

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

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

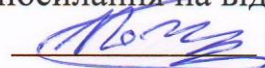
Козлов Сергій Сергійович

УДК 621.316.1

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

05.14.02 – електричні станції, мережі та системи
14– електрична інженерія
Подається на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

 С. С. Козлов

*Згідно з текстом лекції з
існуючими прикладами
досліджень*

*Вчений секретар
спеціалізованої вченої
к 64.050.06 Делу
16.02.2021 р.*



Науковий керівник
Гриб Олег Герасимович,
доктор технічних наук, професор

Харків – 2021

АНОТАЦІЯ

Козлов С. С. Підвищення ефективності експлуатації об'єктів електричних мереж за рахунок використання Smart Grid. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.02 – електричні станції, мережі та системи (14 – Електрична інженерія) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки України, Харків, 2021 р.

Дисертація присвячена розробці та вдосконаленню методів керування електропостачанням об'єктів великої потужності з високою скважністю споживання за допомогою Smart Grid системи.

Розглянуто проблеми використання Smart Grid систем в Україні та за кордоном. Установлено, що впровадження Smart Grid систем у країнах ЄС визначено рядом нормативних документів, директивами та стратегіями розвитку.

Визначено, що впровадження Smart Grid систем відбувається з метою підвищення надійності енергопостачання, енергетичної безпеки, енергоефективності та екологічної гармонізації.

Аналіз літератури з питань побудови гібридних енергосистем показав, що застосування відновлюваних джерел енергії в об'єднаних чи локальних енергосистемах має низку переваг щодо економії паливних ресурсів, незалежності від зовнішнього постачання, здешевлення енергії. Виділено основні концепції Smart Grid систем.

Сформульовано способи підвищення ефективності електропостачання об'єктів з високим ступенем шпаруватості споживання електричної енергії.

Розглянуто методологію підвищення ефективності електропостачання об'єктів електричних мереж. Показано, що підвищення ефективності систем електропостачання є одним із пріоритетних завдань в енергетиці.

Проведено класифікацію методів підвищення ефективності електропостачання промислових підприємств. Виділено причини основних технологічних втрат електроенергії в системах електропостачання. Представлено методи, які найбільше підходять для підвищення ефективності систем електропостачання.

Зроблено висновок, що на кожному промисловому підприємстві необхідно застосовувати індивідуальний підхід до існуючих методів вирішення проблем з кваліфікованою оцінкою обсягів витрат, заощадження і терміну окупності їх упровадження.

З'ясовано, що основним способом підвищення ефективності функціонування електротехнічних комплексів і систем електропостачання підприємств є розвиток розподілу генерації за рахунок поновлюваних джерел енергії.

Досліджено методологію визначення складу і типу обладнання гібридних енергосистем. Показано, що всі методи можна поділити на графічні, імовірнісні, аналітичні, ітераційні, гібридні та методи штучного інтелекту.

Виділено критерії при проектуванні гідроелектростанцій. Показано, що ці критерії формують технологічні, економічні, соціально-політичні та екологічні фактори.

Установлено, що перспективним напрямком у компенсації реактивної складової повної потужності є використання багатофункціональних пристроїв, що виконують функції компенсатора несиметрії живильної мережі, стабілізатора, активного фільтра і компенсатора реактивної потужності.

Проведено аналіз ефективності системи електропостачання радіотехнічного науково-дослідного комплексу Інституту іоносфери. Наведено загальну характеристику та режими роботи вимірювального комплексу Інституту іоносфери: радарів, антен та інших виконавчих

пристроїв. Побудовано структурну схему радару некогерентного розсіяння та структурну схему Інституту іоносфери.

Проаналізовано енергоспоживання експериментального комплексу за перше півріччя 2019 та 2020 рр. Установлено, що загальне енергоспоживання з січня по червень 2020 р. склало 60592 кВт·год.

Проведено аналіз ефективності системи електропостачання радіотехнічного науково-дослідного комплексу Інституту іоносфери, який дозволив визначити можливі фактори та режими роботи, що сприяють погіршенню якості електричної енергії в мережі.

Проаналізовано спектр напруги і струму на вході споживача. Експериментальні дані показали, що найбільшу складову в реактивну компоненту споживання вносять радіопередавачі радару метрового діапазону.

Розглянуто динамічні властивості передавача, який складається з високовольтного випрямляча та модуляційного пристрою. Наведено основні параметри передавача. Наведено принцип роботи модуляційного пристрою, комірки модулятора, комірки випрямляча, системи керування модуляційним пристроєм.

У Matlab Simulink створено математичну модель системи живлення вимірювального комплексу Інституту іоносфери за отриманими енергетичними характеристиками формувача.

Досліджено енергетичні характеристики передавача. Отримано результати моделювання формуючої лінії. Аналіз режимів роботи функціональних компонентів радіокомплексу показав їхню низьку енергоефективність і негативний вплив на якість електроенергії, що в сучасних умовах робить наукові радіотехнічні комплекси вкрай непривабливим споживачем для енергосистеми України.

Сформульовано концепцію та запропоновано методику модернізації режимів роботи функціональних компонентів радіотехнічних науково-дослідницьких комплексів.

Запропоновано на початковому етапі модернізації проводити аналіз структури енергоспоживання, режимів роботи всіх вузлів і компонентів системи електропостачання, можливих джерел і причин втрат в енергосистемі та зниження якості електроенергії.

Визначено склад програмного забезпечення інформаційно-вимірювальної системи і системи автоматичного керування електропостачанням.

Наведено метод розрахунку і способів включення накопичувачів енергії. За результатами розрахунку синтезовано спрощену модернізовану систему електропостачання радіопередавача радіотехнічного науково-дослідницького комплексу.

Наведено рівняння розрахунку балансу потужностей для акумуляторів, сонячної панелі та вітрогенераторів. Показано, що промислова мережа і накопичувач енергії під час експлуатації радіотехнічного науково-дослідницького комплексу використовуються періодично у випадкові проміжки часу і мають підключатися до енергосистеми через додаткові інвертори. Здійснено розрахунок потужностей сонячних станцій та вітрогенераторів.

На підставі проведеного аналізу енергетичних показників формувача потужних зондуючих імпульсів, методів регулювання показників якості з використанням неактивних складових повної потужності запропоновано використовувати багатофункціональний компенсатор неактивних складових повної потужності.

У Matlab Simulink побудовано модель фільтрокомпенсуючого пристрою і формувача.

Отримані за допомогою моделі енергетичні характеристики формувача продемонстрували зміну рівня амплітуд обраних вищих гармонік струму мережі живлення та забезпечення підтримання коефіцієнта потужності навантаження з компенсатором не нижче 0,99, зниження амплітуд вищих гармонік струму мережі живлення на 50-60%.

Проведено синтез структурної схеми інформаційно-виміральної системи радіотехнічного науково-дослідницького комплексу.

Наведено вимоги до побудови та виділено основні характерні особливості системи автоматичного управління електропостачанням об'єктів, подібних радіотехнічному науково-дослідницькому комплексу.

На підставі графіків електропостачання та розкладу проведення експерименту побудовано математичну модель Інституту іоносфери.

Синтезовано спрощені схеми заміщення smart-системи електропостачання, споживачів, поновлюваних джерел, накопичувача електричної енергії.

Проведено моделювання роботи виконавчих пристроїв та динамічних процесів у системі електроживлення вимірального комплексу 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 та ємності акумуляторних батарей, що дозволить застосовувати їх для збільшення кількості виконавчих пристроїв Інституту іоносфери. 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 складає 4,72 МВт.

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

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

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.
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.
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.
5. Козлов С. С. Оптимізація енергопостачання науково-дослідного комплексу інституту іоносфери / С. С. Козлов // Актуальні проблеми автоматики та приладобудування : матеріали I 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.
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.

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.

ABSTRACT

Kozlov S. S. Improving the efficiency of electrical network facilities using Smart Grid. – Qualification scientific work as a manuscript.

Thesis for granting the Degree of Candidate of Technical sciences (PhD degree) in specialty 05.14.02 – Management systems and processes (14 – Electrical Engineering) – National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute» of Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2021.

The dissertation is devoted to the development and improvement of power supply control methods of high-power objects with high consumption rate using Smart Grid system.

Problems of using Smart Grid systems in Ukraine and abroad are considered. It is established that the implementation of Smart Grid systems in the EU countries is defined by a number of regulations, directives and development strategies.

It is determined that the implementation of Smart Grid systems is aimed at improving the reliability of energy supply, energy security, energy efficiency and environmental harmonization.

Literature Analysis of the hybrid power systems construction has shown that the use of renewable energy sources in integrated or local power systems has a number of advantages in terms of fuel economy, independence from external supply, cheaper energy. The basic concepts of Smart Grid systems are highlighted.

Ways to increase the efficiency of power supply of facilities with a high degree of duty cycle of electricity consumption are formulated.

The methodology of power supply efficiency increasing of electric networks objects is considered. It is shown that increasing the efficiency of energy supply systems is one of the priority tasks in energy.

The classification of power supply efficiency increasing methods of the industrial enterprises is carried out. The causes of the main technological losses of

electricity in power supply systems are highlighted. The methods that are most suitable for increasing of energy supply systems efficiency are presented.

It is concluded that each industrial enterprise should apply an individual approach to existing methods of solving problems with a qualified assessment of costs, savings and payback period of their implementation.

It was found that the main way to increase the efficiency of electrical systems and power supply systems of enterprises is the development of generation distribution through renewable energy sources.

The methodology of determining the composition and type of equipment of hybrid power systems is studied. It is shown that all methods can be divided into graphical, probabilistic, analytical, iterative, hybrid and artificial intelligence methods.

Criteria for designing hydropower plants are highlighted. It is shown that these criteria are formed by technological, economic, socio-political and environmental factors.

It is established that a promising direction in the compensation of inactive components of full power is the use of multifunctional devices that perform the functions of compensator of asymmetry of the supply network, stabilizer, active filter and reactive power compensator.

The analysis of efficiency of power supply system of radio engineering research complex of the Institute of Ionosphere is carried out. The general characteristics and modes of operation of the measuring complex of the Institute of the Ionosphere: radars, antennas and other actuators are given. The block diagram of incoherent scattering radar and the block diagram of the Ionosphere Institute are constructed.

The energy consumption of the experimental complex for the first half of 2019 and 2020 is analyzed. It is established that the total energy consumption from January to June 2020 amounted to 60592 kW·h.

Analysis of the efficiency of the power supply system of the radio engineering research complex of the Institute of the Ionosphere, which allowed to

identify possible factors and modes of operation that contribute to the deterioration of electricity in the network is made.

The spectrum of voltage and current at the input of the consumer is analyzed. Obtained experimental data have shown that the largest component in the reactive component of consumption is made by radio transmitters of the meter range.

The dynamic properties of a transmitter consisting of a high-voltage rectifier and a modulation device are considered. The main parameters of the transmitter are given. The principle of operation of the modulation device, modulator cell, rectifier cell, modulation device control system is given.

Using Matlab Simulink a mathematical model of the power supply system of the measuring complex of the Ionosphere Institute based on the obtained energy characteristics of the shaper has been created.

The energy characteristics of the transmitter are investigated. The results of modeling the forming line are obtained. The analysis of the modes of operation of the functional components of the radio complex showed their low energy efficiency and negative impact on the quality of electricity, which in modern conditions makes scientific radio systems extremely unattractive consumer for the power system of Ukraine.

The technique of work modes of functional components modernization of radio engineering research complexes is offered.

It is proposed at the initial stage of modernization to analyze the structure of energy consumption, modes of operation of all components and components of the power supply system, possible sources and causes of losses in the power system and reduce the quality of electricity.

The composition of the software of the information-measuring system and the system of automatic control of power supply is determined.

The method of calculation and methods of inclusion of energy storage devices are given.

According to the results of the calculation, a simplified modernized power supply system of the radio transmitter and radio-technical research complex are synthesized.

The equation for calculating the batteries power balance, solar panels and wind turbines is given. It is shown that the industrial network and energy storage during the operation of the radio research complex are used periodically at random intervals and must be connected to the power system through additional inverters. The capacity of solar stations and wind generators has been calculated.

On the basis of the analysis of energy indicators of the shaper of powerful probing pulses, methods of regulation of quality indicators with use of inactive components of full power to use the multipurpose compensator of inactive components of full power is offered.

Using Matlab Simulink models of a filter-compensating device and a shaper have been created.

The energy characteristics of the shaper obtained with the help of the model showed a change in the level of amplitudes of the selected higher harmonics of the power supply and ensuring the maintenance of the load power factor with a compensator not lower than 0.99, reducing the amplitudes of higher harmonics of the power supply by 50-60%.

The synthesis of the structural scheme of the information-measuring system of the radio-technical research complex is carried out.

The requirements for construction are given and the main characteristic features of the system of automatic power supply control of objects similar to the radio engineering research complex are highlighted.

A mathematical model of the Ionosphere Institute on the basis of power supply schedules and the schedule of the experiment was built.

Simplified schemes of replacement of smart-system of power supply, consumers, renewable sources, electric energy storage are synthesized.

The modeling of executive devices and dynamic processes in the power supply system of the measuring complex of the Institute of Ionosphere is carried out.

The simulation showed that the volt-ampere characteristics obtained experimentally with the volt-ampere characteristics of the constructed model are coincided.

The simulation results revealed the possibility of increasing the number of panels and the capacity of batteries, which will allow them to be used to increase the number of actuators of the Institute of Ionosphere. The simulation results allowed to formulate problems on the proper use of voltage converters and the use of PWM controller.

According to the results of the experiments, it was found that for 1 month the amount of energy returned to the network, accumulated during the experiment and during periods of maximum solar activity, when using 600 solar panels is 4,72 MW

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

REFERENCES

1. Domnin I. Control system of the filter-compensating device with the second-order fuzzy-regulator / I. Domnin, O. Levon, S. Kozlov // *Tekhnichna elektrodynamika*. – 2018. – Ch. 6. – S. 30–33.
2. Kozlov C. C. Analiz rezhymiv enerhospozhyvannia kompleksu nekoherentnoho rozsiannia Instytutu ionosfery NAN i MON Ukrainy / S. S. Kozlov // *Visn. Nats. tekhn. un-tu «Kharkiv. politekhn. in-t»*. Serii: Radiofizyka ta ionosfera. – Kharkiv, 2018. – № 43. – S. 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 // *Svitlotekhnika ta elektroenerhetyka*. – 2020. – Vyp. 58, № 2. – S. 73–77.

4. Issledovanie raboty dvuhkonturnoy sistemy upravleniya kompensatorom neaktivnyih sostavlyayuschih polnoy moschnosti / E.A. Levon, S.S. Kozlov, N.A. Kuzmenko, S.I. Ryimar // Energoberezhenie. Energetika. Energoaudit. – 2020. – #2. – S. 67–72.

5. Kozlov S. S. Optymizatsiia enerhopostachannia naukovo-doslidnoho kompleksu instytutu ionosfery / S. S. Kozlov // Aktualni problemy avtomatyky ta prykladobuduvannia : materialy I Mizhnar. nauk.-tekhn. konf., 7–8 hrud. 2017 r. / NTU «KhPI» [ta in.]. – Kharkiv, 2017. – С. 226–227.

6. Kozlov S. S. Matematicheskoe modelirovanie sistemy elektrosnabzheniya nauchno-issledovatel'skogo kompleksa Instituta ionosfery / S. S. Kozlov // 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. Kozlov S. S. Optymyzatsiia parametrov enerhoustanovok radyopolyhona Ynstytuta yonosferi NAN Ukrainy / A. Y. Hapon, S. S. Kozlov, E. E. Svetlychnaia // Aktualni problemy avtomatyky ta prykladobuduvannia : materialy 2 Mizhnar. nauk.-tekhn. konf., 6–7 hrud. 2018 r. / NTU «KhPI» [ta in.]. – Kharkiv, 2018. – S. 24–25.

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 // Aktualni problemy avtomatyky ta prykladobuduvannia : materialy III Mizhnar. nauk.-tekhn. konf., 03–04 hrud. 2020 r. / Nats. tekhn. un-t «Kharkiv. politekhn. in-t» [ta in.]. – Kharkiv, 2020. – S. 3–4.

9. Doslidzhennia modeli enerhospozhyvannia naukovo-doslidnym kompleksom instytutu ionosfery NAN ta MON / A. I. Hapon, N. O. Yevsina, O. M. Yevseienko, S. S. Kozlov, O. O. Lievon // Aktualni problemy avtomatyky ta prykladobuduvannia : materialy III Mizhnar. nauk.-tekhn. konf., 03–04 hrud. 2020 r. / Nats. tekhn. un-t «Kharkiv. politekhn. in-t» [ta in.]. – Kharkiv, 2020. – S. 11–12.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	5
ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1. СТАН І ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ SMART-GRID ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ОБ'ЄКТІВ З ВИСОКИМ СТУПЕНЕМ ШПАРУВАТОСТІ СПОЖИВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ	14
1.1. Використання Smart Grid систем в Україні та за кордоном.....	14
1.2. Аналіз літератури з питань побудови гібридних енергосистем	17
1.3. Перспективи застосування Smart Grid для гібридних енергосистем	18
1.4. Підвищення ефективності електропостачання об'єктів з високим ступенем скважності споживання електричної енергії.....	22
1.5. Висновки за розділом	26
РОЗДІЛ 2. МЕТОДОЛОГІЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ І СИНТЕЗУ ГІБРИДНИХ ЕНЕРГОСИСТЕМ.....	27
2.1. Методологія підвищення ефективності електропостачання об'єктів електричних мереж	27
2.2. Дослідження методології визначення складу и типу обладнання гібридних енергосистем	47
2.2.1. Графічні методи.....	49
2.2.2. Імовірнісні методи.....	50
2.2.3. Аналітичні методи.....	51
2.2.4. Ітераційні методи.....	51
2.2.5. Методи штучного інтелекту.....	52
2.2.6. Гібридні методи.....	52
2.3. Застосування багатофункціональних пристроїв компенсації неактивних складових повної потужності	55
2.4. Висновки за розділом	58
РОЗДІЛ 3. АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ РАДІОТЕХНІЧНОГО НАУКОВО-	60

ДОСЛІДНОГО КОМПЛЕКСУ ІНСТИТУТУ ІОНОСФЕРИ	60
3.1. Загальна характеристика та режими роботи вимірювального комплексу Інституту іоносфери	60
3.1.1. Методи дослідження	64
3.1.2. Структурна схема комплексу	64
3.2. Дослідження енергоспоживання комплексу	67
3.3. Аналіз споживання реактивної електроенергії в системі електропостачання об'єкта.....	70
3.3.1. Динамічні властивості передавача як потужного споживача електроенергії.....	70
3.4. Створення математичної моделі системи живлення вимірювального комплексу Інституту іоносфери.....	81
3.4.1 Дослідження енергетичних характеристик передавача в пакеті Matlab Simulink.....	85
3.5 Висновки за розділом	86
РОЗДІЛ 4. СИНТЕЗ SMART GRID СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ РАДІОТЕХНІЧНОГО КОМПЛЕКСУ ВЕЛИКИЙ ПОТУЖНОСТІ З ВИСОКОЮ СКВАЖНІСТЮ СПОЖИВАННЯ	88
4.1. Підготовчий етап модернізації	89
4.2. Розрахунок і способи включення накопичувача енергії	90
4.3. Структурні зміни в системі електропостачання	92
4.4. Розрахунок потужності СЕС	99
4.5. Розрахунок потужності ВЕС	102
4.5.1. Розрахунок енергетичного потенціалу ВЕС.....	103
4.5.2. Вибір вітрогенератора з урахуванням енергетичного балансу РНДК	103
4.6. Синтез системи електропостачання РНДК з фільтрокомпесуючим пристроєм.....	105
4.7. Синтез інформаційно-вимірювальної системи РНДК.....	109
4.8. Система управління електропостачанням РНДК.....	113
4.9. Методика модернізації енергосистеми.....	115

	4
4.10 Висновки за розділом.....	118
РОЗДІЛ 5. РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ SMART GRID СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ТА РОЗРОБКА РЕКОМЕНДАЦІЙ ПО ЇЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ	119
5.1. Розробка спрощеної схеми заміщення smart-системи електропостачання.....	119
5.2. Розробка схеми заміщення споживачів електричної енергії.....	122
5.3. Розробка схеми заміщення поновлюваних джерел електричної енергії.....	127
5.4. Розробка схеми заміщення накопичувача електричної енергії.....	130
5.5. Моделювання динамічних процесів у системі електроживлення вимірювального комплексу Інституту іоносфери.....	133
5.6. Результати роботи алгоритму автоматизації управління smart-систем електроживлення об'єкта.....	139
5.7. Висновки за розділом	145
ВИСНОВКИ.....	147
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	149
ДОДАТОК А.	168
ДОДАТОК Б.	172
ДОДАТОК В.....	197
ДОДАТОК Г.	199