

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

Николаева Александра Аркадьевича, кандидата технических наук, доцента, заведующего кафедрой автоматизированного электропривода и мехатроники федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»

на диссертационную работу **Иванова Ильи Алексеевича** «Синтез алгоритмов управления автономными генерирующими комплексами на основе синхронных генераторов с постоянными магнитами из условия устойчивой работы», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности
2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

На отзыв представлена диссертация и автореферат «Синтез алгоритмов управления автономными генерирующими комплексами на основе синхронных генераторов с постоянными магнитами из условия устойчивой работы». Диссертация состоит из введения, четырех глав, основных результатов и выводов, заключения, списка литературы и приложений. Работа изложена на 198 страницах машинописного текста, содержит 149 рисунков и 9 таблиц, списка литературы из 133 наименования.

1. Актуальность темы исследования

Своевременные тенденции перехода к возобновляемой энергетике и децентрализованному энергосбережению позволяют решать задачи доступного и надежного электроснабжения потребителей электроэнергии. При создании таких электротехнических комплексов возникают вопросы устойчивого функционирования каждого ключевого компонента, находящегося в энергосистеме. Эта задача становится особо актуальной при отсутствии возможности балансирования потоков мощности, когда потребитель является автономным относительно внешней энергосистемы. Из-за большого разнообразия возможных источников энергии и топологий преобразователей для создания общей шины напряжения, становится актуальной задача объединения их в единую систему автоматического управления. Также возникает вопрос унификации подходов к синтезу системы управления полупроводниковыми преобразователями и разработки их общих методик синтеза. Очевидно, что для решения задач подобного класса необходим поиск такого закона управления и методики синтеза электротехнического комплекса системы энергоснабжения автономного потребителя, который, в первую очередь, позволит обеспечить его устойчивое функционирование при широком наборе варьируемых параметров.

Диссертация Иванова Ильи Алексеевича посвящена важной проблеме синтеза алгоритмов управления автономными генерирующими комплексами. Актуальность темы исследования определяется существующими требованиями к устойчивому функционированию подсистем электротехнического комплекса системы энергоснабжения автономного потребителя. Идеи, положенные при практической реализации работы, базируются на схмотехнических и алгоритмических изменениях и корректирующих устройствах в составе электротехнического комплекса. В связи с этим, тема диссертационной работы Иванов Ильи Алексеевича является **актуальной**.

2. Оценка структуры и содержания работы

Краткая характеристика работы. Содержание и структура диссертационной работы соответствуют поставленной цели и задачам исследования. Используемая в диссертационной работе терминология и стиль изложения материала соответствуют общепринятым нормам.

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована цель и идея работы, поставлены задачи исследования, показаны научная новизна, практическая и теоретическая значимость работы, а также научные положения, выносимые на защиту. Представлены методология и методы исследования, достоверность научных положений, реализация и внедрение полученных результатов, апробация и публикации по теме диссертационной работы.

В первой главе диссертации проведен анализ процессов в электротехническом комплексе электроснабжения автономного потребителя, на основании которого была определена его базовая структура и алгоритмические принципы построения. Автором приводятся наиболее распространенные архитектуры и топологии электротехнических комплексов систем электроснабжения автономного потребителя, полупроводниковой преобразовательной техники и типовых источников электрической энергии.

Вторая глава диссертации посвящена анализу существующих методик синтеза систем автоматического управления полупроводниковыми преобразователями постоянного напряжения. Рассмотрены различные способы синтеза цифровой системы автоматического управления преобразователя постоянного напряжения. Сделан вывод об универсальности методик расчета параметров регуляторов и структуры систем автоматического управления DC/DC-преобразователей различного типа.

В третьей главе диссертационной работы выполнено исследование возникновения неустойчивых режимов работы полупроводниковых преобразователей при использовании активно-индуктивного источника электропитания с противо-ЭДС. Были получены аналитические зависимости определения областей неустойчивого функционирования, а также предложены методы компенсации таких режимов работы.

Четвертая глава диссертации посвящена доказательству существования неустойчивых областей работы электротехнического комплекса системы энергоснабжения автономного потребителя с питанием от активно-индуктивного источника с противо-ЭДС, а также подтверждению корректного функционирования методов компенсации возникновения режимов неустойчивой работы полупроводниковых преобразователей. Исследования проводились при использовании, как компьютерного моделирования в математическом пакете SimInTech, так и полунатурных экспериментов с применением метода программно-аппаратного моделирования Hardware-in-the-Loop (HIL).

В заключении обобщены результаты проведенных в рамках диссертационной работы исследований.

3. Достоверность, обоснованность и научная новизна основных результатов работы

Достоверность научных результатов подтверждается результатами компьютерного моделирования с применением современных программных средств и апробацией основных научных результатов на научно-технических конференциях. Результаты исследований получе-

ны с использованием общепринятых допущений и методик анализа. Теоретические положения и выводы в диссертации научно обоснованы.

По мнению официального оппонента, научная новизна диссертационной работы состоит в следующем:

1. Получены результаты теоретических исследований, доказывающие возможность применения универсальной методики синтеза системы автоматического управления преобразователей постоянного напряжения различных типов (повышающего, понижающего, неизолированного двунаправленного и изолированного двунаправленного), обеспечивающей достижение заданных показателей качества регулирования.

2. Разработана методика определения границы устойчивости электротехнического комплекса системы электроснабжения автономного потребителя, учитывающая параметры первичного и вторичного электрических контуров преобразователя постоянного напряжения при работе с активно-индуктивным источником энергии с противо-ЭДС, например, синхронным генератором с постоянными магнитами. Методика позволяет определить зоны устойчивой работы электротехнического комплекса на основании анализа свойств характеристического полинома эквивалентной передаточной функции, описывающей анализируемую систему, с применением критерия устойчивости Рауса-Гурвица. На основании выявленных зон неустойчивой работы комплекса формируются логические условия для области допустимых значений параметров электрических контуров преобразователей постоянного напряжения, обеспечивающих необходимую устойчивость.

3. Разработаны схемотехнический и алгоритмический способы обеспечения устойчивой работы электротехнического комплекса системы электроснабжения автономного потребителя. Данные способы отличаются от существующих тем, что устойчивость обеспечивается комбинированным изменением электрических параметров преобразователя постоянного напряжения (емкости силового входного фильтра) и параметров его системы автоматического управления. При этом заведомо не организуются функциональные зоны ограничения мощности электротехнического комплекса, что обеспечивает уменьшение энергетических и массогабаритных показателей элементов системы электроснабжения. Разработанные способы позволяют снизить ёмкость входного силового фильтра преобразователя постоянного напряжения не менее чем на 200%.

4. Теоретическая и практическая значимость результатов диссертации

Теоретическая значимость работы заключается в следующем: 1) получена новая методика выделения областей неустойчивой работы электротехнического комплекса системы электроснабжения автономного потребителя, учитывающая совокупность параметров источника электрической энергии, силового полупроводникового преобразователя, системы управления и нагрузки; 2) разработаны новые схемотехнический и алгоритмический способы обеспечения устойчивой работы электротехнического комплекса системы электроснабжения автономного потребителя; 3) доказана возможность применения универсальной методики синтеза системы автоматического управления преобразователей постоянного напряжения различных типов (повышающего, понижающего, неизолированного двунаправленного и изолированного двунаправленного).

Практическая значимость работы заключается: 1) в повышении устойчивости и надежности работы электротехнических комплексов систем электроснабжения автономного потребителя с преобразователями постоянного напряжения различного типа, подключенными к общей промежуточной шине постоянного напряжения, к которым могут относиться низкоэнергетические объекты, работающие отдельно от внешней электроэнергетической системы, например, электрический транспорт с выработкой и потреблением электрической энергии на борту; 2) в снижении массогабаритных показателей и стоимости компонентов преобразователей постоянного напряжения, достигаемых, например, при снижении емкости входного силового фильтра преобразователя на 200% по сравнению с традиционными техническими решениями; 3) в упрощении настройки регуляторов систем автоматического управления силовыми преобразователями постоянного напряжения различного типа за счет применения универсальной методики синтеза систем управления.

Полученные результаты исследований могут быть использованы на предприятиях, проектирующих или производящих преобразовательную технику и элементы автоматики для электротехнических комплексов систем электроснабжения автономного потребителя. Результаты исследований могут быть востребованы в научной работе и образовательном процессе в профильных высших учебных заведениях.

Также необходимо отметить, что полученные теоретические и практические результаты диссертации нашли свое применение в научно-исследовательских по тематике диссертации, исполнителем которых являлся соискатель.

5. Подтверждение достаточной полноты публикаций основных положений результатов, выводов и заключения. Соответствие автореферата содержанию диссертации.

Содержание диссертации раскрыто в 9 основных работах, из них: 2 научные статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 7 научных публикаций в изданиях, индексируемых в наукометрической системе Scopus, в том числе в журнале *Q1*. В представленных публикациях достаточно полно отражены все основные результаты диссертации. Автореферат отражает содержание диссертационной работы.

6. Соответствие диссертации паспорту научной специальности

Диссертация соответствует паспорту научной специальности 2.4.2 Электротехнические комплексы и системы по техническим наукам, а именно: 1) п. 1 Развитие общей теории электротехнических комплексов и систем, анализ системных свойств и связей, физическое, математическое, имитационное и компьютерное моделирование компонентов электротехнических комплексов и систем, включая электромеханические, электромагнитные преобразователи энергии и электрические аппараты, системы электропривода, электроснабжения и электрооборудования; 2) п.3 Разработка, структурный и параметрический синтез, оптимизация электротехнических комплексов, систем и их компонентов, разработка алгоритмов эффективного управления; 3) п. 4 Исследование работоспособности и качества функционирования электротехнических комплексов, систем и их компонентов в различных режимах, при различных внешних воздействиях, диагностика электротехнических комплексов.

7. Вопросы и замечания по диссертационной работе и автореферату

1. В диссертации и автореферате указано, что общее количество публикаций автора по теме диссертации – 38. В списке литературы диссертации присутствуют 37 позиций из 38, т.е. пропущена 1 публикация. В автореферате диссертации приведены только 9 основных трудов. В диссертации и автореферате нет ссылок на 4 патента на полезную модель и 4 патента на изобретение, которые отмечены в результатах работы на стр. 11 диссертации и стр. 7 автореферата. Данные патенты следовало бы показать, т.к. они могут являться важным результатом интеллектуальной деятельности соискателя.

2. Как во введении диссертации, так и в автореферате, в п. 3 научной новизны и в п.3 положений, выносимых на защиту, имеется разночтение. В научной новизне обозначены новые схемотехнический и алгоритмический **методы** обеспечения гарантированной устойчивости процессов в электротехническом комплексе системы электроснабжения автономного потребителя, при этом в положениях, выносимых на защиту, – схемотехнический и алгоритмический **способы** компенсации неустойчивого режима работы электротехнического комплекса системы электроснабжения автономного потребителя. При этом в теоретической и практической значимости работы данные методы (способы) не упомянуты.

3. В главе 1 приведены типовые функциональные схемы систем электроснабжения с общей переменной шиной, с промежуточной шиной переменного тока высокой частоты, промежуточной шиной постоянного тока. Следовало бы привести конкретные примеры электротехнических комплексов, действующих на промышленных предприятиях, либо в составе низкоэнергетических объектов, работающих вне магистральной сети и соответствующих принципам microgrid, с более подробным описанием схем электроснабжения, параметров генераторов различного типа, силовых преобразователей, накопителей энергии, электрических нагрузок и т.д.

4. Во 2 главе диссертации описаны известные методики расчета параметров регуляторов систем автоматического регулирования преобразователей постоянного напряжения (повышающего, понижающего, неизолированного двунаправленного и изолированного двунаправленного). Сделан вывод об универсальности подхода к расчету параметров САР данных преобразователей независимо от их типа. Однако в главе не приведен анализ структуры реальных САР DC/DC преобразователей, ведущих фирм-производителей оборудования, таких как: Siemens, ABB, Schneider Electric, Sungrow, Huawei, General Electric и др. Было бы полезно показать какие типы САР DC/DC преобразователей используются в реальных промышленных устройствах. Во всех ли случаях САР для преобразователей постоянного напряжения представляют собой простую двухконтурную систему подчиненного регулирования с внутренним контуром регулирования тока и внешним контуром регулирования выходного напряжения? Кроме того в главе 2 было бы полезно подробнее рассмотреть существующие способы обеспечения устойчивости работы преобразователей постоянного напряжения, которые разработаны ранее и используются в серийных силовых преобразователях.

5. В 3 главе диссертации при математическом описании математической модели генерирующего комплекса (стр.64-67) синхронный генератор с постоянными магнитами пред-

ставлен упрощенно в виде источника ЭДС с последовательно включенным активным сопротивлением и индуктивностью статорной обмотки. Схема замещения генератора принята однофазной. Также на стр. 66 отмечено, что влиянием механических параметров генератора также можно пренебречь из-за значительной механической инерции. Кроме того, на данном этапе исследований при составлении математической модели электротехнического комплекса не учтены параметры двухконтурных САР преобразователей постоянного напряжения. В результате передаточная функция исследуемого электротехнического комплекса представлена упрощенно в виде динамического звена с передаточной функцией, содержащий характеристический полином 2-го порядка. Следовало бы провести дополнительные исследования, доказывающие возможность использования данных допущений, либо привести отдельное обоснование со ссылками на публикации, где возможность применения данных допущений уже была доказана.

6. В 3 главе на стр. 67 сказано, что в основу анализа устойчивости систем электроснабжения автономного потребителя положен алгебраический критерий Рауса-Гурвица. На основании данного критерия в дальнейшем определены границы устойчивости для первичного и вторичного электрических контуров преобразователя постоянного напряжения в функции мощности нагрузки. На основании этих исследований разработана методика определения области неустойчивого состояния электротехнического комплекса. Однако необходимо отметить, что алгебраический критерий Рауса-Гурвица является упрощенным и затрудняет численную оценку запасов устойчивости динамических систем. Для точной оценки устойчивости систем дополнительно применяют, например, частотные критерии устойчивости: критерий Найквиста и основанные на нем логарифмические критерии с анализом ЛАЧХ и ЛФЧХ. В работе не сказано, почему можно использовать только один критерий Рауса-Гурвица для оценки устойчивости систем электроснабжения автономного потребителя.

7. В главе 3 диссертации на рис. 3.4, 3.5, 3.7, 3.9, 3.11 приводятся графики с кривыми и границами устойчивости, также приводятся графики с добавочным коэффициентом к емкости преобразователя (рис 3.12), где фигурируют фактические значения мощности и сопротивлений нагрузки, напряжения и емкости преобразователя. При этом в главе 3 не приведена информация об исходных параметрах электротехнического комплекса, для которого выполнен анализ устойчивости (величина ЭДС генератора E , значения индуктивности L_g и активного сопротивления R_g генератора, номинальных токах преобразователя, коэффициенте передачи преобразователя K , исходных значений емкости фильтров преобразователя C_1 и C_2 , а также сопротивления R_1). Значения параметров комплекса впервые упоминаются в главе 4 (в табл. 4.1), при этом отсутствуют параметры синхронного генератора с постоянными магнитами: E , L_g , R_g . Получены ли указанные выше графики на рис. 3.4, 3.5, 3.7, 3.9, 3.11 с использованием этих параметров или расчет выполнялся на основе других исходных данных?

8. В главе 4 диссертации в п.4.3 приводится описание результатов моделирования режимов работы стабилизаторов напряжения при питании от активно-индуктивного источника энергии с ЭДС. Сказано, что был выполнен переход от модели синхронной машины с постоянными магнитами, работающей на выпрямитель к машине постоянного тока, чьи параметры были бы эквивалентны, при этом возможность данного эквивалентирования подробно не

раскрыта. Кроме того, в дальнейшем не приведены электрические параметры эквивалентного генератора постоянного тока, используемого в имитационной модели.

9. В главе 4 диссертации при анализе и разработке мероприятий по обеспечению устойчивости электротехнического комплекса электроснабжения автономного потребителя на имитационной модели используются параметр «частота сопряжения внешнего контура регулирования напряжения ω_c », также анализируются графики переходных процессов напряжений и токов DC/DC преобразователя при различных параметрах комплекса. На основании этих данных анализируется устойчивость комплекса. Было бы полезным использовать анализ ЛАЧХ и ЛФЧХ исследуемой системы с целью более наглядного объяснения запасов устойчивости по фазе и амплитуде, а также привести сводную таблицу с динамическими показателями качества регулирования напряжения и тока DC/DC преобразователя для различных режимов работы комплекса, т.к. на представленных графиках переходных процессов нет обозначений этих показателей.

10. В главе 4 в п. 4.4. приведены результаты экспериментальных исследований режимов работы комплекса электроснабжения автономного потребителя в рамках полунатурного эксперимента по методике Hardware-in-the-loop с использованием микроконтроллера STM, программный код для которого сгенерирован в математическом пакете SimInTech. На основании исследований делается вывод, что результаты эксперимента соответствуют результатам моделирования. Однако результаты моделирования следовало бы проверять на полноценной физической модели комплекса с настоящими элементами: синхронным генератором с постоянными магнитами, DC/DC преобразователем с цифровой САР, а также электрической нагрузкой. Непонятно в чем заключается ценность эксперимента, когда сравниваются результаты моделирования эффективности работы алгоритмов управления в программе SimInTech с той же самой моделью, только реализованной на аппаратном микроконтроллере STM. Если математическая модель в обоих случаях одинакова, то и результаты моделирования и эксперимента будут схожие. Проведение полунатурного эксперимента имеет смысл в том случае, когда аппаратная HIL-модель в виде цифрового двойника или цифровой тени уже верифицирована путем сравнения с результатами экспериментальных исследований на действующем электротехническом комплексе. В этом случае HIL-модель может заменить исследуемый элемент промышленного электротехнического комплекса и ее можно использовать для сравнения с другими математическими и компьютерными моделями, либо для настройки САР, когда САР реализуется, например, в математических пакетах SimInTech или Matlab, а объект регулирования – комплекс из генератора, DC/DC-преобразователя, электрической нагрузки, реализован в виде HIL-модели.

11. В диссертации подробно не рассмотрены вопросы устойчивости при параллельной работе нескольких DC/DC преобразователей на промежуточную шину постоянного напряжения. Является ли обеспечение устойчивости отдельных элементов комплекса, включающих в себя синхронный генератор и DC/DC-преобразователь, достаточным условием устойчивости всего комплекса из группы DC/DC-преобразователей, присоединенных к общей шине постоянного напряжения? Заключение о том, что система будет устойчивой, если все уз-

лы, работающие на формирование напряжения на шине постоянного тока, также будут устойчивы, представленное в 3 главе на стр. 64, приведено без дополнительных разъяснений.

Необходимо отметить, что вопросы и замечания, несмотря на их важность, не снижают значимость основных результатов диссертационной работы.

8. Заключение

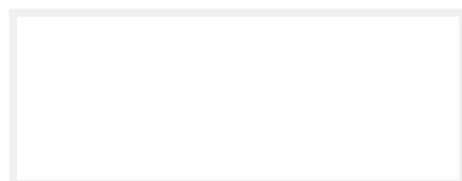
Диссертационная работа Иванова Ильи Алексеевича «Синтез алгоритмов управления автономными генерирующими комплексами на основе синхронных генераторов с постоянными магнитами из условия устойчивой работы» представляет собой законченную научно-квалификационную работу, содержащую новое решение актуальной научно-технической задачи по обеспечению устойчивости работы элементов электротехнического комплекса электроснабжения автономного потребителя, в частности, устойчивой работы преобразователей постоянного напряжения (DC/DC-преобразователей) различного типа, подключенных к общей шине постоянного напряжения, при возникновении возмущающих воздействий со стороны электрической нагрузки.

Работа соответствует требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям в соответствии с пунктами 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней» (постановление Правительства РФ №842 от 24 сентября 2013 г. с изменениями и дополнениями), а её автор, Иванов Илья Алексеевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы.

Официальный оппонент

Заведующий кафедрой автоматизированного электропривода и мехатроники, канд. техн. наук, доцент

(кандидатская диссертация Николаева А.А. защищена по научной специальности 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы)



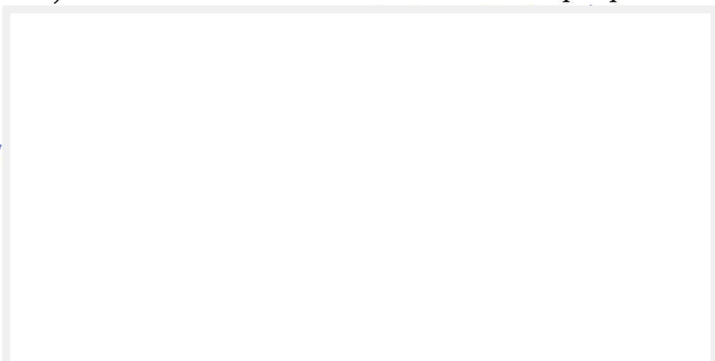
Николаев Александр Аркадьевич

Отзыв получен 25 мая 2026

М.А. / Д.В.И. М.А.

С отзывом ознакомлен

Иванов И.А.
Подпись Николаева А.А. заверяю:



Сведения об организации: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». Адрес: 455000, Россия, Челябинская область, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38, тел.: +7 (3519) 29-84-02, факс: +7 (3519) 23-92-35, e-mail: mgtu@mgtu.ru, веб-сайт: <https://www.mgtu.ru>.