментально встановлено, що вдосконалена конструкція акумулятора теплоти має вищий показник енергетичного коефіцієнта корисної дії, порівняно з відомими конструкціями на 12–15 %. Визначено, що нижній ряд нагрівальних елементів в акумулюючому матеріалі необхідно розміщувати на відстані, яка не перевищує величину граничного радіуса R , що уможливорює мінімізацію застійних зон під час акумулювання теплової енергії та зменшення часу «заряджання» акумулятора на 15–20 %.

7. Адекватність числової моделі підтверджена зіставленням отриманих результатів з експериментальними даними. Встановлено, що різниця між температурними показниками не перевищує 5 %.

8. Отримано вихідні дані щодо вибору конструктивних параметрів комбінованого акумулятора енергії, на основі яких розроблено методичку

розрахунку та підготовлено практичні рекомендації з проектування нових конструкцій акумуляторів теплоти фазового переходу.

9. Проведений техніко-економічний аналіз свідчить, що річний економічний ефект на один комплект обладнання системи комплексного енергозабезпечення побутових споживачів електричною та тепловою енергією від альтернативних джерел номінальною потужністю 2000 Вт та піковою 5000 Вт, відповідно, становить 6896 грн на рік. Термін окупності, за умови продажу державі генерованої електричної енергії системою за «зеленим тарифом», не перевищує 5–7 років.

Таким чином, окремо варто відзначити, що мета роботи досягнута, а всі поставлені задачі – розв’язані.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Жесан Р.В., Плешков С.П., Деморецька О.П., Шкабура В.О. Основні проблеми, що виникають при створенні систем автоматизованого енергопостачання з використанням комбінованих геліо-вітрових установок автономного сільськогосподарського споживача // Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету / техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. / Вип. 17. Кіровоград: КНТУ, 2006. С. 312-316.

2. Щербина О.М. Енергія для всіх: технічний довідник з енергоощадності та відновних джерел енергії / передм. Г.М. Забарного. Вид. 4-е, допов. І перероб. Ужгород: Вид-во В.Падяка, 2007. 340 с.

3. Грінченко Р., Грінченко Д. Принципи незалежного енергозабезпечення споживача від поновлюваних джерел енергії // Нетрадиційні і поновлювані джерела енергії як альтернативні первинним джерелам в регіоні: Матеріали І-ї науково-практичної конференції Зб. наук. Статей. Львів: ЛьЦНТЕІ, 2001. С. 25-29.

4. Говоров П.П., Говоров В.П. Комплексне вирішення питань тепло-, електрика гарячого водопостачання на основі використання сонячної енергії // Матеріали п'ятої міжнародної науково-практичної конференції "Нетрадиційні і поновлювані джерела енергії як альтернативні первинним джерелам енергії в регіоні" Зб. наук. статей, Львів: ЛьЦНТЕІ, 2009. С. 197-199.

5. Жесан Р.В., Плешков С.П., Деморецька О.П., Шкабура В.О. Основні проблеми, що виникають при створенні систем автоматизованого енергопостачання з використанням комбінованих геліо-вітрових установок автономного сільськогосподарського споживача // Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету / техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. / Вип. 17. Кіровоград: КНТУ, 2006. С. 312-316.

6. Щербина О.М. Енергія для всіх: технічний довідник з енергоощадності та відновних джерел енергії / передм. Г.М. Забарного. Вид. 4-е, допов. і перероб. Ужгород: Вид-во В.Падяка, 2007. – 340 с.

7. Жесан Р.В., Плешков С.П., Деморецька О.П., Шкабура В.О. Основні проблеми, що виникають при створенні систем автоматизованого енергопостачання з використанням комбінованих геліо-вітрових установок автономного сільськогосподарського споживача // Збірник наукових праць

Кіровоградського національного технічного університету / техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. / Вип. 17. Кіровоград: КНТУ, 2006. С. 312-316.

8. Щербина О.М. Енергія для всіх: технічний довідник з енергоощадності та відновних джерел енергії / передм. Г.М. Забарного. Вид. 4-е, допов. І перероб. Ужгород: Вид-во В.Падяка, 2007. 340 с.

9. Грінченко Р., Грінченко Д. Принципи незалежного енергозабезпечення споживача від поновлюваних джерел енергії // Нетрадиційні і поновлювані джерела енергії як альтернативні первинним джерелам в регіоні: Матеріали І-ї науково-практичної конференції. Зб. наук. Статей. Львів: ЛьЦНТЕІ, 2001. С. 25-29.

10. Говоров П.П., Говоров В.П. Комплексне вирішення питань тепло-, електро- та гарячого водопостачання на основі використання сонячної енергії // Матеріали п'ятої міжнародної науково-практичної конференції "Нетрадиційні і поновлювані джерела енергії як альтернативні первинним джерелам енергії в регіоні" Зб. наук. статей, Львів: ЛьЦНТЕІ, 2009. С.197-199.

11. Commission Communication of 10 January 2007: «Renewable Energy Road Map. Renewable energies in the 21st century: building a more sustainable future»: [Електронний ресурс] // Режим доступу: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=URISERV%3A127065>.

12. International Energy Agency: [Електронний ресурс] // Режим доступу: <http://www.iea.org>.

13. Відновлювана енергетика – невід'ємна частина паливно-енергетичного комплексу України. Присвячено 95-річчю заснування Національної академії наук України: [Електронний ресурс] // Режим доступу: <http://ive.org.ua/wp-content/uploads/ive-nanu-2013-info.pdf>.

14. Україна. Огляд енергетичної політики 2006: [Електронний ресурс] // Режим доступу: <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/Ukraine2006UKR.pdf>.

15. Стратегія розвитку паливно-енергетичного комплексу України до 2030 року. К.: Міністерство палива та енергетики України, 2006. 129 с.

16. Каталог інноваційних пропозицій в галузі енергозбереження. – Львів: ЛьЦНТЕІ, 2008. 108 с.

17. Каталог продукції заводу «Теплотехніка»: [Електронний ресурс] // Режим доступу: <http://www.teplotehnika.dp.ua>.

18. Про затвердження Порядку застосування тарифів на електроенергію: Постанова НКРЕ від 23 квітня 2012 № 428: [Електронний ресурс] // Режим доступу: <http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/z0599-12>.
19. Соловей О.І. Нетрадиційні та поновлювальні джерела енергії: навч. посіб. / О.І. Соловей, Ю.Г. Лега, В.П. Розен [та ін.]; за заг. ред. О.І. Солов'я. Черкаси: ЧДТУ, 2007. 484 с.
20. Pat. 1536291 CN, IPC F25B 9/14. Heat pump system using stirling engine as power and its application method / Kecheng G., Lin F., Yonghong L.; the applicant and the owner: UNIV TSINGHUA. – № CN03109717; appl. 11.03.2003; published 13.10.2004.
21. Титар С.С. Сонячні колектори різних конструкцій в системах теплопостачання / С.С. Титар, С.Ф. Крижна // Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2010. № 3. С. 55–59.
22. Marija S. Todorovic 3.5 MW Seawater Heat Pump Assisted Multipurpose Solar System's 25 Years of Operation / Marija S. Todorovic, Slobodan PejkoVIC, Vido Zenovic // ASHRAE Transactions. 2010. Vol. 116. P. 227–241.
23. Chaturvedi S.K. Thermal Performance of a Variable Capacity Direct Expansion Solar-assisted Heat Pump / S.K. Chaturvedi, D.T. Chen, A. Kheireddine // Energy Conversion and Management. 1998. № 39 (3/4). P. 181–191.
24. Ito S. Performance of a Heat Pump Using Direct Expansion Solar Collectors / S. Ito, N. Miura, K. Wang // Solar Energy. 1999. № 65 (3). P. 189–196.
25. Пуховий І.І. Безпосереднє використання теплоти доквілля в системах тепло- і холодопостачання / І.І. Пуховий // Техн. електродинаміка. 2003. Тем. вип. С. 31–33.
26. Боженко М.Ф. Джерела теплопостачання та споживачі теплоти: навч. посіб. / М.Ф. Боженко, В.П. Сало. К.: Політехніка, 2004. 192 с.
27. Басок Б.І. Схемні рішення оснащення енергосефективного будинку системою теплозабезпечення / Б.І. Басок, О.М. Недбайло, М.В. Ткаченко // Промислова теплотехніка. 2013. № 1. С. 50–56.
28. Пат. 32450 UA, МПК F24D 11/00. Спосіб автономного теплозабезпечення і гарячого водопостачання / Михайлицька Н. В., Дрюкова К. Ю., Чечин Ю. В., Татаринів О. П., Заславський М. В., Дорофій С. М., Синельников О. В.; заявник і власник: Михайлицька Наталія Валентинівна. Опубліковано 12.05.2008.

29. Пат. 6313391 (US), МПК F24J2/34; F24J2/04; H01L37/00, Solar power system using thermal storage and cascaded thermal electric converters / Abbott Russell M (US), Опубл. 06.11.2001.

30. Титко Р. Відновлювальні Джерела Енергії: (Досвід Польщі для України) / Р. Титко, В. Калініченко; Полтавська Державна аграрна академія. Полтава: ПДАА, 2010. 533 с.

31. Мельник Л.Г. Економіка енергетики: навч. посіб. для вузів / Л.Г. Мельник, О.І. Карінцева, І.М. Сотник. Суми: Університетська книга, 2006. 238 с.

32. Дудюк Д.Л. Нетрадиційна енергетика: основи теорії та задачі: навч. посіб. / Д.Л. Дудюк, С.С. Мазепа, Я.М. Гнатишин. Львів: Магнолія 2006, 2009. 188 с.

33. Горобець В.Г. Розробка конструкції та моделювання теплообмінних процесів в сезонному акумуляторі теплоти / В.Г. Горобець, Є.О. Антипов // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія «Техніка та енергетика АПК». 2012. Вип. 174, ч. 2. С. 221–229.

34. Автоматичний ввід резерву на Atmega 8 [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://sxem.org/2-vse-stati/17-avtomatika-v-bytu/86-avtomaticheskij-vvod-rezervnogo-pitaniya-na-atmega8>

35. Дроменко В. Б. Сучасні підходи оцінки якості характеристик складних електричних кіл / В. Б. Дроменко, В. С. Тарас. // Технології та дизайн. - 2021. - № 1. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/td_2021_1_10

36. Лісовець С.М. Застосування мікросистеми збору даних з інтерфейсом USB m-DAQ12/DAC для автоматизації швидкоплинних технологічних процесів / Лісовець С.М., Дроменко В.Б., Кучма Р.А., Бондаренко С.В. // Інноватика в освіті, науці та бізнесі: виклики та можливості: Матеріали

I Всеукраїнської конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених (17 листопада 2020 р., м. Київ). – К. : КНУТД, 2020. – С. 278-285.

37. Дроменко В. Б. Аналіз підходів до вимірювання характеристик складних електричних кіл / В. Б. Дроменко // Мехатронні системи: інновації та інжиніринг : тези доповідей III-ої Міжнар. наук.-практ. конф. (10 жовтня 2019 р., м. Київ) / відп. за вип. М. А. Зенкін. - Київ : КНУТД, 2019. - С. 110-111.