

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

КОЗЛОВ СЕРГІЙ СЕРГІЙОВИЧ



УДК 621.316.1

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ОБ'ЄКТІВ
ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ ЗА РАХУНОК ВИКОРИСТАННЯ
SMART GRID**

Спеціальність 05.14.02 – електричні станції, мережі та системи

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2021

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано на кафедрах радіоелектроніки й автоматизації та кібербезпеки енергосистем Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник

доктор технічних наук, професор
Гриб Олег Герасимович,
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»,
завідувач кафедри автоматизації та
кібербезпеки енергосистем.

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор
Тугай Юрій Іванович
Інститут електродинаміки
Національної академії наук України,
завідувач відділу оптимізації систем
електропостачання;

кандидат технічних наук,
Бедерак Ярослав Семенович,
Приватне акціонерне товариство «АЗОТ»,
м. Черкаси,
начальник лабораторії цеху електропостачання

Захист відбудеться «29» квітня 2021 р. о 12⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 64.050.06 у Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, м. Харків, вул. Кирпичова, 2.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, м. Харків, вул. Кирпичова, 2.

Автореферат розісланий «25» березня 2021 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



Дмитро ДАНИЛЬЧЕНКО

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Головними завданнями проектування та експлуатації сучасних систем електропостачання є вірне визначення електричних навантажень, розподіл електроенергії та раціональна передача, забезпечення необхідного ступеня надійності електропостачання, забезпечення необхідної якості електроенергії на затискачах електроприймачів, забезпечення електромагнітної сумісності з мережею живлення приймачів електричної енергії, економія електроенергії та інших матеріальних ресурсів.

Вивчення режимів роботи електроустановок великої потужності з урахуванням вимог до якості електроенергії та надійності електропостачання є необхідністю для формування систем електропостачання об'єкта в цілому. Одними з важливих питань режиму систем електропостачання є споживання і регулювання активної потужності об'єктами та електроустановками великої потужності, раціональне регулювання добового графіка активного навантаження і обмеження споживаної потужності в аварійних умовах при зниженні якості електроенергії в енергосистемі.

Компенсація реактивної потужності в промислових електричних мережах, особливо з урахуванням електромагнітної сумісності приймачів електричної енергії з мережею живлення, є так само одним з найбільш дискусійних питань в електропостачанні. Комбіноване використання традиційних джерел енергії з різними екологічно чистими альтернативними джерелами енергії з об'єднанням їх у розумну енергосистему Smart Grid дозволяє покрити потреби в електроенергії та підвищити рівень надійності електропостачання, підвищити енергоефективність та знизити економічну вартість споживання.

З кожним роком, у зв'язку зі зростанням вартості електроенергії, використання електроустановок великої потужності становиться дорожчим. Одним з таких об'єктів, що також характеризується високим ступенем шпаруватості споживання електричної енергії, є Інститут іоносфери НАН та МОН України. Інститут є великим світовим науковим центром з унікальним інструментом для дослідження навколосемного космічного простору і сонячноземних зв'язків. Тому підвищення ефективності функціонування подібних об'єктів є актуальною науково-дослідною задачею на даний час.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дослідження виконувалися на кафедрах радіоелектроніки й автоматизації та кібербезпеки енергосистем НТУ «ХПІ» відповідно до завдань ініціативної науково-дослідної роботи МОН України за темою «Розробка методів і алгоритмів багатоцільової оптимізації радіоелектронних та автоматичних систем» (ДР № 0118U002008), де здобувач був виконавцем окремих розділів.

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є розробка та використання Smart Grid енергосистеми для підвищення ефективності експлуатації об'єктів електричних мереж.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- проаналізувати стан і перспективи застосування Smart Grid технологій для електропостачання об'єктів з високим ступенем шпаруватості споживання електричної енергії;
- проаналізувати ефективність системи енергопостачання радіотехнічного науково-дослідного комплексу Інституту іоносфери, визначити можливі фактори та режими роботи, що сприяють погіршенню якості електричної енергії від споживача;
- розробити метод синтезу Smart Grid системи енергопостачання для об'єктів з високим ступенем шпаруватості споживання;
- розробити математичну модель науково-дослідного комплексу Інституту іоносфери;
- розробити комп'ютерну модель та алгоритми програмного керування Smart-системи електроживлення об'єкта для проведення моделювання та підтвердження теоретичних засад розроблених методів.

Об'єкт дослідження – процеси керування споживанням електроенергії об'єктами електричних мереж.

Предмет дослідження – характеристики і параметри режимів експлуатації об'єктів електричних мереж з високим ступенем шпаруватості споживання електричної енергії.

Методи дослідження. В основу дисертаційної роботи покладено системний підхід при проведенні теоретичних та експериментальних досліджень, що базується на використанні методів розрахунку електричних кіл змінного струму, техніки високих напруг та математичної статистики. Застосовані методи експериментального дослідження для визначення величин гармонік струму та напруги трифазної мережі; метод Лапласа для вирішення систем диференціальних рівнянь; методи математичного моделювання і математичної статистики із використанням програмних і математичних пакетів Microsoft Excel та Matlab; метод порівняльного аналізу для опису об'єкта дослідження та його складових.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у:

- набув подальшого розвитку метод підвищення енергоефективності системи електропостачання науково-дослідних комплексів, режим електроспоживання яких характеризується значною шпаруватістю, який відрізняється від відомих врахуванням характеристик відновлювальних джерел енергії та фільтрокомпенсуючих пристроїв, що дозволило значно знизити енергетичні витрати та собівартість проведення досліджень;
- отримав подальший розвиток метод визначення складу та типу обладнання гібридних енергосистем, який відрізняється від відомих аналізом складу споживачів системи та використанням інформаційних технологій, що дозволяє зменшити електроспоживання науково-дослідних комплексів великої потужності;
- вперше запропоновано метод моделювання локальних систем

електропостачання з відновлювальними джерелами електроенергії та автоматизацією керування, який враховує коефіцієнти потужності й коефіцієнти гармонік по кожному споживачу та їх розподілення по окремим групам, що дозволяє підвищити ефективність експлуатації об'єктів електричних мереж

Практична значимість отриманих результатів для електроенергетичної галузі:

– розроблено методику модернізації системи енергопостачання з використанням принципів Smart Grid, що дозволило забезпечити підвищення ефективності експлуатації об'єктів електричних мереж з високим ступенем шпаруватості споживання електричної енергії;

– розроблено рекомендації по використанню акумуляторних батарей у Smart Grid системі, що дозволило збільшити їх строк експлуатації;

– запропоновано заходи при аварійних режимах у мережі Інституту іоносфери, які дозволяють продовжити проведення експерименту та автоматично перейти до використання трифазної мережі або енергії, яка накопичувалася для повернення в мережу;

– отримані в дисертаційній роботі результати комп'ютерного моделювання впроваджені у Інститут іоносфери НАН та МОН України і активно використовуються в роботі організації. Крім того, отримані результати використовуються в навчальному процесі кафедри радіоелектроніки НТУ «ХП».

Особистий внесок здобувача. Усі основні результати, що виносяться на захист, отримані здобувачем особисто, серед яких: метод синтезу Smart Grid системи енергопостачання об'єктів великої потужності з високою шпаруватістю споживання та здійснені за його допомогою результати моделювання; алгоритми програмного управління Smart-системи електроспоживання об'єкта; результати моделювання системи електроспоживання при роботі обладнання Інституту іоносфери; програмне забезпечення для керування зарядом та розрядом акумуляторних батарей; математична модель науково-дослідного комплексу Інституту іоносфери.

Апробація результатів дисертації. Основні результати роботи доповідалися та обговорювалися на: семінарах кафедр «Радіоелектроніка» та «Автоматизація та кібербезпека енергосистем» НТУ «ХП»; Міжнародних науково-технічних конференціях «Актуальні проблеми автоматизації та приладобудування» (м. Харків, 2017, 2018, 2020); Міжнародних науково-практичних конференціях «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» (м. Харків, 2018, 2020).

Публікації. Основні наукові результати і висновки дисертаційного дослідження відображені у 9 публікаціях, серед них: 4 – в наукових фахових виданнях України (1 – у виданні, що входить до міжнародної наукометричної бази Scopus), 5 – в матеріалах конференцій.

Структура дисертації. Дисертаційна робота складається з анотації двома мовами, змісту, переліку умовних позначень, вступу, п'яти розділів,

висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг дисертації становить 201 сторінок, серед них 78 рисунків по тексту; 22 таблиці по тексту; список із 172 найменувань використаних джерел на 19 сторінках, 4 додатків на 34 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано вибір теми дослідження, його актуальність, сформульовано мету та задачі, визначено об'єкт, предмет і методи дослідження, розкрито наукову новизну, практичне значення одержаних результатів, наведено дані про їх апробацію та публікації автора.

У **першому розділі** проведений аналіз літератури з питань побудови гібридних енергосистем. Показано актуальність та перспективи застосування Smart Grid для гібридних енергосистем (ГЕ). Зроблено аналіз конфігурацій різних архітектур ГЕ, які можна вибрати, залежно від потреб споживача. Основні компоненти гібридних енергетичних систем в основному включають генератори відновлюваної енергії (джерела змінного / постійного струму), невідновлювані генератори (джерела змінного / постійного струму), блок кондиціонування енергії, накопичувач, навантаження (АС / DC), та іноді можуть включати мережу. Загальна конфігурація гібридної енергетичної системи зображена на рис. 1

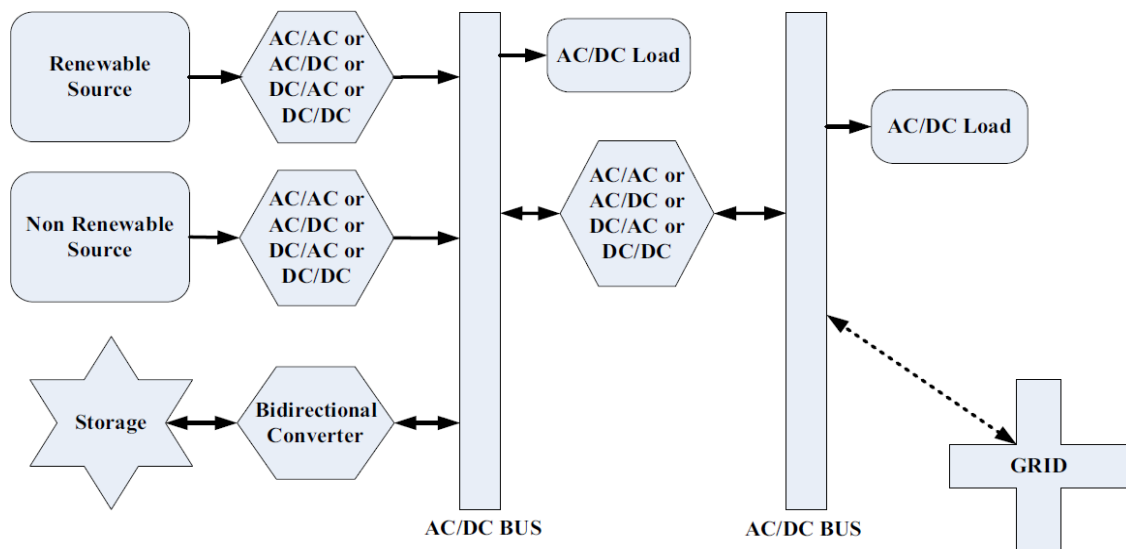


Рисунок 1 – Основні компоненти ГЕ

У **другому розділі** дисертації розглядаються найбільш актуальні та перспективні методи підвищення ефективності електропостачання промислових підприємств. Основним способом підвищення ефективності функціонування електротехнічних комплексів і систем енергоживлення підприємств є розвиток розподілу генерації за рахунок поновлюваних джерел енергії. Саме це є одним з пріоритетних напрямків енергетичної стратегії України. Показано, що особливу увагу слід приділяти керуванню

споживанням електроенергії. В цьому напрямку вся зростаюча роль належить використанню Smart Grid а також активно-адаптивних мереж. Досліджено методології визначення складу і типу обладнання ГЕ, розглянуті різні критерії, які використовуються при проектуванні ГЕ та комерційно доступні програмні інструменти для визначення розмірів системних компонентів ГЕ.

Проаналізовано питання впливу неактивних складових повної потужності на якість електроенергії мережі живлення. Виконано аналіз систем компенсації неактивних складових повної потужності, а саме багатофункціональних компенсаторів неактивних складових повної потужності. Показана актуальність включення до Smart Grid системи енергопостачання об'єктів з високим ступенем шпаруватості споживання фільтрокомпенсуючих пристроїв з розподілом функцій контролю за величинами окремих параметрів мережі живлення та їх корекції по окремих каналах.

Третій розділ дисертації присвячений аналізу ефективності системи енергопостачання радіотехнічного науково-дослідного комплексу Інституту Іоносфери (РНДК).

Показано, що енергоспоживання радіополігону нерівномірне та у режимі вимірювань енерговитрати в десятки разів перевищують середньодобові показники, що вимагають додаткового енергетичного потенціалу енергогенеруючих установок. Представлені експериментальні дані, а саме загальне споживання активної та реактивної складової повної потужності комплексом Інститутом іоносфери. На рис.2 показано типове енергоспоживання радіополігону Інституту іоносфери у зимовий період (1 місяць 2020 р.). На рис. 3 представлена структурна схема підключення споживачів енергії Інституту іоносфери до мережі живлення. На рис. 4 та рис. 5 представлені напруга, струм та спектр струму на вході ного з споживачів (СП1), який спотворює гармонічний струм промислової частоти.

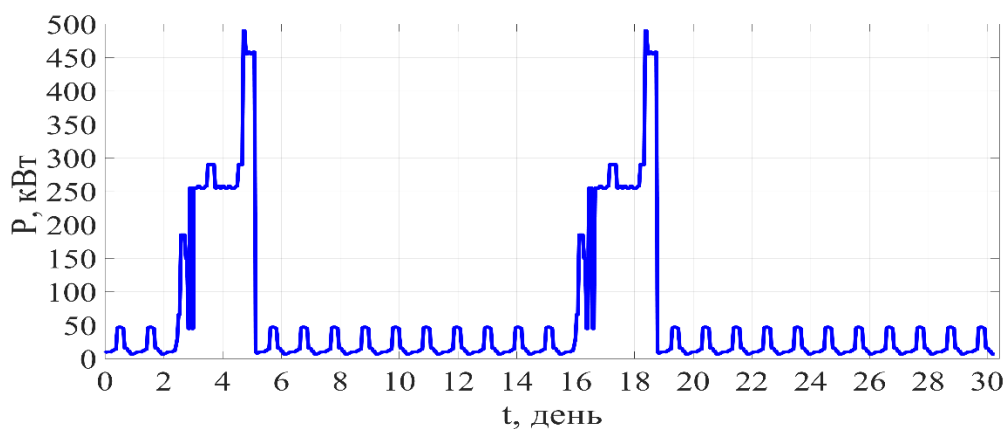


Рисунок 2 - Енергоспоживання радіополігону Інституту іоносфери у зимовий період (1 місяць 2020 р.).

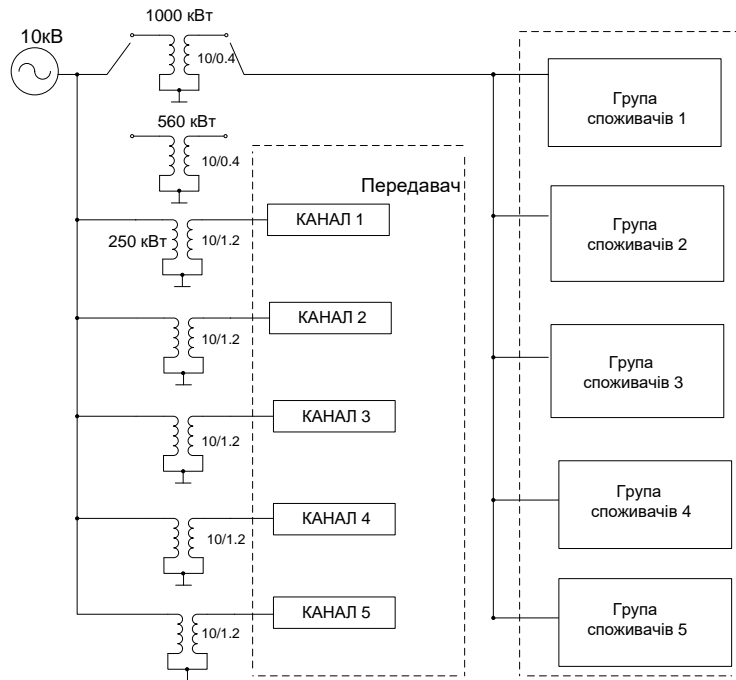


Рисунок 3 – Структурна схема підключення споживачів електроенергії Інституту іоносфери

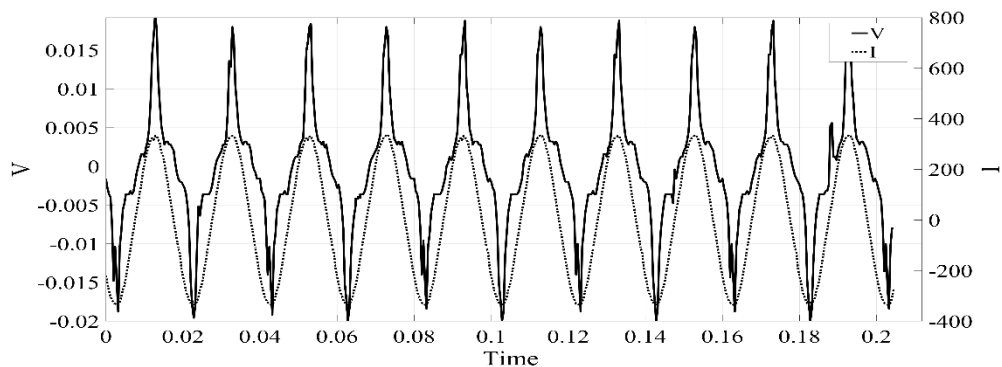


Рисунок 4 - Напряга та струм на вході споживача СП1.

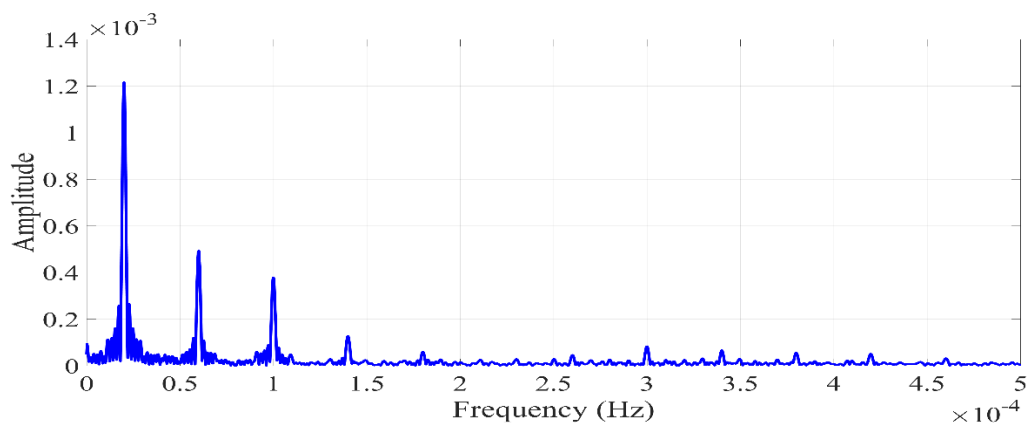


Рисунок 5 - Спектр струму на вході споживача СП1.

Проведено дослідження енергетичних характеристик найпотужнішого споживача електроенергії комплексу - формувача потужних зондуючих імпульсів у пакеті Matlab Simulink. Розроблена Matlab - модель формувача показана на рис. 6.

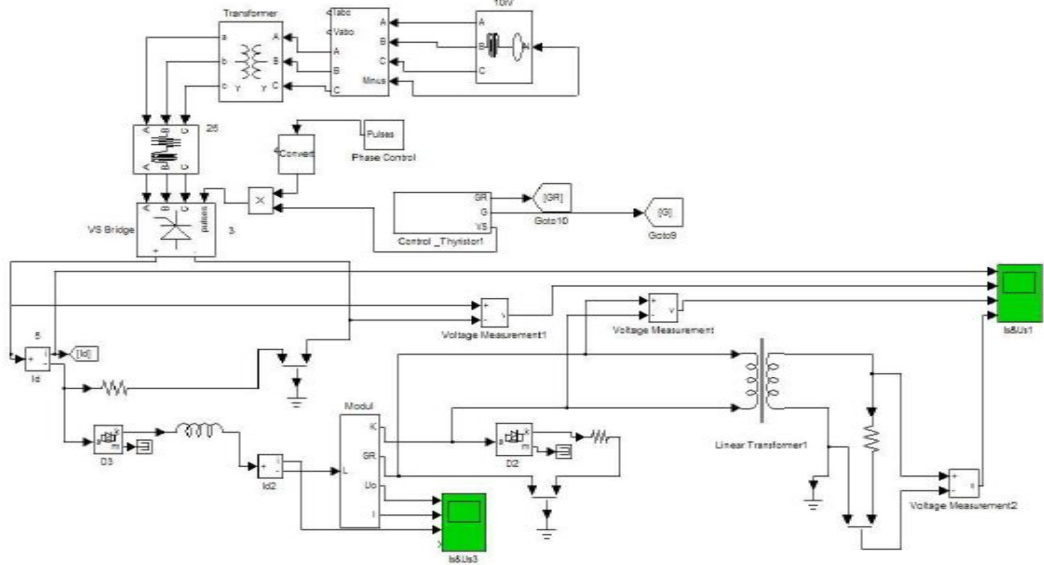


Рисунок 6 - Matlab –модель формувача потужних зондуючих імпульсів

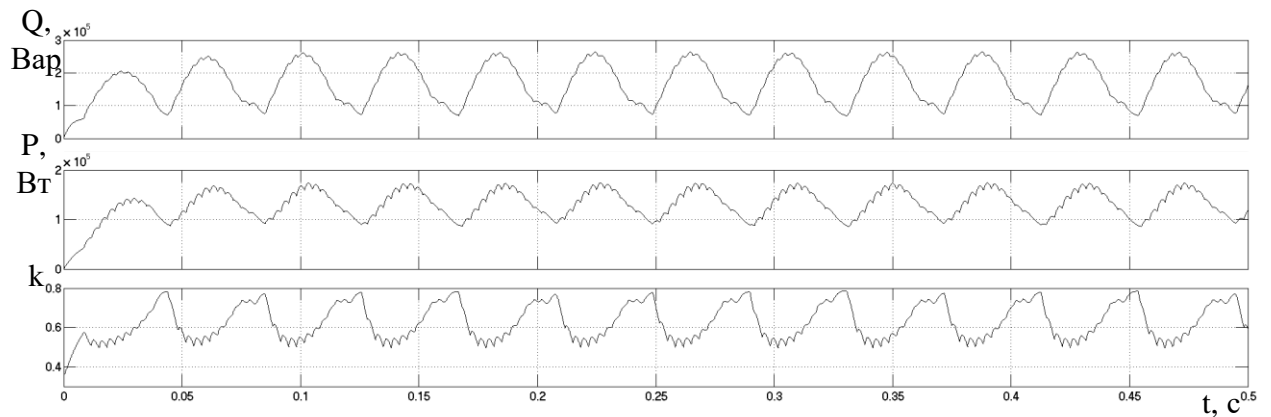


Рисунок 7 - Енергетичні характеристики формувача

При дослідженні енергетичних характеристик формувача встановлено, що параметри формувача, а також особливості режимів його роботи, а саме: не синхронізована з частотою мережі живлення частота високочастотних зондуючих імпульсів $f_i = 24,4$ Гц, зміна споживання активної потужності при роботі формувача в межах від 70 до 160 кВт, значно впливають на діапазони зміни неактивних складових повної потужності і на коефіцієнт потужності формувача в цілому.

У **четвертому розділі** наведено загальну функціонально-технологічну ідеологію концепції модернізації системи енергопостачання РНДК, як концепцію повністю інтегрованої, саморегулюючим і самовідновлювальної електроенергетичної системи, що має мережеву топологію і включає в себе всі генеруючі джерела, магістральні і розподільчі мережі і всі види споживачів електричної енергії, керовані єдиною мережею інформаційно-керуючих пристроїв і систем в режимі реального часу. Для такої модернізації мають місце передумови, серед яких: дефіцит джерел електричної енергії; постійно зростаючі вимоги до надійності і якості електропостачання з боку споживачів; постійне підвищення вартості електричної енергії; зростання вимог зацікавлених сторін - стейкхолдерів - до результатів діяльності енергетичних компаній, підвищення надійності електропостачання, зниження операційних витрат, підвищення доходів інвесторів, зниження чисельності персоналу і ін.. Для РНДК характерні також такі передумови модернізації енергосистеми: наявність великої території, що охороняється, далеко від населених пунктів і транспортних магістралей, що допускають монтаж та експлуатацію альтернативних джерел електроенергії; велика номенклатура електроустаткування з широким спектром функціоналу; наявність висококваліфікованого персоналу по монтажу та обслуговування електроустаткування; прогнозованість і циклічність енергоспоживання на тривалий період часу.

Наведено цілі і завдання модернізації системи енергопостачання РНДК, серед них: надійність; мережа повинна гарантувати захищеність і якість постачання електроенергії; економічність; здатність до самовідновлення після збоїв в подачі електроенергії; забезпечення синхронної роботи джерел генерації та вузлів зберігання електроенергії; гнучкість; мережа повинна підлаштовуватися під потреби споживачів електроенергії; можливість активної участі в роботі промислової мережі (ПМ) джерел генерації та вузлів зберігання електроенергії; підвищення ефективності роботи енергосистеми в цілому. Ряд перерахованих пунктів відповідає ознакам Smart Grid.

У розділі наведена методика модернізації системи енергопостачання РНДК, та аналогічних енергетичних комплексів, яка містить послідовність та зміст окремих етапів модернізації, та синтезу нових систем.

На першому етапі структурна схема діючої системи доповнюється накопичувачем енергії (НЕ), сонячною електростанцією (СЕС), та вітрогенеруючою електростанцією (ВЕС). Це доповнення перетворює систему в гібридну, де виникає необхідність додаткового силового комутуючого обладнання. Крім того, радикально змінюються алгоритми функціонування системи, що демонструють рівняння балансу потужностей.

Якщо в первинному варіанті ПМ була єдиним джерелом електроенергії, до якого безпосередньо підключалися різні споживачі, то тепер є три джерела енергії, і накопичувач енергії, який для них може виступати і як споживач, і як ще одне джерело електроенергії.

Одночасно ПМ стала виступати як споживач надлишкової енергії, що виробляється СЕС і ВЕС.

Спочатку рівняння балансу потужності мало вигляд

$$W_{\text{ПМ}}(t) = \sum_{i=1}^n W_i(t) + W_{\text{В}}, \quad (1)$$

де $W_{\text{ПМ}}(t)$ - миттєва потужність, споживана з мережі, $W_i(t)$ - миттєва потужність i -го споживача, $W_{\text{В}}(t)$ - потужність втрат.

Після підключення НЕ, СЕС і ВЕС баланс потужностей можна записати для випадків:

1. Генерується потужність, яка дорівнює потужності споживання

$$W_{\text{ПМ}}(t) + W_{\text{СЕС}}(t) + W_{\text{ВЕС}}(t) = \sum_{i=1}^n W_i(t) + W_{\text{В}}. \quad (2)$$

$W_{\text{ПМ}}(t)$ обмежена на фіксованому рівні. НЕ в роботі системи участі не бере.

2. З урахуванням обмежень на споживання з ПМ генерується СЕС і ВЕС потужності недостатньо. Для компенсації відсутньої потужності підключається НЕ.

$$W_{\text{ПМ}}(t) + W_{\text{СЕС}}(t) + W_{\text{ВЕС}}(t) + W_{\text{НЕ}}(t) = \sum_{i=1}^n W_i(t) + W_{\text{В}}. \quad (3)$$

3. Є надлишок потужності, який використовується для заряду НЕ

$$W_{\text{ПМ}}(t) + W_{\text{СЕС}}(t) + W_{\text{ВЕС}}(t) = \sum_{i=1}^n W_i(t) + W_{\text{НЕ}}^*(t) + W_{\text{В}}, \quad (4)$$

де $W_{\text{НЕ}}^*(t)$ - миттєве значення енергії накопичувача з урахуванням втрат на перетворення.

4. Є надлишок потужності при зарядженому НЕ. ПМ стає споживачем електроенергії.

$$W_{\text{СЕС}}(t) + W_{\text{ВЕС}}(t) = \sum_{i=1}^n W_i(t) + W_{\text{ПМ}}(t) + W_{\text{В}}. \quad (5)$$

5. Виникає необхідність повернути енергію, накопичену в НЕ в мережу

$$W_{\text{СЕС}}(t) + W_{\text{ВЕС}}(t) + W_{\text{НЕ}}(t) = \sum_{i=1}^n W_i(t) + W_{\text{ПМ}}(t) + W_{\text{В}}. \quad (6)$$

Наведені спрощені рівняння (1) - (6) показують, що і промислова мережа і накопичувач енергії підключаються до енергосистеми РНДК через додаткові інвертори. Крім того потрібна установка додаткового комутаційного обладнання.

Далі у розділі наведені подальші кроки та методики розрахунку потужностей НЕ, СЕС і ВЕС. Оцінка ємності накопичувача енергії.

Світовий досвід показує високу ефективність застосування накопичувачів електроенергії для згладжування пульсацій споживання і генерації. Ємність накопичувача типу АБ розраховується для трьох режимів електропостачання РНДК:

1. Режим згладжування пульсацій енергоспоживання до рівня середньодобового значення. Як видно з графіків місячного споживання при піковому споживанні під час експерименту до 500 кВт, середньодобове за місяць не перевищує 35 кВт.

2. Режим покриття споживання власними генеруючими потужностями.

3. Режим передачі надлишкової електроенергії в ПМ для компенсації пікового навантаження.

Проведено оцінку настановної потужності сонячних батарей. Як і для визначення ємності АБ, пропонуються для розрахунку встановленої потужності три варіанти:

1. Сонячна станція покриває пікове споживання РНДК. Станція працює одночасно зі споживанням середньодобового значення з ПМ.

2. Сонячна станція покриває повний обсяг споживаної електроенергії РНДК.

3. Станція виробляє не більш 1/3 від необхідної кількості електроенергії, з урахуванням того, що енергія надходить також з промислової мережі і від вітрогенераторів.

Оцінка настановної потужності ВЕС виконується за тими ж умовами, що і для СЕС. Аналіз типового розподілу по місяцях сонячної енергії, що падає на одиницю площі в зоні РНДК і розподілу енергетичного потенціалу вітроустановок по місяцях вказує на перспективність їх спільної роботи.

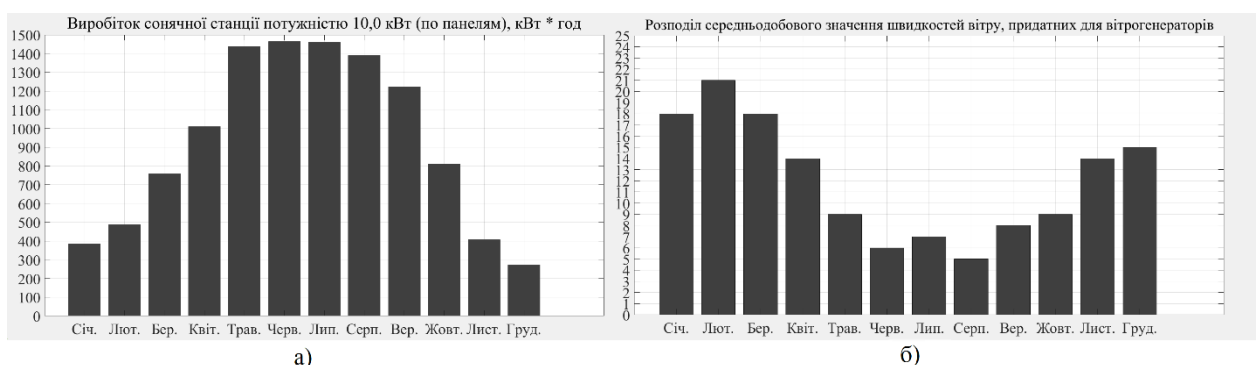


Рисунок 8 - Графіки розподілу потенціалу енергоустановок а) - для сонячних батарей СЕС, б) - для вітрогенераторів ВЕС.

Якщо рис. 8-а) ілюструє збільшення енергоемності сонячних батарей в літню пору, то на рис. 8-б) спостерігається зниження в цей же період енергетичного потенціалу ВЕС. Відбувається часткова взаємна компенсація зниження енерговіддачі однієї енергогенеруючої установки зростанням енерговіддачі іншої.

Розділ також містить рекомендації по побудові системи компенсації реактивної складової повної потужності.

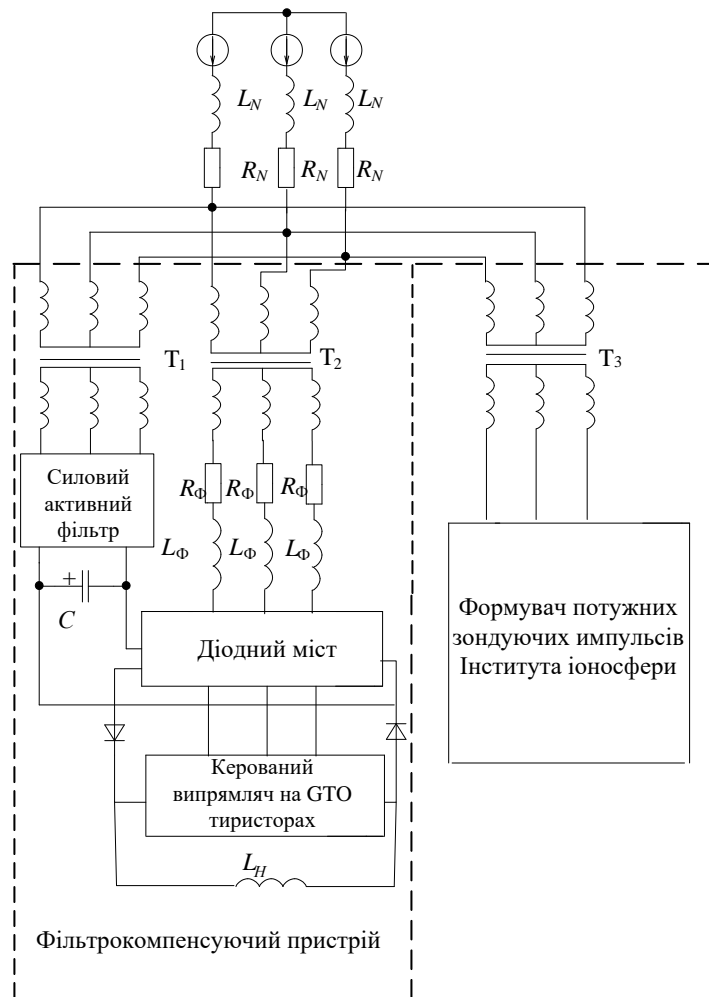


Рисунок 9 – Принцип підключення формувача та компенсатора до мережі живлення

На підставі проведеного аналізу енергетичних показників формувача, методів регулювання показників якості з використанням неактивних складових повної потужності, запропоновано використовувати багатофункціональний компенсатор неактивних складових повної потужності (фільтрокомпенсуючий пристрій), призначений для фільтрації вищих гармонік струму, що генерується формувачем в мережу живлення, компенсації реактивної складової основної гармоніки струму мережі. Принцип підключення формувача і компенсатора до мережі живлення показаний на рисунку 9.

На рис. 10 представлені Matlab - модель фільтрокомпенсуючого пристрою та формувача. Експерименти підтвердили ефективність застосування фільтрокомпенсуючого пристрою при вирішенні поставлених завдань.

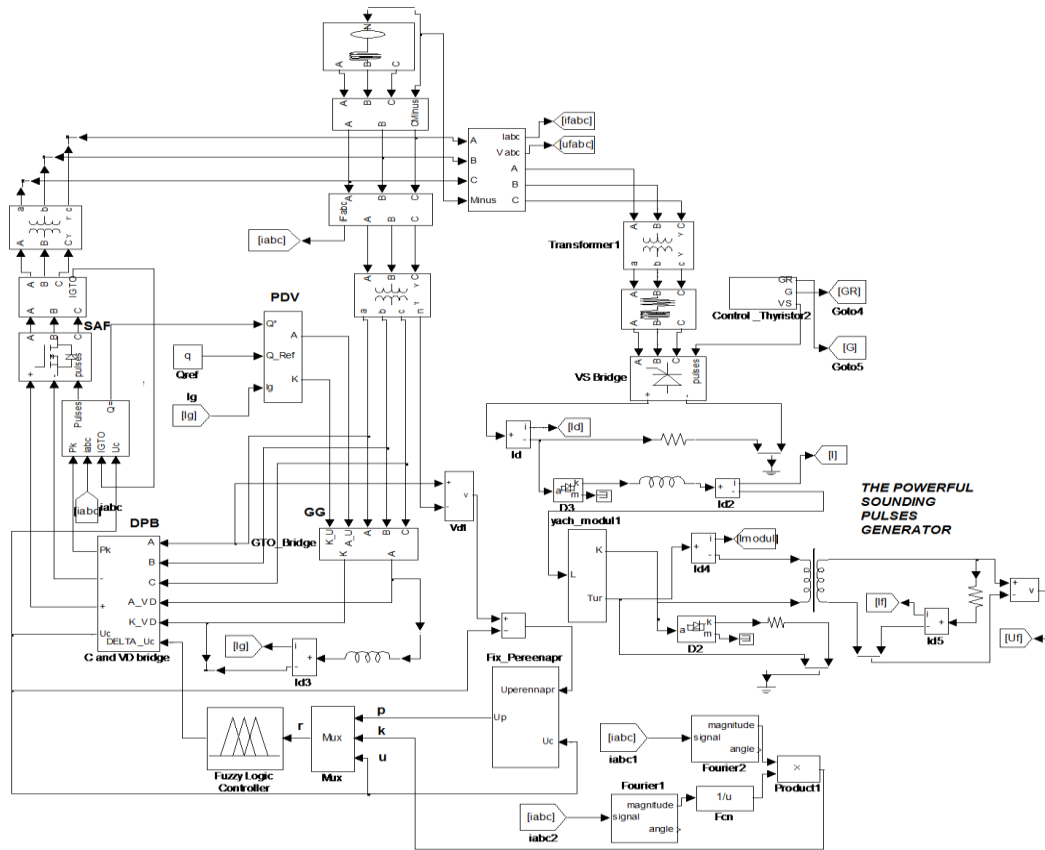


Рисунок 10 – Matlab - модель фільтрокомпенсуючого пристрою та формувача

Завдяки застосуванню фільтрокомпенсуючого пристрою забезпечується підтримання коефіцієнта потужності навантаження з компенсатором не нижче 0,99 (рис. 11) та відбувається зниження амплітуд вищих гармонік струму мережі живлення на 60%, що задовольняє вимогам.

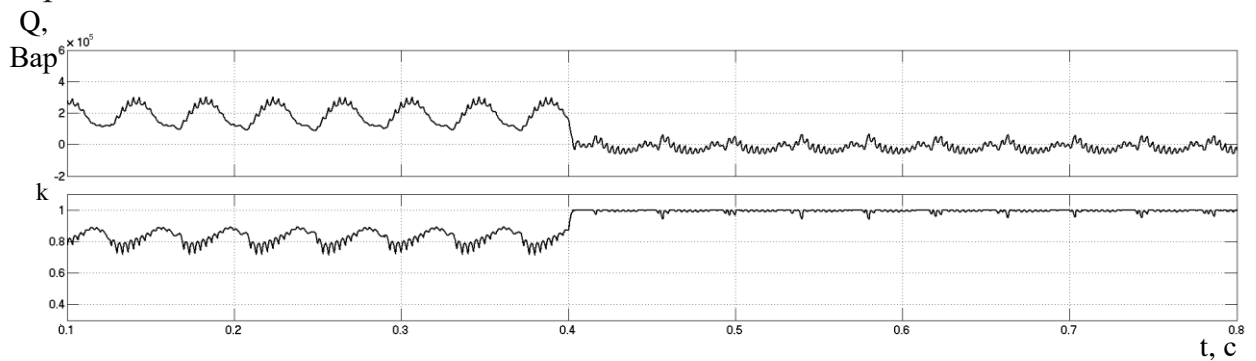


Рисунок 11 – Результати моделювання фільтрокомпенсуючого пристрою

Розділ також містить рекомендації по побудові системи збору та первинної обробки інформації, диспетчерської станції енергосистеми РНДК, системи керування, яка являє собою замкнуту багатоконтурну, адаптивну систему з розподіленими параметрами, комплексу комутаційного обладнання.

П'ятий розділ присвячено комп'ютерному моделюванню Smart Grid системи електропостачання Інституту іоносфери (рис. 12) з ШІМ-способом керування зарядом/розрядом акумуляторної батареї, а також схемам на

фотоелектричних елементах інвертора, режимам накопичення енергії в акумуляторній батареї для проведення експерименту, режиму роботи системи при розрядженні акумуляторної батареї нижче заданого значення, режиму накопичення енергії в акумуляторній батареї для подальшого повернення її постачальнику в ПМ.

Надано методику розрахунку кількості сонячних панелей та ємності акумулятора, яка допомогла створити комп'ютерні моделі та виконати моделювання заданих режимів роботи.

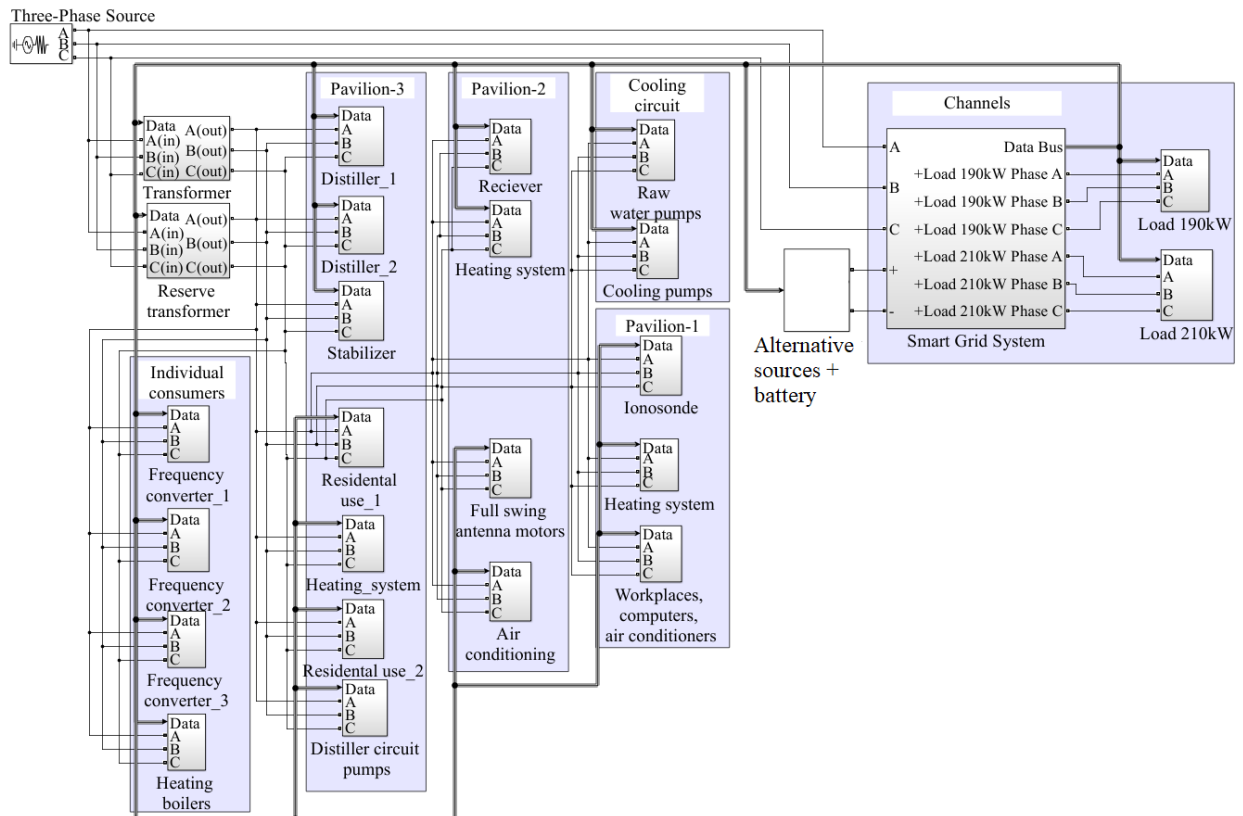


Рисунок 12 – Matlab модель Інституту іоносфери

Проведений аналіз результатів комп'ютерного моделювання показав, що для застосування в якості блоку повернення енергії в мережу в Smart Grid системі може використовуватись блок акумуляторної батареї з ШІМ-способом керування заряду батареї, за умови накопичення енергії у час проведення експерименту та в періоди часу з 05:00 до 11:00 і з 18:00 до 20:00 та розрядом батареї не менше рівня, що становить 70% від повної ємності акумулятора. ШІМ-спосіб керування зарядом батареї має менш складну будову та простішу систему керування в порівнянні з МРРТ-контролерами, які натомість дозволяють скоротити втрати до 20%.

На рис. 13 наведено остаточну схему для проведення експериментів, що складається з блоку сонячних панелей та акумуляторів, перетворювача, навантаження, розрахунку спожитої потужності, алгоритму підключення навантаження за розкладом роботи.

Проведено моделювання роботи виконавчих пристроїв Інституту іоносфери. Накопичення енергії СЕС та ВЕС в акумуляторі відбувалося для забезпечення роботи передавачів сумарною потужністю 400 кВт·г. За розрахунками, для використання передавачів необхідно, щоб в акумуляторі було накопичено 7,76 МВт енергії до часу проведення експерименту. Для цього знадобилося 600 сонячних панелей потужністю 250 Вт кожна.

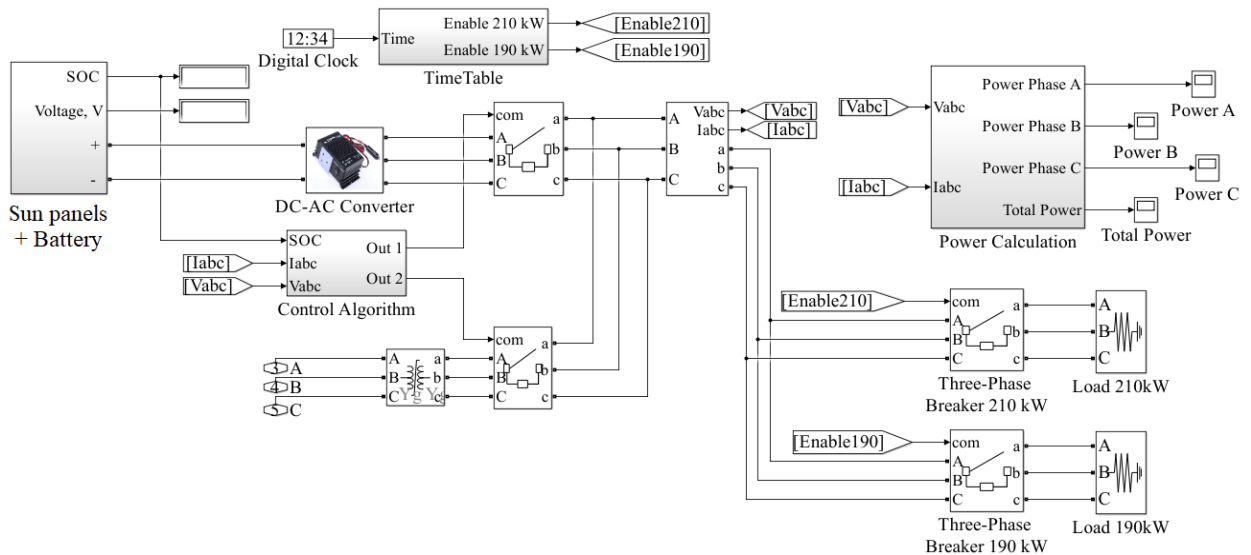


Рисунок 13 – Синтезована схема Smart Grid системи

Отримані результати моделювання підтвердили зроблені теоретичні висновки (рис. 14): за 12 діб до початку експерименту йде накопичення енергії в акумуляторі, а за 2 доби проведення експерименту йде її витрата.

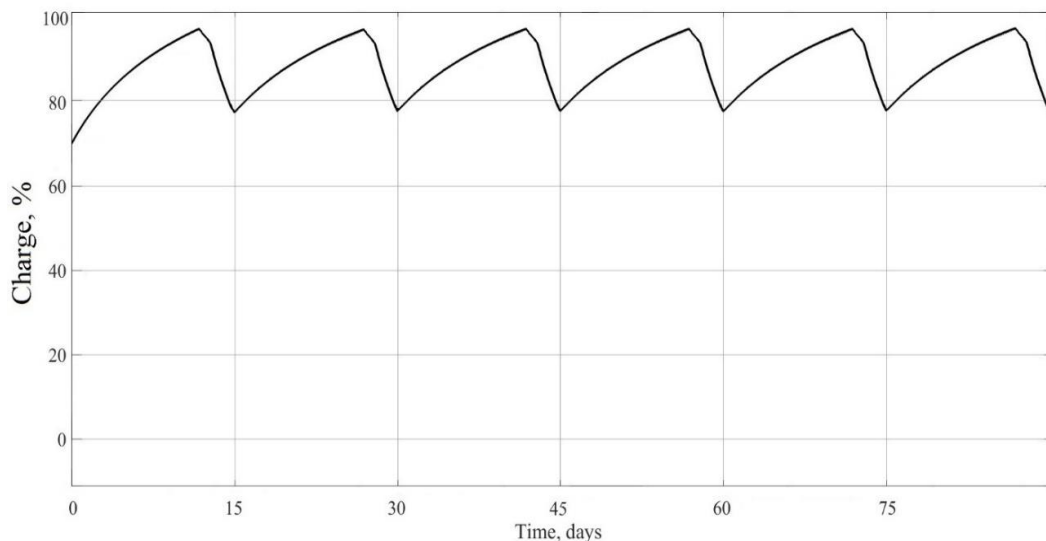


Рисунок 14 – Графік заряду та розряду акумуляторної батареї

На рис. 15, *a-e* показано вольт-амперні характеристики виконавчих пристроїв під час проведення експерименту, отримані за допомогою Matlab-моделювання.

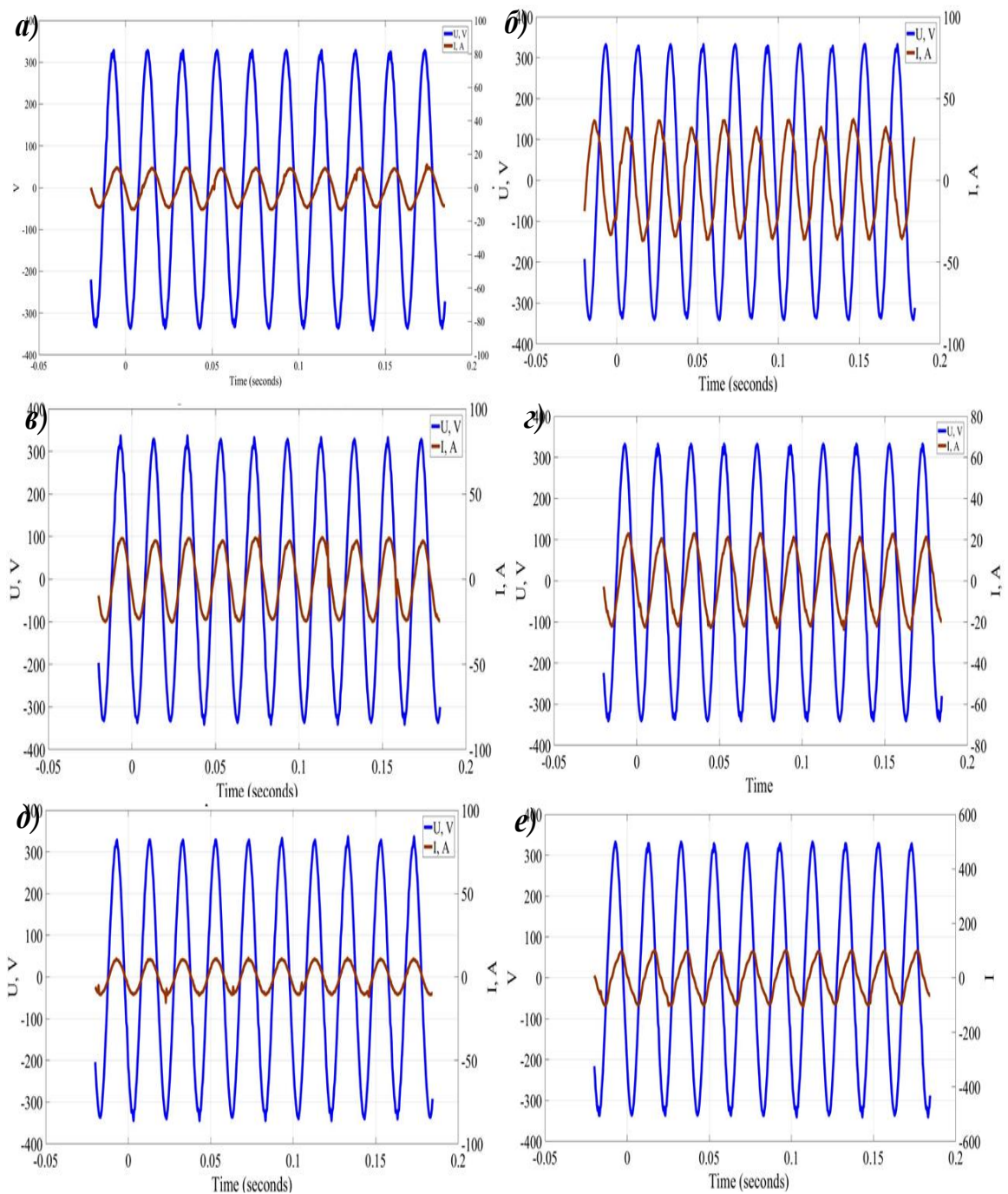


Рисунок 15 – Вольт-амперні характеристики виконавчих пристроїв: побутові потреби (а), перетворювач частоти (б), насоси сирогої води (в), дистиллятори (г), приймач (д), стабілізатор (е)

Моделювання показало, що вольт-амперні характеристики, отримані експериментальним шляхом, збігаються з вольт-амперними характеристиками побудованої моделі (рис. 15, а-е).

На рисунку 16 наведено графік заряду акумуляторної батареї, що імітує розрахунок кількості енергії, яка накопичилася для повернення постачальнику в мережу.

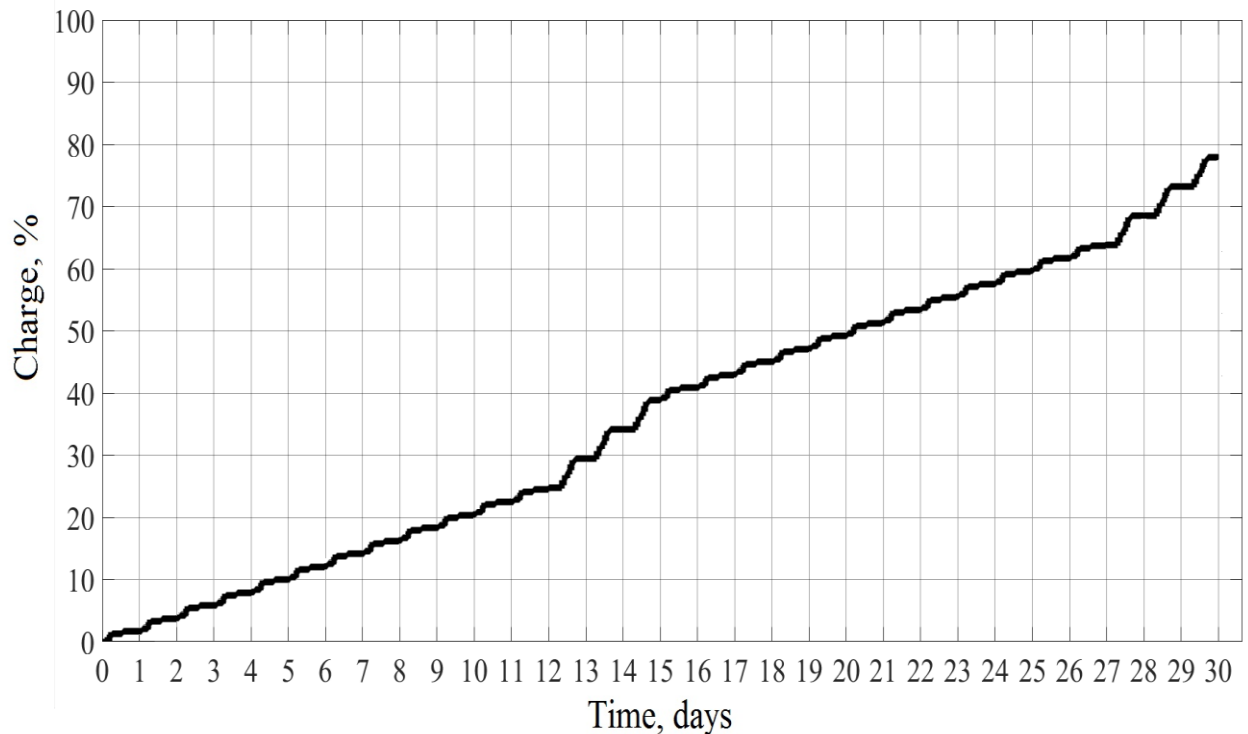


Рисунок 16 – Графік заряду акумулятора

Особливу увагу в дисертаційній роботі приділено розробленню заходів захисту при аварійних режимах. Заходи полягають у використанні енергії від трифазної мережі або енергії, накопиченої для повернення в мережу, якщо поточний рівень заряду акумуляторної батареї опуститься нижче 70%. Проведене імітаційне моделювання підтвердило, що запропоновані заходи дозволяють уникнути появи негативних явищ як для навантажень.

Результати моделювання виявили можливість збільшення кількості панелей та ємності акумуляторних батарей, що дозволить застосовувати їх для збільшення кількості виконавчих пристроїв Інституту іоносфери у Smart Grid системі. Також результати моделювання дозволили сформулювати задачі з належного використання перетворювачів напруги та використання ШІМ-контролера.

За результатами проведених експериментів встановлено, що за 1 місяць кількість поверненої в мережу енергії, що накопичилась під час проведення експерименту та в періоди немаксимальної активності сонця, при використанні 600 сонячних панелей дорівнює 4,72 МВт.

У додатках наведені програми керування, акт використання результатів дисертаційної роботи в навчальному процесі кафедри радіоелектроніки НТУ «ХП», акт використання результатів досліджень у роботі Інституту іоносфери НАН та МОН України, список публікацій здобувача за темою дисертаційної роботи.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено науково-практичну задачу створення методів синтезу Smart Grid системи енергопостачання об'єктів великої потужності з високою шпаруватістю споживання, що дозволило підвищити ефективність їх експлуатації. Основні кінцеві та отримані результати:

1. Аналіз існуючих методів керування об'єктами великої потужності дозволив науково обґрунтувати можливість підвищення енергоефективності об'єктів з високою шпаруватістю за рахунок синтезу методів керування з використанням Smart Grid системи енергопостачання.

2. Проведено аналіз ефективності системи енергопостачання радіотехнічного науково-дослідного комплексу Інституту іоносфери, що дозволив визначити можливі фактори та режими роботи, що сприяють погіршенню якості електричної енергії від споживача.

На основі аналізу методів компенсації неактивних складових повної потужності обґрунтована актуальність застосування багатофункціональних енергоефективних компенсаторів неактивних складових повної потужності, що дозволяють успішно вирішувати проблему компенсації реактивної потужності, що генерується або споживається навантаженням, фільтрації вищих гармонік струму. Використання розглянутого фільтрокомпенсуючого пристрою забезпечує підтримку коефіцієнта потужності навантаження з компенсатором не нижче 0,99 і зниження амплітуд вищих гармонік струму в точці підключення фільтрокомпенсатора і навантаження до мережі живлення на 60%.

3. Розроблено метод синтезу Smart Grid системи енергопостачання для об'єктів великої потужності з високою ступеню шпаруватості споживання електричної енергії, що дозволило спроектувати Smart Grid систему постачання та обліку електроенергії для науково-дослідницького Інституту іоносфери.

4. Розроблено математичну модель науково-дослідного комплексу Інституту іоносфери, що дозволила скласти рівняння балансу потужностей.

5. Розроблено комп'ютерну модель та алгоритми програмного керування Smart-системи електроживлення об'єкта для проведення моделювання роботи виконавчих пристроїв Інституту іоносфери. Моделювання показало, що вольт-амперні характеристики, отримані експериментальним шляхом, збігаються з вольт-амперними характеристиками побудованої моделі. Результати моделювання виявили можливість збільшення кількості панелей СЕС та ємності акумуляторних батарей, що дозволить застосовувати їх для збільшення кількості виконавчих пристроїв Інституту іоносфери. Також результати моделювання дозволили сформулювати задачі з належного використання перетворювачів напруги та використання ШІМ-контролера.

За результатами проведених експериментів встановлено, що за 1 місяць кількість поверненої в мережу енергії, що накопичилась під час проведення експерименту та в періоди немаксимальної активності сонця, при використанні 600 сонячних панелей склала 4,72 МВт при використанні

15,52 МВт для проведення двох експериментів.

6. Результати наукових досліджень впроваджені в практику проектування систем Інституту іоносфери НАН і МОН України. Матеріали дисертації використовуються в лекційних курсах «Електромагнітні системи» і «Радіотехнічні кола та сигнали» на кафедрі «Радіоелектроніка» НТУ «ХПІ».

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Domnin I. Control system of the filter-compensating device with the second-order fuzzy-regulator / I. Domnin, O. Levon, S. Kozlov // Технічна електродинаміка. – 2018. – Ч. 6. – С. 30–33.

Розроблено метод підвищення якості мережі за допомогою нечіткого регулятора.

2. Козлов С. С. Аналіз режимів енергоспоживання комплексу некогерентного розсіяння Інституту іоносфери НАН і МОН України / С. С. Козлов // Вісн. Нац. техн. ун-ту «Харків. політехн. ін-т». Серія: Радіофізика та іоносфера. – Харків, 2018. – № 43. – С. 51–54.

3. Development and simulation of the Institute of ionosphere measuring complex energy consumption / A. Gapon, O. Grib, S. Kozlov, O. Yevseienko, O. Levon // Світлотехніка та електроенергетика. – 2020. – Вип. 58, № 2. – С. 73–77.

Промодельовані режими роботи виконавчих пристроїв Інституту іоносфери під час проведення експерименту.

4. Исследование работы двухконтурной системы управления компенсатором неактивных составляющих полной мощности / Е.А. Левон, С.С. Козлов, Н.А. Кузьменко, С.И. Рымарь // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – 2020. – №2. – С. 67–72.

Промодельовані режими роботи двоконтурної системи керування компенсатором під час проведення експерименту.

5. Козлов С. С. Оптимізація енергопостачання науково-дослідного комплексу інституту іоносфери / С. С. Козлов // Актуальні проблеми автоматики та приладобудування : матеріали І Міжнар. наук.-техн. конф., 7–8 груд. 2017 р. / НТУ «ХПІ» [та ін.]. – Харків, 2017. – С. 226–227.

6. Козлов С. С. Математическое моделирование системы электроснабжения научно-исследовательского комплекса Института ионосферы / С. С. Козлов // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я (MicroCAD–2018) : у 4 ч. : тези доп. XXVI міжнар. наук.-практ. конф. / НТУ «ХПІ» [та ін.]. – Харків, 2018. – Ч. 3. – С. 310.

7. Козлов С.С. Оптимизация параметров энергоустановок радиополгона Института ионосферы НАН Украины / А. И. Гапон, С. С. Козлов, Е. Е. Светличная // Актуальні проблеми автоматики та приладобудування : матеріали 2 Міжнар. наук.-техн. конф., 6–7 груд. 2018 р. / НТУ «ХПІ» [та ін.]. – Харків, 2018. – С. 24–25.

Запропоновано використання альтернативних джерел енергії, надані

рекомендації щодо режимів роботи виконавчих пристроїв Інституту іоносфери під час проведення експерименту

8. Development of a computer model of the power supply system of the Institute of ionosphere NAS and MES of Ukraine / A. Gapon, S. Kozlov, O. Yevseienko, O. Levon // Актуальні проблеми автоматики та приладобудування : матеріали III Міжнар. наук.-техн. конф., 03–04 груд. 2020 р. / Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т» [та ін.]. – Харків, 2020. – С. 3–4.

Досліджено режими енергоспоживання Інституту іоносфери з використанням Smart Grid системи.

9. Дослідження моделі енергоспоживання науково-дослідним комплексом інституту іоносфери НАН та МОН / А. І. Гапон, Н. О. Євсіна, О. М. Євсеєнко, С. С. Козлов, О. О. Левон // Актуальні проблеми автоматики та приладобудування : матеріали III Міжнар. наук.-техн. конф., 03–04 груд. 2020 р. / Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т» [та ін.]. – Харків, 2020. – С. 11–12.

У середовищі Matlab побудовано математичну модель енергоспоживання Інституту іоносфери.

АНОТАЦІЇ

Козлов С. С. Підвищення ефективності експлуатації об'єктів електричних мереж за рахунок використання Smart Grid. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.02 – електричні станції, мережі та системи. – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, 2021.

Дисертація присвячена розробці та вдосконаленню методів застосування в системах енергопостачання об'єктами великої потужності з високою шпаруватістю споживання в складі Smart Grid системи керування.

Проведено аналіз ефективності системи енергопостачання радіотехнічного науково-дослідного комплексу Інституту іоносфери, що дозволив визначити можливі фактори та режими роботи, що сприяють погіршенню якості електричної енергії від споживача.

Представлені результати аналізу режимів енергоспоживання комплексу некогерентного розсіювання Інституту іоносфери НАН і МОН України з метою вирішення проблеми підвищення енергоефективності науково-дослідного комплексу та створення енергоефективної системи електропостачання з застосуванням інтелектуальної Smart Grid системи, яка забезпечить стійку роботу наукового обладнання для виконання дослідницьких програм НАН України.

Проведено моделювання роботи виконавчих пристроїв Інституту іоносфери. Моделювання показало, що вольт-амперні характеристики, отримані експериментальним шляхом, збігаються з вольт-амперними характеристиками побудованої моделі. Результати моделювання дозволили

сформулювати завдання щодо належного використання перетворювачів напруги і використання ШІМ-контролера.

Ключові слова: система електропостачання, Smart Grid, альтернативні джерела енергії, фільтрокомпенсуючий пристрій.

Козлов С. С. Підвищення ефективності експлуатації об'єктів електричних мереж за рахунок використання Smart Grid. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.02 – электрические станции, сети и системы. – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, 2021.

Диссертация посвящена разработке и совершенствованию методов применения в системах энергоснабжения объектами большой мощности с высокой скажностью потребления в составе Smart Grid системы управления.

Проведённый анализ литературных источников показал, что повышение эффективности функционирования систем электроснабжения является актуальной проблемой современных исследований.

Проведен анализ эффективности системы энергоснабжения радиотехнического научно-исследовательского комплекса Института ионосферы, позволивший определить возможные факторы и режимы работы, способствующие ухудшению качества электрической энергии от потребителя.

Предложены меры для снижения экономической стоимости проведения экспериментов по исследованию ионосферы научно-исследовательского комплекса некогерентного рассеяния.

Представлены результаты анализа режимов энергопотребления комплекса некогерентного рассеяния Института ионосферы НАН и МОН Украины с целью решения проблемы повышения энергоэффективности научно-исследовательского комплекса и создания энергоэффективной системы электроснабжения с применением интеллектуальной Smart Grid системы, которая обеспечит устойчивую работу научного оборудования для выполнения исследовательских программ НАН Украины.

Описана система электропитания комплекса и режимы энергопотребления комплекса. Описаны устройства радарной системы, а также наиболее мощные потребители электроэнергии, которые потребляют электроэнергию на экспериментальные и хозяйственные нужды.

Проанализированы энергопотребления комплекса некогерентного рассеяния за 2020 год. Получены и представлены графики средней потребляемой мощности (среднесуточный показатель) и средней потребляемой мощности в режиме измерений.

Проведено моделирование работы исполнительных устройств Института ионосферы. Моделирование показало, что вольт-амперные характеристики, полученные экспериментальным путем, совпадают с вольтамперными характеристиками построенной модели. Результаты моделирования

обнаружили возможность увеличения количества панелей и емкости аккумуляторных батарей, что позволит применять их для увеличения количества исполнительных устройств Института ионосферы. Также результаты моделирования позволили сформулировать задачи по надлежащему использованию преобразователей напряжения и использования ШИМ-контроллера.

Ключевые слова: система электроснабжения, Smart Grid, альтернативные источники энергии, фильтрокомпенсирующее устройство.

Kozlov S. S. Improving the efficiency of electrical network facilities through the use of Smart Grid. – Manuscript.

The thesis on Candidate Degree in Technical Sciences: Specialty 05.14.02 – power plants, networks and systems. – National Technical University «Kharkov Polytechnic Institute», Kharkov, 2021.

The thesis is devoted to the development and improvement of methods of high power objects with high duty cycle in power supply systems as a part of Smart Grid control system.

The analysis of the efficiency of the power supply system of the radio engineering research complex of the Institute of the Ionosphere, which made it possible to determine the possible factors and modes of operation, contributing to the deterioration of the quality of electrical energy from the consumer.

The results of energy consumption modes analysis of Institute of Ionosphere incoherent scattering complex are presented.

The work of the Institute of the Ionosphere executive devices is modeled. Simulation results showed that experimentally obtained current-voltage characteristics coincided with the current-voltage characteristics of the constructed model. The simulation results allowed to formulate tasks of voltage converters and PWM controller proper usage.

Keywords: power supply system, Smart Grid, alternative energy sources, filter compensating device.



Підписано до друку 28.12.2017 р. Формат 60×90/24
Гарнітура Times New Roman. Папір офсетний
Друк – ризограф. Ум. друк. аркушів 0,9
Наклад 100 прим. Зам. № 000428