

На правах рукописи



**Беляев Николай Александрович**

**СИНТЕЗ СИСТЕМ АДАПТИВНОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ ГЕНЕРАТОРОВ С  
ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТЬЮ НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ АВТОМАТИЧЕСКОГО  
УПРАВЛЕНИЯ С ЭТАЛОННОЙ МОДЕЛЮ**

Специальность 05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические системы

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Томск – 2015

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ФГАОУ ВО НИ ТПУ)

**Научный руководитель:**

**Хрущев Юрий Васильевич,**  
доктор технических наук, профессор

**Официальные оппоненты:**

**Паздерин Андрей Владимирович,**  
доктор технических наук, профессор,  
федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего  
профессионального образования «Уральский  
федеральный университет имени первого  
Президента России Б.Н. Ельцина», заведующий  
кафедрой «Автоматизированные электрические  
системы»

**Тонышев Владимир Федорович,**  
кандидат технических наук, доцент,  
федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
образования «Сибирский государственный  
университет водного транспорта», профессор  
кафедры «Электроэнергетические системы и  
электротехника»

**Ведущая организация:**

федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
образования «Новосибирский государственный  
технический университет»

Защита состоится «07» октября 2015 года в 15<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета Д 212.269.10 при ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» и на сайте:  
<http://portal.tpu.ru/council/2800/worklist>

Автореферат разослан «21» августа 2015 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.269.10



**А.В. Кабышев**

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Проблема и актуальность.** Разработка и создание современных устройств автоматического управления режимами работы электроэнергетической системы в целом и отдельных ее элементов в частности представляют одно из основных направлений совершенствования электроэнергетической отрасли. Важной задачей этого направления является автоматизация управления режимами работы генерирующего оборудования и, в частности, задача синтеза адаптивных систем автоматического управления процессами точной синхронизации генераторов с электрической сетью (ЭС). Решение этой задачи позволяет повысить качество сопровождающих переходных процессов и предотвратить излишний износ оборудования, вызванный последствиями несинхронного включения генераторов.

Значительный вклад в исследование процессов включения на параллельную работу генераторов с сетью, а также частей энергосистем внесли: А.А. Хачатуров, Л.Г. Мамиконянц, В.А. Веников, Е.Л. Сиротинский, М.Л. Thompson, J.C. Gomez, М.М. Morgos и др. Подробно рассмотрены принципы работы устройств синхронизации в работах Н.И. Овчаренко, А.Ф. Дьякова, М.А. Берковича, В.А. Гладышева, В.А. Семенова.

В настоящее время серийно выпускаемые и устанавливаемые на электростанциях устройства точной синхронизации генераторов в целом удовлетворяют предъявляемым к ним требованиям. В то же время алгоритмы функционирования этих устройств обладают рядом недостатков, основным из которых является отсутствие формализованной процедуры перевода параметров синхронизации к конечным значениям. Указанный недостаток приводит к непредсказуемости получаемых результатов и возможной неуспешности синхронизации в целом. Декомпозиция процесса управления, возникающая в результате выделения этапа подгонки частот и этапа ожидания момента совпадения фазовых углов напряжений синхронизируемых объектов, приводит к относительно высокой длительности, неопределенности результатов синхронизации при возникновении возмущений, а также к необходимости смещения целевых условий синхронизации в направлении понижения качества. Последнее свойство вызвано необходимостью обеспечения некоторой ненулевой величины скольжения для вращения векторов напряжений синхронизируемых объектов в процессе ожидания момента совпадения фаз. Влияние возникающих в ходе процесса синхронизации возмущений способно приводить как к ускорению процесса, так и к существенному увеличению его длительности.

Особое значение этот вопрос приобретает в послеаварийных режимах, когда происходит деление сети и выделение на изолированную работу дефицитной части электроэнергетической системы (ЭЭС). В условиях нестационарности режимных параметров этой части включение дополнительных энергоагрегатов для покрытия дефицита мощности методом самосинхронизации (либо точной синхронизации с расширением допустимых пределов) будет приводить к возникновению дополнительных качаний роторов генераторов и создавать опасность ухудшения режима вплоть до потери синхронизма включаемым и соседними агрегатами.

В Энергетической стратегии России для достижения стратегических целей развития электроэнергетики предусматривается оптимизация структуры генерирующих мощностей, включающая увеличение доли маневренных энергоагрегатов. Важным показателем таких агрегатов является сравнительно

быстрый запуск до состояния холостого хода, что удовлетворяет поставленной цели. Однако применение несовершенных алгоритмов синхронизации способно привести к увеличению длительности включения таких агрегатов в сеть и, как следствие, снижению их маневренности.

Важность совершенствования алгоритмов синхронизации обусловлена и приоритетными направлениями развития электроэнергетики, к которым, в частности, относятся развитие и внедрение автоматизированных подстанций, цифровых устройств автоматики и гибких силовых устройств управления. Применение этих средств предоставляет дополнительные возможности для эффективного управления процессами синхронизации, как отдельных генераторов, так и частей ЭЭС.

**Степень разработанности темы.** В настоящее время исследования в области разработки и совершенствования принципов работы систем автоматической синхронизации в основном направлены на совершенствование и развитие существующих алгоритмов. Принципиально новый подход, предложенный в Томском политехническом университете, заключается в приложении методов автоматического управления с эталонной моделью к задаче синтеза систем синхронизации генератора с электрической сетью. Выполненные ранее исследования применимости данного подхода не содержат проработку алгоритмов управления параметрами синхронизации по построенным программным траекториям движения (ПТД) роторов синхронизируемых генераторов, а в предложенных алгоритмах построения ПТД предусматривается знакопеременное (двухполярное) управление, труднореализуемое с помощью систем регулирования турбин. Открытым остается также вопрос возможности использования существующих измерительных систем.

Изложенные аспекты актуальности совершенствования систем синхронизации объектов ЭЭС и степени разработанности темы определяют цель данной работы.

**Цель работы.** Разработка способа адаптивной синхронизации генераторов с электрической сетью, позволяющего выполнять управление посредством выдачи однополярных управляющих воздействий.

Для достижения этой цели проработан, развит и апробирован на программных моделях подход к синтезу систем синхронизации генераторов с электрической сетью на основе методов автоматического управления с эталонной моделью. При этом решались следующие задачи:

1. Критический анализ эффективности алгоритмов современных средств автоматической синхронизации объектов ЭЭС и определение направлений диссертационной работы.

2. Обоснование способа адаптивной синхронизации генераторов с электрической сетью, позволяющего выполнять управление посредством выдачи однополярных управляющих воздействий.

3. Разработка алгоритмов функционирования основных блоков системы синхронизации с эталонной моделью: блока построения эталонной модели, регулятора, измерительного блока.

4. Моделирование и апробация разработанных алгоритмов при автономной и совместной работе в программном комплексе Mustang и специализированной среде моделирования MATLAB Simulink.

**Идея работы.** Основной идеей работы является применение методов автоматического управления с эталонной моделью к задаче синтеза систем адаптивной синхронизации генератора с электрической сетью для выполнения

целенаправленного одновременного перевода параметров синхронизации к конечным значениям посредством выдачи однополярных управляющих воздействий.

**Методы исследования.** Решение поставленных в диссертации задач осуществлялось при помощи математического и программного моделирования ЭЭС, вычислительных экспериментов, применения методов дифференциального исчисления, теории электрических машин, электромеханических переходных процессов, а также теории автоматического управления.

**Научную новизну диссертации имеют следующие положения, выносимые на защиту:**

1. Способ построения эталонной модели для систем синхронизации генератора с сетью, обеспечивающий перевод управляемых параметров к конечным значениям посредством выдачи однополярных управляющих воздействий.

2. Способ управления, позволяющий осуществлять движение параметров синхронизации по построенным для них траекториям эталонных моделей.

3. Алгоритмы функционирования блока измерения синхронизируемых параметров, позволяющие в пределах двух периодов промышленной частоты осуществлять измерение относительных углов, скоростей и ускорений векторов напряжений в узлах синхронизации объектов.

Научная новизна ряда выполненных значимых разработок подтверждена патентом РФ на изобретение № 2457597.

**Практическая ценность.** Реализация синтезированных систем автоматической точной синхронизации генератора с электрической сетью, основанных на принципах построения систем автоматического управления объектами с эталонной моделью, позволит:

- сократить время, требуемое для выполнения условий синхронизации, и, соответственно, минимизировать задержки во включении генерирующих мощностей в сеть;

- обеспечить работоспособность систем синхронизации в условиях наличия возмущений, вызывающих отклонения параметров синхронизации от эталонной модели, и повысить качество сопровождающих переходных процессов;

- исключить методическую ошибку управления, обусловленную необходимостью смещения целевых условий синхронизации в область понижения качества управления, характерную для существующих систем синхронизации.

**Теоретическая значимость работы.** Полученные результаты представляют собой методическую основу для создания нового класса адаптивных систем автоматического управления динамическими переходами ЭЭС, связанных с необходимостью синхронного объединения их частей.

**Личный вклад автора.** Автором диссертации обоснована актуальность совершенствования современных систем автоматической точной синхронизации генераторов и частей ЭЭС; разработаны алгоритмы работы определяющих блоков систем управления процессами синхронизации с эталонной моделью; выполнена апробация разработанных алгоритмов посредством моделирования в специализированных программных комплексах.

В совместных публикациях вклад автора составляет более 50 %.

**Достоверность научных результатов** подтверждена выбором классических способов синтеза адаптивных автоматических систем управления, сопоставлением с результатами других аналогичных исследований и вычислительными экспериментами с использованием сертифицированных программных средств.

**Апробация работы.** Материалы диссертационной работы демонстрировались, докладывались и обсуждались на международных, всероссийских и университетских конференциях, форумах и семинарах: I университетской конференции студентов Элитного технического образования «Ресурсоэффективным технологиям – энергию и энтузиазм молодых» (Томск, 2010); II Международной научно-практической конференции молодых учёных «Ресурсоэффективные технологии для будущих поколений» (Томск, 2010); XVII Международной научно-практической конференции студентов и молодых учёных «Современные техника и технологии» (Томск, 2011); XIII Всероссийском студенческом научно-техническом семинаре «Энергетика: эффективность, надёжность, безопасность» (Томск, 2011); Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (Томск, 2011); XIV Международном студенческом научно-техническом семинаре «Энергетика: эффективность, надежность, безопасность» (Томск, 2012); III Международной научно-технической конференции «Электроэнергетика глазами молодежи» (Екатеринбург, 2012); IV Международной научно-технической конференции «Электроэнергетика глазами молодежи» (Новочеркасск, 2013); I Международном молодежном форуме «Интеллектуальные энергосистемы» (Томск, 2013); V Международной научно-технической конференции «Электроэнергетика глазами молодежи» (Томск, 2014).

**Публикации.** По результатам выполненных исследований, разработок и их применения, связанных с темой диссертационной работы, опубликовано 14 научных работ, в том числе 1 патент РФ на изобретение, 2 статьи в рецензируемых изданиях перечня ВАК РФ и 11 публикаций в материалах научно-технических конференций, семинаров и форумов.

**Структура и объем диссертации.** Общий объем представленного диссертационного материала составляет 170 страниц и включает в себя: оглавление, введение, четыре главы, заключение, приложения и список литературы из 107 наименований. Материал диссертационной работы включает 56 рисунков и 9 таблиц.

## **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** на основе краткого анализа недостатков алгоритмов работы существующих систем автоматической точной синхронизации генераторов с ЭС и перспективных направлений развития электроэнергетики изложены и обоснованы суть и актуальность решаемой в диссертации задачи синтеза адаптивных систем автоматической точной синхронизации с эталонной моделью.

**В первой главе** представлен анализ современного состояния средств автоматической синхронизации генераторов с электрической сетью. Рассмотрены способы и условия синхронизации, представлены алгоритмы функционирования существующих устройств автоматической точной синхронизации, проведен их анализ и выделены основные недостатки. В качестве области функционирования, требующей совершенствования, выделено обеспечение равенств частот и фаз напряжений синхронизируемых объектов. В ходе оценки актуальности разработки более совершенных алгоритмов работы устройств автоматической точной синхронизации проведен обзор существующих направлений развития указанных устройств. Отмечено, что предлагаемые методики основаны на совершенствовании отдельных сторон существующих алгоритмов работы устройств, и не направлены на

формирование формализованных процедур одновременного перевода всех параметров синхронизации к заданным конечным значениям.

Введено дополнительное условие точной синхронизации, заключающееся в обеспечении равенства нулю относительного ускорения движения векторов напряжения синхронизируемых объектов в момент включения объединяющего выключателя. Предложено включить указанное условие в перечень требований, предъявляемых к разрабатываемым современным системам автоматической синхронизации. Отмечено, что выполнение дополнительного условия точной синхронизации в совокупности с соблюдением традиционных условий будет способствовать повышению качества электромеханических переходных процессов, сопровождающих включение генераторов в сеть.

Проанализированы результаты начальной проработки задачи синтеза систем синхронизации генераторов и ЭС с эталонной моделью, выполненной в Томском политехническом университете. Основу этого синтеза составляет идея применения методов автоматического управления с эталонной моделью к задаче управления процессами синхронизации. При этом роль эталонной модели отводится программной траектории движения (ПТД), построенной для параметров синхронизации и обеспечивающей целенаправленный и одновременный их перевод к заданным конечным значениям.

Алгоритмы построения ПТД, синтезированные на начальном этапе, показали теоретическую возможность такого управления. Однако при построении этих алгоритмов не учитывались реальные характеристики исполнительных устройств регулирования. К недостаткам этих алгоритмов относится ступенчатость и знакопеременный (двухполярный) характер ПТД. При этом ПТД формируется на интервале, ограниченном одним относительным оборотом векторов напряжений синхронизируемых объектов. В результате, для реализации таких алгоритмов требуется осуществление двухполярных управляющих воздействий сложной формы на непродолжительном интервале времени.

Отмечено также, что проработка вопросов управления параметрами синхронизации по построенной для них ПТД в выполненных ранее исследованиях не проводилась, а вопросы использования существующих измерительных систем не исследовались.

По результатам выполненного анализа сформулированы, в развёрнутом виде, задачи, подлежащие решению в диссертации.

**Во второй главе** диссертации представлена структурно-функциональная схема синтезируемой системы синхронизации с эталонной моделью. Дано описание разработанных алгоритмов построения ПТД, лишенных отмеченных недостатков. Охарактеризован подход к синтезу регулятора синтезируемой системы, и дано описание алгоритмов его работы.

Обобщённая структурно-функциональная схема системы синхронизации объектов ЭЭС, основанная на принципах построения систем управления с эталонной моделью, представлена на рисунке 1.

На этом рисунке объекты 1 и 2 представляют собой синхронизируемые объекты: генераторы, электрическую сеть, части энергосистем. В качестве устройств регулирования могут выступать регуляторы турбины и регуляторы возбуждения генераторов, накопители электрической энергии, устройства электрического торможения и другие устройства, способные осуществить точное и качественное управление параметрами вращательного движения векторов напряжения на контактах

объединяющего выключателя (ОВ). Анализатор состояния контролирует значения параметров синхронизации и формирует команду на включение объединяющего выключателя.

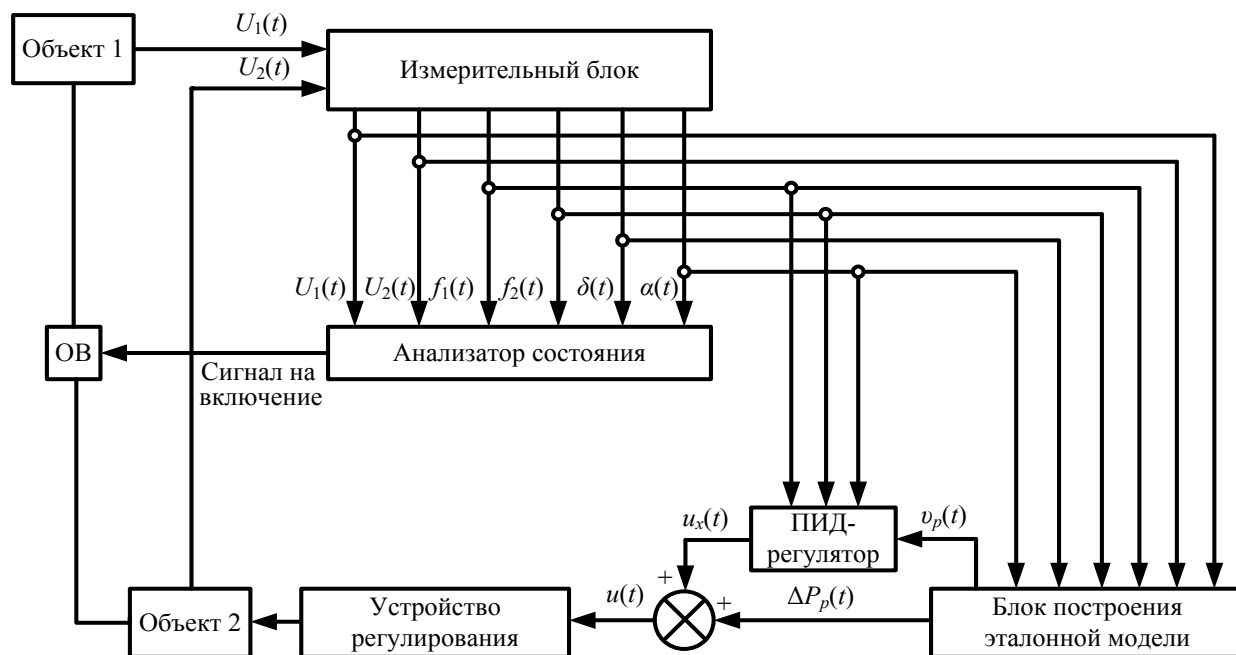


Рисунок 1 – Структурно-функциональная схема системы синхронизации с эталонной моделью

Блок построения эталонной модели формирует на основании измерений программную траекторию движения для параметров относительного движения векторов напряжения синхронизируемых объектов, доставляющую их из начального состояния в заданную точку фазовых координат.

К наиболее простым и универсальным с позиции реализации управляющих воздействий при синхронизации генератора с сетью для дальнейших разработок отнесены алгоритмы построения ПТД постоянного (рисунок 2, а) и линейно изменяющегося (рисунок 2, б) небаланса мощности  $\Delta P_p(t)$  на валу генератора.

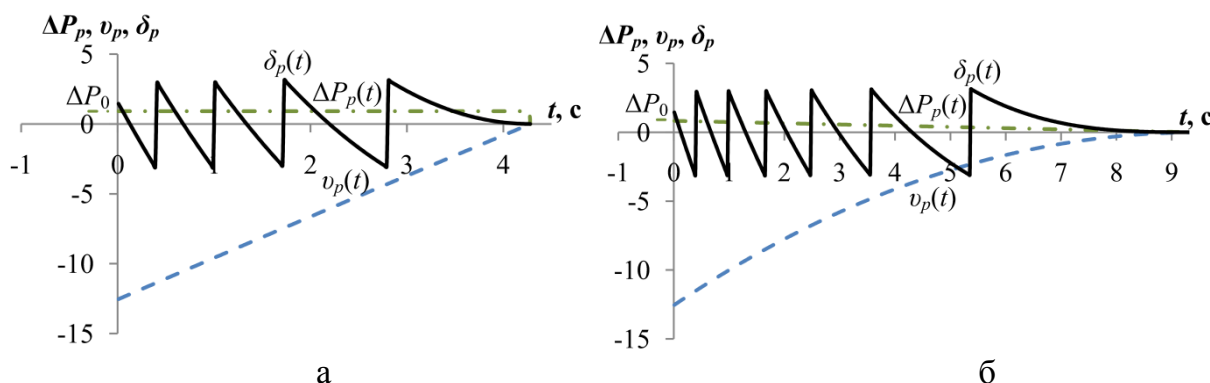


Рисунок 2 – Пример построения ПТД по алгоритмам  
а – постоянного небаланса мощности; б – линейно изменяющегося небаланса мощности

Как видно из рисунка 2, оба алгоритма обеспечивают целенаправленный перевод величин относительного угла  $\delta$  и относительной скорости  $v$  между векторами напряжения генератора и сети к нулевым значениям. При этом в первом алгоритме осуществляется мгновенное обнуление величины небаланса мощности  $\Delta P_p(t)$  в конечный момент времени, что следует отнести к ограничивающим его применение условиям. Второй алгоритм обеспечивает плавное изменение величины  $\Delta P_p(t)$  от начального значения до нуля. Вывод расчетных соотношений для определения параметров ПТД осуществляется на основе уравнения движения ротора генератора, записанного с учетом изменения частоты в ходе процесса управления:

$$\Delta P = (1 + \frac{v}{\omega_{ном}}) \frac{T_j}{\omega_{ном}} \frac{dv}{dt}, \quad (1)$$

где  $T_j$  – постоянная инерции генератора;  $\Delta P$  – небаланс активной мощности на валу генератора;  $\omega_{ном}$  – номинальная синхронная частота.

Для успешной синхронизации величина небаланса мощности в ходе управления должна соответствовать, при начальных значениях  $\delta_0$ ,  $v_0$ ,  $\Delta P_0$ , следующим расчетным зависимостям:

- для алгоритма постоянного небаланса мощности:

$$\Delta P_p = \Delta P_{p0} = \frac{T_j v_0^2}{2\omega_{ном}(2\pi n_p + \delta_0)} (1 + \frac{2v_0}{3\omega_{ном}}), \quad (2)$$

- для алгоритма линейно изменяющегося небаланса мощности:

$$\Delta P_p(t) = \frac{2C_2 T_j}{\omega_{ном} t_{pT}} (1 - \frac{t}{t_{pT}}), \quad (3)$$

где

$$C_2 = -v_0 (\frac{v_0}{2\omega_{ном}} + 1). \quad (4)$$

Расчетная продолжительность процесса синхронизации  $t_{pT}$  определяется согласно выражениям:

- для алгоритма постоянного небаланса:

$$t_{pT} = -\frac{3(2\pi n_p + \delta_0)}{(3\omega_{ном} + 2v_0)} (1 + \frac{2\omega_{ном}}{v_0}), \quad (5)$$

- для алгоритма линейно изменяющегося небаланса:

$$t_{pT} = \frac{2\pi n_p + \delta_0}{\omega_{ном} (1 - \frac{1}{2} (\sqrt{1 - \frac{2C_2}{\omega_{ном}}} - \sqrt{\frac{\omega_{ном}}{2C_2}} \arcsin(-\sqrt{\frac{2C_2}{\omega_{ном}}}))}. \quad (6)$$

В уравнениях (2), (5) и (6) величина  $n_p$  представляет собой целое число взаимных оборотов векторов напряжений синхронизируемых объектов и определяется путем округления, полученных по следующим зависимостям, значений  $n$ :

- для алгоритма постоянного небаланса:

$$n = -\frac{\delta_0}{2\pi} + \frac{T_j v_0^2}{4\pi \Delta P_0 \omega_{ном}} (1 + \frac{2v_0}{3\omega_{ном}}), \quad (7)$$

- для алгоритма линейно изменяющегося небаланса:

$$n = -\frac{\delta_0}{2\pi} + \frac{C_2 T_j}{\pi \Delta P_0} \left(1 - \frac{1}{2} \left( \sqrt{1 - \frac{2C_2}{\omega_{ном}}} - \sqrt{\frac{\omega_{ном}}{2C_2}} \arcsin\left(-\sqrt{\frac{2C_2}{\omega_{ном}}}\right) \right)\right). \quad (8)$$

Приведенные в (1-8) соотношения справедливы для случая наличия некоторой ненулевой начальной величины небаланса мощности  $\Delta P_0$ , достаточной для осуществления управления.

При выборе подхода к управлению параметрами синхронизации по построенной для них ПТД, предложено применение комбинации двух основных принципов автоматического управления движущимися объектами – принципов «жестких» и «гибких» траекторий. В первом случае целью управления является стабилизация движения параметров синхронизации в некоторой окрестности построенной для них на первом этапе номинальной ПТД. Принцип «гибких» траекторий учитывает тот факт, что к длительности процедуры синхронизации, в общем случае, не предъявляется жестких условий, кроме ее предпочтительной минимизации, и заключается в периодическом перестроении ПТД на основании текущих значений параметров синхронизации.

Алгоритм управления при принятом подходе обобщенно представляется в виде:

$$u(t) = F(\Delta P_p, x, f) = F_1(\Delta P_p) + F_2(x) + F_3(f), \quad (9)$$

где  $F(\Delta P_p, x, f)$  представляет собой функцию от задающего воздействия  $\Delta P_p$ , ошибки управления  $x$ , возмущающего воздействия  $f$ , а также их производных и интегралов по времени. При этом  $F_1(\Delta P_p)$  и  $F_3(f)$  соответствуют управлению по задающему и возмущающему воздействиям соответственно, а  $F_2(x)$  – управлению по отклонению (ошибке).

Задающее воздействие в уравнении (9) может быть получено на основании (2) и (3), в то время как возмущающие воздействия для задачи синхронизации носят, как правило, случайный характер. Таким образом, определению подлежит функция управления по отклонению (ошибке). Принимая во внимание возможности измерительных систем и необходимость осуществления комплексного точного управления по всем координатам построенной ранее ПТД, в качестве регулятора принимается ПИД-регулятор с фильтром верхних частот, а в качестве переменной управления по отклонению – величина относительной скорости.

Использование принятого подхода к управлению параметрами синхронизации направлено на обеспечение процедуры минимизации корректирующих управляющих воздействий, выполняемых для стабилизации параметров в некоторой окрестности номинальной ПТД, построенной на первом этапе, и повышение адаптивности системы синхронизации к случайным возмущениям, возникающим в ходе процесса управления. При этом в простейшем случае в качестве граничных траекторий, разделяющих области стабилизирующего управления и области движения по гибким траекториям, могут быть приняты, например, средние линии, проведенные между соседними ПТД.

**В третьей главе** рассмотрены вопросы реализации измерительного блока системы синхронизации с эталонной моделью. Проведенный анализ подходов к измерению параметров вращательного движения векторов напряжения показал, что алгоритмы новейших систем измерения позволяют обеспечить высокую точность определения величин относительного угла и относительной скорости в установившихся режимах. Однако возможности функционирования таких систем в

переходных режимах неоднозначны, на данный момент их совершенствование с позиции этого вопроса продолжается. При этом точность определения относительного ускорения представляется неопределенной, а вопросы её повышения, как правило, не рассматриваются.

Отмечено, что измерительный блок современного автоматического синхронизатора АС-М в целом удовлетворяет требованиям процесса синхронизации с использованием принципа подгонки частоты и ожидания момента совпадения фазовых углов синхронизируемых объектов. Однако для систем синхронизации с эталонной моделью предъявляются повышенные требования к точности измерения параметров синхронизации на интервале управления, что приводит к необходимости использования более совершенных алгоритмов.

Проработан подход к измерению параметров вращательного движения векторов напряжения, учитывающий неравномерный характер их движения и позволяющий оценивать величины измеряемых параметров в течение интервала измерения с повышенной точностью.

Представленный подход заключается в разбиении периода измерения на три интервала:  $\tau_1 = t_2 - t_1$ ,  $\tau_2 = t_3 - t_2$ ,  $\tau_3 = t_4 - t_3$  (рисунок 3), формировании на их основе системы линейных уравнений для величины фазового угла измеренного сигнала и решения полученной системы уравнений.

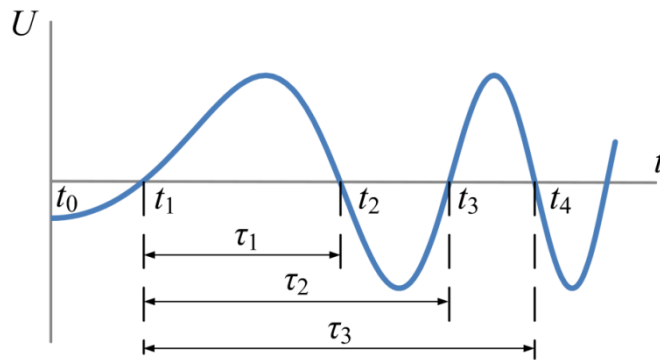


Рисунок 3 – Определение длительности временных интервалов  $\tau$

Система уравнений для величины фазового угла может быть представлена в виде:

$$\begin{aligned}\delta(\tau_1) &= d_1\tau_1 + d_2\tau_1^2 + d_3\tau_1^3 = \pi, \\ \delta(\tau_2) &= d_1\tau_2 + d_2\tau_2^2 + d_3\tau_2^3 = 2\pi, \\ \delta(\tau_3) &= d_1\tau_3 + d_2\tau_3^2 + d_3\tau_3^3 = 3\pi.\end{aligned}\tag{10}$$

Из системы уравнений (10) определяются коэффициенты  $d_1$ ,  $d_2$ ,  $d_3$ . Тогда величины параметров вращательного движения в момент времени  $t_0$  выражаются как:

$$\delta_{0(+)} = 2\pi - d_1t_1 + d_2t_1^2 - d_3t_1^3\tag{11}$$

или

$$\delta_{0(+)} = \pi - d_1t_1 + d_2t_1^2 - d_3t_1^3,\tag{12}$$

$$\omega_0 = d_1 - 2d_2t_1 + 3d_3t_1^2,\tag{13}$$

$$\alpha_0 = 2d_2 - 6d_3t_1,\tag{14}$$

$$\lambda_0 = \lambda = 6d_3.\tag{15}$$

Выбор выражения для расчета величины  $\delta$  определяется направлением перехода мгновенных значений напряжения через нуль.

Значения параметров в текущий момент времени:

$$\lambda(t) = \lambda_0 = \lambda = \text{const}, \quad (16)$$

$$\alpha(t) = \alpha_0 + \lambda t, \quad (17)$$

$$\omega(t) = \omega_0 + \alpha_0 t + \lambda t^2 / 2, \quad (18)$$

$$\delta(t) = \delta_{0(+)} + \omega_0 t + \frac{\alpha_0 t^2}{2} + \frac{\lambda t^3}{6} \quad (19)$$

или

$$\delta(t) = \delta_{0(+-)} + \omega_0 t + \frac{\alpha_0 t^2}{2} + \frac{\lambda t^3}{6}. \quad (20)$$

Представленный алгоритм позволяет определять текущие (расчетные) значения параметров вращательного движения векторов напряжения, а также дает информацию об изменении параметров в течение интервала измерения. Однако в этом случае полученные зависимости будут отставать от действительных на треть периода измерения, что может оказаться существенным для случая стремительно изменяющихся параметров. Для получения более актуальных зависимостей применяется процедура экстраполяции указанных параметров с учетом допущения о постоянстве характера изменения параметров на 1/3 периода измерений.

Алгоритмы функционирования измерительного блока были воспроизведены в среде моделирования MATLAB Simulink (рисунок 4). Результаты измерения, полученные с применением представленных алгоритмов ( $\delta_m, f_m$ ), при неравномерном характере изменения величины относительного ускорения, несущественно отличались от реальных величин ( $\delta_{real}, f_{real}$ ), что свидетельствует о потенциальной эффективности предложенного подхода.

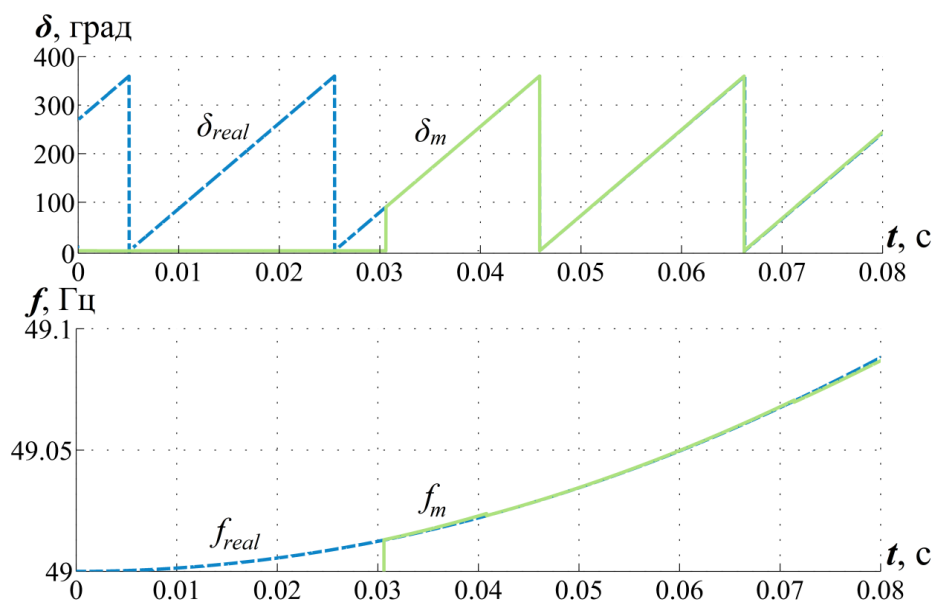


Рисунок 4 – Результаты моделирования функционирования измерительного блока при неравномерно ускоренном движении

В четвертой главе представлены результаты моделирования предложенных алгоритмов работы системы синхронизации с эталонной моделью в специализированном программном комплексе (ПК) Mustang без учета инерционности регулирования и в специализированной среде моделирования MATLAB Simulink с учетом модели турбины и ее регулятора. С целью проведения сравнительного анализа, выполнено моделирование алгоритмов работы современного синхронизатора SYNCHROTECT (фирма ABB) (рисунок 5) и алгоритмов синтезируемой системы синхронизации (рисунки 6, 7).

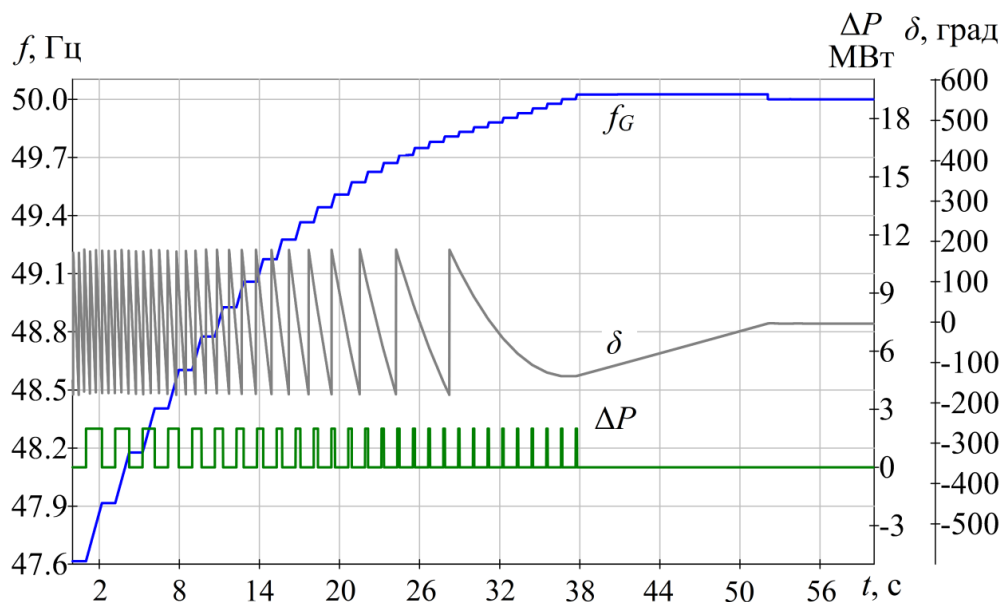


Рисунок 5 – Результаты моделирования алгоритмов работы синхронизатора SYNCHROTECT в ПК Mustang

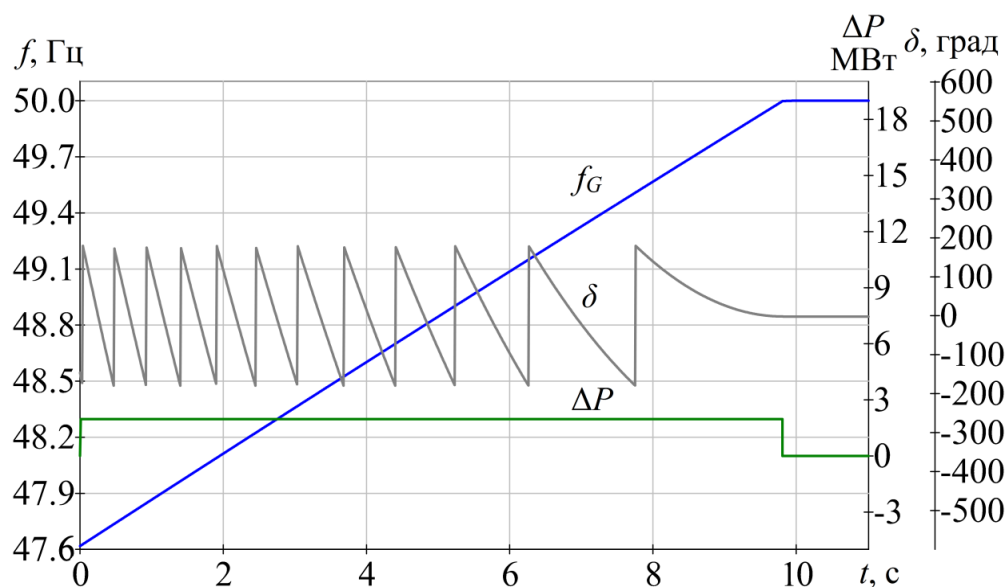


Рисунок 6 – Результаты моделирования процесса синхронизации по алгоритму постоянного небаланса мощности в ПК Mustang

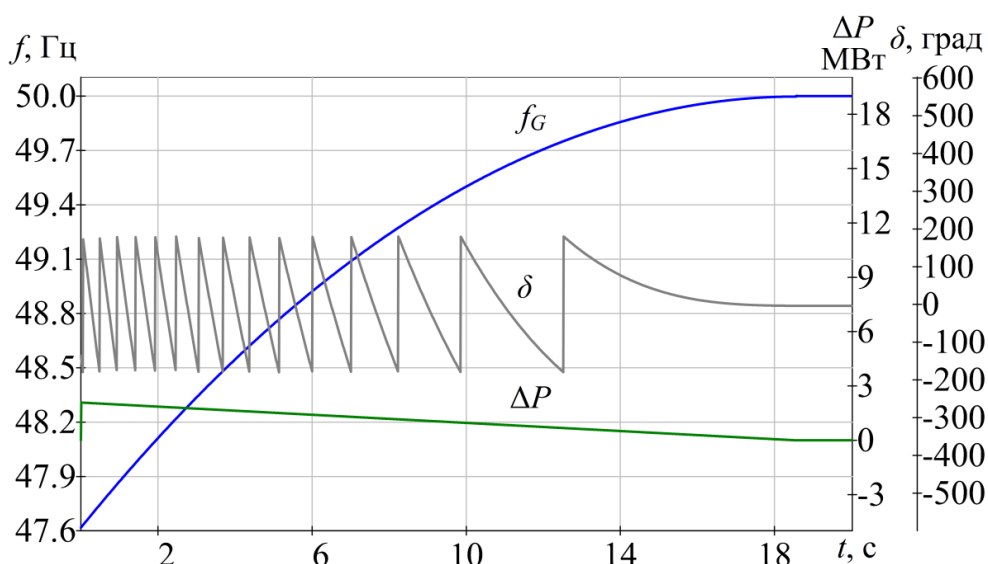


Рисунок 7 – Результаты моделирования процесса синхронизации по алгоритму линейно изменяющегося небаланса мощности в ПК Mustang

В ходе моделирования были получены повышенные показатели быстродействия предложенных алгоритмов по сравнению с алгоритмами существующих устройств. Так, для алгоритма построения ПТД постоянного небаланса мощности длительность процесса синхронизации составила 9,8 секунды (см. рисунок 6), а для алгоритма линейно изменяющегося небаланса этот процесс завершился через 18,6 секунд (см. рисунок 7). При идентичных начальных условиях для работы алгоритма синхронизатора SYNCHROTACT (см. рисунок 5) потребовалось 52 секунды.

В ПК Mustang проведено моделирование процессов синхронизации в условиях наличия случайных возмущений в форме кратковременного отклонения частоты сети (рисунок 8). Результатами было подтверждено быстродействие алгоритмов синхронизации с эталонной моделью, а также эффективность и работоспособность управления по принципу «гибких» траекторий.

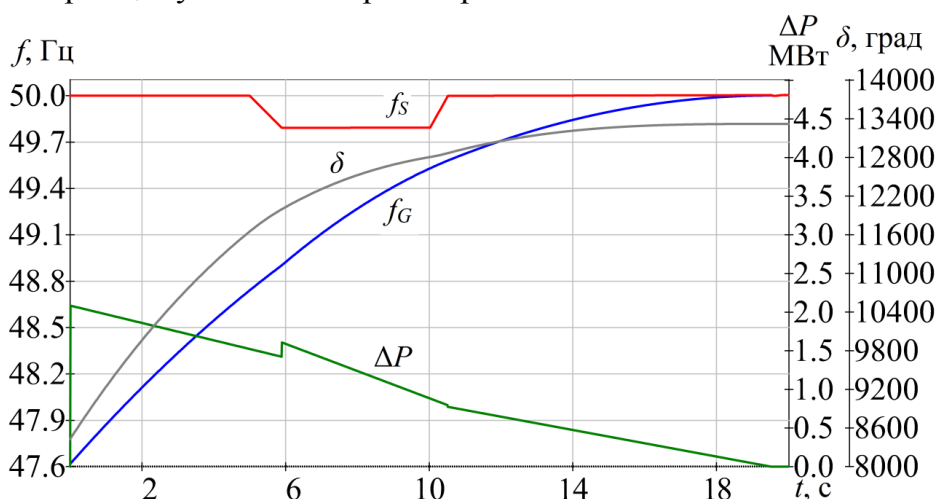


Рисунок 8 – Результаты моделирования процесса синхронизации по алгоритму линейно изменяющегося небаланса при возникновении случайного возмущения

Моделирование процесса синхронизации в специализированной среде MATLAB Simulink проведено с учетом одномассовой модели турбины и ее

регулятора, что позволило оценить работоспособность разрабатываемых алгоритмов функционирования систем синхронизации с эталонной моделью в условиях наличия инерционности исполнительных устройств.

Результаты моделирования процесса синхронизации на основе алгоритмов построения ПТД постоянного и линейно изменяющегося небалансов (рисунки 9, 10) показали эффективность стабилизирующего управления по принципу «жесткой» траектории. При этом с целью снижения интенсивности стабилизирующих управляющих воздействий длительность процесса синхронизации была увеличена.

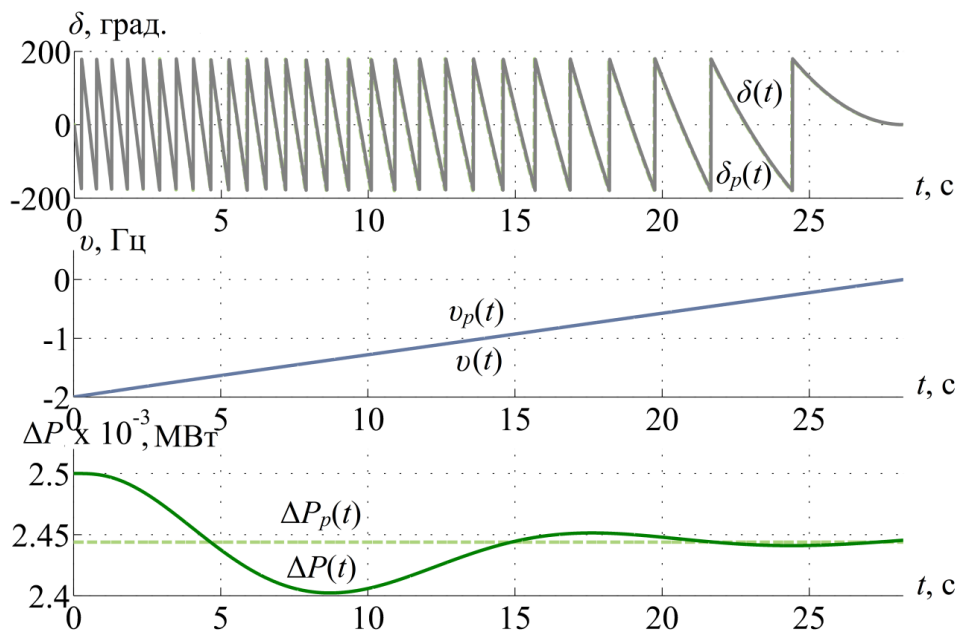


Рисунок 9 – Результаты моделирования работы системы синхронизации с эталонной моделью для алгоритма построения ПТД постоянного небаланса мощности в среде MATLAB Simulink

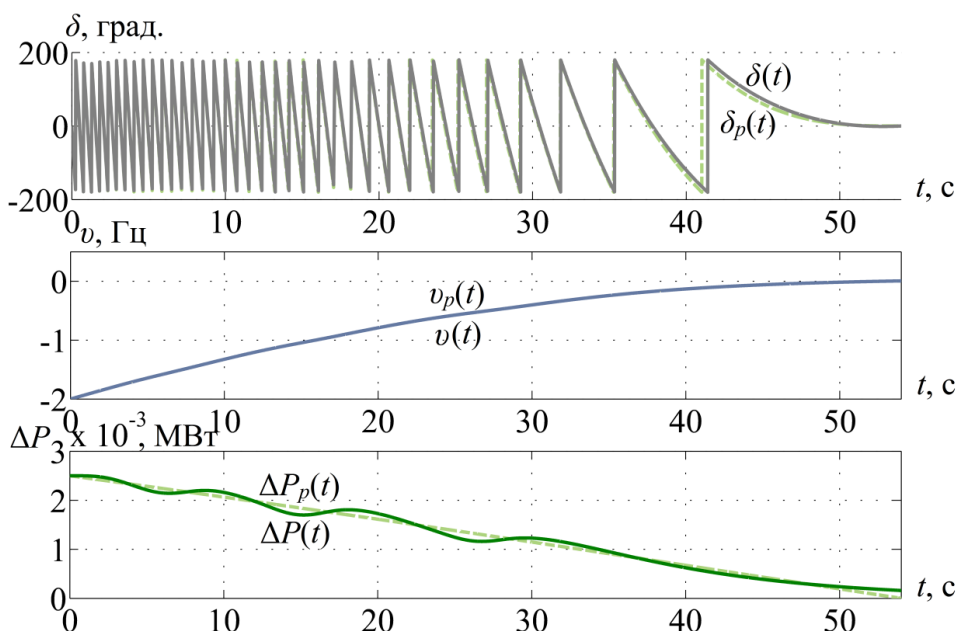


Рисунок 10 – Результаты моделирования работы системы синхронизации с эталонной моделью для алгоритма построения ПТД линейно изменяющегося небаланса мощности в среде MATLAB Simulink

Полученные результаты моделирования позволяют судить об эффективности предложенных алгоритмов работы систем синхронизации с эталонной моделью. При этом алгоритм постоянного небаланса мощности представляется более целесообразным в системах, обладающих сравнительно невысокой инерцией. При повышенной инерционности исполнительных устройств, преимущество следует отдать алгоритму линейно изменяющегося небаланса, способному обеспечить нулевую величину небаланса мощности в конечной точке интервала управления.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Основные результаты работы сводятся к следующим положениям:

1. Проведен анализ эффективности алгоритмов функционирования современных устройств автоматической синхронизации объектов ЭЭС, показавший наличие ряда недостатков, основным из которых является отсутствие формализованной процедуры перевода параметров синхронизации к конечным значениям, что, в частности, вызывает неоднозначность и неопределенность результатов синхронизации, а также возможность ее неуспешной работы в целом.

2. Введено дополнительное условие точной синхронизации, заключающееся в необходимости, для эталонной модели, обеспечения нулевой величины относительного ускорения векторов напряжения синхронизируемых объектов к моменту включения генератора в сеть. Что касается реального движения, то это условие может выполняться с некоторым допуском. Выполнение указанного условия позволит повысить качество переходных процессов, сопровождающих включение объединяющего выключателя.

3. Разработан способ автоматической точной синхронизации генераторов с электрической сетью, основанный на принципах построения систем автоматического управления с эталонной моделью и позволяющий выполнять целенаправленное управление посредством выдачи однополярных управляющих воздействий. Способ позволяет осуществлять управление с нулевой методической ошибкой. Это свойство выражается в формировании целевых условий синхронизации как условий достижения нулевых значений потенциальной и кинетической энергий относительного движения роторов генераторов синхронизируемых объектов, что предполагает обеспечение нулевых величин относительного ускорения, относительной скорости и относительного угла к моменту включения объединяющего выключателя.

4. Предложены варианты реализации регулятора системы автоматической синхронизации с эталонной моделью, заключающиеся в применении принципов управления «гибких» и «жестких» траекторий. Применение указанных принципов позволяет обеспечивать движение параметров синхронизации в некоторой окрестности от построенной программной траектории движения при использовании безынерционных и инерционных исполнительных устройств регулирования в условиях наличия внешних возмущений, возникающих в ходе процесса управления.

5. Выполнен анализ состояния развития существующих измерительных систем и предложен способ аналитического определения параметров вращательного движения векторов напряжений синхронизируемых объектов, учитывающий непрерывный и неравномерный характер их изменения и заключающийся в аппроксимации, на интервале измерения, функции ускорения линейной зависимостью, характерной для равномерно ускоренного движения.

6. Проведена апробация предложенных алгоритмов работы основных блоков системы синхронизации путем их моделирования в программном комплексе Mustang и среде моделирования MATLAB Simulink. По результатам апробации может быть сделан вывод о том, что применение изложенного подхода к синтезу систем синхронизации позволяет решить следующие задачи:

- сократить время, требуемое для выполнения условий синхронизации, и, следовательно, минимизировать задержки во включении генерирующих мощностей в сеть;

- исключить методическую ошибку управления, характерную для существующих систем синхронизации и вызванную необходимостью смещения целевых условий синхронизации в область понижения качества;

- обеспечить работоспособность систем синхронизации в условиях наличия возмущений, вызывающих отклонения параметров синхронизации от эталонной модели, и повысить качество сопровождающих переходных процессов.

Результаты диссертационного исследования следует также рассматривать в качестве методической основы для создания нового класса адаптивных систем автоматического управления динамическими переходами электроэнергетических систем, связанных с необходимостью синхронного объединения их частей.

### **Список научных трудов по теме диссертации**

#### ***Статьи, опубликованные в периодических научных изданиях, рекомендованных ВАК***

1. Хрущев Ю.В., **Беляев Н.А.** Алгоритмы эталонных моделей для построения устройств адаптивной синхронизации генераторов и частей электроэнергетических систем // Известия ТПУ, 2013. – № 4. – С.168-174.

2. **Беляев Н.А.**, Хрущев Ю.В. Алгоритмы эталонной модели и регулятора в задаче синтеза адаптивного устройства синхронизации генератора с электрической сетью // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – Изд-во ФГБОУ ВО «НГАВТ», 2015. – № 1. – С. 208–213.

#### ***Патенты на изобретение***

3. Пат. 2457597 Рос. Федерация, МКП H02J3/42. Способ синхронизации возбужденной синхронной машины с сетью. / **Беляев Н.А.**, Хрущев Ю.В.; заявитель и патентообладатель Томский политехнический университет. – № 2011120883/07; заявл. 24.05.2011; опубл. 27.07.2012, Бюл. №21.

#### ***Материалы международных, всероссийских и университетских конференций, форумов и семинаров***

4. **Беляев Н.А.** Состояние и перспектива развития устройств автоматической синхронизации генераторов и электроэнергетических сетей // Ресурсоэффективным технологиям – энергию и энтузиазм молодых: материалы I университетской конференции студентов Элитного технического образования, Томск, 19-20 апреля 2010 г. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – С. 62-64.

5. **Беляев Н.А.**, Хрущев Ю.В. Алгоритмы построения программных траекторий движения для устройств адаптивной синхронизации генераторов и электроэнергетических систем // Ресурсоэффективные технологии для будущих поколений: сборник трудов II международной научно-практической конференции молодых ученых, Томск, 23-25 ноября 2010. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – С. 180-181.

6. **Беляев Н.А.** Разработка и моделирование алгоритмов работы устройства адаптивной синхронизации генераторов и частей электроэнергетических систем // Современные техника и технологии: сборник трудов XVII международной научно-практической конференции студентов и молодых ученых, Томск, 18-22 апреля 2011. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – Т.1, с. 25-26.
7. **Belyaev N.A.** The generator adaptive synchronization device // Энергетика: эффективность, надёжность, безопасность: сборник трудов XIII всероссийского студенческого научно-технического семинара, Томск, 19-22 апреля 2011. – Томск: ТПУ, 2011. – Т. 2, с. 299-302.
8. **Беляев Н.А.** Устройство адаптивной синхронизации генераторов и частей электроэнергетических систем // Энергосберегающие технологии: материалы международной молодежной конференции, Томск, 28-30 июня 2011. – Томск: Изд-во НИ ТПУ, 2011. – Т. 1, с. 209-212.
9. **Беляев Н.А., Хрущев Ю.В.** Результаты моделирования алгоритмов работы устройства адаптивной синхронизации генераторов и частей электроэнергетических систем // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: труды международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 06-08 октября 2011. – Томск: ТПУ. – Т. 1, с. 305-309.
10. **Беляев Н.А., Обливальная Т.В.** Перспективы совершенствования устройств синхронизации генераторов и частей энергосистем // Энергетика: эффективность, надёжность, безопасность: сборник трудов XIV международного студенческого научно-технического семинара, Томск, 24-27 апреля 2012. – Томск: ТПУ. – Т. 1, с. 110-114.
11. **Беляев Н.А., Хрущев Ю.В.** Синтез устройства адаптивной синхронизации генератора и электроэнергетической сети // Электроэнергетика глазами молодежи: научные труды III международной научно-технической конференции, Екатеринбург, 22-26 октября 2012. – Екатеринбург: УрФУ. – Т. 2, с. 94-99.
12. **Беляев Н.А., Хрущев Ю.В.** Компенсация отклонений параметров режима в задаче синтеза устройства синхронизации генераторов и частей энергосистем с эталонной моделью // Электроэнергетика глазами молодежи: научные труды IV международной научно-технической конференции, Новочеркасск, 14-18 октября 2013. – Новочеркасск: ЛИК, 2013 – Т. 2, с. 215-219.
13. **Беляев Н.А., Хрущев Ю.В.** Синтез устройства адаптивной синхронизации генераторов и частей энергосистем как элемент построения Smart-grid // Интеллектуальные энергосистемы: труды I международного молодежного форума, Томск, 21-25 октября 2013. – Томск: ТПУ, 2013. – Т.1, с. 118-122.
14. **Беляев Н.А., Свечкарев С.В., Хрущев Ю.В.** Аналого-цифровое моделирование алгоритмов работы устройства синхронизации генератора и электрической сети с эталонной моделью // Электроэнергетика глазами молодежи: научные труды V международной научно-технической конференции, Томск, 10-14 ноября 2014. – Томск: ТПУ, 2014. – Т. 1, с. 259-263.