На правах рукописи

ЯКУПОВ Айнур Махмутович

КОЛЕБАТЕЛЬНАЯ ВЕТРОУСТАНОВКА В СОСТАВЕ МИКРОСЕТИ

Специальность:

05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Уфа – 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет» на кафедре электромеханики

Научный руководитель: Доктор технических наук, профессор **Хайруллин Ирек Ханифович**

Официальные оппоненты: Доктор технических наук, профессор **Кубарьков Юрий Петрович** ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», профессор кафедры «Электрические станции»

Доктор технических наук, профессор **Соснина Елена Николаевна** ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», профессор кафедры «Электроэнергетика, электроснабжение и силовая электроника»

Ведущая организация: ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)», г. Челябинск

Защита состоится «29» января 2019 г. в 10^{00} часов на заседании диссертационного совета Д 212.288.02 на базе ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» по адресу: 450008, г. Уфа, ул. К. Маркса, 12.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» и на сайте *www.ugatu.su*.

Автореферат разослан «___» _____ 20___ года.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук, доцент А.Ю. Демин

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования. В настоящее время возобновляемые источники энергии (ВИЭ), такие как солнечные электростанции (СЭС), ветроустановки (ВЭУ) находят широкое распространение. Это стало возможным благодаря развитию технологий и повышению эффективности в области возобновляемых источников энергии, обострения экологических проблем, стимулирования развития ВИЭ на государственном уровне. Электротехнические комплексы генерации на основе ВИЭ, называемые микросетями, состоящих из ВЭУ, СЭС, аккумуляторных батарей (АКБ), дизельных генераторов (ДГ) или микротурбин (МТ), подключенных через инвертор, на данный момент находят широкое распространение как в промышленности, так и в быту.

Подобные комплексы отличаются автономностью, а также характеризуются невысокими затратами на обслуживание, минимальным загрязнением окружающей среды благодаря использованию ВИЭ, а также высокой эффективностью. Если раньше для обслуживания подобных систем были необходимы опытные операторы и большие производственные предприятия, то сегодня благодаря улучшенной автоматизации, применению новых источников энергии, уменьшению размеров эффективных энергоустановок, экономические показатели значительно улучшились.

Однако существующие ВЭУ обладают низким КПД и не пригодны к эксплуатации при низких скоростях ветра. Поэтому актуальной научно-технической задачей является разработка ветроустановок с повышенным КПД, с возможностью работы при низких скоростях ветра, для чего необходима разработка новых конструктивных схем ВЭУ и исследование ее возможности работы в составе микросети.

Таким образом, объектом исследования в данной диссертационной работе является микросеть с ВЭУ колебательного типа (КВЭУ).

Степень разработанности темы исследования. Анализ работ показал, что в отечественной науке на тему микросетей с ВЭУ посвящены работы Белея В.Ф., Воропай Н.И., Галюкова В.С., Данилова Н.И., Елистратова В.В., Кубарькова Ю.П., Сосниной Е.Н., Суслова К.В., Суржиковой О.А., Удалова С.Н. Зарубежные работы представлены авторами Ying Han, Weirong Chen, Qi Li, Jongbok Baek, Wooin Choi, Suyong Chae, Taeho Kim, Monika Ivantysynova, Jayant Kumar, Van-Hai Bui, Akhtar Hussain, Hak-Man Kim, Hamed Moazami Goodarzi and Mohammad Hosein Kazemi, Lucas Cuadra, Miguel del Pino, José Carlos Nieto-Borge, Sancho Salcedo-Sanz, Raji Atia, Noboru Yamada, Martinez J.A., Guerra G. A,

Carpinelli G., Celli G., Mocci S., Mottola F., Pilo F., Proto D., Adefarati T., Bansal R. Анализ отечественных и зарубежных работ показал, что исследования в данном направлении в основном ограничиваются предложениями различных решений, включающих лишь один из аспектов проектирования ВЭУ. В связи с этим, необходимо подробно изучить и исследовать ВЭУ, с учетом их специфик, что является наукоемкой задачей для развития надежных, экономичных и экологичных комплексов.

Таким образом, создание новой конструктивной схемы КВЭУ и разработка методики прогнозирования ее выработки, а также исследование ее в составе микросети являются актуальной научно-технической задачей.

Цель и задачи. Целью работы является исследование и разработка КВЭУ, работающей в составе микросети.

Для достижения поставленной цели должны быть решены следующие задачи:

1. Разработка новой конструктивной схемы КВЭУ и ее математической и имитационной модели. Исследование нового КВЭУ, и получение численных зависимостей энергетических характеристик КВЭУ типа с помощью разработанных математической и имитационной моделей.
2. Исследование работы КВЭУ в составе микросети, с учетом взаимовлияний элементов микросети. На основе данных исследований – разработка методики оптимального проектирования микросети с КВЭУ и алгоритма управления микросетью с использованием методики краткосрочного прогнозирования.
3. Исследование эффективности применения принципа максимальной энтропии для долгосрочного прогнозирования выработки КВЭУ и сравнение с традиционной методикой. Разработка методики долгосрочного прогнозирования выработки КВЭУ.
4. Экспериментальная верификация и апробирование полученных теоретических положений и разработанных методик.

Научная новизна.

1. На основании разработанных математической и имитационной моделей для новой конструктивной схемы КВЭУ получены энергетические характеристики.

2. Выявлено взаимовлияние друг на друга элементов микросети, содержащей КВЭУ, АКБ, другие источники напряжения и нагрузку; получены

зависимости уровней искажения напряжения микросети от изменения скорости ветра.

3. На основе критерия Колмогорова–Смирнова показана возможность более точного описания функции распределения скорости ветра с использованием принципа максимальной энтропии.

Теоретическая и практическая значимость работы.

1. Полученные характеристики мощности КВЭУ могут быть использованы в случае внедрения КВЭУ в производство.

2. Разработанная и запатентованная конструктивная схема КВЭУ (патент на изобретение РФ № 2528793) может найти применение в промышленности.

3. Полученные в ходе проверки методики долгосрочного прогнозирования и результаты долгосрочного прогноза ВИЭ для г. Уфы могут быть использованы для предварительного технико-экономического анализа целесообразности строительства ВЭУ в окрестностях города.

4. Методика оптимального проектирования микросети с КВЭУ и алгоритм управления с методикой краткосрочного прогнозирования актуальна для области проектирования, строительства и эксплуатации микросетей с ВЭУ.

Методология и методы исследования.

Для решения поставленных задач и достижения намеченной цели использованы аналитические методы исследования зависимости производимой электрической энергии ВИЭ, основные положения теории электромагнитного поля и переходных процессов в электрической цепи. Для разработки методики долгосрочного прогнозирования использовался принцип максимальной энтропии, метод множителей Лагранжа, метод Ньютона, разложение в ряд Тейлора, методы теории дифференциального и интегрального исчисления, математического моделирования с использованием пакета Matchad 15. Для разработки методики краткосрочного прогнозирования использовались модели временных рядов на искусственных нейронных сетях и на методе исторического подобия с использованием имитационного моделирования во встроенных модулях nntool в Matlab 2014. Методика оптимального проектирования микросети с КВЭУ реализована путем создания программы в среде программирования VBE на языке VBA, в котором реализован генетический алгоритм.

Основные теоретические положения и выводы подтверждены результатами экспериментального моделирования.

Положения, выносимые на защиту:

1. Математическая и имитационная модели колебательной ветроустановки. Полученные с помощью математической и имитационной моделей энергетические характеристики КВЭУ.
2. Результаты исследования работы КВЭУ в составе микросети.
3. Методика долгосрочного прогнозирования выработки КВЭУ, основанная на принципе максимальной энтропии, и экспериментальное сравнение ее работы с традиционной методикой, основанной на функции распределения Вейбулла для г. Уфы.
4. Методика оптимального проектирования микросети с КВЭУ и результаты исследований работы методики с использованием генетического алгоритма и долгосрочного прогнозирования выработки КВЭУ. Алгоритм управления микросетью с методикой краткосрочного прогнозирования.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности.

Диссертация по большинству решаемых задач соответствует специальности 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы», так как разрабатываемая КВЭУ в составе микросети представляет собой электротехнический комплекс, включающий электромеханический преобразователь и инвертор.

Работа соответствует следующим пунктам паспорта специальности:

п. 1. «Развитие общей теории электротехнических комплексов и систем, изучение системных свойств и связей, физическое, математическое, имитационное и компьютерное моделирование компонентов электротехнических комплексов и систем».

п. 3. «Разработка, структурный и параметрический синтез электротехнических комплексов и систем, их оптимизация, а также разработка алгоритмов эффективного управления».

Степень достоверности и апробация результатов.

Достоверность полученных результатов обусловлена использованием строгих математических методов, методов компьютерного моделирования, подтверждаемых результатами имитационного моделирования.

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих международных и всероссийских научно-технических конференциях: IX Международная молодежная научная конференция «Тинчуринские чтения» (Казань, 2014г.), Девятая Всероссийская зимняя школа-семинар аспирантов и молодых ученых «Актуальные проблемы

науки и техники» (Уфа, 2014), Всероссийская научная молодежная школа с международным участием «Возобновляемые источники энергии» (Москва, 2014), Всероссийская молодежная научная конференция «Мавлютовские чтения» (Уфа, 2013). Также апробация работы была проведена в ООО «БЭСК инжиниринг», подтверждаемым актом внедрения.

Публикации. Список публикаций по теме диссертации включает 10 статей, из них 7, входящих в перечень ВАК, 1 патент РФ на изобретения, 1 свидетельство на программы для ЭВМ. Перечень публикаций автора приведен в диссертации в полном объеме.

В работах, выполненных в соавторстве, соискателем лично получены следующие результаты:

- в работе [1, 7] разработаны уравнения описывающие процессы в колебательной ветроустановке;

- в работе [2] проведено апробирование разработанной методики оптимального проектирования электрической сети с распределенной генерацией;

- в работе [3] осуществлена адаптация генетического алгоритма для методики оптимального проектирования микросети;

- в работе [4, 5, 11] осуществлена адаптация уравнений принципа максимальной энтропии для методики долгосрочного прогнозирования выработки ВЭУ.

- в работе [6, 10] разработан алгоритм управления микросетью с возобновляемыми источниками энергии;

- в работе [8] разработана конструктивная схема КВЭУ;

- в работе [9] составлена блок схема программы.

- в работе [12] реализовано использование метода исторического подобия.

Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка, включающего 103 наименований, и трех приложений. Основная часть диссертации составляет 172 страниц.

Во введении обоснована актуальность работы, изложены цели и задачи диссертационной работы, методы решения поставленных задач. Описаны состав и структура работы, показана научная новизна и практическая ценность, сформулированы положения, выносимые на защиту.

В первой главе работы проведен сравнительный анализ современных существующих конструкций различных ветроустановок. Изучены и выявлены недостатки и достоинства тех или иных конструкций.

Было выявлено, что ветроустановки вращательного типа характеризуются скоростью начала вращения. При скорости ветра ниже скорости начала вращения выработка ВЭУ вращательного типа равняется нулю, что плохо для регионов, характеризующихся низкими скоростями ветра. По результатам обзора была предложена новая конструктивная схема энергоэффективной колебательной ветроустановки (патент РФ № 2528793), рисунок 1.

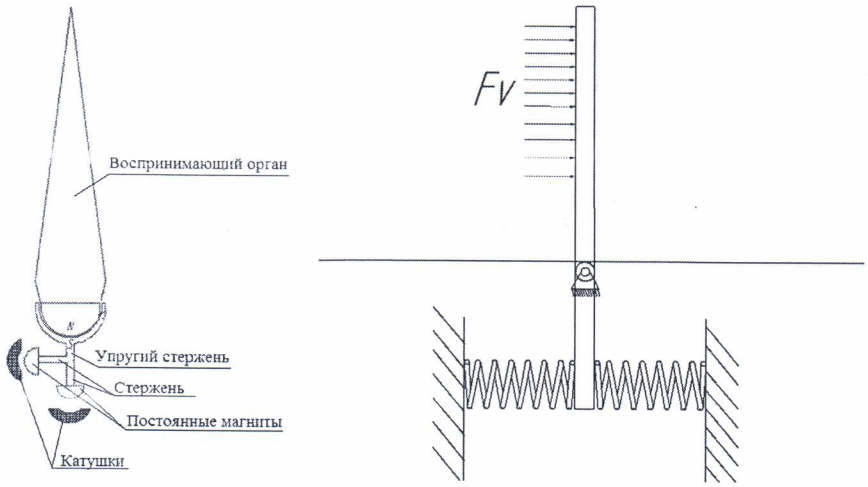

Рисунок 1– Расчетная схема КВЭУ

Также были рассмотрены методики долгосрочного прогнозирования выработки. Было выявлено, что традиционная методика долгосрочного прогнозирования выработки КВЭУ, основанная на функции распределения Вейбулла, не позволяет точно описать функцию распределения скорости.

Сформулированы основные задачи исследования.

Во второй главе разработана математическая и аналитико-имитационная модель предложенной конструктивной схемы КВЭУ. На основе данной имитационной модели в дальнейшем была разработана методика долгосрочного прогнозирования выработки КВЭУ.

При разработке математической модели КВЭУ принимались следующие допущения:

– парус отклоняется на малые углы;

– ветровое течение имеет ламинарный характер;

– магнитная проницаемость немагнитного рабочего зазора генератора равна проницаемости вакуума μ_0 ;

– магнитная проницаемость постоянных магнитов $\mu_{ПМ} = const$;

– потоки рассеяния не учитываются;

– тангенциальная составляющая магнитного поля не учитывается ввиду того, что она практически не участвует в преобразовании механической энергии в электрическую;

– между соседними активными элементами генератора КВЭУ отсутствуют взаимодействия магнитного поля;

– стержни абсолютно упругие, то есть отклонения от нулевого положения отсутствуют.

Уравнения, описывающие процессы в исследуемой КВЭУ приводится ниже:

$$\begin{cases} x(t) = \dfrac{C_X \dfrac{pS}{2}(V_K^2 - V_H^2) - k_m \dfrac{2\mu_0 l F_m^2}{\pi k_\mu a}}{k} \cdot e^{-\frac{\gamma_0 \frac{T_0+C}{T+C}\left(\frac{T}{T_0}\right)^{\frac{3}{2}} b \cdot a}{2m\delta} \cdot t} \times \\ \times \cos\left(\sqrt{\left(\dfrac{\gamma_0 \dfrac{T_0+C}{T+C}\left(\dfrac{T}{T_0}\right)^{\frac{3}{2}} b \cdot a}{2m\delta}\right)^2 - \dfrac{\left(k + k_m \dfrac{2\mu_0 l F_m^2}{\pi k_\mu a}\right)}{m}} \cdot t + \varphi\right); \\ i = \dfrac{w_\phi k_{об} B S_м \cdot \dfrac{\Delta F_B - F_M}{k} \omega\beta \cdot e^{-\beta \cdot t} e^{j\varphi}}{R_Г + R_Н + j\omega(L_Г + L_Н)} \left(e^{-\frac{(R_Г + R_Н)}{(L_Г + L_Н)} \cdot t} - 1\right), \end{cases} \quad (1)$$

где C_X – коэффициент сопротивления тела ветровому потоку в зависимости от формы тела; ρ – плотность воздуха; S– площадь паруса; V_K– конечная скорость ветра; V_H– начальная скорость ветра; k – коэффициент упругости; C – постоянная Сазерленда; T_0 – температура воздуха в воздушном зазоре в момент запуска; T– температура воздуха в момент времени; γ_0 – кинематическая вязкость воздуха, δ – ширина воздушного зазора; b – ширина постоянных магнитов; а-длина постоянных магнитов; k_m– коэффициент упругости; k_μ – коэффициент насыщения магнитной среды; F_m – МДС постоянных магнитов; l – рабочая длина магнитов; μ_0 – магнитная проницаемость вакуума; m – масса индуктора; t– время; $E_{V\max}$– амплитудное значение ЭДС; $R_Г, R_Н$ – активное сопротивление обмотки генератора и нагрузки; $L_Г, L_Н$ – индуктивное сопротивление обмотки генератора и нагрузки; β – коэффициент затухания; ω – собственная частота колебаний.

Для автоматизации решения системы уравнений (1) и использования в составе программного комплекса была создана аналитико-имитационная модель, разработанной КВЭУ.

На рисунке 2 показана зависимость мощности КВЭУ от скорости ветра, полученная решением системы уравнений (1) с использованием имитационной модели.

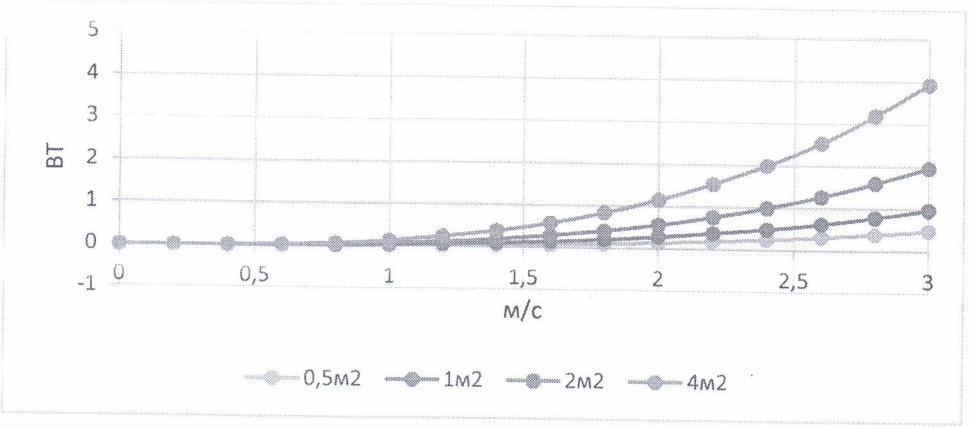

Рисунок 2 – Зависимость мощности, вырабатываемой КВЭУ от скорости ветра

Также во второй главе было проведено сравнение разработанной схемы КВЭУ и существующих ВЭУ, по результатам которого было получено, что ВЭУ имеет технические преимущества перед вертикально-осевыми ВЭУ и для определенных регионов может вырабатывать больше энергии, чем горизонтально-осевые ВЭУ.

Во второй части главы было проведено исследование работы разработанной КВЭУ в составе микросети, которая содержит другие источники напряжения. В исследовании работы КВЭУ совместно с другими источниками в составе микросети было выявлено, что КВЭУ значительно искажает синусоиду напряжения и тока, что является нежелательным фактором для нагрузки микросети. Искажение возникает из непостоянства напряжения и частоты КВЭУ, которые зависят от скорости ветра, что при работе с другими источниками энергии является источником несинусоидальности. В исследовании были получены зависимости «total harmonic distortion» (THD) от различных мощностей источников микросети, рисунок 3.

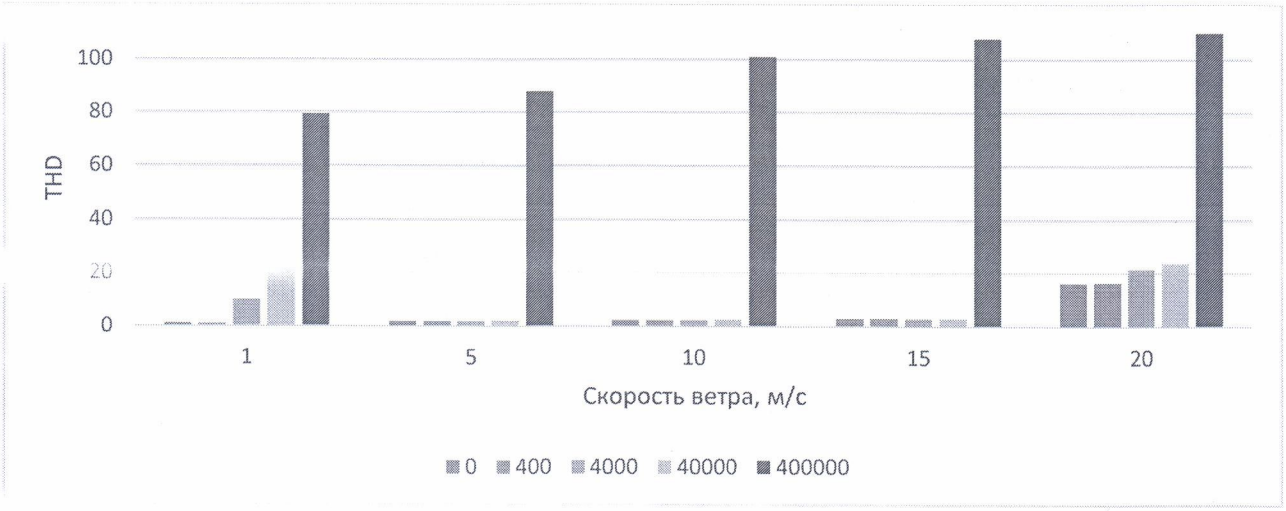

Рисунок 3 – Результат анализа гармоник при различной мощности эквивалентной ЭДС

Во второй части исследования был предложен способ сглаживания несинусоидальности путем использования вставки из АКБ. Применение АКБ позволяет снизить флуктуации напряжения и частоты. Были получены зависимости влияния АКБ при различных скоростях ветра. Также были получены зависимости THD от емкости АКБ при различных скоростях ветра.

Данные исследования показывают, что при использовании совместно с другими источниками энергии необходимо учитывать влияние КВЭУ на несинусоидальность. Для учета данного фактора на стадии проектирования и прогнозирования мощности других элементов микросети и ёмкости АКБ необходимо использование прогнозирования несинусоидальности.

В третьей главе была разработана методика долгосрочного прогнозирования, основывающаяся на принципе максимальной энтропии, который сравнивался с традиционной методикой прогнозирования, основанной на функции распределения Вейбулла. Разработанная методика прогнозирования выработки, основанная на принципе максимальной энтропии, при описании функции ветра имеет следующий вид:

$$f(v) = \exp\left[-\sum_{n=0}^{N} \lambda_n \psi_n(v)\right], \tag{2}$$

где λ_n $(=\lambda_0,...,\lambda_n)$ n+1 множителей Лагранжа, которые определяются решением n+1 нелинейных уравнений, заданных как:

$$L_n(\lambda) = \int \psi_n(v) \exp\left[-\sum_{n=0}^{N} \lambda_n \psi_n(v)\right] dv = \mu_n, n = 0,..., N. \tag{3}$$

Параметр ψ_n берется в виде функции мощности v или как функция логарифма v. Принимается $\psi_n(v) = v^n$.

При применении принципа максимальной энтропии использование более высоких порядков $\psi_n(v)$ дает более точные результаты, но при этом увеличивается время вычислений, так как с ростом порядка увеличивается количество n+1 нелинейных уравнений.

Для сравнения двух методик использовался критерий Колмогорова–Смирнова, RMSE, квадрата корреляции (R^2) между прогнозируемыми значениями и фактическими.

По результатам сравнения двух методик прогнозирования было выявлено, что использование принципа максимальной энтропии дает более точные результаты и может быть применен для любого региона. Также было выявлено, что функция распределения Вейбулла обладает достаточной точностью только для некоторых регионов, где функция распределения ветра и солнечной радиации имеет вид функции с одним экстремумом в виде горба.

В части краткосрочного прогнозирования был рассмотрен способ прогнозирования, основывающейся на использовании искусственной нейронной сети (ИНС). Были проработаны все входные данные ИНС для краткосрочного прогнозирования выработки ВИЭ, такие как время, средняя температура, выработка в данный момент, производная функции выработки ВЭУ.

Для исследования влияния входных данных на точность прогноза была использована, встроенная функция nntool в программном комплексе Matlab 2014. В ходе исследования зависимости точности прогноза от входных данных ИНС было выявлено, что ИНС не точно прогнозирует при резкой смене климатических условий. Поэтому для совершенствования процесса прогнозирования на основе ИНС был разработан комплексная методика, основанная на использовании метода исторического подобия, которая устранила недостаток переобученности нейронной сети. Метод исторического подобия необходим для правильного обучения ИНС и заключается в правильном подборе исторических данных.

Также в третьей главе разработана методика оптимального проектирования микросети с КВЭУ и алгоритм управления микросетью с КВЭУ. Основным критерием и целью работы методики оптимального проектирования является создание конфигурации микросети с КВЭУ с минимальными капитальными и эксплуатационными затратами, учитывающей категорию надежности отдельных элементов комплекса и учитывающей качество

производимой электрической энергии. Алгоритм оптимизации реализован на генетическом алгоритме (ГА). Критерий оптимизации для микросети с КВЭУ задается в виде функций минимизации:

$$\min\{f1 + f2 + f3\}.$$

где $f1$- это капитальные затраты:

$$f1 = \sum_{i=1}^{i=n}(K_{\text{ВЭУ},i} + K_{\text{В},i} + K_{\text{ДЭС/МТ},i} + K_{\text{АКБ},i} + \sum_{j=1}^{j=n} K_{\text{ВЛ},j-i}),$$

где $K_{\text{ВЭУ},i}$ – капитальные затраты на строительство ВЭУ без стоимости на эксплуатацию; $K_{\text{В},i}$ –строительство связи от центра питания до i узла; $K_{\text{В},i}$- строительство связи от узла j питания до i узла; $K_{\text{ДЭС/МТ},i}$ – строительство ДЭС или МТ (других возможных источников энергии).

$f2$- затраты на первичные энергоносители и обслуживание микросети:

$$f2 = \sum_{t=0}^{t}\sum_{i=1}^{i=n}(C_{\frac{\text{ДЭС}}{\text{МТ}},i,t}P_{\frac{\text{ДЭС}}{\text{МТ}},i,t} + C_{\text{В},i,t}P_{\text{В},i,t}) + t\left(\text{И}_{\text{ВЭУ},i} + \text{И}_{\text{В},i} + \text{И}_{\frac{\text{ДЭС}}{\text{МТ}},i} + \text{И}_{\text{В},j-i} + \text{И}_{\text{акб},i}\right),$$

где $P_{\text{В},i}$–мощность от внешней системы; $C_{\text{ДЭС/МТ},i}$ – удельная стоимость первичного энергоносителя на единицу мощности; $C_{\text{В},i}$ – удельная стоимость электрической энергии получаемой с внешней системы на единицу мощности; $\text{И}_{\text{ВЭУ},i}, \text{И}_{\text{В},i}, \text{И}_{\text{ДЭС/МТ},i}, \text{И}_{\text{В},j-i}, \text{И}_{\text{акб},i}$ – эксплуатационные расходы на ВЭУ в узле i на единицу времени, линий связывающих ЭС с узлом i, ДЭС или МТ в узле i, линий связывающих узлы i и j, АКБ в узле i; $P_{\frac{\text{ДЭС}}{\text{МТ}},i,t}$ – мощность получаемая от ДЭС или МТ в узле i в рассматриваемое время; $P_{\text{В},i,t}$ –мощность получаемая от энергосистемы в узел i в рассматриваемое время; t – рассматриваемый период.

$f3$ – описываются электрические потери в микросети за весь срок службы:

$$f3 = C_{\text{пот}}\sum_{t=0}^{t}\sum_{i=1}^{i=n}\sum_{j=1}^{j=n}\left|V_{i,t} - V_{j,t}\right|^2\left|Y_{i,j}\right|\cos\alpha_{ij},$$

где $V_{i,t}$-напряжение в узле i в момент времени t; $V_{j,t}$-напряжение в узле j в момент времени t; $Y_{i,j}$-проводимость между узлом i и j; α_{ij}-угол линии; $C_{\text{пот}}$-удельная стоимость электрической энергии.

Для учета данных особенностей каждого варианта, который разрабатывается алгоритмом проектирования, производится расчет электрических режимов с использованием данных по долгосрочному прогнозированию выработки КВЭУ. Расчет режимов также необходим для

определения затрат на межузловые связи, на потери, на АКБ и для определения выживаемости особи ГА.

Таким образом, разработанная методика оптимального проектирования решает следующие задачи: определяет мощности ВЭУ в микросети; определяет мощности и расположение АКБ в микросети; определяет мощности и расположение других источников энергии; определяет конфигурацию межузловых связей, соединяющих элементы микросети, а также определяет их сечения; определяет конфигурацию связей с системой и их сечения; минимизирует капитальные и эксплуатационные затраты; поддерживает показатели качества электрической энергии в допустимых пределах.

При этом методика оптимального проектирования учитывает следующие особенности: непостоянство выработки электрической энергии ВЭУ, учитывающей долгосрочные прогнозы выработки электрической энергии ВЭУ; выбирает мощности АКБ, что позволяет сглаживать флуктуации небаланса мощности.

Часть третьей главы посвящена алгоритму управления микросети с ВЭУ. Был разработан алгоритм управления микросети с ВЭУ, который позволяет прогнозировать аварийные события и отклонения показателей качества электроэнергии. Алгоритм основывается на использовании краткосрочных прогнозов выработки ВИЭ, которые рассмотрены во второй главе, а также, прогноза потребления электрической энергии. Алгоритм позволяет смоделировать аварийные события и принять оптимальные решения для предотвращения аварийных событий. Разработанный алгоритм позволяет управлять микросетью как в режиме изолированной работы от энергосистемы, так и в режиме интегрированной работы.

Четвертая глава посвящена исследованию работ разработанных методик прогнозирования и оптимального проектирования. Приводятся расчеты, подтверждающие эффективность долгосрочного прогнозирования на основе принципа максимальной энтропии на примере г. Уфы, подтверждающие эффективность краткосрочного прогнозирования с использованием комбинированной методики ИНС и метода исторического подобия. По историческим данным составлена функция распределения для скоростей ветра для г. Уфы на каждый месяц.

Также, для реализации методики оптимального проектирования в среде VBE на языке VBA была разработана программа, включающая полностью автоматизированный процесс проектирования микросети с ВЭУ, что не может

быть реализовано встроенными инструментами Matlab и Matlab Simulink из-за своей комплексности и использования разных алгоритмов. Разработанный программный комплекс по введенным параметрам нагрузки и координатам узлов позволяет сформировать первоначальные варианты для алгоритма оптимизации, рассчитать режимы сети для каждого варианта с учетом долгосрочных прогнозов, полученных во второй главе, что позволяет определить конфигурацию межузловых связей, определить затраты на межузловые связи, емкости АКБ и потери в микросети. По параметрам, полученным в результате расчета режимов, которые являются встроенной функцией, ПК оптимизирует сеть с использованием ГА. На выходе из ПК получаются микросети с определенной конфигурацией генерирующих мощностей в узлах, межузловых связей, емкости АКБ с учетом категорий надежности узлов. На рисунке 4 показан пример работы, разработанного программного комплекса.

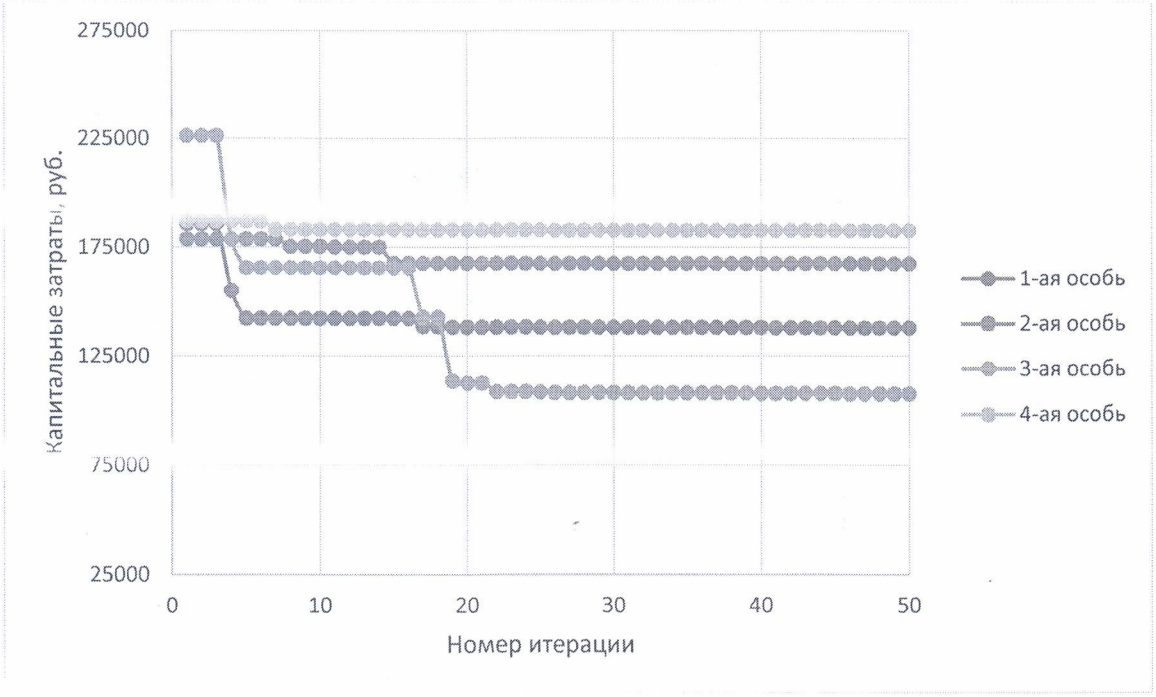

Рисунок 4 – Зависимость целевой функции особей от итераций с мутацией 30%

Заключение.

В результате проведенных исследований были получены следующие научно–технические результаты:

1. Разработана математическая и имитационная модели, получена зависимость мощности, вырабатываемой ВЭУ, от скорости ветра. А также были выявлены преимущества КВЭУ перед существующими ВЭУ и то, что для определенных регионов КВЭУ может вырабатывать больше энергии.

2. Проведено исследование работы КВЭУ в составе микросети. По результатам исследования было выявлено, что работа КВЭУ в составе микросети искажает синусоиду напряжения и тока. Искажение синусоиды зависит от скорости ветра, мощности других источников КВЭУ. Также было выявлено, что для уменьшения искажений синусоиды от КВЭУ эффективно применение вставки из АКБ.

3. Исследована возможность применения принципа максимальной энтропии для описания функции распределения скорости ветра и солнечной радиации. На основе полученных исследований и разработанной аналитико-имитационной модели получена методика долгосрочного прогнозирования, отличающаяся от существующих методик тем, что она реализована на принципе максимальной энтропии. На измеренных данных г. Уфы с использованием метода Колмогорова–Смирнова, RMSE, квадрата корреляции R^2 было подтверждено, что разработанная методика долгосрочного прогнозирования в 1,18 раз точнее, чем традиционная методика, основанная на функции распределения Вейбулла путем экспериментальных исследований. Выявлено, что ошибка по RMSE для традиционной методики составила 0,23 о.е., для методики на принципе максимальной энтропии – 0,09 о.е. Разработанная методика может быть применена для регионов, где функция распределения скорости ветра не носит характера функции с одним экстремумом, а, например, имеет форму двух экстремумов.

Также, была разработана методика краткосрочного прогнозирования, отличающаяся от существующих тем, что она основана на использовании ИНС и метода исторического подобия. По результатам экспериментального исследования методики было получено, что разработанная методика в среднем точнее на 17,35%.

4. Разработана методика оптимального проектирования, которая позволяет создать конфигурацию микросети с минимальными капитальными и эксплуатационными затратами, учитывающая надежность узлов микросети, отличающаяся от существующих методик тем, что она реализована на ГА. Методика основана на использовании ГА и расчета режимов и реализована в программном комплексе, разработанным в среде VBE. Данный ПК использует в качестве входных данных нагрузки узлов, категорию надёжности узлов, географическое положение, координаты узлов микросети. Результатом являются конфигурации микросети с определенными установленными мощностями микросети, АКБ, межузловыми сечениями. При этом ПК учитывает

непостоянство выработки, возможный отказ элементов микросети. При экспериментальном исследовании было выявлено, что ГА минимизирует целевую функцию, что показывает эффективность его работы. Также было получено, что для более эффективной работы методики оптимального проектирования в ГА необходимо реализовывать мутацию и контроль выживаемости поколений. Путем экспериментальных исследований было получено, что при вероятности мутации особей 30% достигается наибольшая эффективность методики оптимального проектирования.

Также разработан алгоритм управления микросети с учетом непостоянства выработки ВИЭ, который позволяет управлять микросетью как в режиме изолированной от энергосистемы, так и в интегрированной в энергосистему. Отличительной особенностью разработанного алгоритма является то, что он может прогнозировать аварийные события благодаря использованию краткосрочного прогнозирования ВИЭ.

Статьи в изданиях по перечню ВАК:

1. Якупов А.М. Математическая и имитационная модель колебательной ветроустановки. / Исмагилов Ф.Р., Хайруллин И.Х., Вавилов В.Е., Якупов А.М. //Научно-аналитический журнал «Инновации и Инвестиции», № 9, с. 276-283, 2018.

2. Якупов А.М. Использование генетического алгоритма для оптимизированного проектирования электрической сети с распределенной генерацией/ Исмагилов Ф.Р., Хайруллин И.Х., Вавилов В.Е., Якупов А.М. //Вестник УГАТУ, № 1(79), с. 106-112, 2018.

3. Якупов А.М. Методика оптимизированного проектирования микросетей с возобновляемыми источниками энергии . / Исмагилов Ф.Р., Хайруллин И.Х., Вавилов В.Е., Якупова Г.Ф., Якупов А.М. //Научно-технический журнал «Энергобезопастность и энергосбережение», № 3, с. 20-27, 2018.

4. Якупов А.М. Использование принципа максимальной энтропии для сравнения эффективности различных ветроустановок / Исмагилов Ф.Р., Хайруллин И.Х., Вавилов В.Е., Якупов А.М., Нургалиева Р.А. //Вестник УГАТУ, № 2(80), с. 82-88, 2018.

5. Якупов А.М. Оценка выработки электрической энергии ветроустановки с использованием принципа максимальной энтропии . / Исмагилов Ф.Р., Хайруллин И.Х., Вавилов В.Е., Якупов А.М. // Научно-аналитический журнал «Инновации и Инвестиции», № 3, с. 273-278, 2018.

6. Якупов А.М. Алгоритм управления микросетью с возобновляемыми

источниками энергии с использованием краткосрочного прогнозирования выработки СЭС . / Исмагилов Ф.Р., Хайруллин И.Х., Вавилов В.Е., Якупов А.М. //Научно-аналитический журнал «Инновации и Инвестиции», № 4, с. 115-120, 2018.

7. Якупов А.М. Исследование работы колебательной ветроэнергетической установки в составе электротехнического комплекса генерации и изолированно от него при разных скоростях ветра / Исмагилов Ф.Р., Хайруллин И.Х., Вавилов В.Е., Якупов А.М. // Вестник УГАТУ, № 3(81), с. 98-104, 2018.

Патенты:

8. Якупов А.М. Ветроэнергетическая установка/ Исмагилов Ф.Р., Хайруллин И.Х., Вавилов В.Е., Якупов А.М. // Пат. 2528793 РФ, МПК F03D5/06, Заявлено 17.09.2013; Опубл. 20.09.2014.

9. Якупов А.М. Программа для автоматизированного проектирования электротехнических комплексов генерации/ Исмагилов Ф.Р., Хайруллин И.Х., Вавилов В.Е., Якупов А.М., Нургалиева Р.А., Якупова Г.Ф. // Пат. 2018616984 РФ, Заявлено 23.04.2018; Опубл. 09.06.2018.

Статьи в других журналах:

10. Якупов А.М. Алгоритм управления микросетью с возобновляемыми источниками энергии // Сборник статей двадцать пятой международной научной конференции «Техноконгресс». / Кемерево, 2018. – 59 с., С. 10-14.

11. Якупов А.М. Применение принципа максимальной энтропии для описания функции распределения скорости ветра для определения долгосрочной выработки ВЭУ //V-ый межвузовский сборник научных трудов «Повышение надежности и энергоэффективности электротехнических систем и комплексов» / Уфа, 2018. – 125 с., С. 85-89.

12. Якупов А.М. Краткосрочное прогнозирование выработки электрической энергии СЭС //V-ый межвузовский сборник научных трудов «Повышение надежности и энергоэффективности электротехнических систем и комплексов» / Уфа, 2018. – 125 с., С. 101-107.

Диссертант А.М. Якупов

ЯКУПОВ Айнур Махмутович

КОЛЕБАТЕЛЬНАЯ ВЕТРОУСТАНОВКА В СОСТАВЕ МИКРОСЕТИ

Специальность:
05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать . Формат 60×84 1/16.
Бумага офсетная. Печать плоская. Гарнитура Times New Roman.
Усл. печ. л. 1,0. Уч.-изд. л. 0,9.
Тираж 100 экз. Заказ № .

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный
технический университет»
Редакционно-издательский комплекс УГАТУ
450008, Уфа-центр, ул. К. Маркса, 12