

## ОТЗЫВ

официального оппонента, доктора технических наук, профессора Герасименко Алексея Алексеевича на диссертационную работу Арефа Махмуда Махрос Амери на тему: «Modeling of renewable energy sources for calculation short current currents of local distribution systems of Egypt» («Моделирование возобновляемых источников энергии при расчёте токов короткого замыкания в локальных распределительных системах Египта»), представленную на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические системы

### 1. Актуальность темы

За последние десятилетия в мировой электроэнергетике наблюдаются кардинальные структурные изменения, вызванные бурным развитием генерирующих объектов, функционирующих на основе использования возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Во многом это связано с развитием силовой электроники и существенным снижением цен на преобразователи электрической энергии, благодаря чему стало возможным и доступным индивидуальное производство электрической энергии. Среди технологий производства электроэнергии с использованием ВИЭ, наиболее быстрыми темпами развивается преобразование энергии ветра и солнца. В большей степени это характерно для регионов с благоприятными для производства электрической энергии на основе использования ВИЭ климатическими условиями (морские побережья, с относительно большой скоростью ветра и страны с достаточно высоким уровнем солнечного излучения).

Египет с его протяжённой береговой линией, практически круглый год безоблачным небом и малыми запасами органических видов топлива, в наибольшей степени удовлетворяет условиям развития распределённой (рассредоточенной) генерации (РГ) на базе ВИЭ. Здесь возобновляемые ресурсы позволяют производить электроэнергию не только индивидуально, но и централизованно, с высокой экономической эффективностью на электростанциях с генерирующими установками, достаточно большой единичной мощности.

Наряду с очевидными положительными характеристиками ВИЭ известны отрицательные стороны их практического применения. Прежде всего, это неопределённость располагаемой мощности источников питания, не позволяющая достаточно точно прогнозировать оперативные режимы локальных электроэнергетических систем (ЛЭЭС), имеющих «слабые» связи с цен-

трализованными распределительными системами. Одним из основных элементов ВИЭ являются конверторы, позволяющие получить переменное напряжение с заданными параметрами напряжения и частоты. Как правило, преобразование энергии осуществляется на основе силовой электроники с дискретными системами управления. Отсюда возникают проблемы обеспечения качества (синусоидальности, необходимого уровня отклонения частоты и напряжения от регламентированных параметров) генерируемой электроэнергии. В результате параметры режима ЛЭЭС во многом зависят от систем управления конверторов и анализ влияния последних на режимы ЛЭЭС является важнейшей научно-исследовательской задачей. Диссертационная работа Арефа М.М.А. посвящена решению именно этой задачи. Основной акцент поставлен на расчёте токов КЗ в ЛЭЭС с ВИЭ. Актуальность работы не вызывает сомнения.

## **2. Структура и объём диссертации**

Представленная диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, и двух приложений. Работа изложена на 164 страницах, содержит 95 рисунков и 20 таблиц, список литературы включает 122 наименования.

*Во введении* обоснована актуальность темы исследования, цели и задачи диссертационной работы.

*В первой главе* достаточно полно представлен информационно-аналитический обзор, позволяющий оценить текущее состояние электросетевого оборудования, в том числе ветроэнергетических установок (ВЭУ) с синхронными генераторами на постоянных магнитах (СГПМ). Представлены их основные функциональные характеристики, в том числе определяющие ток внешнего КЗ. Выявлено, что наибольшее влияние на величину токов КЗ оказывают устройство токовой защиты ВЭУ, устройство защиты от превышения допустимой скорости вращения ротора генератора ВЭУ и функция сохранения генераторного режима ВЭУ при снижении напряжения во внешней цепи. Показано, что во многом функциональные свойства ВЭУ определяются структурной схемой преобразователя напряжения (back-to-back converter). Защиту от импульсов перенапряжения обеспечивает конденсатор в цепи постоянного тока. На основе исследований в среде Симулинк-Матлаб показано, что за счёт предварительного накопления энергии выходной ток ВЭУ остается достаточно большим ещё в течение некоторого времени после завершения процесса короткого замыкания.

*Во второй главе* рассматриваются специфические особенности солнечных фотоэлектрических устройств (СФЭУ). Для их детального изучения разработан программно-аппаратный симулятор, состоящий из микроконтроллера, встроеного в Симулинк- Матлаб. Показано, что на величину тока КЗ максимальное воздействие оказывают вольт-амперные характеристики СФЭУ и построенная на их основе характеристика максимальной мощности. Выполнен анализ характеристик фильтра, предназначенного для обеспечения синусоидальности выходного напряжения. Представлен алгоритм управления СФЭУ в нормальных и аварийных (в том числе при КЗ) режимах работы ЛЭЭС.

*В третьей главе* представлен анализ связанных с КЗ переходных процессов гибридных ЛЭЭС, имеющих в своём составе подсистемы как постоянного, так и переменного токов. При этом объекты ЛЭЭС, а также системы аккумулирования электроэнергии могут быть подключены в различных точках распределительной сети каждой из подсистем. Большая часть электроэнергии от источников генерации на постоянном токе преобразуется для электропотребления на переменном токе. Связь сетей постоянного и переменного тока осуществляется через конверторы DC/DC, DC/AC и AC/DC. Наличие нагрузки постоянного тока позволяет снизить мощность преобразовательных устройств DC/AC, что приводит не только к экономии затрат, но и к снижению токов КЗ в сети переменного тока. В то же время появление новой подсистемы требует анализа режимов сети постоянного тока, в том числе и анализа переходных процессов при появлении и отключении КЗ. Использование распределительных сетей постоянного тока действительно может повысить эффективность системы передачи и потребления электроэнергии. Концепция использования распределительных сетей постоянного тока, представляет собой одно из возможных направлений развития электроэнергетических систем и ее детальное изучение представляет научную ценность.

*В четвертой главе* представлен разработанный автором метод расчёта тока КЗ в ЛЭЭС с конверторами. Метод основан на дифференциации математической модели в зависимости от уровня напряжений на выходе конвертора. Это позволяет максимально учесть специфику работы систем управления конверторов. Метод апробирован на тестовой схеме IEEE-33. Правомочность метода доказана сопоставительными расчётами в среде Симулинк-Матлаб.

К работе прилагается официально разосланный в установленные сроки автореферат диссертации на 23 страницах.

### **3. Степень обоснованности и достоверности научных выводов, положений и рекомендаций**

Достоверность и обоснованность сделанных в диссертационной работе научных выводов и рекомендаций достаточно убедительно подтверждена использованием системного подхода, а также методов теории электроэнергетических систем. Корректность и эффективность разработанных моделей и методов оценивалась проведением численных экспериментов на тестовых и реальных схемах и подтверждена непротиворечивостью полученных результатов и теоретических выводов, во многом совпадающих с решениями, применяемыми в практике. Полученные по авторской методике значения токов КЗ корреспондируются с результатами испытаний реальных устройств ВИЭ с конверторами. Следует рекомендовать использование предложенной методики при расчетах токов КЗ реальных распределительных сетей.

Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций, содержащихся в диссертации, отвечает требованиям, предъявляемым к научным квалификационным работам.

### **4. Новизна научных результатов**

Для решения задач по изучению нормальных и аварийных режимов местных электрических сетей выполнено много исследований, разработаны известные методы расчётов симметричных и несимметричных токов КЗ. В меньшей степени исследована специфика устройств и систем управления ВИЭ с конверторами на базе силовой электроники, их воздействие на параметры нормальных и аварийных режимов распределительных сетей среднего и низкого напряжения. Поставленная автором цель диссертационного исследования «разработка методики и алгоритма расчёта токов КЗ в локальных электрических системах с распределённой генерацией на ВИЭ» может рассматриваться как выполненная. Решая указанную задачу, соискатель предложил метод, позволяющий установить взаимосвязь параметров системы управления конверторов с уровнем токов КЗ. Автором предложен максимально адаптированный для ВИЭ с конверторами алгоритм расчёта токов КЗ, основанный на дифференциации математической модели в зависимости от уровня напряжений на выходе конвертора.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- Разработана методика учёта токоограничивающих свойств генерирующих устройств на ВИЭ при расчётах токов КЗ в локальных электроэнергетических системах.
- Предложена структурно-математическая модель электрогенерирующих устройств на базе ВИЭ с преобразователями и системами управления для анализа их работы в режиме КЗ.
- Разработана математическая модель ЛЭЭС с распределённой генерацией на базе ВИЭ.
- Разработана математическая модель отслеживания траектории максимальной мощности, как определяющей функции симулятора СФЭУ;

## **5. Практическая значимость работы**

Работа полностью ориентирована для решения основных технических проблем, вызванных внедрением в энергосистеме Египта распределённой генерации на базе ВИЭ. Разработанные программные процедуры расчётов токов коротких замыкания, в том числе в системах с ВИЭ, могут быть использованы в учебном процессе и стать основой при разработке программного комплекса расчёта нормальных и аварийных режимов в локальных ЭЭС с РГ на базе ВИЭ с конверторами.

## **6. Апробация работы и подтверждение опубликования основных положений работы**

Результаты исследований апробированы участием автора на 8 международных и всероссийских научно-практических конференциях (2016-2019 гг.). По результатам исследования опубликовано 8 научных работ, из них 4 статьи опубликованы в рецензируемых научных изданиях, определённых ВАК и Аттестационным советом УрФУ, включая 3 статьи в зарубежных изданиях, входящих в международные базы цитирования Web of Science и Scopus.

Автореферат в полной мере отражает содержание диссертационной работы.

## **7. Соответствие диссертации критериям «Положения о присуждении ученых степеней»**

Диссертационная работа Арефа Махмуда Махрос Амери на тему: «Modeling of renewable energy sources for calculation short current currents of local distribution systems of Egypt» («Моделирование возобновляемых источников энергии при расчете токов короткого замыкания в локальных распре-

делительных системах Египта») в полном объеме отвечает критериям, которые указаны в п. 9-14 Положения о присуждении учёных степеней в УрФУ.

Диссертация является научно-квалификационной работой, в которой автором предложено новое научно обоснованное техническое решение в виде разработанных моделей и методов расчёта токов КЗ в локальных электрических системах с ВИЭ.

Диссертация написана автором самостоятельно, обладает внутренним единством, содержит новые научные результаты и положения, выдвигаемые для публичной защиты, что свидетельствует о личном вкладе автора диссертации в науку. В диссертации имеются сведения о практической полезности результатов и рекомендации по использованию научных выводов. Полученные решения и выводы аргументированы.

Содержание диссертационной работы соответствует паспорту научной специальности 05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические системы по следующим пунктам:

- п. 2 «Разработка методов анализа режимных параметров основного оборудования электростанций»;
- п. 3 «Разработка методов расчёта, прогнозирования, оптимизации и координации уровней токов короткого замыкания на электростанциях и в электрических сетях энергосистем»;
- п.6 «Разработка методов математического и физического моделирования в электроэнергетике»;
- п. 9 «Разработка методов анализа и синтеза систем автоматического регулирования, противоаварийной автоматики и релейной защиты в электроэнергетике»;
- п.10. «Теоретический анализ и расчётные исследования по транспорту электроэнергии переменным и постоянным током, включая проблему повышения пропускной способности транспортных каналов»;
- п.13 «Разработка методов использования ЭВМ для решения задач в электроэнергетике».

Основные положения опубликованы в 8 печатных работах, в том числе в 4 работах, опубликованных в рецензируемых научных изданиях, определенных ВАК и Аттестационным советом УрФУ, включая 3 статьи в зарубежных изданиях, входящих в международные базы цитирования Web of Science и Scopus.

Диссертация отвечает требованию указания ссылок на заимствованные материалы или отдельные результаты.

## 8. Основные замечания по работе

1. В работе констатируется, что из-за неадекватного учёта специфики, функциональных характеристик источников питания на базе ВИЭ возникают существенные погрешности расчёта токов КЗ. Какое достигнуто уточнение соответствующих величин токов КЗ при учёте этой специфики источников распределённой (рассредоточенной) генерации, например систем управления конвектором генераторов ВЭУ, при сопоставлении с результатами расчёта токов КЗ с традиционными источниками питания?

2. Переход от автоматизированных систем к автоматическим системам управления режимами в реальном времени, расчётный анализ нормальных и послеаварийных режимов подсистем, работающих изолированно со значительными небалансами активной мощности, возникающими в послеаварийных режимах, предполагает учёт статических характеристик электрических нагрузок, в первую очередь, по частоте напряжения, что не нашло отражения в диссертации.

3. Как эффективны предложенные в диссертации решения по управлению и контролю скорости вращения роторов и стабилизации частоты применительно к местным подсистемам, работающих изолированно в послеаварийных режимах?

4. Наряду с контрольными расчётами нормальных и послеаварийных режимов по тестовым схемам IEEE не менее целесообразным, а главное – целевым, должен быть выполнен расчётный анализ для характерных местных ЭЭС Египта, что не нашло отражения в работе.

5. Применённая терминология в виде «максимально эффективного режима работы» и, особенно, «оптимальной скорости вращения» ротора генераторов ВЭУ требуют пояснения, в частности, оптимальной по какому критерию? Как применение этих терминов обосновано в диссертационной работе?

6. Некорректные формулировки и определения. 6.1. Отдельно, наряду с методом Ньютона выделен «метод последовательных приближений»; однако других методов, другого направления решения систем нелинейных уравнений, в том числе и уравнений установившихся режимов, как последовательные (итерационные) приближения, не существует; 6.2. В отечественной литературе применяется со времён формирования ЭЭС классическая терминология «местные электрические сети» и известны соответствующие названия учебников, а не локальные (lokal, local - нем., англ.) сети и системы; 6.3. Более точным и менее уязвимым по происхождению, чем «распределённая

(кем?) генерация», хотя и менее распространённым является сочетание «рассредоточенные источники», «рассредоточенная выработка (генерация)»; 6.4. Не следует вместо естественного сочетания в «режиме выдачи (генерации) и потребления электроэнергии» вводить терминологию внешнеэкономических операций «экспорта-импорта» электроэнергии, а также акцентировать «солнечная радиация», тем более вводить в употребление «солнечная инсоляция»; для определения соответствующих интегральных и мгновенных характеристик солнечной активности использовать более спокойное выражение – «солнечное излучение»; 6.5. Не следует также пропагандировать сомнительные нововведения (в подрисуночных подписях и таблицах) с нарушениями синтаксических норм правописания.

Замечания существенно не влияют на основные научные и теоретические результаты диссертации и имеют уточняющий, рекомендательный характер.

## **9. Общее заключение**

Представленная диссертационная работа Арефа Махмуда Махрос Амери является самостоятельной, законченной научно-квалификационной работой, в которой содержится новое научно обоснованное техническое решение задачи развития локальных электроэнергетических систем с ВИЭ. Обладает внутренним единством, научной новизной и практической значимостью.

Разработанные модели и методы расчёта токов КЗ в местных электрических сетях с ВИЭ являются решением важной научно-технической задачи отраслевого значения. Предложенные автором диссертации решения достаточно аргументированы.

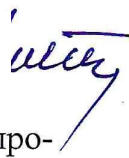
Содержание диссертации полностью соответствует поставленным задачам и отражает последовательность их решения. Работа базируется на достаточном числе исходных данных, примеров и расчётов, написана логичным, понятным языком, по каждой главе в работе сделаны чёткие и аргументированные выводы.

Основные научные результаты диссертации изложены в 8 печатных работах, опубликованных как в соавторстве, так и самостоятельно, 4 из них в изданиях, рекомендованных ВАК. Результаты работы докладывались на 8 конференциях и семинарах различного уровня. Автореферат соответствует основному содержанию диссертации и разработанным теоретическим положениям, научной новизне полученных результатов и их практической значимости с учётом сведений об апробации, публикациях и внедрении.



Это даёт основание утверждать, что диссертационная работа на тему: «Modeling of renewable energy sources for calculation short current currents of local distribution systems of Egypt» («Моделирование возобновляемых источников энергии при расчёте токов короткого замыкания в локальных распределительных системах Египта») полностью соответствует требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, соответствует требованиям п. 9 Положения о присуждении учёных степеней в УрФУ, а её автор Ареф Махмуд Махрос Амери заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические системы.

Официальный оппонент



Герасименко  
Алексей Алексеевич

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Электрические станции и электроэнергетические системы»,




Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский федеральный университет»

660049, Россия, г. Красноярск  
ул. Ленина, д. 70.;

Телефон: +7-960-758-67-99;  
e-mail: GerasimenkoAA@yandex.ru

Дата \_15. 05. 2020

Подпись Герасименко А.А. заверяю

Подпись    
его отдела   
05 / 20 20.

