

На правах рукописи



Задорожный Андрей Олегович

**ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ
ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК НА ОСНОВЕ ОПЫТА
ЭКСПЛУАТАЦИИ ВЕТРОПАРКА В КАЛИНИНГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ**

Специальность 05.09.03 –
Электротехнические комплексы и системы

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2019

Работа выполнена на кафедре электрооборудования судов и электроэнергетики Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Калининградский государственный технический университет»

Научный руководитель: **Белей Валерий Феодосиевич**
доктор технических наук, профессор,
заслуженный работник рыбного хозяйства РФ

Официальные оппоненты: **Чижма Сергей Николаевич**
доктор технических наук, доцент, профессор
института физико-математических наук и
информационных технологий ФГАОУ ВО
«Балтийский федеральный университет имени
Иммануила Канта»
(г. Калининград)


Грибков Сергей Владимирович
кандидат технических наук, старший научный
сотрудник ФГУП «Центральный
аэрогидродинамический институт имени
профессора Н.Е. Жуковского»
(г. Жуковский)

Ведущая организация: Автономная некоммерческая организация
«Научно-информационный центр -
«Атмограф» (г. Москва)

Защита состоится «23» декабря 2019 года в 16 часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.20 при федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» по адресу: 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, главный учебный корпус, аудитория 150.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» и на сайте www.spbstu.ru.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2019 г.

Учёный секретарь диссертационного
совета Д 212.229.20  Иванов Дмитрий Владимирович

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Ветроэнергетика – одна из самых быстроразвивающихся отраслей электроэнергетики. Суммарная установленная мощность всех ветроэнергетических установок на конец 2018 года в мире достигла 600 ГВт, что обеспечивает 6% от мирового электропотребления. В частности, в Дании, ветроэнергетические установки производят более 43% потребляемой электроэнергии. Суммарная установленная мощность ветроэнергетических установок в России составляет 0,144 ГВт при установленной мощности энергосистемы 243,2 ГВт. В энергетической стратегии Российской Федерации до 2030 года одной из основных проблем формирования рационального топливно-энергетического баланса указано недостаточно активное развитие возобновляемой энергетики и использования местных видов топлива в региональных энергетических балансах, и поставлена задача формирования долгосрочной политики развития возобновляемых источников энергии. Распоряжением Правительства РФ «Об основных направлениях государственной политики в сфере повышения энергетической эффективности электроэнергетики на основе возобновляемых источников энергии на период до 2024 года» поставлена задача увеличения объема производства и потребления электрической энергии с использованием возобновляемых источников энергии до 4,5% к 2024 году. Величина объема ввода установленной мощности генерирующих объектов, функционирующих на основе энергии ветра, к 2024 году должна составить 3,28 ГВт, что составляет более 60% от суммарного планируемого объема ввода мощностей на базе всех видов возобновляемых источников энергии в Российской Федерации. Кроме того, в соответствии с законодательством Российской Федерации по поддержке возобновляемых источников энергии уровень локализации ветропарков в России с 2019 года должен составлять не менее 65%, что означает необходимость активного развития отечественного ветроэнергетического промышленного сектора по производству ветроэнергетических установок всех классов мощности. В частности, для России, имеющей огромные территории с холодным климатом и в тоже время большим ветроэнергетическим потенциалом (начиная со среднегодовых значений удельной мощности ветрового потока от 400 Вт/м²), представляет интерес применение ветроэнергетических установок средней мощности (от 100 кВт до 1 МВт).

Однако, недостаточная изученность вопросов функционирования ветроэнергетических установок средней мощности и отсутствие в действующих российских государственных стандартах и нормативных документах требований по подключению и работе ветроэнергетических установок в составе электроэнергетических систем является актуальной проблемой и затрудняет развитие отечественной ветроэнергетики.

Для достижения поставленных перед государством целей необходим анализ опыта эксплуатации уже действующих ветроэнергетических установок в составе ветропарков. В Калининградской области с 2002 года функционирует ветропарк, состоящий из 21 ветроэнергетической установки, суммарной установленной мощностью 5,1 МВт. Таким образом, ветропарк предоставляет уникальную

возможность для анализа опыта эксплуатации и проведения комплексных теоретических и экспериментальных исследований режимов работы ветроэнергетических установок для повышения энергетической эффективности их функционирования в составе электроэнергетических систем, что является актуальной задачей для развития отечественной ветроэнергетики, и в перспективе позволит развить производство отечественных ветроэнергетических установок средней мощности.

Степень проработанности темы. Проблемам, связанным с вопросами подключения, функционирования и повышения энергетической эффективности работы ветроэнергетических установок средней мощности и ветропарков на их основе в составе электроэнергетических систем, ввиду более высокого уровня развития ветроэнергетики за рубежом, посвящены в основном работы иностранных авторов: J. Slootweg, T. Thiringer, N. Hatziaargyriou, P. Rosas, T. Ackermann, F. Santjer, A.G. Abo-Khalil, Md. A. Chowdhury и других. Однако в работах перечисленных авторов в основном оценивается влияние работы ветропарков на базе ветроэнергетических установок средней мощности на параметры электрической сети только в точке подключения к распределительным сетям среднего класса напряжения, но не рассматриваются вопросы влияния на параметры сложно-замкнутой электрической сети высокого класса напряжения в узлах связи с распределительной сетью, на параметры сети в которых в зависимости от технических характеристик подключаемого ветропарка также может оказываться влияние при различных режимах работы ветроэнергетических установок. Также не отражены вопросы влияния внешних воздействий (изменения режимов работы сети, обледенения и др.) на работоспособность и функционирование самих ветроэнергетических установок и ветропарков. В России вопросам ветроэнергетики посвящены работы российских учёных В.В. Елистратова, П.П. Безруких, В.И. Виссарионова, В.Г. Николаева, С.В. Грибкова. Изучением актуальных для развития отечественной ветроэнергетики вопросов функционирования ветроэнергетических установок и ветропарков в районах холодного климата в России активно занимаются научные коллективы под руководством В.В. Елистратова. Среди зарубежных авторов данная проблематика представлена в работах Dr. A. Löwe, H. Rudholm, T. Laakso, S. Kraft, N. Bose, J. Rong, H. Seifert, L. Battisti, R. Fedrizzi, B. Tammelin и других. Однако в данных работах не рассматривается вопрос количественного расчёта параметров обледенения элементов ветроэнергетических установок, не раскрывается вопрос критерия достаточности данных по метеорологическим условиям для проведения расчёта потерь выработки электроэнергии ветроэнергетической установкой по причине обледенения, и, как следствие, влияние на энергетическую эффективность работы ветроэнергетических установок.

Объект исследования – ветропарк на основе ветроэнергетических установок средней мощности на базе асинхронного генератора.

Предмет исследования – энергетическая эффективность работы ветропарка на основе ветроэнергетических установок средней мощности на базе асинхронного генератора.

Целью диссертационной работы является повышение энергетической эффективности функционирования ветроэнергетических установок средней мощности в составе электроэнергетических систем на основе проведения комплекса теоретических, расчётных и экспериментальных исследований по их подключению и работе в сетях среднего класса напряжения.

Поставленная цель предусматривает решение следующих задач:

- проведение экспериментальных исследований и анализ эксплуатационных режимов работы ветроэнергетических установок Vestas V27 (225 кВт) и Wind World 4200/600 (600 кВт) в составе ветропарка установленной мощностью 5,1 МВт в Калининградской области;
- разработка программы для ЭВМ по расчёту параметров обледенения лопастей ветроэнергетических установок в зависимости от метеорологических условий региона;
- разработка математической модели электрической схемы подключения ветропарка установленной мощностью 5,1 МВт к электроэнергетической системе Калининградской области для оценки режимов работы ветропарка;
- разработка рекомендаций по повышению энергетической эффективности работы ветроэнергетических установок на базе асинхронных генераторов в сетях среднего класса напряжения.

Научная новизна работы состоит в следующем:

- разработана математическая модель электрической схемы подключения ветропарка установленной мощностью 5,1 МВт к электроэнергетической системе Калининградской области, отличительной особенностью которой является наличие двух уровней: сложно-замкнутой электрической сети 60-110 кВ и разомкнутой электрической сети среднего класса напряжения 15 кВ;
- уточнена методика расчёта критерия необходимости калькуляции коэффициентов эффективности столкновения, прилипания и прироста (аккреции) при расчёте скорости обледенения лопастей ветроэнергетических установок в зависимости от определения критического значения содержания частиц воды в воздухе (массовой концентрации);
- предложена формула для расчёта усреднённого коэффициента использования установленной мощности ветропарка, учитывающая параметры отдельных ветроэнергетических установок в составе ветропарка.

Теоретическая значимость работы

- впервые предложена двухуровневая математическая модель электрической схемы подключения ветропарка к электроэнергетической системе, состоящая из верхнего уровня (сложно-замкнутой электрической сети высокого класса напряжения) и нижнего уровня (разомкнутой электрической сети среднего класса напряжения), которая позволяет с более высокой точностью производить оценку режимов работы ветропарка и их влияния на параметры электрической сети;
- уточнена методика расчёта критерия необходимости калькуляции коэффициентов эффективности столкновения, прилипания и прироста (аккреции) при расчёте скорости обледенения лопастей ветроэнергетических установок в зависимости от определения критического значения содержания

частиц воды в воздухе (массовой концентрации) за счёт интеграции входных параметров из численной модели прогнозирования погоды (WRF-модель), которая позволяет расширить теорию математического моделирования процесса обледенения;

- предложена формула для расчёта усреднённого коэффициента использования установленной мощности ветропарка, отличающаяся от классической учётом параметров отдельных ветроэнергетических установок в составе ветропарка.

Практическая значимость работы

- разработана математическая модель электрической схемы подключения ветропарка установленной мощностью 5,1 МВт к электроэнергетической системе Калининградской области, позволяющая электросетевой компании осуществлять расчёт режимов работы ветропарка;

- разработана программа для ЭВМ по расчёту параметров обледенения лопастей ветроэнергетических установок в зависимости от метеорологических условий региона, результаты расчёта которой могут быть использованы для составления прогнозных карт обледенения лопастей ветроэнергетических установок для заданной территории, а также для дальнейшего расчета потерь электроэнергии, вырабатываемой ветроэнергетической установкой, в случае обледенения;

- разработаны рекомендации по повышению энергетической эффективности работы ветроэнергетической установки Wind World 4200/600 (600 кВт) в составе ветропарка установленной мощностью 5,1 МВт в Калининградской области.

Практическая значимость работы подтверждена актом внедрения и справкой о внедрении результатов диссертационного исследования.

Основные положения, выносимые на защиту:

- формула для расчёта усреднённого коэффициента использования установленной мощности ветропарка, отличающаяся от классической учётом параметров отдельных ветроэнергетических установок в составе ветропарка;

- методика расчёта критерия необходимости калькуляции коэффициентов эффективности столкновения, прилипания и прироста (аккреции) при расчёте скорости обледенения лопастей ветроэнергетических установок в зависимости от определения критического значения содержания частиц воды в воздухе (массовой концентрации) за счёт интеграции входных параметров из численной модели прогнозирования погоды (WRF-модель);

- математическая модель электрической схемы подключения ветропарка установленной мощностью 5,1 МВт к электроэнергетической системе Калининградской области, отличительной особенностью которой является наличие двух уровней: сложно-замкнутой электрической сети 60-110 кВ и разомкнутой электрической сети среднего класса напряжения 15 кВ;

- рекомендации по повышению энергетической эффективности работы ветроэнергетических установок в составе ветропарка установленной мощностью 5,1 МВт в Калининградской области.

Методы исследований. При выполнении диссертационной работы для решения поставленных задач использовались методы экспериментального исследования, системного анализа и математического моделирования. При проведении исследований использовались программы Neplan, MathCAD, Panoply, NCView, MS Excel, язык программирования Fortran, а также мезомасштабная негидростатическая метеорологическая модель прогнозирования погоды WRF (Weather Research and Forecasting).

Степень достоверности результатов проведенных исследований подтверждается достаточной и соответствующей инженерной точности сходимостью полученных аналитических результатов с фактическими данными экспериментальных исследований.

Личный вклад автора в получение результатов, изложенных в диссертационной работе. В ходе научных исследований автором: проведен анализ отечественных и зарубежных стандартов и нормативных документов, определяющих требования к работе ветроэнергетических установок в сетях среднего класса напряжения; анализ и критическое обобщение работ зарубежных и отечественных авторов по теме исследования; сформулированы цели и задачи исследования. Проведен анализ эксплуатационных режимов работы ветроэнергетических установок в составе ветропарка в Калининградской области. Автору принадлежит разработка программы для ЭВМ по расчёту параметров обледенения лопастей ветроэнергетических установок в зависимости от метеорологических условий региона, подтверждённая правами на интеллектуальную собственность. Разработана математическая модель электрической схемы подключения ветропарка установленной мощностью 5,1 МВт к электроэнергетической системе Калининградской области, отличительной особенностью которой является наличие двух уровней: сложно-замкнутой электрической сети 60-110 кВ и разомкнутой электрической сети среднего класса напряжения 15 кВ, и проведена оценка её достоверности. Разработаны рекомендации по повышению энергетической эффективности работы ветроэнергетических установок в сетях среднего класса напряжения, в том числе по повышению энергетической эффективности работы ветроэнергетической установки Wind World 4200/600 (600 кВт) в составе ветропарка в Калининградской области. Проведена интерпретация всех полученных результатов исследования и сформулированы выводы.

Апробация работы

Основные результаты диссертационной работы доложены и обсуждены на десяти международных научных конференциях, симпозиумах и форумах, в том числе: на XI международной научной конференции «Инновации в науке, образовании и бизнесе», г. Калининград, 2013 г.; на международных семинарах по ветроэнергетике «ForWind» при Научно-исследовательском центре по ветроэнергетике в г. Ольденбург, Германия, 2014, 2015 г.; на международном симпозиуме по противодействию бедствиям «Symposium on disaster resilience and built environment education», г. Хаддерсфилд, Англия, 2015 г.; на III, V и VI международных научных конференциях «Морская техника и технологии. Безопасность морской индустрии», г. Калининград и г. Светлогорск, 2015, 2017,

2018 г.; на международном Саммите «ReGeneration 2030» на территории Аландских островов, Финляндия, 2018 г.; на международном форуме «Электрические сети 2018», г. Москва, 2018 г.; на международном инвестиционном форуме «Ветроэнергетика 2019», г. Москва, 2019 г.

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 11 печатных работ, 3 из которых в рецензируемых научных журналах, рекомендуемых ВАК при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации, 1 в международной базе Web of Science. Получено одно свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 84 наименований, 7 приложений. Работа содержит 139 страниц машинописного текста, 45 рисунков, 32 таблицы.

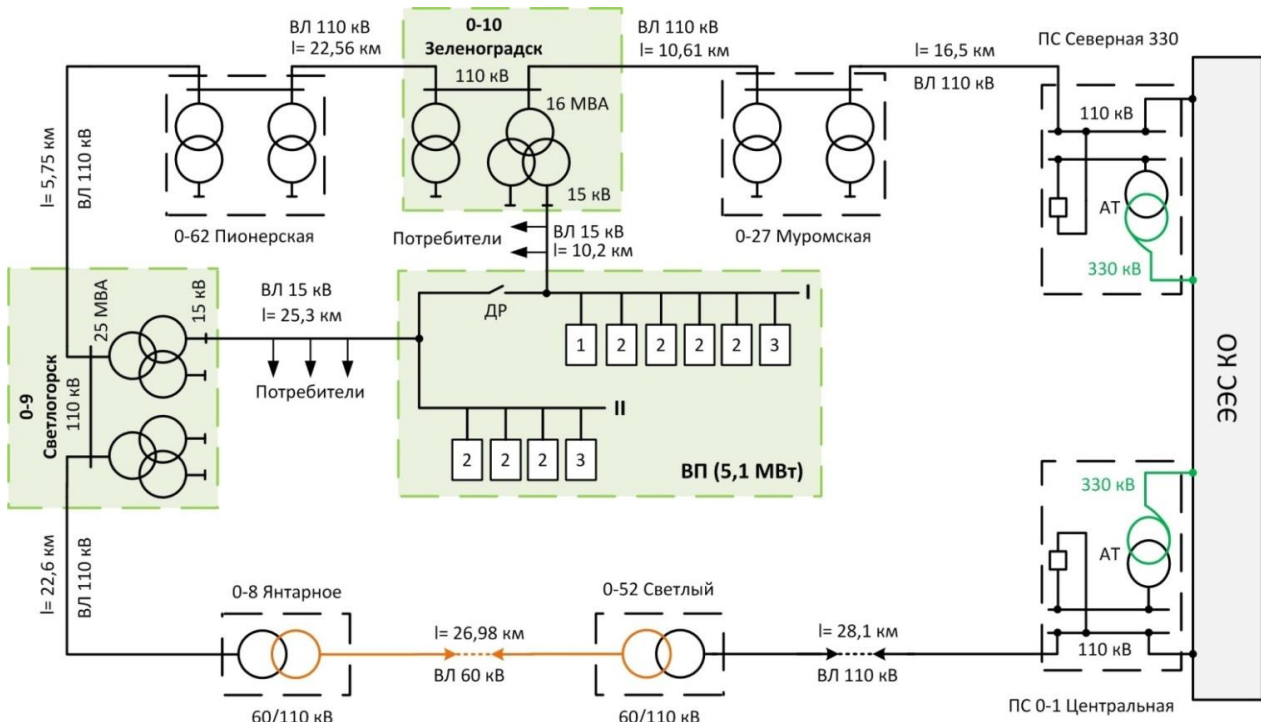
Тема и содержание диссертации соответствует научной специальности 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы» на соискание учёной степени кандидата технических наук по следующим пунктам областей исследования: п. 1 «Развитие общей теории электротехнических комплексов и систем, изучение системных свойств и связей, физическое, математическое, имитационное и компьютерное моделирование компонентов электротехнических комплексов и систем», п. 4 «Исследование работоспособности и качества функционирования электротехнических комплексов и систем в различных режимах, при разнообразных внешних воздействиях».

Основное содержание работы.

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, дана общая характеристика работы, её краткое содержание и структура, изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе выполнен обзор и анализ: развития ветроэнергетических установок средней мощности в мире; нормативных документов, определяющих требования к работе ветроэнергетических установок в сетях среднего класса напряжения; научных работ и исследований в области оценки возможности подключения и совместной работы ветроэнергетических установок в составе электроэнергетической системы в сетях среднего класса напряжения и повышения их энергетической эффективности. По результатам выполненного анализа сформулированы цель и задачи исследования.

Во второй главе проведён анализ опыта эксплуатации ветропарка установленной мощностью 5,1 МВт в Калининградской области (рисунки 1 и 2), состоящего из ветроэнергетических установок с обоими существующими на сегодняшний день в мире способами регулирования выработки активной мощности: stall- и pitch-регулированием.



1, 2, 3 – блоки ВЭУ; I и II – условные части ВП

Рисунок 1 – Упрощенная электрическая схема подключения ветропарка к электроэнергетической системе Калининградской области

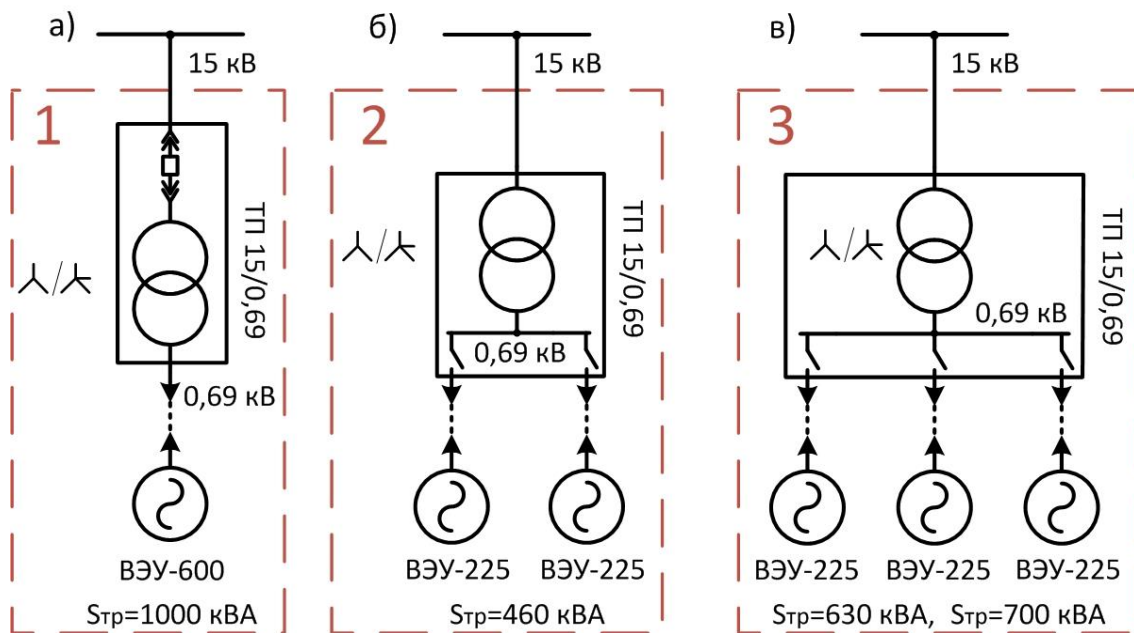


Рисунок 2 – Варианты подключения ветроэнергетических установок к ЛЭП 15 кВ в составе ветропарка (блоки ВЭУ): одна (а), две (б) и три (в) ВЭУ на один трансформатор 0,69/15 кВ

Проведён анализ статистических данных журналов отказов систем управления ветроэнергетических установок средней мощности Wind World 4200/600, установленной мощностью 600 кВт, и Vestas V27, установленной мощностью 225 кВт (ВЭУ-600 и ВЭУ-225 на рисунке 2 соответственно) с 2002 по 2018 годы, который выявил основные причины вынужденного кратковременного простоя (таблица 1).

Таблица 1 – Кратковременные простои ВЭУ-600 и ВЭУ-225

ВЭУ-600			
№	Причина вынужденного кратковременного простоя	Процент от общего числа простоев, %	Возврат к работе ВЭУ
1	Низкое фазное напряжение ($U_{\phi} < 371 \text{ В}$)	71,1	Автоматический (А) или дистанционный (Д)
2	Прекращение электроснабжения на ВЭУ	7,9	А или Д
3	Перегрузка генератора по мощности	6,3	Д
4	Вибрация в ступице	5,4	Ручной
5	Средняя скорость ветра превысила 25 м/с при измерении в течение 10 минут	5,1	А при $V_{\text{ветра}} \leq 20 \text{ м/с}$
6	Перегрев генератора	4,2	А при $T \leq 100 \text{ }^{\circ}\text{C}$
ВЭУ-225			
№	Причина вынужденного кратковременного простоя	Процент от общего числа простоев, %	Номера ВЭУ, на которых зафиксированы отказы
1	Низкое фазное напряжение	21,4	4,5,7,8,11,13,14,17,18,19,20
2	Предохранительный фазокомпенсатор генератора 2 отключен	13,1	5,6,8,9,10,14,15,16,17,18
3	Низкая температура	10,3	4,5,6,7,9,11,12,13,14,15,16,17,18, 20
4	Сбой связи	5,1	2,3,4,7,8,10,11,12,13,14,15,17,18, 19,20
5	Ошибка чередования фаз	4,9	3,4,5,7,8,9,10,11,13,14
6	Сбой частоты	3,7	3,5,6,7,8,11,12,13,14,18,19, 20
7	Поворот лопастей (отклонение от заданного угла)	3,9	4,5,7,10,11,13,14,17,18,19, 20
8	Поворот лопастей слишком мал	2,1	3,4,7,9,10,11,16,20

Установлено, что основной причиной остановок ВЭУ-600 и ВЭУ-225 являлось низкое напряжение на клеммах асинхронного генератора, что обусловлено: слабой электрической связью ветропарк с электроэнергетической системой Калининградской области, при которой не выполняется условие (1) (в точке подключения ВЭУ-600 $S_{\text{кз}}=16,1 \text{ МВА}$); значительной величиной реактивной мощности, потребляемой ветроэнергетическими установками из электрической сети (рисунок 3, б) и значительными нагрузками потребителей, подключенными к линиям электропередачи, соединяющим ветропарк с энергосистемой (рисунок 1).

$$S_{\text{ВЭУ(ВП)}} / S_{\text{кз}} \leq 0,02 \quad (1)$$

$$S_{\text{кз}} = \frac{\sqrt{3} \cdot U_{\text{НОМ}}^2}{X_{\Sigma}}, \quad (2)$$

где $S_{\text{ВЭУ(ВП)}}$ – установленная полная мощность ветроэнергетической установки или ветропарка; $S_{\text{кз}}$ – мощность короткого замыкания в точке подключения ветроэнергетической установки или ветропарка к электрической сети; $U_{\text{НОМ}}$ – номинальное напряжение базисной ступени напряжения, к которой приводятся сопротивления элементов схемы замещения при расчёте; X_{Σ} – суммарное сопротивление элементов сети от точки подключения ветроэнергетической установки или ветропарка до точки подключения, где мощность энергосистемы можно считать бесконечно большой по отношению к мощности ветроэнергетической установки или ветропарка.

Выявлено, что значительное потребление реактивной мощности асинхронными генераторами ВЭУ-600 (рисунок 3, б) и ВЭУ-225 (рисунок 4, б), а также значительные уровни колебаний реактивной мощности в зависимости от ветровой нагрузки (до 190 кВар для ВЭУ-225), оказывают существенное влияние на уровни напряжения у потребителей, подключенных к линиям выдачи мощности ветропарка (3). При этом компенсирующие устройства обеспечивают только компенсацию реактивной мощности, потребляемой ВЭУ-600 и ВЭУ-225 на холостом ходу (рисунок 3).

$$\underline{U}_2 = \underline{U}_1 - \left[\frac{P_n r_{12} + Q_n x_{12}}{U_{ном}} + j \frac{P_n x_{12} - Q_n r_{12}}{U_{ном}} \right], \quad (3)$$

где r_{12} и x_{12} – соответственно активное и индуктивное сопротивления; U_1 и U_2 – напряжения в начале и конце линии электропередачи, P_n и Q_n – активная и реактивная мощности нагрузок.

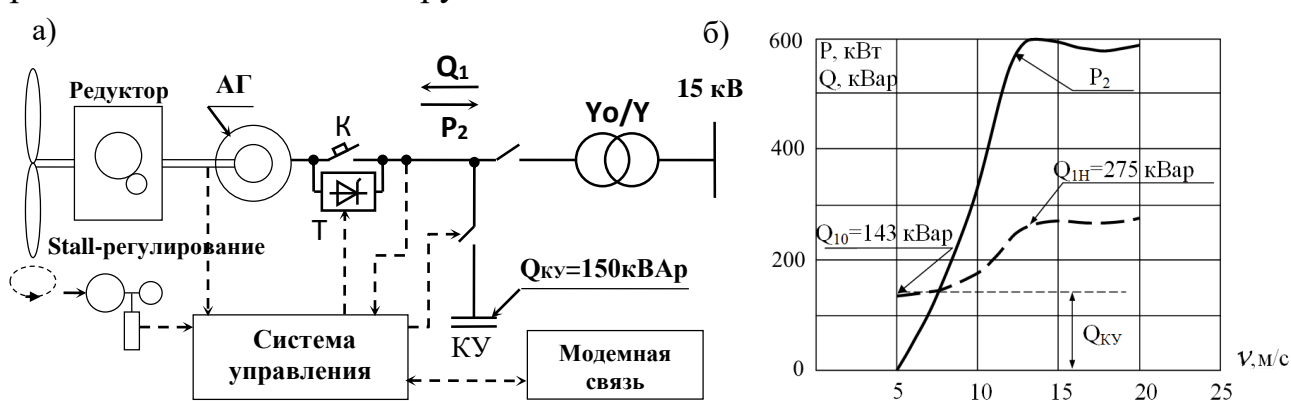


Рисунок 3 – Электрическая схема ВЭУ-600 (а) и зависимости активной и реактивной мощности от скорости ветра (б)

Установлено, что ВЭУ-225 в процессе эксплуатации подвержены ускоренному износу оборудования, ввиду частых переключений между обмотками статора генератора ветроэнергетической установки (50 кВт и 225 кВт), так как в центре диапазона переключений лежит среднегодовая скорость ветра в месте установки (6,5 м/с) (рисунок 4, а).

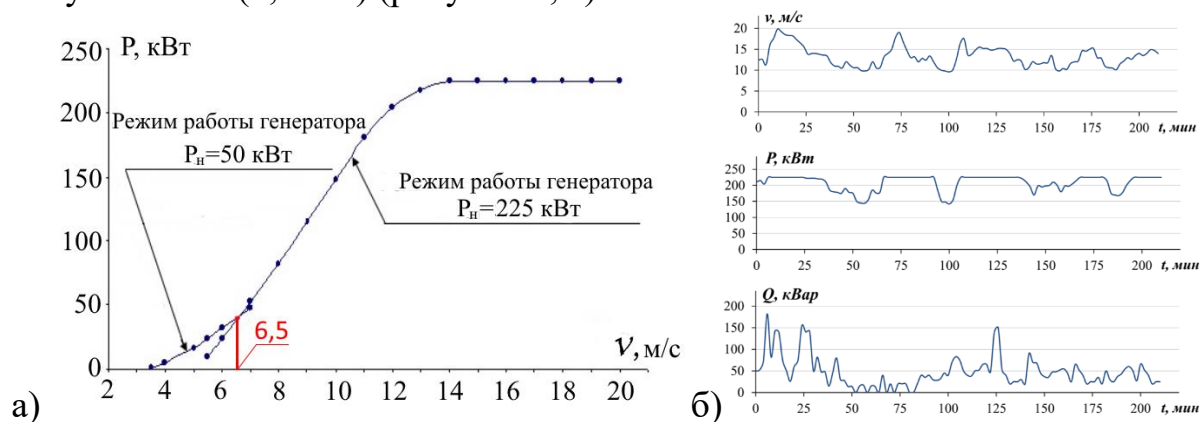


Рисунок 4 – Зависимость активной мощности от скорости ветра при переключении между обмотками статора генератора ВЭУ-225 (а) и изменение активной и реактивной мощности при изменении скорости ветра (б)

Выявлено, что кратковременный скачок активной мощности перед остановом ВЭУ-600 и, как следствие, перегрузка асинхронного генератора по активной мощности (6,3% от общего времени простоя) происходит ввиду инерционности динамической системы «Stall-регулирование – Асинхронный генератор» в момент резкого увеличения скорости при порыве ветра (рисунок 5).

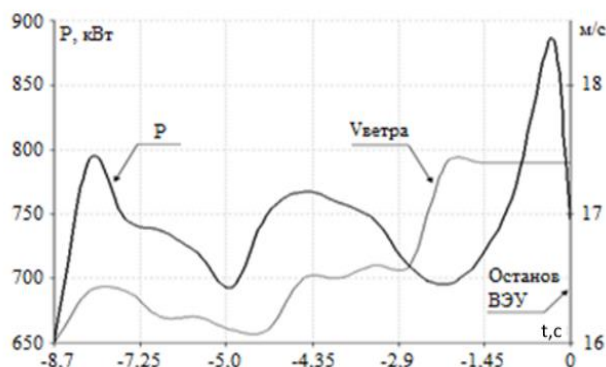


Рисунок 5 – Осциллограмма изменения активной мощности перед остановом ВЭУ-600

Анализ качества электроэнергии, выдаваемой в сеть ВЭУ-600 (таблица 2), выявил значительную несимметрию и несинусоидальность токов и напряжений, причем наиболее значимой является третья гармоника. Установлено, что применение соединения обмоток Д/У₀ силового трансформатора 0,69/15 кВ снизило бы остроту проблем, связанных с качеством электроэнергии ВЭУ-600.

Таблица 2 – Результаты исследований показателей качества электроэнергии ВЭУ-600 при скорости ветра около 7 м/с

Измеряемые величины	Значения	K _{U,i} , %	Коэффициенты n-гармонической составляющей				K _{O(U,i)} , %	
			3	5	7	11		
Фазные напряжения (В)	U _A	408	1,98	1,77	-	-	2,33	
	U _B	398	1,9	1,2	-	1,2		
	U _C	393	1,22	0,5	0,86	-		
Фазные токи (А)	I _A	101	10,2	9,66	0,7	1,53	1,64	9,82
	I _B	87	9,38	9,27	1,0	1,0	0,9	
	I _C	103	2,92	1,66	1,3	1,1	0,9	
Доза фликера	Фаза А	0,0055-0,0174						
	Фаза В	0,0058-0,0141						
	Фаза С	0,0062-0,0141						

где: K_{U,i} – соответственно суммарные коэффициенты гармонических составляющих напряжения и тока; K_{O(U,i)} – коэффициенты несимметрии напряжений и токов по нулевой последовательности.

Предложена формула для расчёта усреднённого коэффициента использования установленной мощности ветропарка K_{уср} (4), отличающаяся от классической учётом параметров отдельных ветроэнергетических установок в составе ветропарка. Анализ эксплуатационных режимов работы ВЭУ-600 и ВЭУ-225 показал, что усреднённые значения коэффициентов использования установленной мощности ветроэнергетических установок в составе ветропарка (K_{уср}=0,16 для ВЭУ-600, K_{уср}=0,185 для ВЭУ-225) значительно ниже среднестатистических значений, основной из причин этого является относительно невысокая ветровая активность в районе размещения ветропарка.

$$K_{y_{cp}} \approx \left[\frac{\sum_{i=1}^n \frac{W_{год, ВЭУ1,i}}{(8760 - T_{простоя, ВЭУ1,i}) \cdot P_H} + \dots + \sum_{i=1}^n \frac{W_{год, ВЭУk,i}}{(8760 - T_{простоя, ВЭУk,i}) \cdot P_H}}{n} \right] \cdot \frac{1}{k}, \quad (4)$$

где $W_{год, ВЭУ1...k,i}$ – годовая выработка электроэнергии ветроэнергетической установкой № $1...k$ в i -м году (кВ·ч); $T_{простоя, ВЭУ1...k,i}$ – число часов вынужденного аварийного простоя ветроэнергетической установки № $1...k$ в i -м году (ч), n – количество лет эксплуатации ветроэнергетической установки; k – количество ветроэнергетических установок одной модели (шт.) (ВЭУ-225 или ВЭУ-600).

Анализ результатов исследований отказов показал, что простой ВЭУ-225 по причине низких температур находится на 3 месте из всех причин отказов ветроэнергетических установок и составляет 10,3% от общего количества отказов. При этом ВЭУ-225 не оборудованы системой обогрева лопастей. Снижение коэффициента использования установленной мощности ВЭУ-225 связаны, в том числе, с обледенением лопастей и отсутствием обогрева электроники ветроэнергетической установки. Обледенение в некоторых случаях явилось причиной возникновения дополнительных отказов ВЭУ-225 из-за нарушения работы лопастей (пункты № 7 и № 8 ВЭУ-225 в таблице 1).

Представлена структура разработанной программы для ЭВМ по расчёту параметров обледенения лопастей ветроэнергетических установок в зависимости от метеорологических условий региона (рисунок б).

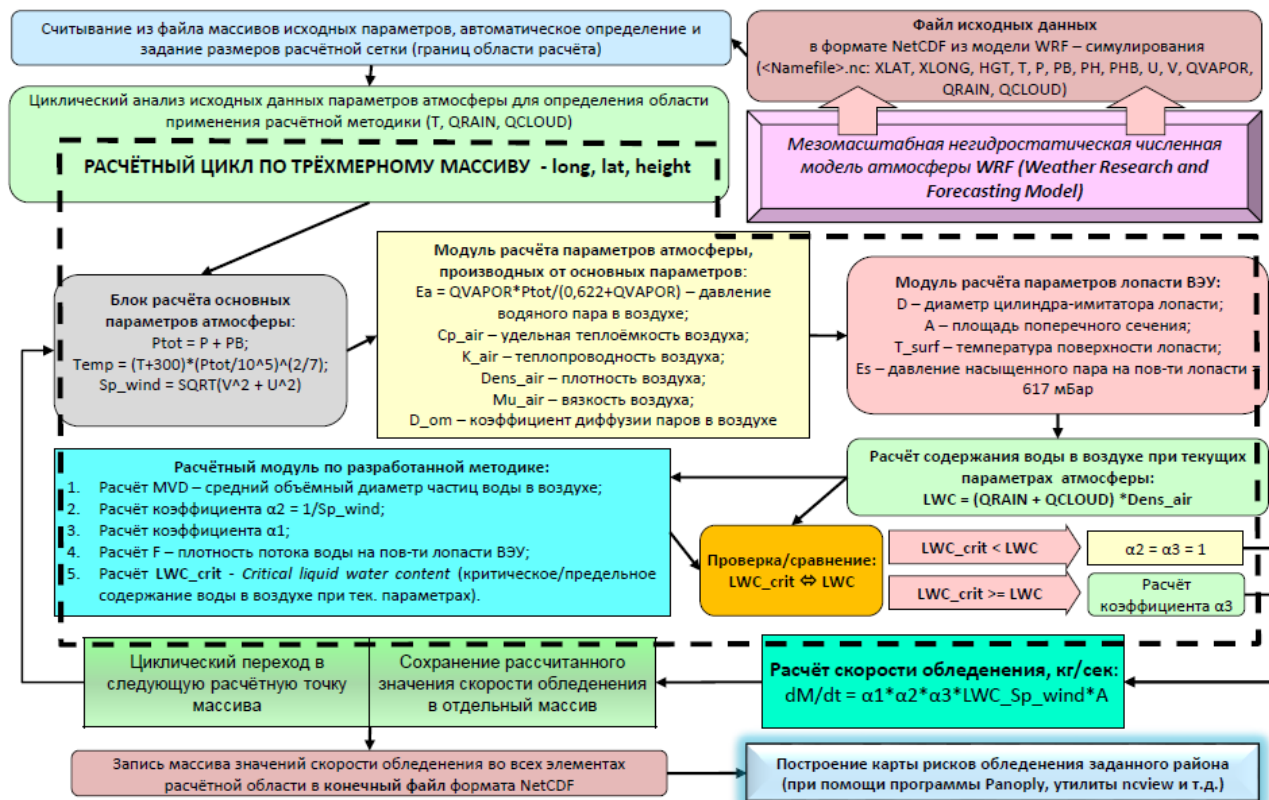


Рисунок б – Блок-схема программы для ЭВМ по расчёту параметров обледенения лопастей ветроэнергетических установок в зависимости от метеорологических условий региона

Функциональные возможности программы позволяют проводить расчёты: скорости обледенения лопастей ветроэнергетических установок (в кг/с); процента времени в течение заданного временного промежутка симуляции, когда скорость обледенения лопастей ветроэнергетических установок больше 0 кг/с; суммарной массы льда, образующейся на лопастях ветроэнергетических установок за заданный временной промежуток симуляции (в кг).

В основу программы была положена теория обледенения Макконена с некоторыми уточнениями ряда других ведущих мировых исследователей в области теории обледенения (5) – (8).

$$I = \alpha 1 \cdot \alpha 2 \cdot \alpha 3 \cdot LWC \cdot v_w \cdot A \quad (5)$$

$$\alpha 1 = 1.066 \cdot K^{-0.00616} \cdot e^{(-1.103 \cdot K^{-0.688})} - 0.028 - 0.00637 \cdot (\varnothing - 100)^{0.381} \cdot (3.641 \cdot K^{-0.498} \cdot e^{(-1.497 \cdot K^{-0.694})} - 0.0454) \quad (6)$$

$$\alpha 2 = 1/v_w \quad (7)$$

$$\alpha 3 = \frac{1}{F \cdot (1-\lambda) \cdot L_f} \cdot \left[(h + \sigma \cdot a) \cdot (t_s - t_a) + \frac{h \cdot \epsilon \cdot L_e}{C_p \cdot P_{tot}} \cdot (e_s - e_a) - \frac{h \cdot r \cdot v_w^2}{2 \cdot C_p} + F \cdot C_w \cdot (t_s - t_a) \right], \quad (8)$$

где I – скорость обледенения лопастей ветроэнергетических установок, кг/с; $\alpha 1$ – коэффициент эффективности столкновения; $\alpha 2$ – коэффициент эффективности прилипания; $\alpha 3$ – коэффициент эффективности прироста (аккреции); LWC – содержание частиц воды в воздухе (массовая концентрация), кг/м³; a – линеаризованная постоянная излучения, К³; v_w – скорость набегающего воздушного потока (скорость частиц), м/с; A – площадь поперечного сечения лопасти ветроэнергетической установки (относительно направления вектора скорости воздушного потока v_w), м².

Уточнена методика расчёта критерия необходимости калькуляции коэффициентов $\alpha 1$, $\alpha 2$, $\alpha 3$ в зависимости от определения критического значения содержания частиц воды в воздухе (массовой концентрации):

$$LWC_{crit} = \frac{k_a}{\alpha 1} \cdot \left(\frac{\rho_\infty}{v_w \cdot D \cdot \mu_\infty} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \left[\frac{-t_a + \frac{\epsilon \cdot L_e}{C_p \cdot P_{tot}} \cdot (e_s - e_a) - \frac{r \cdot v_w^2}{2 \cdot C_p}}{L_f + C_w \cdot t_a} \right] - \frac{\sigma \cdot n \cdot t_a}{\alpha 1 \cdot v_w \cdot (L_f + C_w \cdot t_a)}, \quad (9)$$

где F – плотность потока воды на поверхность ($F = \alpha 1 \cdot \alpha 2 \cdot LWC \cdot v_w$); L_f – удельная теплота плавления льда, Дж/кг; t_a – температура окружающей среды, К; h – коэффициент конвективной теплоотдачи, Вт/(м²·К); L_e – латентное тепло испарения, Дж/кг; C_p – удельная теплоёмкость воздуха, Дж/(кг·К); ρ_∞ – плотность воздуха, кг/м³; μ_∞ – вязкость воздуха, кг/(м·с); ϵ – отношение молекулярных масс сухого воздуха и водяного пара; r – коэффициент восстановления для теплоты внутреннего трения; C_w – удельная теплоёмкость воды, Дж/(кг·К); n – коэффициент промерзания; σ – постоянная Стефана-Больцмана, Вт/(м²·К⁴); P_{tot} – давление воздуха, Па; k_a – теплопроводность воздуха, Вт/(м·К); e_s – давление насыщенного водяного пара на поверхности

лопасти ветроэнергетической установки, Па; e_a – давление окружающего пара в воздушном потоке, Па.

Условия расчёта коэффициентов α формулы (5) представлены в таблице 3. Таблица 3 – Условия расчета коэффициентов α

№	Критерий	Расчет параметров
1	$LWC > LWC_{crit}$	α_1 – расчет по (6), $\alpha_2 = 1$, $\alpha_3 = 1$
2	$LWC \leq LWC_{crit}$	$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ согласно (6), (7), (8)

В третьей главе представлены результаты по разработке математической модели электрической схемы подключения ветропарка установленной мощностью 5,1 МВт к электроэнергетической системе Калининградской области, отличительной особенностью которой является наличие двух уровней: сложно-замкнутой электрической сети 60-110 кВ и разомкнутой электрической сети среднего класса напряжения 15 кВ.

Разработка сложно-замкнутой электрической сети 60-110 кВ до точки подключения ветропарка к электроэнергетической системе Калининградской области, где мощность короткого замыкания является бесконечно большой по сравнению с мощностью ветропарка (рисунок 7), и моделирование режимов работы сети производились в программном комплексе «Nerplan», в котором предусмотрено объектно-ориентированное моделирование электрической сети при учёте необходимой конфигурации элементов сети.

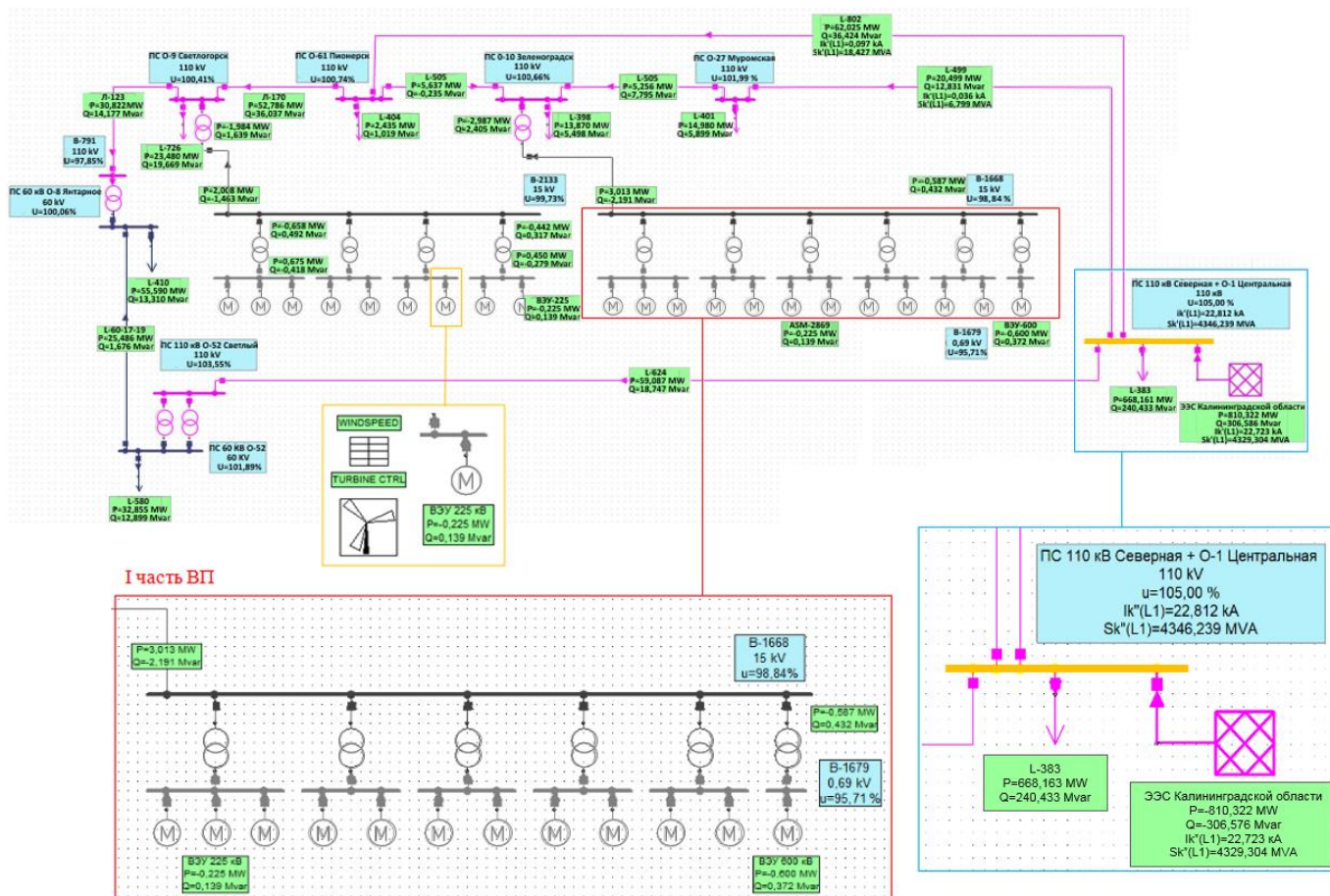


Рисунок 7 – Модель сложно-замкнутой электрической сети 60-110 кВ электрической схемы подключения ветропарка к электроэнергетической системе Калининградской области

Анализ результатов расчётов на модели и показаний натуральных измерений установившихся режимов работы сложно-замкнутой электрической сети 60-110 кВ при различных режимах работы ветроэнергетических установок в составе ветропарка показал незначительное влияние работы ветропарка (в пределах 0,9%) на уровни напряжения на шинах подстанций 110/15 кВ О-10 «Зеленоградск» и О-9 «Светлогорск», являющихся точками подключения ветропарка к электрическим сетям 110 кВ (таблица 4).

Таблица 4 – Результаты расчётов на модели и показания натуральных измерений отклонения напряжения для ряда установившихся режимов работы сложно-замкнутой электрической сети 60-110 кВ

Режим работы ветропарка	Отклонение напряжения, %		
	Результаты расчётов на модели	Показания измерений	Отклонение от результатов измерений, %
ПС О-9 «Светлогорск»			
Максимальная выработка, все ВЭУ в работе	100,41	100,17	0,24
I часть – все ВЭУ в работе, II часть - 6 ВЭУ в работе	100,42	100,54	0,12
I часть – все ВЭУ в работе, II часть – все ВЭУ отключены	100,44	100,33	0,11
I часть – 8 ВЭУ-225 и 1 ВЭУ-600 в работе, II часть – все ВЭУ отключены	100,44	100,56	0,12
I часть – все ВЭУ отключены, II часть – все ВЭУ в работе	100,43	100,58	0,15
I часть – 1 ВЭУ-600 в работе, II часть – все ВЭУ отключены	100,46	100,91	0,45
Минимальная выработка, все ВЭУ отключены	100,46	101,08	0,61
ПС О-10 «Зеленоградск»			
Максимальная выработка, все ВЭУ в работе	101,66	101,47	0,19
I часть – все ВЭУ в работе, II часть - 6 ВЭУ в работе	101,67	101,85	0,18
I часть – все ВЭУ в работе, II часть – все ВЭУ отключены	101,68	101,79	0,11
I часть – 8 ВЭУ-225 и 1 ВЭУ-600 в работе, II часть – все ВЭУ отключены	101,70	101,83	0,13
I часть – все ВЭУ отключены, II часть – все ВЭУ в работе	101,75	101,98	0,23
I часть – 1 ВЭУ-600 в работе, II часть – все ВЭУ отключены	101,75	101,93	0,18
Минимальная выработка, все ВЭУ отключены	101,76	102,02	0,25

Результаты моделирования установившихся режимов работы показали, что потребление реактивной мощности ВЭУ-225 и ВЭУ-600 вызывает снижение уровня напряжения на шинах ближайших подстанций 15 кВ, что в свою очередь оказывает влияние на напряжение близлежащих потребителей электроэнергии, а также снижение напряжения на клеммах асинхронного генератора ветроэнергетических установок (до 7%) (рисунок 7, I часть ветропарка, выделено красным).

С целью более подробного изучения влияния работы ветроэнергетических установок на параметры сети 15 кВ разработан второй уровень математической модели электрической схемы подключения ветропарка к электроэнергетической системе Калининградской области, в основе которого лежит решение систем линейных узловых уравнений в алгебраической форме матричным методом. При решении системы линейных узловых уравнений были применены метод Гаусса и метод обратной матрицы (рисунок 8, выражения (10) – (17), таблица 5). С целью взаимной интеграции разработанных уровней математической модели электрической схемы подключения ветропарка к электроэнергетической системе Калининградской области была разработана модель разомкнутой электрической

сети среднего класса напряжения 15 кВ в программном комплексе «Nerplan», и интегрирована в первый уровень – сложно-замкнутую электрическую сеть 60-110 кВ (рисунок 9).

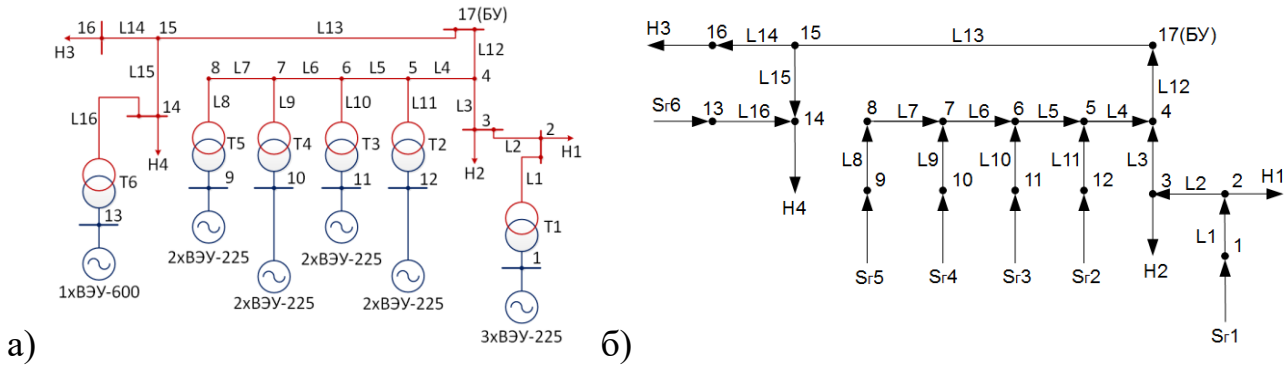


Рисунок 8 – Схема замещения I части ветропарка (а) и направленный граф схемы замещения (б)

$$S = \begin{bmatrix} S_{g1} + i \cdot \frac{Q_{c1}}{2} - S_{n1} - S_{xx1} \\ S_{g2} + i \cdot \frac{Q_{c2}}{2} - S_{n2} - S_{xx2} \\ \dots \\ S_{gn} + i \cdot \frac{Q_{cn}}{2} - S_{nn} - S_{xxn} \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$I = \frac{\bar{S}}{\sqrt{3} \cdot U_b} = \begin{bmatrix} I_{31} \\ I_{32} \\ \dots \\ I_{3n} \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$M = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & \dots & M_{1j} \\ M_{21} & M_{22} & \dots & M_{2j} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ M_{i1} & M_{i2} & \dots & M_{ij} \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$Z = \begin{bmatrix} Z_{L1} + Z_{tr1} \\ Z_{L2} + Z_{tr2} \\ \dots \\ Z_{Ln} + Z_{trn} \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$Y_u = M \cdot Y_v \cdot M^T = \begin{bmatrix} Y_{y11} & Y_{y12} & \dots & Y_{y1j} \\ Y_{y21} & Y_{y22} & \dots & Y_{y2j} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ Y_{yi1} & Y_{yi2} & \dots & Y_{yij} \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$Y_v = \begin{bmatrix} \frac{1}{Z_1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \frac{1}{Z_2} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{Z_n} \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$U_k = b_k - \sum_{i=k+1}^n (Y_{y_{ki}} \cdot U_i) \quad (16)$$

$$\overline{[U^T]} = \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ \dots \\ U_n \end{bmatrix} \quad (17)$$

где S – матрица мощностей узлов; Z – матрица узловых сопротивлений; M – единичная матрица; I – матрица задающих токов в узлах; Y_u – матрица узловых проводимостей; U^T – матрица узловых напряжений.

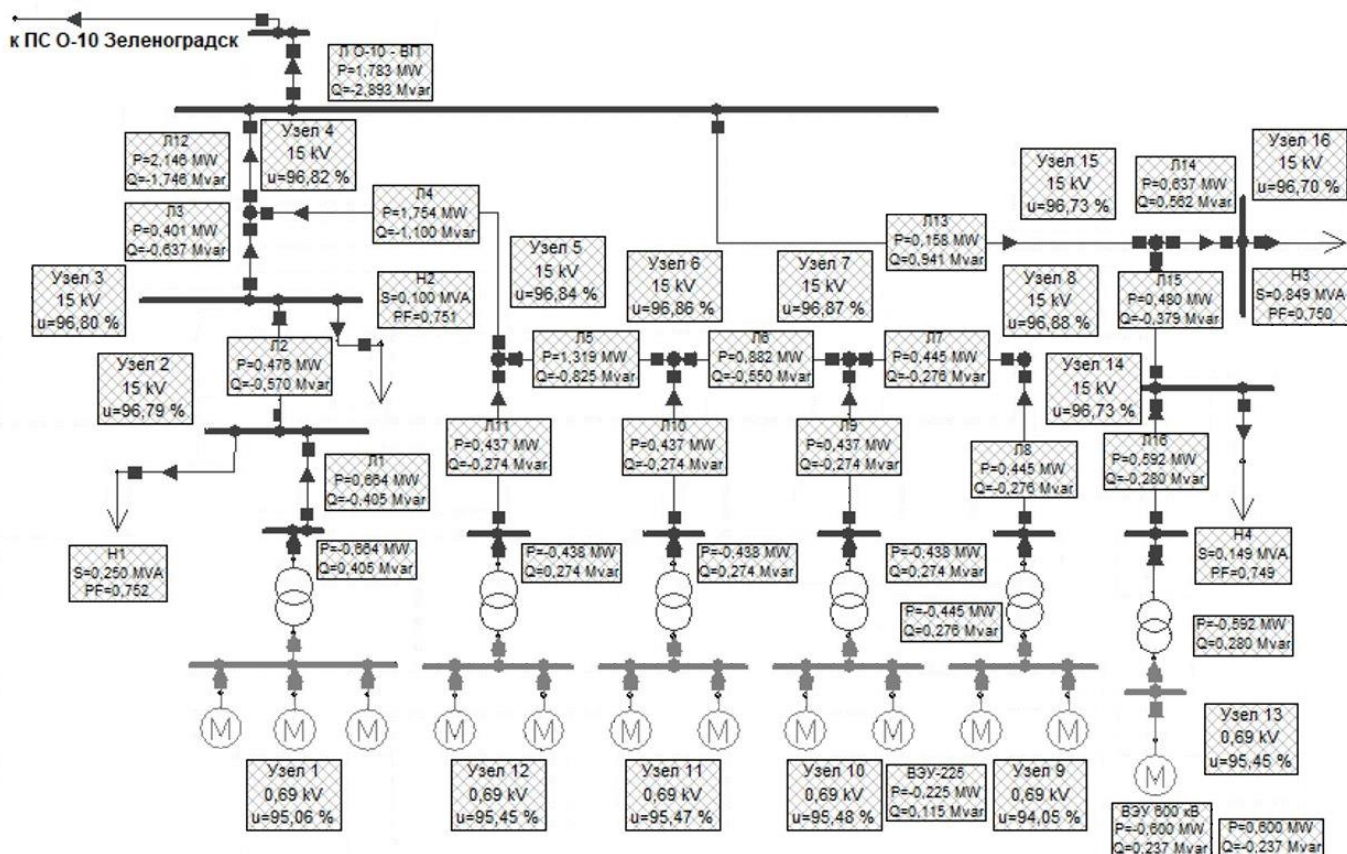


Рисунок 9 – Результаты расчёта установившегося режима работы I части ветропарка (максимальная выработка, все ВЭУ в работе) на модели разомкнутой электрической сети среднего класса напряжения 15 кВ в составе модели сложно-замкнутой электрической сети 60-110 кВ

Таблица 5 – Результаты расчёта системы линейных узловых уравнений матричными методами, натурных измерений и расчёта на модели разомкнутой электрической сети среднего класса напряжения 15 кВ в составе модели сложно-замкнутой электрической сети 60-110 кВ для некоторых режимов работы I части ветропарка

Метод	Напряжение*							
	U1, кВ	U2, кВ	U3, кВ	U4, кВ	U5, кВ	U6, кВ	U7, кВ	U8, кВ
Максимальная выработка, все ВЭУ в работе, максимальная нагрузка потребителей								
Метод Гаусса	0,663	14,550	14,556	14,556	14,558	14,561	14,567	14,567
Метод обратной матрицы	0,679	14,535	14,565	14,580	14,820	14,820	14,820	14,820
Показания измерений	0,657	14,532	14,552	14,541	14,549	14,574	14,693	14,547
Моделирование	0,656	14,519	14,520	14,523	14,526	14,529	14,531	14,532
ВЭУ-600 в работе, остальные ВЭУ отключены, максимальная нагрузка потребителей								
Метод Гаусса	0,668	14,535	14,535	14,540	14,537	14,534	14,534	14,531
Метод обратной матрицы	0,675	14,678	14,678	14,685	14,687	14,679	14,685	14,684
Показания измерений	0,665	14,475	14,481	14,492	14,468	14,471	14,474	14,475
Моделирование	0,662	14,406	14,406	14,414	14,414	14,414	14,414	14,414

Продолжение таблицы 5

Метод	Напряжение							
	U9, кВ	U10, кВ	U11, кВ	U12, кВ	U13, кВ	U14, кВ	U15, кВ	U16, кВ
Максимальная выработка, все ВЭУ в работе, максимальная нагрузка потребителей								
Метод Гаусса	0,656	0,663	0,663	0,662	0,664	14,550	14,550	14,550
Метод обратной матрицы	0,679	0,681	0,681	0,678	0,676	14,715	14,715	14,715
Показания измерений	0,641	0,655	0,656	0,661	0,658	14,555	14,631	14,565
Моделирование	0,649	0,659	0,659	0,659	0,659	14,510	14,510	14,505
ВЭУ-600 в работе, остальные ВЭУ отключены, максимальная нагрузка потребителей								
Метод Гаусса	0,671	0,671	0,671	0,671	0,641	14,711	14,670	14,690
Метод обратной матрицы	0,680	0,676	0,678	0,679	0,643	14,690	14,691	14,687
Показания измерений	0,666	0,666	0,665	0,666	0,638	14,486	14,471	14,480
Моделирование	0,663	0,663	0,663	0,663	0,642	14,417	14,417	14,412

* - напряжение в узлах электрической сети на рисунке 8

Анализ результатов моделирования установившихся режимов работы разомкнутой электрической сети среднего класса напряжения 15 кВ при различных режимах работы ветроэнергетических установок в составе ветропарка выявил, что в некоторых случаях имеют место значительные снижения уровня напряжения на шинах нагрузки (потребителей), до 6,4%, а также снижение напряжения на клеммах ВЭУ-600 до критических значений, при которых ветроэнергетическая установка отключается от электрической сети ($U_{\phi} < 371 \text{ В}$).

Сравнение результатов математического моделирования с натурными показаниями измерений показывает их хорошую сходимость: для сложно-замкнутой электрической сети 60-110 кВ отклонение в пределах 0,6%, для разомкнутой электрической сети среднего класса напряжения 15 кВ в пределах 5,6%, что подтверждает адекватность разработанной математической модели электрической схемы подключения ветропарка установленной мощностью 5,1 МВт к электроэнергетической системе Калининградской области.

В четвертой главе представлены разработанные рекомендации по повышению энергетической эффективности работы ветроэнергетических установок на базе асинхронных генераторов в сетях среднего класса напряжения на примере ветропарка в Калининградской области.

Для снижения вероятности отключения ВЭУ-600, вызванного потреблением значительной реактивной мощности асинхронным генератором ветроэнергетической установки, предложено применение управляемой конденсаторной установки с автоматическим регулированием мощности по уровню напряжения в точке подключения ВЭУ-600 к электрической сети 15 кВ, что согласно расчётам позволит увеличить усреднённое значение коэффициента использования установленной мощности ветроэнергетической установки на 2,3%.

Проведён расчёт балансов реактивной мощности в сети при разных режимах работы ВЭУ-600 с учетом графиков нагрузки потребителей, что позволило определить мощность конденсаторной установки (300 кВар) и оптимальную

точку её подключения к сети с точки зрения обеспечения наиболее эффективной работы ВЭУ-600 (рисунок 10).

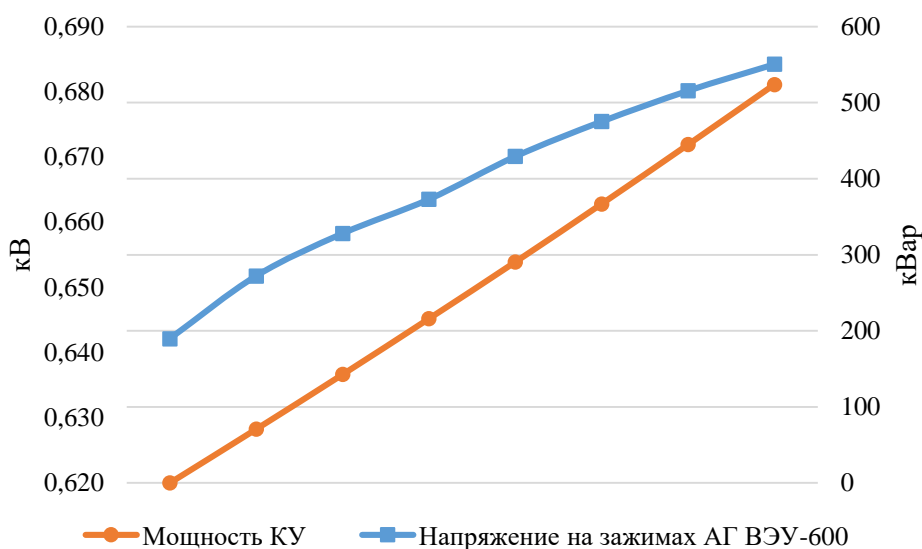


Рисунок 10 – Зависимость изменения напряжения на клеммах АГ ВЭУ-600 от мощности управляемой конденсаторной установки для режима «ВЭУ-600 в работе, остальные ВЭУ отключены, максимальная нагрузка потребителей»

Ввиду наличия значительных отклонений напряжения у потребителей (до 6,4%) для поддержания напряжения в допустимых пределах $\pm 5\%$ предложен вариант регулировки положения анцапфы трансформаторов 0,69/15 кВ на ТП 256-21 и ТП 256-27.

С целью снижения проблем, связанных с качеством электроэнергии, выдаваемой в сеть ВЭУ-600 (таблица 2), предложено применение силового трансформатора 0,69/15 кВ на ТП 256-21 с соединением обмоток Д/У₀ взамен существующего с соединением обмоток У/У₀, что позволит снизить коэффициент несимметрии напряжений по нулевой последовательности до нормально допустимых значений (2%).

При проектировании новых ветропарков применение разработанной методики и программы для расчёта параметров обледенения лопастей ветроэнергетических установок позволит оценить экономическую целесообразность применения систем, предотвращающих обледенение лопастей ветроэнергетических установок (anti-icing system) или систем, позволяющих избавиться от уже образовавшегося льда (de-icing system), и избежать при дальнейшей эксплуатации снижения выработки электроэнергии по причине отказов элементов ветроэнергетических установок в период низких температур. Установлено, что применение систем, предотвращающих обледенение лопастей ветроэнергетических установок, и, как следствие, исключение отказов ветроэнергетических установок по причине низких температур, позволило бы увеличить усреднённое значение коэффициента использования установленной мощности ВЭУ-225 в составе ветропарка в Калининградской области на 0,3%.

Заключение

На основании выполненных теоретических, расчётных и экспериментальных исследований получены следующие научные и практические результаты.

1. Предложена формула для расчёта усреднённого коэффициента использования установленной мощности ветропарка, отличающаяся от классической учётом параметров отдельных ветроэнергетических установок в составе ветропарка.

2. Уточнена методика расчёта критерия необходимости калькуляции коэффициентов эффективности столкновения, прилипания и прироста (аккреции) при расчёте скорости обледенения лопастей ветроэнергетических установок в зависимости от определения критического значения содержания частиц воды в воздухе (массовой концентрации) за счёт интеграции входных параметров из численной модели прогнозирования погоды (WRF-модель), что позволяет расширить теорию математического моделирования процесса обледенения.

3. Разработана программа для ЭВМ по расчёту параметров обледенения лопастей ветроэнергетических установок в зависимости от метеорологических условий региона, результаты расчёта которой могут быть использованы для составления прогнозных карт обледенения лопастей ветроэнергетических установок для заданной территории, а также для дальнейшего расчета потерь вырабатываемой электроэнергии ветроэнергетической установкой в случае обледенения (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ: № 2017618835 от 10.08.2017).

4. Разработана математическая модель электрической схемы подключения ветропарка установленной мощностью 5,1 МВт к ветроэнергетической системе Калининградской области, отличительной особенностью которой является наличие двух уровней: сложно-замкнутой электрической сети 60-110 кВ и разомкнутой электрической сети среднего класса напряжения 15 кВ, которая позволяет электросетевой компании осуществлять расчёт режимов работы ветропарка, а также с более высокой точностью производить оценку влияния работы ветропарка на параметры электрической сети обоих классов напряжения.

5. Разработаны рекомендации по повышению энергетической эффективности работы ветроэнергетических установок на базе асинхронных генераторов в сетях среднего класса напряжения, в частности ветроэнергетической установки Wind World 4200/600 (600 кВт) в составе ветропарка установленной мощностью 5,1 МВт в Калининградской области:

- предложено применение управляемой конденсаторной установки с автоматическим регулированием мощности по уровню напряжения в точке подключения ВЭУ-600 к электрической сети 15 кВ, что позволит увеличить усреднённое значение коэффициента использования установленной мощности ВЭУ-600 на 2,3%;

- предложен вариант регулировки положения анцапфы ряда трансформаторов 0,69/15 кВ на ТП, входящих в схему выдачи мощности ветропарка (ТП 256-21 и ТП 256-27);
- предложено применение на ТП 0,69/15 кВ (ТП 256-21), к которой подключена ВЭУ-600, силового трансформатора 0,69/15 кВ с соединением обмоток Д/У0 взамен существующего с соединением обмоток У/У₀;
- установлено, что применение систем, предотвращающих обледенение лопастей ветроэнергетических установок, и, как следствие, исключающих отказы ветроэнергетических установок по причине низких температур, позволило бы увеличить усреднённое значение коэффициента использования установленной мощности ВЭУ-225 в составе ветропарка на 0,3%.

6. Полученные в рамках диссертационного исследования результаты внедрены в рабочий процесс постобработки мезомасштабного моделирования и составления прогнозных карт рисков обледенения для различных территорий Европейского союза в Научно-исследовательском центре по ветроэнергетике «ForWind», г. Ольденбург, Германия, что подтверждено актом внедрения.

7. Практическая значимость результатов работы подтверждена справкой о внедрении результатов диссертационного исследования в практической деятельности электросетевой компании АО «Янтарьэнерго».

В диссертации изложены новые научно обоснованные технические решения, внедрение которых обеспечивает повышение энергетической эффективности функционирования ветроэнергетических установок средней мощности в составе электроэнергетических систем.

Основные положения диссертационной работы отражены в следующих публикациях:

а) научные статьи, опубликованные в ведущих российских периодических изданиях, рекомендуемых ВАК при Минобрнауки РФ:

1. Белей В.Ф., Задорожный А.О. Анализ опыта эксплуатации ветропарка в Калининградской области // Москва – Электричество. - 2018. №8 – С 4-11.

2. Белей В.Ф. Задорожный А.О. Ветроэнергетические установки в условиях холодного климата: новейшие разработки, опыт сооружения и эксплуатации / В.Ф. Белей, А.О. Задорожный // - Энергетик. - 2015. - №10. – С. 42-47.

б) научные статьи, опубликованные в ведущих российских периодических изданиях, рекомендуемых ВАК при Минобрнауки РФ и в международной базе Web of Science:

3. Белей В.Ф., Задорожный А.О. Ветропарки морского базирования: новейшие технологии. Морские интеллектуальные технологии, № 4(38). Т.2. "Труды V Международного балтийского морского форума", НИЦ «МОРИНТЕХ», 2017. – С. 88-92.

в) научные статьи в прочих научных изданиях:

4. Задорожный, А. О. Анализ требований к работе ветроэлектростанций в составе энергосистемы / А. О. Задорожный // Инновации в науке, образование и бизнесе - 2013: XI Междунар. науч. конф. (25-27 сент.): тр.: к 100-летию высш. рыбохоз. образования в России: в 2 ч. / Федер. агентство по рыболовству; ФГБОУ ВПО "КГТУ". - Калининград: ФГБОУ ВПО " КГТУ", 2013. - Ч. 1. – С. 387-389.

5. Белей В.Ф., Задорожный А.О. Тренды мировой и российской ветроэнергетики. Проблемы и перспективы развития электроэнергетики и электротехники: матер. Всерос. науч.-практ. конф. / редкол.: Э.Ю. Абдуллазянов (гл. редактор) и др. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2019. – С. 450-455.

6. Белей В.Ф., Задорожный А.О. Ветроэнергетика России: анализ состояния и перспективы развития. Часть 1. //М. - Энергия: экономика, техника, экология. - №7. С. 19-29.

7. Белей В.Ф., Задорожный А.О. Ветроэнергетика России: анализ состояния и перспективы развития. Часть 2. //М. - Энергия: экономика, техника, экология. - №8. С. 2-15.

8. Белей В.Ф., Задорожный А.О., Решетников Г.А. Перспективы расширения ветропарка в поселке Куликово / МЕЖДУНАРОДНЫЙ БАЛТИЙСКИЙ МОРСКОЙ ФОРУМ. Том 1: материалы VI Международного морского форума. – Калининград: Изд-во БГАРФ, 2018, С.847-851

9. Белей В.Ф., Задорожный А.О. Перспективы использования ветропотенциала в прибрежной зоне Калининградской области / V Международный балтийский морской форум: материалы Международного морского форума. – Калининград: Изд-во БГАРФ, 2017, С. 250-255.

10. Белей В.Ф., Горбатов Д.С., Задорожный А.О. Ветрогидроаккумулирующая электростанция в Калининградской области. / III Балтийский морской форум. Международная научная конференция «Морская техника и технологии. Безопасность морской индустрии»: тезисы докладов. I том. – Калининград: Изд-во БГАРФ, 2015. – С. 102-106.

11. Белей В.Ф., Задорожный А.О. Новейшие области применения ветроэнергетических установок / Симпозиум по направлению образования "Противодействие бедствиям и управление застроенной средой": успешное завершение проекта. Сборник тезисов докладов. Университет Хаддерсфилда, Великобритания, 2015. – С. 12. - ISBN: 978-1-862181-56-4

г) права на интеллектуальную собственность:

12. Государственная регистрация программы для ЭВМ «Программа расчёта параметров обледенения лопастей ветроэнергетических установок в зависимости от метеорологических условий региона». Федеральная служба по интеллектуальной собственности. Номер свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ: № 2017618835 от 10.08.2017.