

На правах рукописи



Косарев Борис Андреевич

**МЕТОДИКИ УПРАВЛЕНИЯ ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННЫМИ
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ
С РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИЕЙ**

05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Омск, 2020

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Омский государственный технический университет».

Научный руководитель: **Федоров Владимир Кузьмич**
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Ковалев Владимир Захарович**
доктор технических наук, профессор, профессор Института нефти и газа федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Югорский государственный университет»
(г. Ханты-Мансийск)

Сушков Валерий Валентинович
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Энергетика» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Нижевартовский государственный университет»
(г. Нижневартовск)

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет»
(г. Новосибирск)

Защита диссертации состоится «29» декабря 2020 г. в 16:30 на заседании объединенного диссертационного совета Д 999.162.02, созданного на базе Омского государственного технического университета и Омского государственного университета путей сообщения, по адресу: 644050, г. Омск, пр. Мира, 11, Главный корпус, П-202.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Омского государственного технического университета и на сайте www.omgtu.ru

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по адресу: 644050, г. Омск, пр. Мира, 11, объединенный диссертационный совет Д 999.162.02. Тел.: (3812) 65-24-79, e-mail: dissov_omgtu@omgtu.ru

Автореферат разослан _____ 2020 года.

Ученый секретарь объединенного
диссертационного совета Д 999.162.02
канд. техн. наук, доцент



О.А. Лысенко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Актуальность темы. Согласно Постановлению Правительства РФ от 28 марта 2019 г. N 335 "О внесении изменений в постановление Правительства Российской Федерации от 15 апреля 2014 г. N 321" в паспорте государственной программы РФ «Развитие энергетики» в числе перспектив развития топливно-энергетического комплекса отмечена высокая роль децентрализованных электротехнических систем (ДЭС) с распределенной генерацией (РГ). Очевидными преимуществами ДЭС с РГ является адаптивное использование доступных энергоресурсов, уменьшение потерь электроэнергии при передаче потребителю по сравнению с централизованными электротехническими системами и возможность направлять излишки электроэнергии в энергохранилища или внешнюю сеть. Основными проблемами ДЭС с РГ является дисбаланс генерируемой и потребляемой мощностей, вызывающий отклонение сетевого напряжения и частоты от допустимых значений, возможность возникновения устойчивых хаотических колебаний режимных параметров, дополнительные потери мощности в питающих линиях за счет смещения центров электрических нагрузок (ЦЭН). В этой связи актуальными задачами для ДЭС с РГ являются поддержание сетевого напряжения и частоты в диапазоне допустимых значений, детектирование и подавление хаотических колебаний режимных параметров, минимизация потерь электроэнергии в питающих линиях. Данные задачи могут быть решены путем разработки методик управления ДЭС с РГ, направленных на стабилизацию режимных параметров в пределах допустимых значений, в том числе при возникновении хаотических колебаний, а также на уменьшение потерь мощности при электропередаче. Апробацию методик управления ДЭС с РГ целесообразно осуществлять методами имитационного компьютерного моделирования. В качестве предполагаемых результатов от внедрения методик управления ДЭС с РГ ожидается стабилизация значений показателей качества электроэнергии, повышение режимной устойчивости электросистемы и пропускной способности линий электропередачи.

Степень разработанности проблемы. Большой вклад в создание и развитие ДЭС внесли отечественные ученые Безруких П.П., Булатов Ю.Н., Волкова И.О., Воропай Н.И., Директор Л.Б., Зайченко В.М., Илюшин П.В., Ковалев В.З., Крюков А.В., Кубарьков Ю.П., Куликов А.Л., Лукутин Б.В., Обухов С.Г., Сушков В.В., Федоров В.К., Фишов А.Г. и зарубежные ученые J. Dekker, T. Sadamoto, C. Sandels, C. Sandroni, R.H. Tan, T. Ishizaki и др.

Тематика исследований включает вопросы разработки методик управления ДЭС с РГ, однако не затрагивает такие проблемы как выявление и подавление хаотических колебаний режимных параметров и уменьшение потерь мощности при электропередаче. Существующие компьютерные модели ДЭС с РГ следует дополнить детализацией схем замещения типовых электроприемников.

Таким образом, задачи моделирования и разработки методик управления ДЭС с РГ являются актуальными.

Цель диссертационной работы – разработка и исследование методик управления децентрализованными электротехническими системами с распределенной генерацией.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

1. Провести анализ существующих компьютерных моделей и методик управления ДЭС с РГ.
2. Разработать методику управления ДЭС с РГ, позволяющую повысить качество электрической энергии, выявлять и подавлять хаотические колебания режимных параметров.

3. Разработать методику управления ДЭТС с РГ, позволяющую уменьшить потери мощности при передаче электроэнергии.

4. Разработать компьютерные модели ДЭТС с РГ, позволяющие апробировать методики управления и рассчитывать основные электрические параметры ДЭТС с РГ.

Объект и предмет исследования. Объектом исследования является ДЭТС с РГ. Предметом исследования являются модели, алгоритмы и методики управления ДЭТС с РГ.

Научная новизна работы:

1. Разработаны имитационные компьютерные модели ДЭТС с РГ промышленного предприятия и ДЭТС с РГ жилых зданий для апробации методик управления и расчета режимных параметров, отличающиеся детализацией схем замещения нагрузки потребителей.

2. Разработана методика управления, направленная на поддержание установившегося отклонения напряжения и частоты ДЭТС с РГ в заданном диапазоне, отличающаяся тем, что позволяет выявлять и подавлять хаотические колебания режимных параметров.

3. Разработана методика управления, направленная на снижение потерь мощности при передаче электроэнергии в ДЭТС с РГ, отличающаяся тем, что позволяет компенсировать смещения центров электрических нагрузок путем динамического перераспределения источников питания по группам потребителей.

Новизна технических решений подтверждена свидетельствами о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2019619453, № 2019665189, № 2020615877.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Полученные соискателем основные научные результаты соответствуют пункту 1 «Развитие общей теории электротехнических комплексов и систем, изучение системных свойств и связей, физическое, математическое, имитационное и компьютерное моделирование компонентов электротехнических комплексов и систем», пункту 3 «Разработка, структурный и параметрический синтез электротехнических комплексов и систем, их оптимизация, а также разработка алгоритмов эффективного управления» паспорта специальности 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы».

Практическая ценность работы заключается:

1. В возможности подавления хаотических колебаний режимных параметров ДЭТС с РГ.

2. В уменьшении потерь мощности при передаче электроэнергии в ДЭТС с РГ.

3. В разработке имитационных компьютерных моделей ДЭТС с РГ промышленного предприятия и ДЭТС с РГ жилых зданий, позволяющих рассчитывать параметры режима, апробировать методики управления.

Практическая ценность работы подтверждена свидетельствами о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2019619453, № 2019665189, № 2020615877.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Имитационные компьютерные модели ДЭТС с РГ промышленного предприятия и ДЭТС с РГ жилых зданий для апробации методик управления и расчета режимных параметров.

2. Методика управления ДЭТС с РГ, направленная на повышение качества электроэнергии, выявление и подавление хаотических колебаний режимных параметров.

3. Методика управления ДЭТС с РГ, направленная на уменьшение потерь мощности при передаче электроэнергии.

Методология и методы исследования. Методология исследования основана на применении основных положений теории электротехнических комплексов и систем, принципов управления объектами электротехнических комплексов и систем промышленного и бытового назначения, теории электрических машин. В качестве методов исследования использовано объектно-ориентированное программирование, имитационное компьютерное моделирование. Верификация моделей выполнена на основе экспериментальных измерений.

Достоверность результатов диссертационной работы и выводов подтверждается корректностью поставленных задач, обоснованностью принятых допущений при разработке методик управления, апробацией разработанных методик управления путем имитационного компьютерного моделирования в программах для ЭВМ, прошедших регистрацию в Федеральной службе по интеллектуальной собственности.

Реализация и внедрение результатов работы.

1. Разработанные методики управления ДЭС с РГ признаны эффективными и внедрены в производственную деятельность Омской ТЭЦ – 4.

2. Результаты диссертационной работы внедрены в учебную деятельность в ФГБОУ ВО «Омский государственный технический университет».

Апробация работы. Основные научные результаты и положения диссертации докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

1. XI студенческая научно-практическая конференция «Приборостроение и информационные технологии», посвященная 60-летию образования Омского научно-исследовательского института приборостроения (Омск, 2018 г.).

2. Всероссийская (с международным участием) научно-практическая конференция «Актуальные вопросы энергетики» (Омск, 2019 г.), (Омск, 2020 г.).

3. XIII Международная IEEE научно-техническая конференция «Динамика систем, механизмов и машин» (Омск, 2019 г.).

4. XII студенческая научно-практическая конференция «Приборостроение и информационные технологии», посвященная 61-летию образования Омского научно-исследовательского института приборостроения (Омск, 2019 г.).

Также результаты работы были представлены на омском научно-практическом семинаре «Современные проблемы радиофизики и радиотехники» (Омск, 2019 г.), (Омск, 2020 г.).

Материалы диссертационной работы в полном объеме докладывались и обсуждались на научно-техническом семинаре кафедры «Электрическая техника» ОмГТУ (Омск, 2020 г.).

Публикации. Материалы диссертации опубликованы в 18 научных работах, из них 6 в периодических изданиях по перечню ВАК РФ, и одна статья, индексируемая в Scopus. Получены 3 свидетельства о регистрации программы для ЭВМ в Федеральной службе по интеллектуальной собственности.

Личный вклад автора состоит в анализе существующих компьютерных моделей и методик управления ДЭС, выявлении их основных недостатков и нерешенных задач; постановке цели, задач исследования и методологии их решения; разработке методик эффективного управления и компьютерных моделей ДЭС, формировании основных научных результатов и положений, изложенных в диссертации. В работах в соавторстве личный вклад соискателя составляет значение не менее 75%.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа содержит введение, четыре главы, основные выводы по результатам научных исследований, библиографический

список, список сокращений и условных обозначений и приложения. Общий объем диссертации 185 страниц, в том числе 66 рисунков, 19 таблиц, список использованной литературы из 123 наименований и приложение из 12 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выполняемых исследований, сформулированы цели и задачи исследования, обоснованы научная новизна и практическая значимость результатов, представлены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе показана актуальность ДЭС с РГ и высокая общемировая динамика развития распределенной энергетики. Рассмотрены вопросы управления и имитационного компьютерного моделирования ДЭС с РГ, способы уменьшения потерь мощности при электропередаче.

По результатам обзора сделаны выводы об отсутствии методик управления ДЭС с РГ, учитывающих возможность возникновения хаотических колебаний режимных параметров и направленных на уменьшение потерь мощности при электропередаче. Существующие компьютерные модели ДЭС с РГ следует дополнить детализацией схем замещения типовых электроприемников.

Во второй главе выполнено имитационное компьютерное моделирование ДЭС с РГ жилых зданий и промышленного предприятия при помощи пакета прикладных программ MatLab.

Внешний вид компьютерных моделей ДЭС с РГ жилых зданий и промышленного предприятия показан на рисунке 1, рисунке 2.

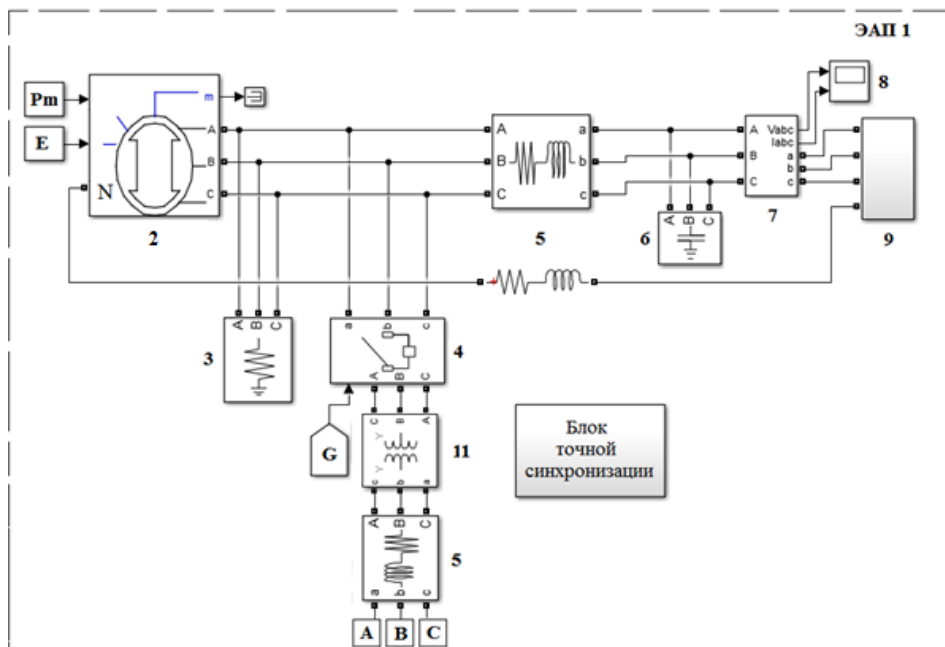
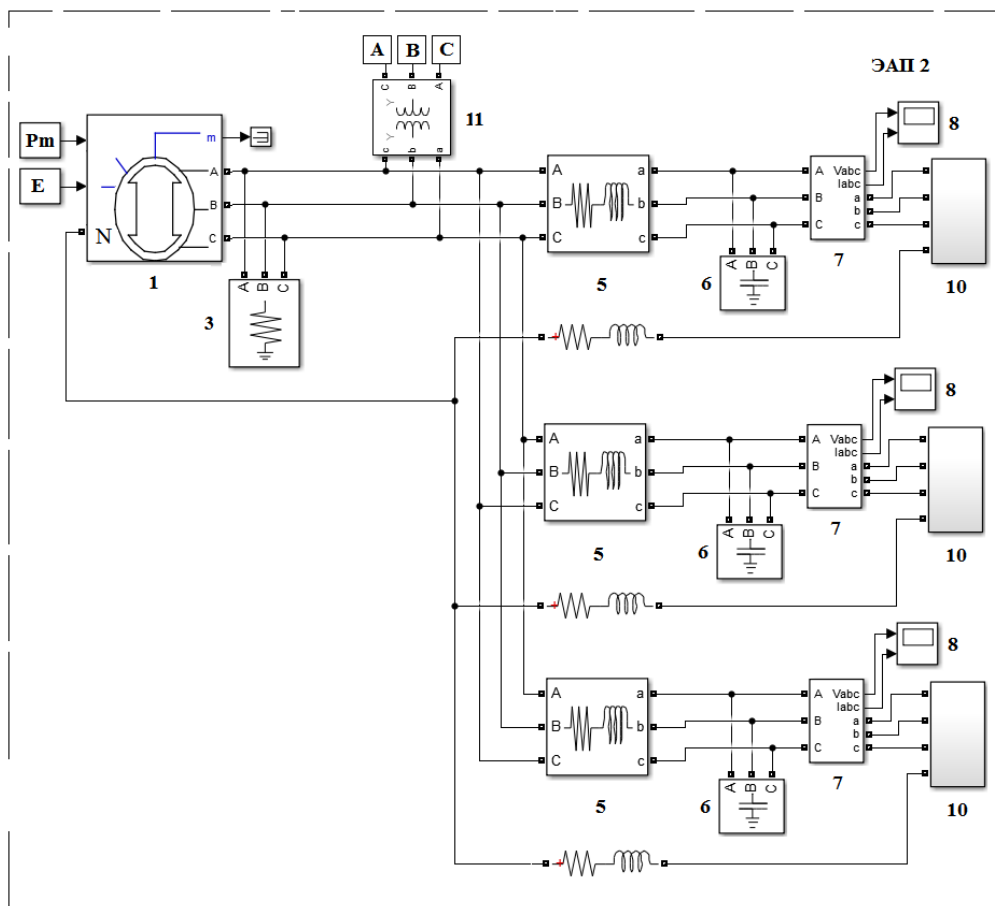


Рисунок 1 – Компьютерная модель ДЭС с РГ жилых зданий: 1, 2 - синхронные генераторы; 3 - активная нагрузка (собственные нужды генератора); 4 - управляемый выключатель; 5 - линия электропередачи; 6 - компенсирующее устройство; 7 - блок измерения напряжения и тока; 8 - осциллограф; 9 - блок нагрузки жилых зданий; 10 - блок нагрузки жилых зданий; ЭАП - электросистема активного потребителя; 11 – силовой трансформатор 6/0,4 кВ



Окончание рисунка 1

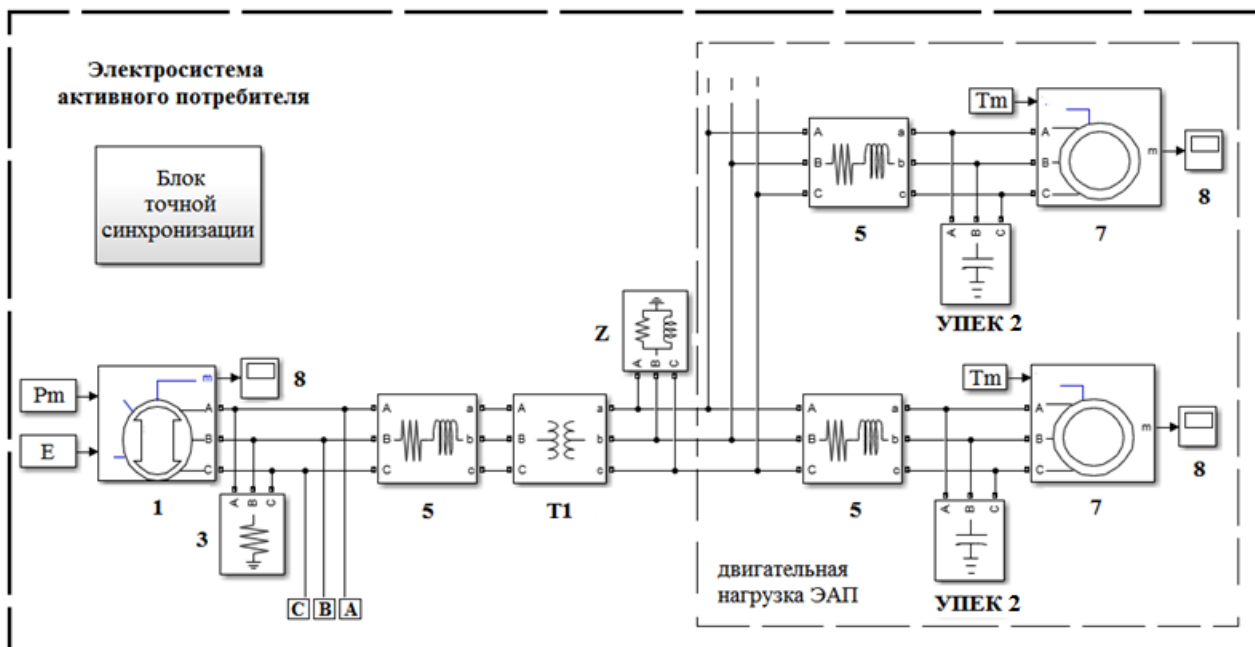
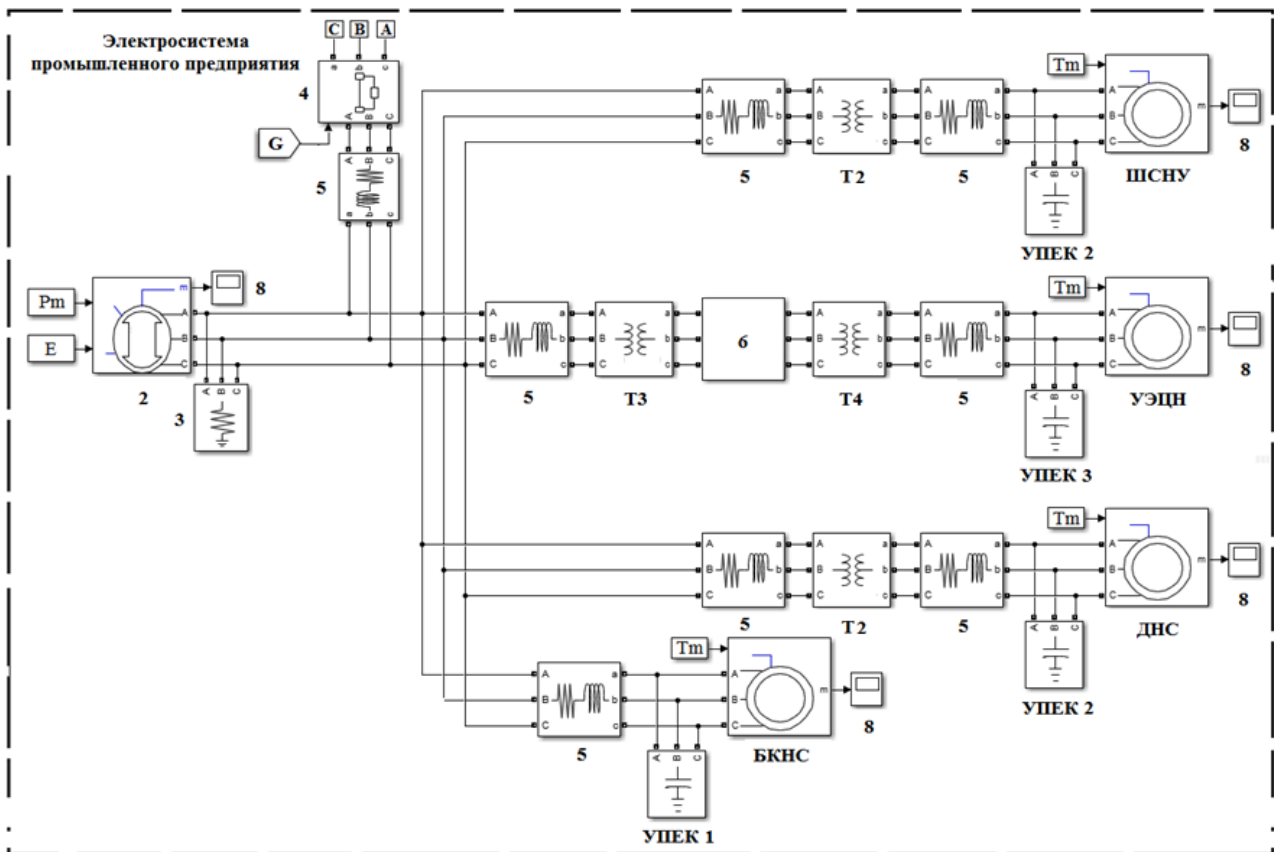


Рисунок 2 – Компьютерная модель ДЭС с РГ промышленного предприятия: 1, 2 – синхронные генераторы; 3 – активная нагрузка (собственные нужды генератора); 4 – управляемый выключатель; 5 – линия электропередачи; 6 – низковольтный преобразователь частоты; 7 – асинхронный двигатель ВАО-72-2; 8 – осциллограф; Т1 – Т4 – силовые трансформаторы; УПЕК 1 – УПЕК 3 – установки поперечной емкостной компенсации



Окончание рисунка 2

Компьютерные модели ДЭС с РГ позволяют рассчитать значение и распределение потоков мощности, комплексы тока и напряжения, частоту в любой точке электросистемы, угол нагрузки генераторов (рисунки 3, 4).

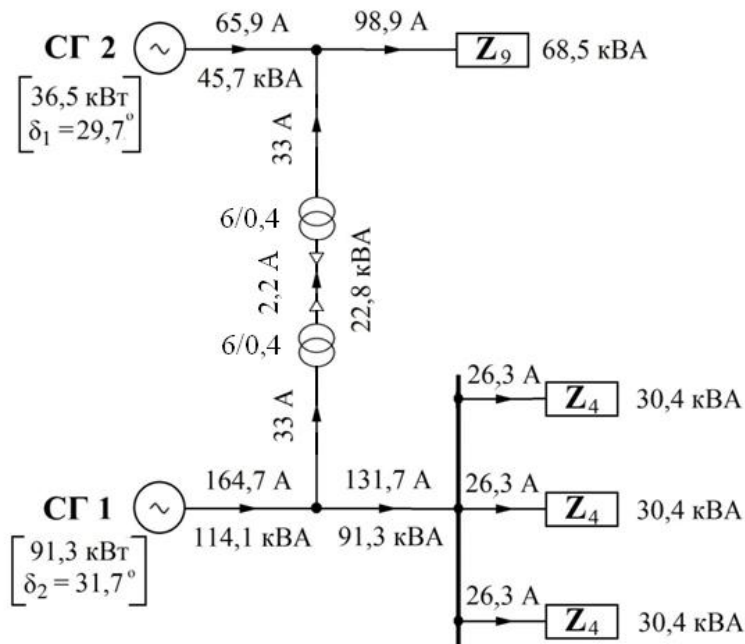


Рисунок 3 – Схема распределения потоков мощности в ДЭС с РГ жилых зданий: СГ1, СГ2 – синхронные генераторы; Z_9 – нагрузка 9 жилых зданий; Z_4 – нагрузка 4 жилых зданий

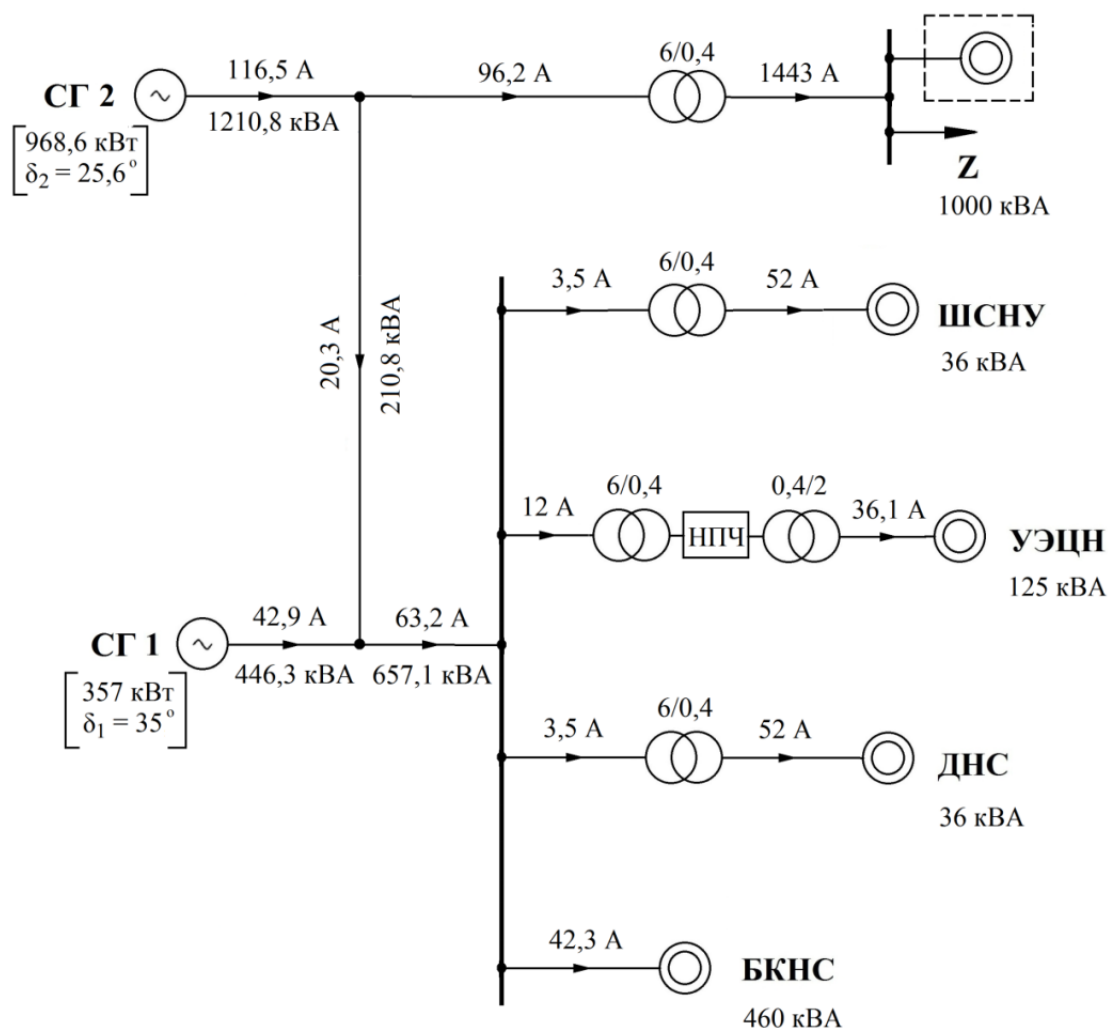


Рисунок 4 – Схема распределения потоков мощности в ДЭС с РГ промышленного предприятия: СГ1, СГ2 – синхронные генераторы; Z – статическая часть нагрузки; ШСНУ – штанговая скважинная насосная установка; УЭЦН - установка электроприводного центробежного насоса; ДНС – дожимная насосная станция; БКНС – блочная кустовая насосная станция

Также при помощи компьютерных моделей ДЭС с РГ рассчитаны гармонические искажения напряжения и тока.

В точке присоединения нагрузки жилых зданий коэффициенты искажения синусоидальности кривой по напряжению и по току составляют соответственно 8,88 % и 21,67 %. Спектр гармонических составляющих напряжения представлен в основном нечетными гармониками 3 (7.31 %), 5 (1.58 %), 7 (3.16 %), 9 (0.39 %), 11 (1.98 %), 13 (0.24 %) порядков. Спектр гармонических составляющих тока представлен в основном нечетными гармониками 3 (16.50 %), 5 (8.88 %), 7 (5.81 %), 9 (6.07 %), 11 (5.53 %), 13 (2.64 %) порядков.

В точке присоединения нагрузки промышленного предприятия коэффициенты искажения синусоидальности кривой по напряжению и по току составляют соответственно 7,34 % и 44,33 %. Спектр гармонических составляющих тока представлен следующими

гармониками: 2 (1,2 %) 3 (41,21 %), 4 (0,17 %), 5 (5,89 %), 7 (2,82 %), 9 (1,94 %), 11 (1,41 %), 13 (0,6 %) порядков. Спектр гармонических составляющих напряжения представлен следующими гармониками: 2 (0,23 %), 3 (4,44 %), 4 (0,03 %), 5 (0,34 %), 7 (0,52 %), 9 (0,29 %), 11 (0,08 %), 13 (0,06 %) порядков.

В третьей главе рассмотрена методика управления ДЭС с РГ, учитывающая возможность возникновения хаотических колебаний режимных параметров. Также приведен расчет критериев управляющего воздействия, направленного на подавление хаотических колебаний. Показаны результаты апробации методики управления при помощи компьютерных моделей ДЭС с РГ.

Методика управления ДЭС с РГ состоит из следующих операций:

1. Задание параметров эталонной синусоиды напряжения (U_m – амплитуда, $f_{ном}$ – номинальная частота);

2. Формирование массива значений эталонной синусоиды:

2.1. Вычисление периода эталонной синусоиды $T = \frac{1}{f_{ном}}$;

2.2. Разбиение периода T на n равных отрезков (n – целое число). Длина отрезка (шага) ΔT составляет $\frac{T}{n} = \frac{1}{f_{ном} \cdot n}$;

Согласно нормам качества электрической энергии предельно допустимое отклонение частоты составляет 0,4 % от номинального значения 50 Гц. Тогда предельно допустимое отклонение значения периода T составляет 1/6300 с. Поэтому в методике выбрано значение шага $\Delta T \geq \frac{1}{3150}$ с.

2.3. Вычисление значений эталонной синусоиды $U_s(t) = U_m \sin(2\pi f_{ном} t)$ на интервале $\frac{1}{4f_{ном}}; \frac{1}{4f_{ном}} + 3000T$ с шагом ΔT ;

Согласно нормам качества электрической энергии для сетей общего пользования выбирают установившееся отклонение напряжения среднее за 1 минуту, поэтому в методике рассматриваются значения напряжения на интервале длительностью $3000 \cdot T$ (количество точек $3000 \cdot (n+1)$).

3. Определение максимального и минимального значений фазного напряжения U_{ϕ}^i в течение времени $T + \frac{1}{6300}$ (учтена возможность увеличения периода T за счет предельно допустимого отклонения частоты от номинального значения).

Предельно допустимое установившееся отклонение напряжения составляет 10 % от номинального согласно нормам качества электрической энергии. Поэтому при $\frac{|U_{\phi}^i - U_{\phi}^i|}{U_{\phi}^i} \geq 0,1$ следует пункт 5, иначе следует пункт 4.

4. Для значений фазного напряжения $U_{\phi}^i = U_{\phi max}$, $U_{\phi}^{i+1} = U_{\phi max}$ принять соответственно моменты времен T_i , T_{i+1} . Если $\left| \frac{1}{T_{i+1} - T_i} - f_{ном} \right| \geq 0,4$, то поступает сигнал регулировки частоты (уменьшение величины генерируемой активной мощности при положительном значении $\frac{1}{T_{i+1} - T_i} - f_{ном}$, увеличение величины генерируемой активной мощности при отрицательном значении $\frac{1}{T_{i+1} - T_i} - f_{ном}$), иначе следует пункт 1.

5. Операция детектирования режима биений заключается в следующем. При значении фазного напряжения $U_\phi = U_{\phi max}$ принять момент времени $t = 0$ и запоминать значения фазного напряжения через каждые ΔT с. до момента времени $3000 \cdot T$ с. (количество точек $3000 \cdot (n+1)$). Для $U_\phi = U_{\phi min}$ запомнить момент времени T_6 . При соответствии массивов U_ϕ и $U_{\phi max} \cos(\frac{\pi t}{T_6})$ детектируется режим биений и выполняется пункт 6, иначе следует пункт 7.

6. Переход электросистемы активного потребителя (ЭАП) в автономный режим работы. Тестирование основных источников питания (ОИП) ЭАП. При соответствии параметров ОИП номинальным выполняется подключение ЭАП к общей сети. При несоответствии параметров ОИП номинальным выполняется отключение ОИП от соответствующей электросистемы и подключение резервного источника питания (РИП). В случае отсутствия РИП выполняется оценка запаса по мощности общей сети. Если мощность общей сети может быть увеличена до требуемого значения без потери устойчивости, то ЭАП с вышедшим из строя источником питания подключается к общей сети. Если мощность общей сети не может быть увеличена до требуемого значения без потери устойчивости, тогда электроснабжение ЭАП с вышедшим из строя ОИП прерывается.

7. Выявление хаотического режима работы ДЭТС с РГ выполняется при помощи вычисления значения старшего показателя Ляпунова. Положительное значение старшего показателя соответствует хаотическим колебаниям режимных параметров ДЭТС с РГ.

Расчет значения старшего показателя Ляпунова выполняется по следующей формуле:

$$\lambda = \frac{1}{N \Delta T} \sum_{k=1}^N \ln |\Delta \delta^{-k \Delta T}|, \quad (1)$$

где N – число точек измерения, ΔT – шаг дискретизации, $\Delta \delta$ – отклонение угла поворота ротора синхронного генератора.

При положительном значении λ детектируется режим хаотических колебаний и выполняется пункт 9, иначе выполняется пункт 8.

8. Для значений фазного напряжения $U_\phi^i = U_{\phi max}$, $U_\phi^{i+1} = U_{\phi max}$ принять соответственно моменты времени T_i , T_{i+1} . Если $\left| \frac{1}{T_{i+1} - T_i} - f_{ном} \right| \geq 0,4$, то выполняется регулирование частоты, напряжения и следует пункт 1, иначе выполняется регулирование напряжения и следует пункт 1.

9. Операция подавления хаотических колебаний заключается в следующем. ЭАП переходят в автономный режим работы. После завершения переходных процессов, ЭАП подключаются к общей сети. При отрицательном значении старшего показателя Ляпунова следует пункт 1. При наличии положительного старшего показателя Ляпунова на ДЭТС с РГ оказывается управляющее воздействие, подавляющее хаотические колебания (выбор и расчет управляющего воздействия приводится ниже), после чего следует пункт 1.

На основании условий асимптотической устойчивости решения системы дифференциальных уравнений, описывающих ДЭТС с РГ, получены критерии управляющего воздействия, направленного на подавление хаотических колебаний:

$$\begin{cases} \frac{D_1}{J_1} - \frac{D_2}{J_2} > 0, \\ \left(\frac{D_1}{J_1} - \frac{D_2}{J_2} \right)^2 - 4E_1 E_2 B_{12} \left(\frac{\cos(\delta_{12} - \alpha_{12})}{J_1} + \frac{\cos(\delta_{12} + \alpha_{12})}{J_2} \right) < 0, \end{cases} \quad (2)$$

где D_1 , D_2 – коэффициенты демпфирования, J_1 , J_2 – моменты инерции ротора генераторов; E_1 , E_2 – ЭДС генераторов; B_{12} – взаимная проводимость схемы замещения

пассивной части ДЭС с РГ; δ_{12} – относительный угол поворота роторов генераторов; α_{12} – дополняющий угол.

Предложенная методика управления апробирована при помощи компьютерных моделей ДЭС с РГ.

При моделировании отклонение напряжения, частоты в точках присоединения нагрузки ДЭС с РГ корректируются отключением (включением) балластной нагрузки и компенсирующего устройства (рисунки 5, 6).

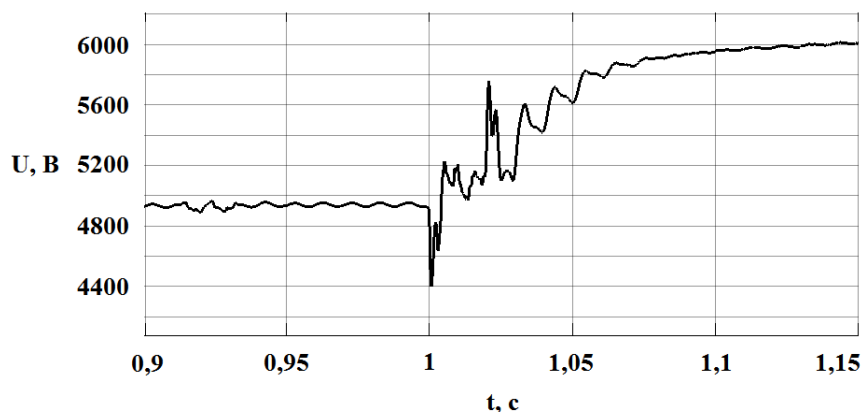


Рисунок 5 – Регулирование напряжения ДЭС с РГ промышленного предприятия при подключении компенсирующего устройства 1408,5 кВАр

Из рисунка следует, что после подачи управляющего воздействия установившееся отклонение напряжения составляет менее 10 % от номинального значения 6 кВ и соответствует нормам качества электроэнергии.

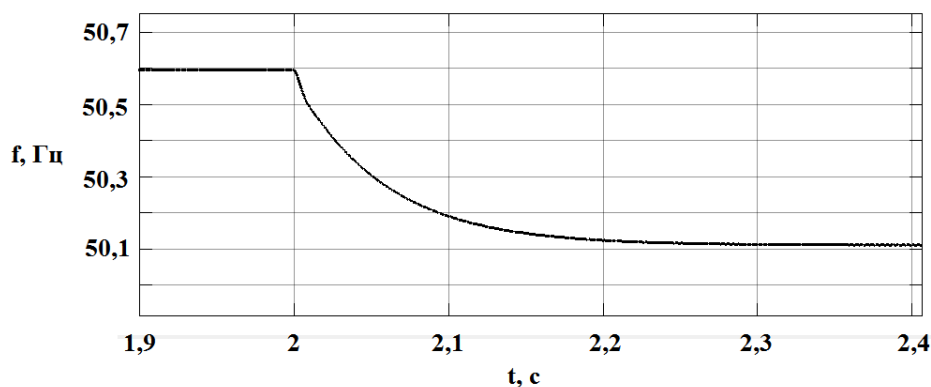


Рисунок 6 – Регулирование частоты ДЭС с РГ жилых зданий при подключении балластной нагрузки 26 кВт

Из рисунка следует, что после подачи управляющего воздействия значение частоты соответствует предельно допустимому диапазону 49,6 – 50,4 Гц согласно нормам качества электрической энергии.

При возникновении режима биений регулируется частота источников питания ДЭС с РГ (рисунок 7).

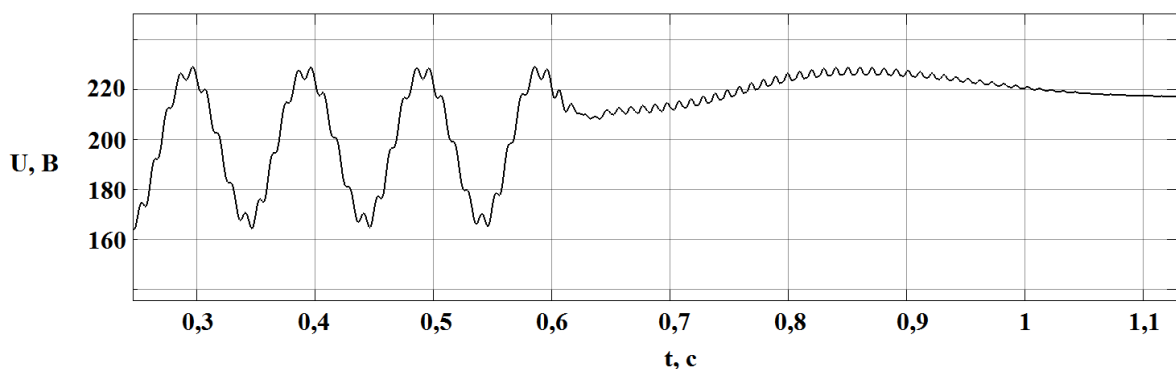


Рисунок 7 – Подавление режима биений в ДЭТС с РГ жилых зданий при разнице частот источников питания 5 Гц

Как видно из рисунка, квазипериодические колебания напряжения после подачи управляющего воздействия затухают через переходный процесс и стабилизируются в диапазоне значений 200 – 240 В, что соответствует нормам качества электроэнергии.

Для подавления хаотических колебаний режимных параметров ДЭТС с РГ корректируются значения коэффициентов демпфирования синхронных генераторов (рисунок 8).

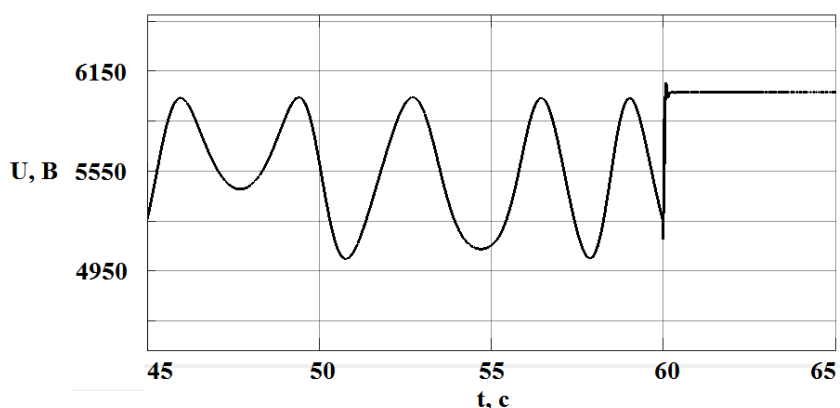


Рисунок 8 – Подавление хаотических колебаний в ДЭТС с РГ промышленного предприятия при увеличении демпферного коэффициента генератора

Согласно рисунку после подачи управляющего воздействия хаотические колебания напряжения стабилизируются в диапазоне 5850 – 6150 В. Для уровня напряжения 6 кВ данный диапазон значений соответствует нормам качества электроэнергии.

Таким образом, результаты моделирования указывают на удовлетворительную работу методики управления, после подачи управляющего воздействия флуктуации значений режимных параметров ДЭТС с РГ стабилизируются в допустимых пределах.

В четвертой главе рассмотрена методика уменьшения потерь мощности при передаче электроэнергии в ДЭТС с РГ.

Основная идея методики заключается в сокращении расстояния между центром электрических нагрузок (ЦЭН) группы потребителей и соответствующим источником питания (ИП) за счет подключения потребителей к ИП, находящемуся на меньшем расстоянии от ЦЭН. Сокращение длины питающих линий между ЦЭН группы потребителей и ИП уменьшает потери при транспорте электроэнергии. При смещении ЦЭН групп

потребителей происходит перераспределение ИП по критерию минимальной длины питающих линий.

Рассмотрим подробно цикл операций, направленный на снижение потерь мощности при передаче электроэнергии в ДЭС с РГ:

1. Задание координат потребителей в группах:

$$K_n = \begin{pmatrix} x_1 & y_1 \\ \vdots & \vdots \\ x_N & y_N \end{pmatrix}, \quad (3)$$

где K_n – матрица координат потребителей; $(x; y)$ – координаты отдельного потребителя; n – порядковый номер группы потребителей, N – количество потребителей в группе.

2. Задание координат источников питания ИП:

$$ИП_n = \begin{pmatrix} x_1 & y_1 \\ \vdots & \vdots \\ x_N & y_N \end{pmatrix}, \quad (4)$$

где $ИП_n$ – матрица координат источников питания; $(x; y)$ – координаты отдельного ИП; n – порядковый номер ИП, N – количество ИП в электросистеме.

3. Измерение в момент времени t значений мощности потребителей и токов питающих линий:

$$P_{tn} = \begin{pmatrix} P_{t1} \\ \vdots \\ P_{tN} \end{pmatrix}, \quad (5)$$

$$I_{tn} = \begin{pmatrix} I_{t1} \\ \vdots \\ I_{tK} \end{pmatrix}, \quad (6)$$

где P_{tn} – матрица значений мощности потребителей n -ой группы в момент времени t , I_{tn} – матрица значений токов питающих линий в момент времени t , N – количество потребителей в n -ой группе, K – количество групп потребителей.

4. Расчет ЦЭН групп потребителей в момент времени t :

$$\begin{aligned} &ЦЭН_{tn}(x_{tn}; y_{tn}) \\ x_{tn} &= \frac{\sum_{i=1}^N P_{tn}^i \cdot K_n^{i,1}}{\sum_{i=1}^N P_{tn}^i}, \end{aligned} \quad (7)$$

$$y_{tn} = \frac{\sum_{i=1}^N P_{tn}^i \cdot K_n^{i,2}}{\sum_{i=1}^N P_{tn}^i}. \quad (8)$$

5. В соответствие n -ой группе потребителей ставится ИП k -ой группы, если:

- расстояние от ЦЭН_{tn} до ИП_k $L_{tk} = \sqrt{(x_{tn} - x_k)^2 + (y_{tn} - y_k)^2}$ является наименьшим в электросистеме по сравнению с расстоянием от ЦЭН_{tn} до любого другого ИП $L = \sqrt{(x_{tn} - x)^2 + (y_{tn} - y)^2}$, включая ИП_n (рисунок 9);

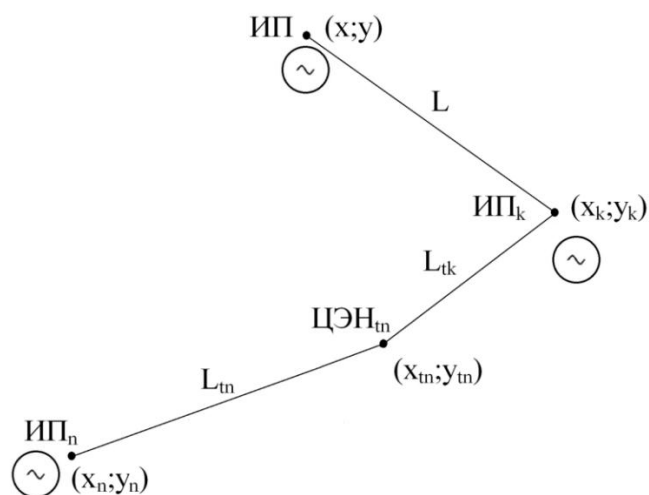
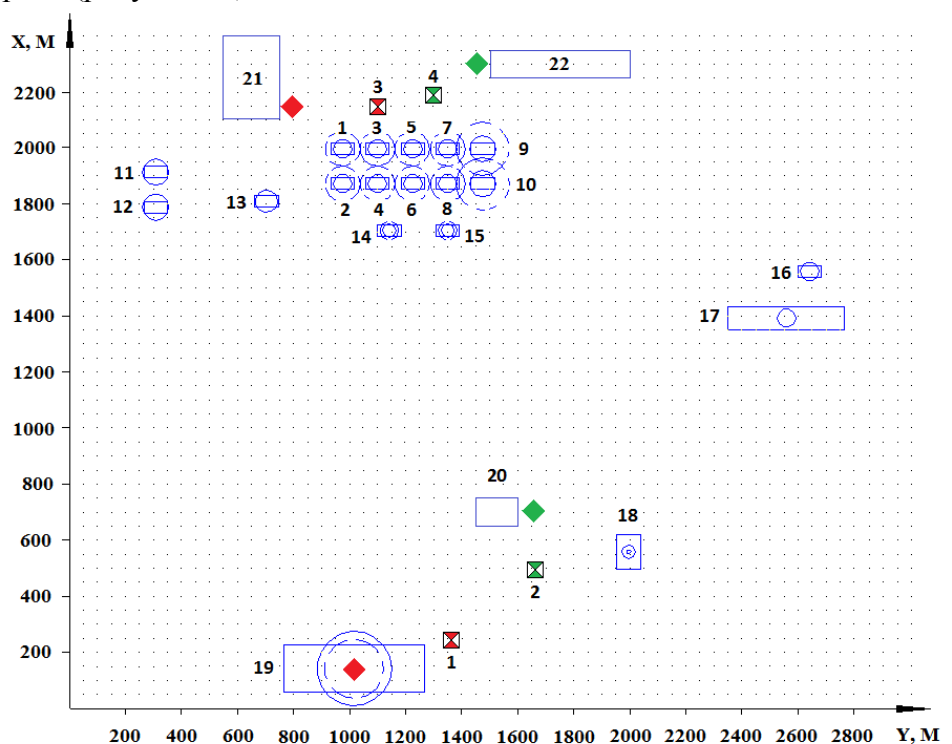


Рисунок 9 – Смещение центра электрических нагрузок в момент времени t

- максимальная мощность источника питания к-ой группы P_{max_k} не меньше суммы мощностей ЭП к-ой и n-ой групп $\sum P_{tk} + \sum P_{tn}$:

$$P_{max_k} \geq \sum P_{tk} + \sum P_{tn} \quad (9)$$

Разработанная методика апробирована на примере ДЭС с РГ промышленного микрорайона города (рисунок 10).



- ☒ - центр электрических нагрузок (утро) ☒ - центр электрических нагрузок (вечер)
- ♦ - источник питания (утро) ♦ - источник питания (вечер)

Рисунок 10 – Схема плана промышленного микрорайона города и картограмма нагрузок потребителей с перераспределением ИП при смещении ЦЭН: 1-10 – многоквартирный дом; 11 – больница; 12 – санаторий; 13 – бассейн; 14 – торговый комплекс; 15 – кинотеатр; 16 – школа; 17 – хлебозавод; 18 – бетонный завод; 19 – кирпичный завод; 20 – фотоэлектрическая установка; 21 – гибридная электростанция; 22 – солнечная электростанция

Примечание: 1. Штриховой линией указаны мощности нагрузок потребителей в вечернее время, тонкой сплошной линией – в утреннее время; 2. Масштабный коэффициент мощности картограммы 0,02 кВт/м².

Потребители 1 - 15 подключены к гибридной электростанции 21, состоящей из ветряной электростанции с установленной мощностью 3 МВт и дублирующей инверторной дизельной электростанции мощностью 3 МВт. Потребители 16 – 19 подключены к централизованной системе электроснабжения с ГПП 35/10 кВ, находящейся на территории кирпичного завода. Потребитель 20 – активный потребитель (тепличное хозяйство), использующий в качестве источника питания для собственных нужд и для поставок электроэнергии во внешнюю сеть фотоэлектрическую установку мощностью 1300 кВт. Потребитель 22 - активный потребитель (дачное хозяйство), использующий в качестве источника питания для собственных нужд и для поставок электроэнергии во внешнюю сеть фотоэлектрические установки суммарной мощностью 6000 кВт.

Рассмотрим работу методики управления в утреннее и вечернее время. После расчета ЦЭН групп потребителей и расстояний между ЦЭН и ИП согласно пункту 5 методики управления в соответствие группе потребителей 1-15 ставится ИП 22, группе потребителей 16-19 – ИП 20.

Расчет снижения потерь мощности ΔP_n после перераспределения ИП по группам потребителей может быть выполнен по формуле:

$$\Delta P_n = 3 \cdot I_{tn}^2 \cdot r_{0n} \cdot \Delta L_n, \quad (10)$$

где I_{tn} – фазный ток в питающей линии n-ой группы потребителей, r_{0n} – значение удельного сопротивления питающей линии n-ой группы потребителей, $\Delta L_n = L_{tn} - L_{tk}$ – разница расстояний между ЦЭН n-ой группы потребителей и ИП до и после перераспределения ИП.

Фазный ток в питающей линии n-ой группы потребителей в момент времени t рассчитывается по формуле:

$$I_{tn} = \frac{P}{\sqrt{3} U_n \cos \varphi}, \quad (11)$$

где I_{tn} – фазный ток, P – активная мощность потребителя, U_n – линейное напряжение, $\cos \varphi$ – коэффициент мощности.

Годовая финансовая прибыль за счет снижения потерь мощности в питающих линиях при внедрении методики динамического перераспределения ИП рассчитывается по формуле:

$$\Pi = 8760 \cdot \Delta P_n \left(0,124 + \frac{T_M}{10000} \right)^2 \cdot D, \quad (12)$$

где Π – годовая финансовая прибыль, ΔP_n – потери мощности в линиях, T_M – продолжительность максимальной нагрузки, D – тариф электроэнергии.

Для расчета годовой финансовой прибыли примем следующие значения переменных:

- для группы потребителей 1-15: $U_n = 10$ кВ; $P = 705$ кВт; $\cos \varphi = 0,95$; $r_0 = 1,91$ Ом/км (СИП-3 1x16, одноцепная линия); $L_{21} = 499$ м; $L_{22} = 194$ м; $T_M = 4380$ ч; $D = 4,67$ руб./кВт·ч;
- для группы потребителей 16-19: $U_n = 10$ кВ; $P = 5550$ кВт; $\cos \varphi = 0,95$; $r_0 = 0,641$ Ом/км (СИП-3 1x50, двухцепная линия); $L_{19} = 715$ м; $L_{20} = 193$ м; $T_M = 4380$ ч; $D = 4,67$ руб./кВт·ч;

Результаты расчетов представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты расчета снижения потерь мощности и получения финансовой прибыли при использовании методики перераспределения ИП

Группа потребителей	Результаты расчета			
	I_{in}, A	$\Delta L_n, м$	$\Delta P_n, кВт$	П, тыс.руб.
1-15	42,8	305	3,2	41
16-19	168,6	522	57	1476

Из таблицы следует, что годовая финансовая прибыль от использования разработанной методики составляет 1517000 руб.

Использование предложенной методики управления с технологической точки зрения требует возможности реконфигурации ЭТС промышленного микрорайона при помощи 4 реклоузеров ориентировочной стоимостью 1200000 руб. Учитывая финансовую прибыль при использовании разработанной методики управления, срок окупаемости внедряемого оборудования составит 10 месяцев.

Экономическая эффективность применения методики управления зависит от количества групп потребителей и ИП. При увеличении числа групп потребителей и ИП промышленного микрорайона до 5 годовая финансовая прибыль составляет 2600 руб. Таким образом, экономическая эффективность применения метода динамического перераспределения ИП при увеличении числа групп потребителей уменьшается. Это следует учитывать при внедрении методики динамического перераспределения ИП в алгоритмы управления ДЭТС с РГ на стадии проекта.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе поставлены и решены актуальные задачи разработки методик управления ДЭТС с РГ, учитывающих возможность возникновения хаотических колебаний режимных параметров. Для апробации методик управления разработаны имитационные компьютерные модели ДЭТС с РГ. Также в работе предложена методика управления ДЭТС с РГ, позволяющая минимизировать потери мощности при электропередаче.

Основные результаты исследований заключаются в следующем:

1. На основании анализа научной литературы сделаны выводы:

- отечественная и зарубежная энергетика активно наращивает объемы распределенной генерации энергии, наиболее эффективными и рентабельными являются ДЭТС с РГ на основе ГТУ и ГПУ;

- в методиках управления ДЭТС с РГ не учитывается возможность возникновения хаотических колебаний режимных параметров;

- в методиках управления ДЭТС с РГ не учитывается возможность уменьшения потерь мощности при электропередаче;

- существующие имитационные компьютерные модели ДЭТС с РГ, следует дополнить детализацией схем замещения нагрузки потребителей.

2. Разработаны имитационные компьютерные модели ДЭТС с РГ жилых зданий и промышленного предприятия. В моделях выполнена детализация нагрузки и основных элементов электросистем, произведен расчет значений параметров схем замещения. Компьютерные модели ДЭТС с РГ позволяют рассчитать распределение потоков мощности, комплексы тока и напряжения, частоту в любой точке электросистемы, угол нагрузки

генераторов. Также при помощи компьютерных моделей можно оценивать гармонические искажения напряжения и тока в любой точке электросистемы.

3. Разработана методика управления ДЭТС с РГ, учитывающая возможность возникновения хаотических колебаний режимных параметров. Приведен расчет управляющего воздействия, направленного на подавление хаотических колебаний в ДЭТС с РГ. Методика управления апробирована при помощи компьютерных моделей ДЭТС с РГ жилых зданий и промышленного предприятия. Результаты моделирования указывают на удовлетворительную работу методики управления.

4. Разработана методика расчета динамического перераспределения источников питания по группам потребителей в ДЭТС с РГ, позволяющая уменьшить потери мощности при электропередаче.

Разработанная методика апробирована на примере ДЭТС с РГ промышленного микрорайона города. Результаты расчета показали, что годовая финансовая прибыль от использования разработанной методики составляет 1517000 руб. Срок окупаемости оборудования, необходимого для реализации методики управления, составляет 10 месяцев. Показано, что экономическая эффективность применения метода динамического перераспределения ИП при увеличении числа групп потребителей уменьшается.

Перспективы дальнейшей разработки темы заключаются в совершенствовании методик управления ДЭТС с РГ, учитывающих возможность возникновения хаотических колебаний, с целью повышения качества электроэнергии и режимной устойчивости многомашинных электросистем, а также поиске новых путей уменьшения потерь мощности в ДЭТС с РГ.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в периодических научных изданиях по перечню ВАК

1. Косарев, Б.А. Выбор оптимального напряжения источника энергии для системы электроснабжения с распределенной генерацией / Б.А. Косарев, Г.А. Кошук, В.К. Федоров. – DOI: 10.25206/1813-8225-2018-162-115-118 // Омский научный вестник. – 2018. – №6 (162). – С. 115-118.

2. Косарев, Б.А. Динамическое перераспределение источников питания в электротехнической системе с распределенной генерацией / Б.А. Косарев, Г.А. Кошук, Л.Г. Польшцев, В.К. Федоров. – DOI: 10.25206/1813-8225-2019-164-50-55 // Омский научный вестник. – 2019. – №2 (164). – С. 50-55.

3. Косарев, Б.А. Модель электротехнической системы с распределенной генерацией / Б.А. Косарев, В.К. Федоров. – DOI: 10.25206/1813-8225-2019-167-64-71 // Омский научный вестник. – 2019. – №5 (167). – С. 64-71.

4. Косарев, Б.А. Возможность возникновения хаотических режимов работы электротехнической системы с распределенной генерацией / Б.А. Косарев, Г.А. Кошук, А.А. Охотников, В.К. Федоров. – DOI: 10.25206/1813-8225-2019-168-58-62 // Омский научный вестник. – 2019. – №6 (168). – С. 58-62.

5. Косарев, Б.А. Устранение отклонений напряжения и частоты, подавление хаотических колебаний в электротехнической системе с распределенной генерацией / Б.А.

Косарев, В.К. Федоров. – DOI: 10.25206/1813-8225-2019-168-52-57 // Омский научный вестник. – 2019. – №6 (168). – С. 52-57.

6. Косарев, Б.А. Оценка качества электроэнергии в системе электроснабжения с активным потребителем / Б.А. Косарев, В.К. Федоров, Р.Н. Хамитов. – DOI: 10.34831/EP.2020.80.84.001 // Промышленная энергетика. – 2020. – №9. – С.2-8.

Статьи, индексируемые в БД Scopus

7. Косарев Б.А. Моделирование включения активного потребителя на параллельную работу с системой электроснабжения нефтегазодобывающего предприятия / Б.А. Косарев, В.К. Федоров, Р.Н. Хамитов. – DOI: 10.18799/24131830/2020/8/2776 // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 8. – С. 144-153.

Статьи в российских и иностранных изданиях, материалы международных, всероссийских и региональных конференций

8. Применение систем конструкторского проектирования при расчете электротехнических систем с распределенной генерацией / Б.А. Косарев, Г.А. Кошук, В.К. Федоров // Приборостроение и информационные технологии: материалы XI ежегодной студенческой науч.-практ. конф., посвященной 60-летию образования Омского научно-исследовательского института приборостроения (Омск, 29 ноября 2018) / АО «ОНИИП» [и др.]. — Омск: ОНИИП, 2019. – С. 83–87.

9. «Умная» электротехническая система с распределенной генерацией: алгоритм контроля частоты и напряжения сети / Б.А. Косарев // Приборостроение и информационные технологии: материалы XII ежегодной студенческой науч.-практ. конф., посвященной 61-ой годовщине образования Омского научно-исследовательского института приборостроения (Омск, 13 декабря 2019) / АО «ОНИИП» [и др.]. — Омск: ОНИИП, 2020. – С. 42-46.

10. Особенности проектирования электротехнических систем с распределенной генерацией / Б.А. Косарев, Г.А. Кошук, О.А. Лысенко, В.К. Федоров // Актуальные вопросы энергетики: материалы Всероссийской науч.-практ. конф. с междунар. участием (Омск, 21 мая 2019) / ОмГТУ. — Омск: Изд-во ОмГТУ, 2019. – С. 113–116.

11. Оценка качества электроэнергии электротехнической системы с распределенной генерацией без использования корректирующих устройств/ Б.А. Косарев, Г.А. Кошук, В.В. Троценко, В.К. Федоров // Динамика систем, механизмов и машин: материалы XIII Междунар. IEEE науч.-технич. конф. (Омск, 5–7 ноября 2019 г.) / ОмГТУ [и др.]. — Омск: Изд-во ОмГТУ, 2019. – Т. 7, № 2. – С. 44-50.

12. Косарев, Б.А. Оптимизация функционирования электротехнической системы с распределенной генерацией/ Б. А. Косарев, Г. А. Кошук, В. К. Федоров, О. А. Лысенко // Актуальные вопросы энергетики. – 2019. – № 1(1). –С. 99-103.

13. Моделирование электротехнической системы с распределенной генерацией / Б. А. Косарев // Современные проблемы радиофизики и радиотехники: сборник докладов Омского научного семинара / отв. ред. С.В. Кривальцевич. – Вып. 8. – Омск: ОНИИП, 2020. – С. 36-43.

14. Косарев, Б.А. Методика управления системой электроснабжения с синхронной генерацией / Б.А. Косарев, О.А. Лысенко, В.К. Федоров, Р.Н. Хамитов // Актуальные вопросы энергетики. – 2020. – № 1(2). – С. 48-52.

15. Косарев, Б.А. Хаотические режимы работы децентрализованных систем электроснабжения / Б.А. Косарев, О.А. Лысенко, В.К. Федоров, Р.Н. Хамитов // Актуальные вопросы энергетики. – 2020. – № 1(2). – С. 27-31.

Патенты и свидетельства о регистрации

16. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019619453 Российская Федерация. Модель расчета параметров трехфазной четырехпроводной электротехнической системы с распределенной генерацией: № 2019618488: заявл. 10.07.2019: опубл. (зарег.) 17.07.2019 / Б.А. Косарев; заявитель АО «ОНИИП». – 1 с.

17. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019665189 Российская Федерация. Устранение отклонений напряжения и частоты, подавление хаотических колебаний в электротехнической системе с распределенной генерацией: № 2019663698: заявл. 1.11.2019: опубл. (зарег.) 20.11.2019 / Б.А. Косарев ; заявитель АО «ОНИИП». – 1 с.

18. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020615877 Российская Федерация. Динамическое перераспределение источников питания по центрам электрических нагрузок в электротехнической системе с распределенной генерацией: № 2020614985: заявл. 15.05.2020: опубл. (зарег.) 3.06.2020 / Б.А. Косарев ; заявитель АО «ОНИИП». – 1 с.

Печатается в авторской редакции

Подписано в печать 22.10.20 г. Формат 60x84/16.

Отпечатано на дупликаторе. Усл.печ.л. 1,28.

Тираж 100 экз. Заказ 50.

Типография: 644050, Омск-50, пр. Мира, 11, т.: 65-32-08
Омский государственный технический университет,
научное издательство

