
На правах рукописи

МАРТИРОСЯН Акоп Арамаисович

**ПОВЫШЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ
С ПРИМЕНЕНИЕМ РЕГУЛИРУЕМОЙ ПРОДОЛЬНОЙ КОМПЕНСАЦИИ**

Специальность 05.14.02 – Электростанции и электроэнергетические системы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Иваново 2009

Работа выполнена на кафедре «Электрические системы» ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В. И. Ленина»

Научный руководитель –
кандидат технических наук, доцент

Голов Валерий Павлович

Официальные оппоненты:
доктор технических наук, профессор

Савельев Виталий Андреевич

кандидат технических наук, доцент

Серов Вячеслав Ананьевич

Ведущая организация

ОАО «Проектно-изыскательский
и научно-исследовательский институт
по проектированию энергетических систем и электрических сетей»
«Энергосетьпроект»

Защита состоится «26» июня 2009 г. в 11-00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.064.01 при ГОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В. И. Ленина» по адресу: 150003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34, корпус «Б», ауд. 237.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 150003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34, Ученый совет ИГЭУ. Тел.: (4932) 38-57-12, факс (4932) 38-57-01. E-mail: uch_sovet@ispu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В. И. Ленина».

Автореферат разослан «26» мая 2009 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук, профессор

А.В. Мошкарин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Одной из важнейших характеристик электропередачи является ее пропускная способность, поскольку она определяет экономические показатели и режим электроэнергетической системы (ЭЭС). Недостаточная пропускная способность межсистемных и системообразующих линий электропередачи (ЛЭП) ограничивает возможность удовлетворения требований свободного рынка электроэнергии при соблюдении условий надежного энергоснабжения. Кроме того, современные электроэнергетические системы, имеющие в своем составе протяженные ЛЭП сверхвысокого напряжения (СВН), характеризуются изменением потока передаваемой мощности в широком диапазоне. Работа электроэнергетической системы в режимах, когда передаваемая по ЛЭП СВН мощность ниже натуральной, сопровождается избытком реактивной мощности, что может привести к повышению уровней напряжения и нарушению устойчивости работы электроэнергетической системы. Данную проблему можно решить с включением шунтирующих реакторов (ШР). Однако ШР снижает пропускную способность ЛЭП СВН, поэтому в режимах работы с большими перетоками мощности (включая послеаварийные режимы), а также по условиям динамической устойчивости ЭЭС их целесообразно отключать. В режимах, когда передаваемая по ЛЭП СВН мощность больше натуральной, целесообразно использовать устройство продольной компенсации (УПК). Однако частые коммутации этих устройств недопустимы в силу ограничений, которые накладывает современное состояние высоковольтных выключателей. Таким образом, эффективность применения ШР и нерегулируемых УПК снижается с точки зрения обеспечения необходимых значений режимных параметров линии по напряжению и реактивной мощности, а также может привести к проблемам сохранения устойчивости работы ЭЭС (условие самовозбуждения синхронных генераторов). Эффективно решить указанные проблемы можно с помощью управляемых шунтирующих реакторов (УШР), а также устройств регулируемой продольной емкостной компенсации.

Решение этой задачи в настоящее время возможно путем применения новой технологии – гибких (управляемых) систем электропередачи переменного тока (Flexible AC Transmission Systems–FACTS), содержащих современные многофункциональные устройства, позволяющие максимальное использование ЛЭП за счет увеличения пропускной способности, особенно в аварийных и послеаварийных режимах работы электрической сети. Бурное развитие таких устройств в последние годы стало возможным в связи с прогрессом в области разработки мощных силовых преобразователей. Технология FACTS, основанная на силовой электронике, была специально разработана с целью улучшения рабочих показателей слабых связей переменного тока, а также в целях целесообразного внедрения передачи энергии на большие расстояния на переменном токе.

Подход к системе передачи как к активному элементу электрической системы привел к проведению исследований по использованию устройств регулируемой продольной емкостной компенсации для увеличения пропускной способности ЛЭП СВН, а также улучшения как статической, так и динамической устойчивости ЭЭС. В настоящее время в качестве таких устройств могут быть использованы тиристорные устройства продольной компенсации (ТУПК) на основе схемы, предусматривающей регулирование тока с помощью параллельно включенных тиристоров, и получившей в англоязычной литературе название Thyristor Controlled Series Compensator (TCSC). В данной работе рассматривается регулируемое устройство продольной компенсации, степень компенсации которого возрастает с ростом передаваемой мощности и наоборот.

Выбор параметров закона управления регулируемой продольной компенсации является сложной задачей, так как данный выбор должен производиться для системы в целом, а именно с учетом других регулируемых элементов системы, например автоматических регуляторов возбуждения (АРВ) на синхронных генераторах электростанции.

Данный вопрос рассматривался в работах таких известных ученых как В. А. Веников, В. А. Строев, Ю. П. Рыжов, В. И. Кочкин, Ю. Г. Шакарян, А. А. Рогозин, В. Н. Ивакин и др.

В большинстве работ по этим проблемам некоторые вопросы установившихся режимов линии СВН с регулируемой УПК, а также вопросы выбора законов регулирования этих устройств в целях улучшения устойчивости ЭЭС в целом были рассмотрены неполно.

Целью работы является повышение устойчивости электроэнергетических систем на основе совершенствования законов регулирования и управления УПК.

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие основные задачи:

- разработка полной математической модели ЭЭС (с учетом электромагнитных переходных процессов в ее элементах с управляемой продольной емкостной компенсацией);
- анализ статических характеристик исследуемой системы при различных параметрах закона регулирования УПК;
- исследование влияния параметров закона регулирования УПК на апериодическую статическую устойчивость системы;
- анализ влияния характеристик регулируемого УПК на переходные процессы при «больших» возмущениях в электроэнергетической системе;
- анализ колебательной статической устойчивости исследуемой электроэнергетической системы с регулируемым УПК;
- анализ влияния АРВ синхронных генераторов на устойчивость электроэнергетической системы и выбор параметров регулирования УПК;

- формирование требований к параметрам и характеристикам емкостных элементов для их использования в УПК.

Методы исследования. Для решения поставленных задач в работе использовались методы математического моделирования ЭЭС, методы решения систем нелинейных уравнений, теория дальних линий электропередачи, теория электрических цепей, теория электромеханических переходных процессов, методы анализа устойчивости электроэнергетических систем.

Достоверность и обоснованность результатов работы подтверждается:

- проверкой полученных результатов другими известными методиками, не использованными в диссертации (программы расчета установившихся режимов);
- сопоставлением результатов исследований с результатами, полученными при использовании различных методов.

Научная новизна работы состоит в следующем:

- получены предельно допустимые степени компенсации индуктивного сопротивления ЛЭП, обеспечивающие сохранение колебательной статической устойчивости системы, с учетом АРВ синхронных генераторов;
- разработана математическая модель ЭЭС с учетом электромагнитных переходных процессов в ее элементах с управляемой продольной емкостной компенсацией, позволяющая проводить расчеты режимов электроэнергетической системы с регулируемым УПК;
- впервые получены статические характеристики электропередачи при различных параметрах закона регулирования УПК;
- сформулированы требования к параметрам и характеристикам емкостных элементов, обеспечивающих функционирование регулируемых УПК;
- разработана методика определения диапазона изменения параметров режима электроэнергетической системы и параметров регулируемого УПК, обеспечивающая максимальную эффективность применения регулируемых УПК с точки зрения улучшения устойчивости электроэнергетической системы.

Работа выполнена в составе темы «Разработка принципов согласованного и робастного управления электротехническими и электроэнергетическими системами» по Заданию Федерального агентства по образованию Ивановскому государственному энергетическому университету им. В. И. Ленина.

Практическая ценность работы. Результаты работы могут быть использованы при решении задач проектирования дальних линий электропередачи с управляемыми элементами, расчета статической и динамической устойчивости электроэнергетических систем с гибкими линиями электропередачи, создания систем регулирования управляемых устройств продольной емкостной компенсации. Предложенная методика и алгоритм расчета колебательной статической устойчивости ЭЭС позволяют в полной мере использовать возможности управляемой продольной емкостной компенсации.

Полученные в работе требования к параметрам и характеристикам емкостных элементов используются в работах по их реализации.

Разработанный метод анализа колебательной устойчивости в электроэнергетических системах с регулируемым УПК, а также метод расчетов характеристик таких ЛЭП используется на кафедре «Электрические системы» ИГЭУ в курсах «Электромеханические переходные процессы» и «Дальние электропередачи сверхвысокого напряжения».

Автор защищает:

- полную математическую модель электроэнергетической системы с учетом электромагнитных переходных процессов в ее элементах с управляемой продольной емкостной компенсацией в функции тока, используемую для анализа режимов и устойчивости электроэнергетической системы;

- требования к закону управления регулируемого УПК, обеспечивающие улучшение устойчивости электроэнергетической системы с учетом АРВ генераторов;

- методику определения диапазона изменения параметров режима электроэнергетической системы и параметров регулируемого УПК, обеспечивающую максимальную эффективность применения регулируемых УПК с точки зрения улучшения устойчивости электроэнергетической системы.

Личный вклад автора состоит в разработке математической модели для анализа и исследования влияния регулируемого УПК в функции тока на устойчивость электроэнергетической системы; разработке метода формирования требований к закону управления регулируемого УПК и настроечным параметрам АРВ для максимально эффективного применения УПК, без ухудшения устойчивости электроэнергетической системы; анализе и обобщении расчетных исследований.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на кафедре «Электрические системы» Ивановского государственного энергетического университета, на следующих международных научно-технических конференциях:

- международные научно – технические конференции «Состояние и перспективы развития электротехнологии» (г. Иваново, 1999, 2001, 2003, 2005, 2007 гг.);

- региональная научно-техническая конференция студентов и аспирантов (г. Иваново, 2006 г.).

Список публикации. По материалам диссертационной работы опубликовано 11 печатных работ, в том числе 4 статьи в изданиях по списку ВАК, одна статья в сборниках материалов и 6 тезисов докладов.

Содержание и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав, библиографического списка использованной литературы из 50 наименований и 6 приложений. Объем диссертации, включая приложения, составляет 145 страниц машинописного текста. Работа содержит 54 рисунка.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна и практическая значимость, основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена разработке математического описания исследуемой ЭЭС, состоящей из электростанции, и мощной приемной системы, представленной шинами неизменного напряжения и частоты, которые связаны линией электропередачи, содержащей УПК с регулируемой емкостью (рис. 1).

Такое простое эквивалентное представление приемной системы наиболее удобно для исследования влияния регулируемых УПК на установившиеся и переходные режимы передачи, поскольку дает возможность проводить эти исследования при минимальном объеме аналитической и расчетной работы и в то же время позволяет выявить влияние такой электропередачи на устойчивость системы, ее установившиеся режимы и переходные процессы и тем самым сформулировать основные требования к характеристикам регулируемой емкости и системам их управления.

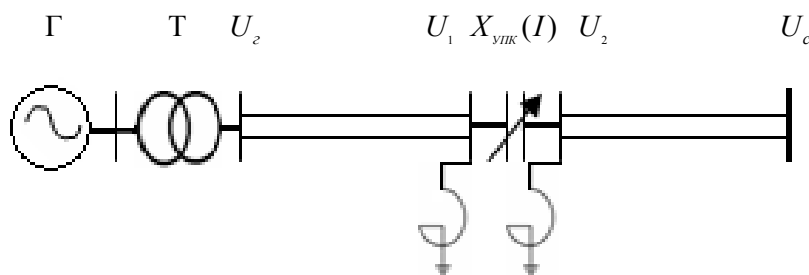


Рис. 1. Исследуемая электрическая система

Для представления характеристики управляемых УПК в математических моделях в работе предложена следующая форма функциональной зависимости сопротивления управляемой емкости от тока:

$$X_{упк}(I) = \frac{10^6}{\omega_o \cdot (K1 - K2 \cdot I)}. \quad (1)$$

Здесь I — модуль тока через УПК, кА; $X_{упк}(I)$ — сопротивление УПК, Ом; $\omega_o = 2\pi f$, где f — частота переменного тока, Гц; $K1, K2$ — коэффициенты, характеризующие зависимость $X_{упк}(I)$, определение которых является первоочередной задачей при проведении расчетов.

Предложенная форма представления сопротивления управляемого УПК является нелинейной функцией, крутизна которой в различных точках может

изменяться с помощью изменения коэффициента $K2$ и имеет возрастающую зависимость $X_{упк}$ от тока в линии, что и обеспечивает увеличение степени компенсации при увеличении потока передаваемой мощности по ЛЭП СВН и наоборот. В принципе, подобная характеристика управляемой продольной емкостной компенсации $X_{упк}(I)$ может определяться соображениями реализации и технологии.

Для выбора коэффициента $K1$ необходимо следующее:

- принимается исходная степень компенсации для наиболее вероятного исходного режима и рассчитывается установившийся режим системы, в результате чего получаем значение тока в месте установки УПК;
- поскольку коэффициент $K2$ определяет крутизну зависимости сопротивления управляемого УПК от тока, то, задаваясь $K2$ и зная ток и значение сопротивления $X_{упк}$ для исходного режима, получаем значение коэффициента $K1$.

Таким образом, полная математическая модель, соответствующая схеме замещения (рис. 2), описывающая переходные процессы в рассматриваемой системе (рис. 1) с учетом электромагнитных переходных процессов в обмотках статора, элементах электропередачи, содержащей управляемую продольную емкостную компенсацию, включает в себя 23 дифференциальных уравнения и нелинейную систему алгебраических уравнений.

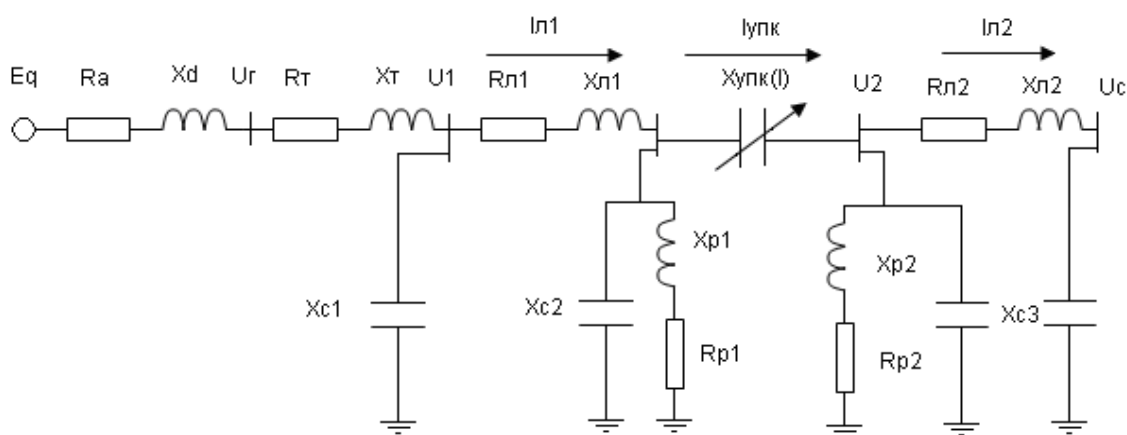


Рис. 2. Схема замещения исследуемой системы

Для решения различных задач анализа режимов и устойчивости электроэнергетической системы разработаны математические модели исследуемой системы различной степени детализации. В следующих главах проводится сравнение результатов расчетов по полной модели и упрощенным моделям в целях выявления возможностей использования упрощенных моделей, потому как ряд исследований показали, что некоторые допущения, как правило, не существенно влияют на результаты исследования аperiodической статической и динамической устойчивости электроэнергетической системы.

Вторая глава посвящена анализу статических характеристик и апериодической статической устойчивости исследуемой электроэнергетической системы с управляемым УПК.

Анализ статической устойчивости проводится с использованием линеаризованной по первому приближению математической модели. Расчеты статических характеристик выполнены по предложенным математическим моделям. На рис. 3 показаны угловые характеристики мощности для различных параметров закона регулирования УПК.

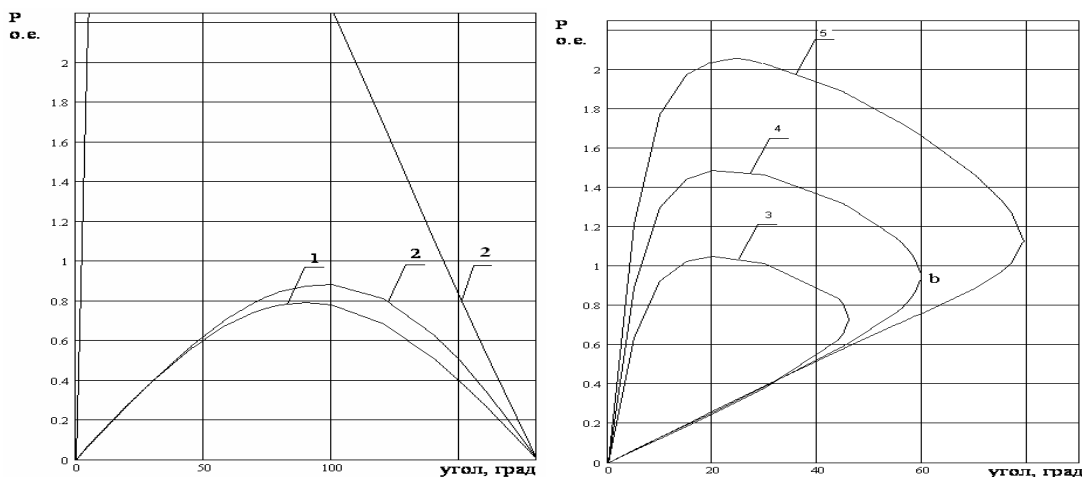


Рис. 3. Характеристика $P(\delta)$:

1 – $K_2=0$; 2 – $K_2=2$ мкф/кА; 3 – $K_2=10$ мкф/кА; 4 – $K_2=6$ мкф/кА; 5 – $K_2=4$ мкф/кА

Анализ угловых характеристик активной мощности показывает возможность увеличения передаваемой мощности и показателей предельных режимов по условиям статической устойчивости при использовании продольной емкостной компенсации рассматриваемого типа. Увеличение предела передаваемой мощности по сравнению с пределом для нерегулируемого устройства может достигнуть 30 % и более. Для данного подхода необходимо решать задачу оптимизации коэффициента регулирования по току для получения максимума передаваемой мощности, при различной исходной степени компенсации и различных законах регулирования $X_{УПК}(I)$, что подтверждается зависимостью, приведенной на рис. 4.

Для рассмотрения влияния регулируемой компенсации на апериодическую устойчивость исследуемой системы использована линеаризованная математическая модель при неучете электромагнитных переходных процессов в элементах исследуемой системы.

В данном случае для характеристического уравнения исследуемой системы критерием апериодической устойчивости будет следующее соотношение:

$$\left\{ \frac{\partial P}{\partial \delta} + \frac{P^2 \frac{\partial X_{УПК}}{\partial I}}{I \cdot (X_{d\Sigma} - X_{УПК}) \cdot \left[(X_{d\Sigma} - X_{УПК}) - I \cdot \frac{\partial X_{УПК}}{\partial I} \right]} \right\} > 0. \quad (2)$$

Таким образом, анализ статической устойчивости, выполненный методом малых колебаний и с помощью практических критериев, показывает принципиальную тождественность условий устойчивости исследуемой электропередачи с условиями для обычных электропередач.

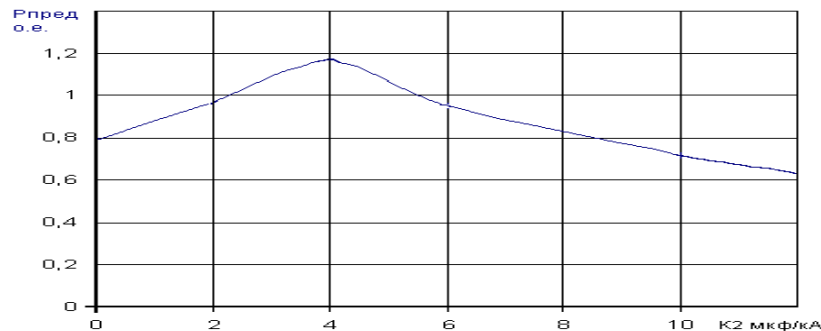


Рис. 4. Зависимость $P_{пред}$ ($K2$)

На рис. 5 приведены зависимости $a_2(\delta)$ для четырех характеристик управляемой емкости в УПК. Анализ этих характеристик и самого выражения критерия устойчивости (2) показал возможность увеличения предельных по апериодической статической устойчивости параметров режима и то, что апериодическая статическая устойчивость существенно зависит от характеристики управляемой емкости в УПК.

В данной главе также рассматриваются статические характеристики исследуемой системы с использованием разработанных математических моделей. Сравнение этих характеристик показывает существенное количественное различие статических характеристик при одинаковых функциональных зависимостях сопротивления УПК. Исходя из этого можно сделать вывод о необходимости возможно более полного учета всех параметров передачи при расчетах установившихся режимов. Однако качественно, т. е. по своему внешнему виду, они не имеют существенных отличий. Анализ уровней напряжения на выводах УПК, при резонансных переходах, показал, что имеет место существенное увеличение напряжения. Из этого следует, что характеристику регулируемого УПК необходимо выбирать таким образом, чтобы сохранить преимущества рассматриваемой компенсации и устранить нежелательные явления.

Третья глава посвящена исследованию динамической устойчивости системы, содержащей линию электропередачи с регулируемым УПК. В ней решаются следующие основные задачи:

- выявление особенностей расчета переходных процессов в электроэнергетической системе с регулируемым УПК;

- сравнение результатов расчетов переходных процессов для различных характеристик управляемой емкости;
- анализ влияния характеристик управляемой емкости на переходные процессы и динамическую устойчивость.

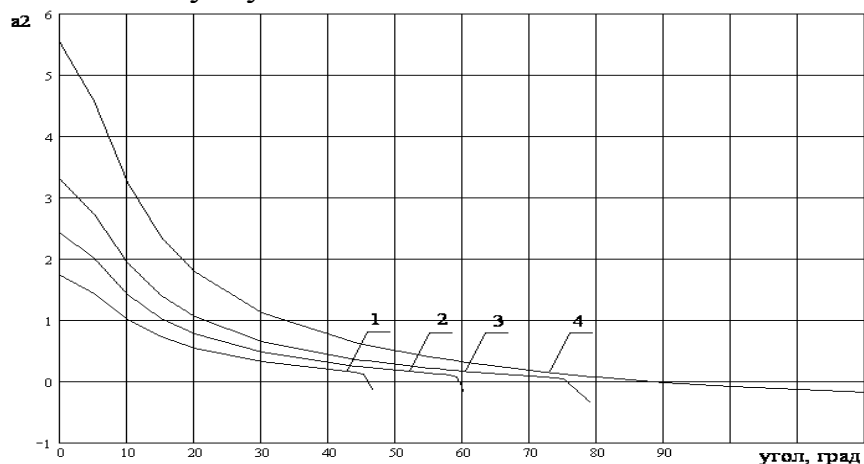


Рис. 5. Анализ аperiodической устойчивости:
 1 – $K2=10$ мкФ/кА; 2 – $K2=6$ мкФ/кА; 3 – $K2=4$ мкФ/кА; 4 – $K2=2$ мкФ/кА

При рассмотрении этих вопросов важно выяснить, можно ли получить существенный технический эффект при использовании рассматриваемых УПК и при каких характеристиках. Расчеты переходных процессов в исследуемой электроэнергетической системе при «больших» возмущениях проводились с использованием программно-методического комплекса МИК-АЛ. Динамическая устойчивость исследуемой системы анализировалась при возмущениях исходного режима двух типов: короткие замыкания и набросы активной мощности, наиболее распространенные и характерные для нагруженных межсистемных связей. В работе приведены зависимости $P(t)$ и $\delta(t)$ для различных характеристик $X_{\text{впк}}(I)$, определяемых значением коэффициента $K2$ в соотношении (1), а также для различных исходных режимов. Анализ результатов расчета по полной математической модели показал, что при одинаковом возмущении исходного режима для различных зависимостей сопротивления $X_{\text{впк}}(I)$ характер переходного процесса различен. При значениях $K2$, равных 10 мкФ/кА, 6 мкФ/кА, имеем явно выраженные резонансные переходы, которые не наблюдаются при $K2 < 4,64$ мкФ/кА и при мощности, равной натуральной, причем система остается динамически устойчивой. При мощности, равной 50 % натуральной мощности, резонансные переходы не наблюдаются при $K2 < 5,4$ мкФ/кА. Особо следует выделить переходный процесс при значениях $K2=4,64$ мкФ/кА и $K2=5,4$ мкФ/кА. Как видно из анализа переходного процесса (рис. 6), он отличается от процессов как с резонансным переходом, так и без него. Для анализа этого процесса необходимо учитывать вид статических характеристик (рис. 3) и провести анализ с учетом зависимости $\delta(t)$. В рассматриваемых случаях возникли довольно редкие, но, как показали анализ и расчеты, вполне возможные условия для достижения в пере-

ходном процессе точки начала резонансного перехода, а именно: при достижении этой точки $\omega = \omega_0$ в рассматриваемом переходном процессе, то есть $\frac{d\delta}{dt} = 0$, что и видно на рис. 6. Поэтому далее переходный процесс пошел не с увеличением угла $\delta(t)$ и переходом со сменой знака активной мощности за счет электромеханической инерции ротора генератора, а стала «отрабатываться» верхняя ветвь статической характеристики с большими величинами токов, а следовательно, и значительной электромагнитной мощностью, что привело к интенсивному торможению ротора и резкому снижению угла δ , то есть к нарушению устойчивости во втором цикле качаний. Отсюда и столь необычный вид характеристики переходного процесса.

Анализ динамической устойчивости исследуемой электроэнергетической системы с регулируемым УПК показал существенное увеличение предельной мощности по условию сохранения динамической устойчивости при выбранных соответствующим образом характеристиках элемента (до 10 % при трехфазном коротком замыкании по сравнению с УПК обычного типа). Однако, изменяя значения коэффициентов, характеризующих зависимость сопротивления УПК в функции тока, можно увеличить значение этой мощности до 30 %. Анализ изменения напряжений на выводах УПК в переходном процессе при различных характеристиках УПК показал, что и с точки зрения оценки уровней напряжения достижение в переходном процессе резонансных явлений крайне нежелательно. Это приводит к значительным перенапряжениям на выводах емкости, как в переходном процессе, так и в стационарных режимах, о чем свидетельствуют проведенные ранее исследования стационарных режимов при высоких степенях компенсации с УПК обычного типа. Однако в рассматриваемом случае эти явления имеют место лишь при передаваемых мощностях, значительно превышающих мощности реальных рабочих режимов передачи.

Рассмотрение уровней напряжений в переходном режиме лишний раз подтверждает необходимость выбора характеристики $X_{УПК}(I)$ таким образом, чтобы обеспечить невозможность такого нежелательного явления как резонансный переход, причем анализ отсутствия этого явления при определенной крутизне характеристики необходимо проводить совместно с анализом статических характеристик, чтобы исключить эти явления.

Сравнение изменений мощности генератора в течение переходного процесса $P(t)$ показывает, что для одинаковых характеристик управляемой емкости при отсутствии резонансных переходов результаты расчетов по полной и упрощенной моделям близки. Что касается переходных процессов при резонансных переходах, то они при соответствующих характеристиках $X_{УПК}(I)$ существенно отличаются, хотя качественная сторона процесса, наличие или отсутствие резонансного перехода, совпадает при расчете по полной и упрощенной моделям. Количественное различие изменений угла ротора в течение

переходного процесса обусловлено тем, что при расчете по полной математической модели получен угол между вектором напряжения системы и поперечной осью ротора синхронной машины, а при расчете по упрощенной модели имеем угол между ЭДС E' и вектором напряжения U_c .

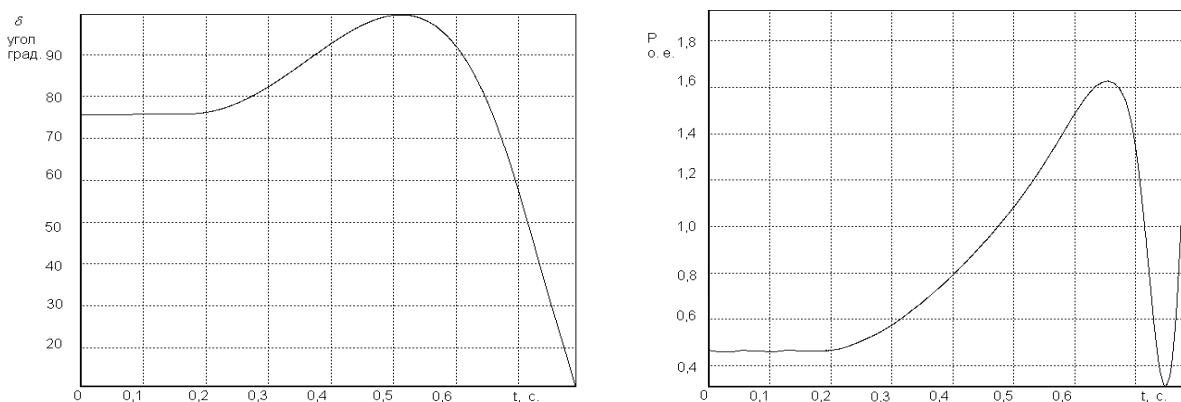


Рис. 6. Зависимости $\delta(t)$ и $P(t)$ для $K2=4,64$ мкФ/кА

В четвертой главе представлен способ анализа колебательной статической устойчивости исследуемой системы с определением диапазона значений настроечных параметров АРВ СД (сильного действия) при различной степени компенсации и различных параметрах закона регулирования УПК, где обеспечивается максимальная эффективность применения регулируемых УПК с точки зрения улучшения устойчивости электроэнергетической электрической системы.

Анализ колебательной статической устойчивости выполнен с использованием полной математической модели исследуемой системы посредством вычислительного эксперимента, а полученные результаты подтверждены применением известных методов теории устойчивости. На основании результатов исследования колебательной статической устойчивости по полной математической модели определены границы устойчивости в зависимости от степени компенсации и параметров закона регулирования УПК. Эта зависимость приводится на рис. 7. Из этих характеристик видно, что при степени компенсации до 50 % в системе с регулируемым УПК не наблюдается нарушений колебательной статической устойчивости во всем диапазоне возможных рабочих режимов, т. е. регулируемое УПК не приводит к появлению колебательной неустойчивости.

Однако при значительных перетоках мощности с применением регулируемого УПК емкостное сопротивление может принимать значение, близкое к границе зоны самовозбуждения. В результате возрастание тока линии приводит к нарушению условий сохранения колебательной устойчивости. В данном случае имеет место противоречие в требованиях к закону регулирования УПК с точки зрения улучшения аperiodической статической и динамической устойчивости, с одной стороны, и устранения самовозбуждения, с другой стороны. Анализ предельных режимов показал, что такое отрицательное

влияние регулируемого УПК на колебательную статическую устойчивость наблюдается при высоких значениях степени компенсации. Такая степень компенсации не применяется в практике эксплуатации электроэнергетических систем.

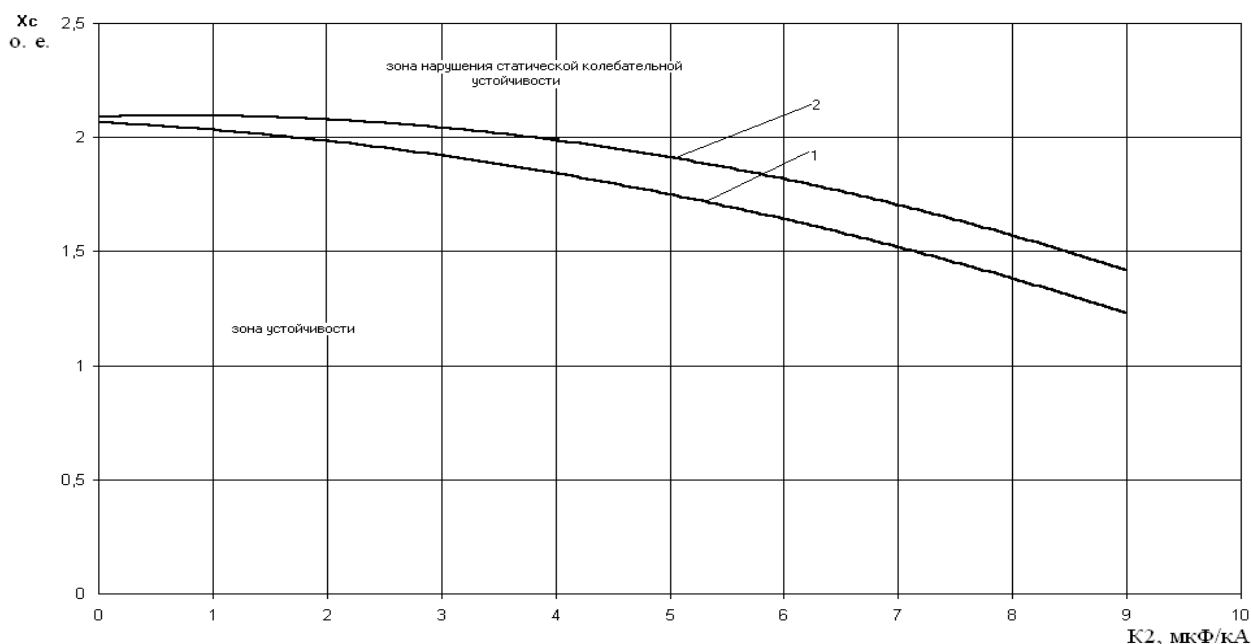


Рис. 7. Зависимость степени компенсации $X_{уПК}$ от коэффициента K_2 :
1—без АРВ СД; 2—с АРВ СД

Как видно на рис. 7, даже при таких высоких степенях компенсации при совместном выборе законов регулирования управляемых УПК и АРВ можно устранить отрицательное влияние регулируемых УПК на колебательную статическую устойчивость. Исходя из этого можно сделать вывод о том, что закон регулирования УПК, положительно влияющий на апериодическую статическую устойчивость и динамическую устойчивость в диапазоне рабочих режимов, не приводит к нарушениям колебательной статической устойчивости при различных параметрах закона регулирования. Для подтверждения результатов, полученных выше, а также для более глубокого анализа колебательной статической устойчивости исследуемой электроэнергетической системы разработана методика, с помощью которой выявлены диапазоны изменения параметров режима электроэнергетической системы (рис. 1) и параметров регулируемого УПК, при которых обеспечивается максимальная эффективность применения рассматриваемых УПК с точки зрения улучшения устойчивости электроэнергетической системы. С этой целью записаны уравнения электромеханических и электромагнитных переходных процессов, проведена линеаризация уравнений по первому приближению и получен характеристический определитель (3). Для построения границы D - разбиения рассмотрен режим, близкий к зоне самовозбуждения. Подставив численные значения частных производных режимных параметров в характеристический определитель и раскрыв его, получим характеристическое уравнение пятой

степени (4). В соответствии с методом D - разбиения, наложив $p = j\omega$ и выделив действительную и мнимую части, будем иметь систему из двух уравнений с действительными коэффициентами, решая которую, получим параметрические уравнения по настроечным параметрам АРВ СД (5).

$$D(P) = \begin{vmatrix} T_j p^2 + P_d p + \frac{\partial P}{\partial \delta} & \frac{\partial P}{\partial E_q} & \frac{\partial P}{\partial X_{УПК}} \\ -\frac{\partial I}{\partial \delta} & -\frac{\partial I}{\partial E_q} & -\left(\frac{\partial I}{\partial X_{УПК}} - \frac{1}{\frac{\partial X_{УПК}}{\partial I}} \right) \\ T_{do} p \frac{\partial E_q'}{\partial \delta} - \frac{1}{(1+pT_e)(1+pT_p)} \times \\ \times ((K_{ou} + pK_{1U}) \frac{\partial U_2}{\partial \delta} + (K_{1I} + K_{2I} p) p \frac{\partial I_2}{\partial \delta}) & T_{do} p \frac{\partial E_q'}{\partial E_q} + 1 - \frac{1}{(1+pT_e)(1+pT_p)} \times \\ \times ((K_{ou} + pK_{1U}) \frac{\partial U_2}{\partial E_q} + (K_{1I} + K_{2I} p) p \frac{\partial I_2}{\partial E_q}) & T_{do} p \frac{\partial E_q'}{\partial X_{УПК}} - \frac{1}{(1+pT_e)(1+pT_p)} \times \\ \times ((K_{ou} + pK_{1U}) \frac{\partial U_2}{\partial X_{УПК}} + (K_{1I} + K_{2I} p) p \frac{\partial I_2}{\partial X_{УПК}}) \end{vmatrix}. \quad (3)$$

$$D(p) = D_o(p) + K_{1I} D_1(p) + K_{2I} D_2(p) = 0,$$

$$D_o(p) = -7,287 \cdot 10^{-6} p^5 - 6,2633 \cdot 10^{-4} p^4 - 1,9759 \cdot 10^{-2} p^3 - 0,53665 p^2 - 2,1283 p - 1,5041, \quad (4)$$

$$D_1(p) = 7,0795 \cdot 10^{-3} p^3 + 3,8234 \cdot 10^{-3} p^2 - 0,1344 p,$$

$$D_2(p) = 7,079 \cdot 10^{-3} p^4 + 3,823 \cdot 10^{-3} p^3 - 0,1344 p^2.$$

$$K_{1I} = \frac{-1,3651 \cdot 10^{-4} \omega^4 + 5,1589 \cdot 10^{-8} \omega^6 + 1,0359 \cdot 10^{-2} \omega^2 + 0,2918}{-5,0119 \cdot 10^{-5} \omega^4 - 1,9177 \cdot 10^{-3} \omega^2 - 1,8066 \cdot 10^{-2}}, \quad (5)$$

$$K_{2I} = \frac{-4,406 \cdot 10^{-6} \omega^6 + 3,639 \cdot 10^{-3} \omega^4 + 6,962 \cdot 10^{-2} \omega^2 - 0,202}{-5,0119 \cdot 10^{-5} \omega^6 - 1,9177 \cdot 10^{-3} \omega^4 - 1,8066 \cdot 10^{-2} \omega^2}.$$

На рис. 8 представлена граница области D - разбиения.

Область устойчивости для настроечных параметров АРВ СД можно проверить как с помощью полной математической модели и вычислительного эксперимента, так и с помощью корней характеристического уравнения. Рассмотрим точку с настроечными параметрами АРВ СД $K_{1I} = 1 \frac{\text{ед.возб.х.х.}}{\text{рад/с}}$ и

$K_{2I} = 0,01 \frac{\text{ед.возб.х.х.}}{\text{рад/с}^2}$ (рис. 8), при которых имеем устойчивый режим. При таких

значениях настроечных параметров АРВ СД корни характеристического уравнения имеют вид

$$p_1 = -64,1, \quad p_{2,3} = -4,7382 \pm 29,336i, \quad p_{4,5} = -2,339 \pm 2,314i.$$

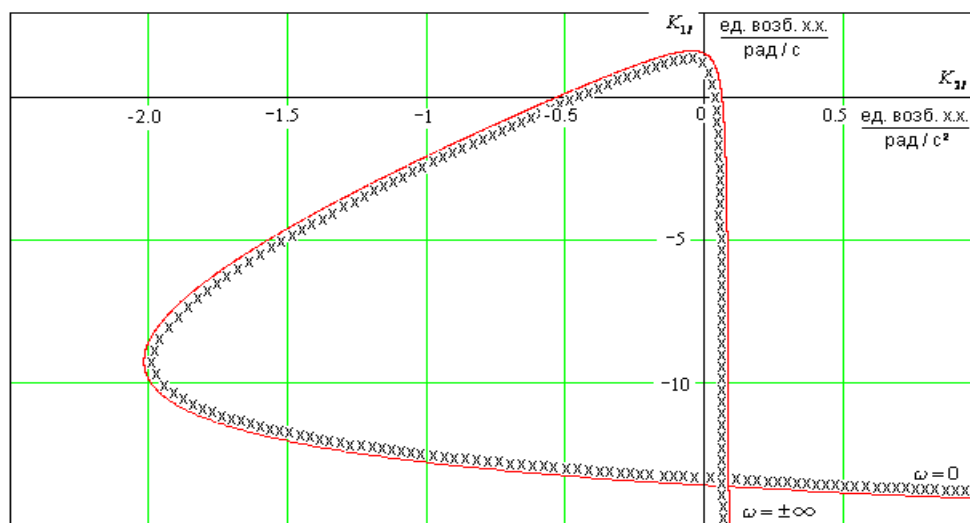


Рис. 8. Граница области D - разбиения для режима с параметрами $X_{УПК} = 2$ и $K_2 = 2 \text{ мкФ/кА}$

Как видно, система статически устойчива. При рассмотрении режима, соответствующего точке вне области устойчивости, например $K_{11} = 3 \frac{\text{ед. возб. х.х.}}{\text{рад/с}}$ и

$K_{21} = 0,5 \frac{\text{ед. возб. х.х.}}{\text{рад/с}^2}$, имеем следующие корни характеристического уравнения:

$$p_1 = -12,905, \quad p_{2,3} = -2,218 \pm 2,03i, \quad p_4 = 19,02, \quad p_5 = 276,1.$$

Полученный результат соответствует нарушению статической устойчивости при выбранных настроечных параметрах АРВ СД. На рис. 9 приведены результаты вычислительного эксперимента с использованием полной математической модели исследуемой электроэнергетической системы. Результаты подтверждают правильность сделанных выводов. Процесс изменения угла во времени разделен на четыре интервала с разными режимными параметрами. Первый интервал соответствует установившемуся режиму с параметрами УПК $X_{УПК} = 2$ и $K_2 = 2 \text{ мкФ/кА}$. Второй участок соответствует режиму с отключенным АРВ. Как было показано ранее (рис. 7), в таком режиме происходит нарушение колебательной статической устойчивости, что мы и наблюдаем. Третий интервал – это включение АРВ СД с настроечными параметрами из области устойчивости D - разбиения (рис. 9). Как видно на рис. 9, АРВ СД положительно влияет на устойчивость электроэнергетической системы, устраняя развивающийся колебательный процесс. Четвертый интервал соответствует режиму с АРВ СД, но с настроечными параметрами, взятыми вне области D - разбиения, что приводит к нарушению статической устойчивости (рис. 9).

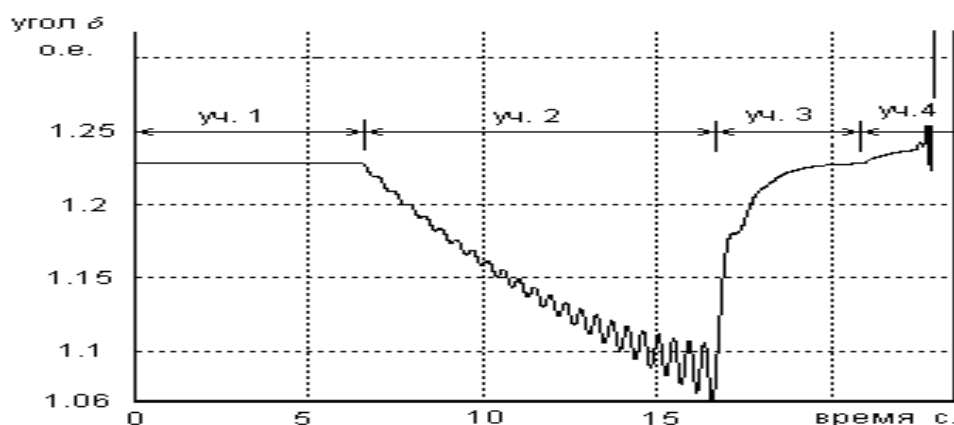


Рис. 9. Изменение угла δ во времени

Таким образом, используя разработанный метод, можно определить области устойчивости настроечных параметров АРВ СД для любого режима электрической системы, то есть для любой степени компенсации, с любым параметром, характеризующим зависимость $X_{упк}(I)$ при разных нагрузках ЛЭП СВН, в целях обеспечения устойчивости электроэнергетической системы в целом в диапазоне возможных рабочих режимов. Таким образом, рассмотренная математическая модель позволяет анализировать колебательную статическую устойчивость с регулируемым УПК и АРВ СД. Представленный способ анализа статической устойчивости дает возможность определить диапазон значений настроечных параметров АРВ СД при различной степени компенсации и различных параметрах закона регулирования $X_{упк}(I)$, где обеспечивается максимальная эффективность применения регулируемых УПК с точки зрения улучшения устойчивости электроэнергетической системы.

По результатам проведенных исследований сформулированы требования к параметрам и техническим характеристикам емкостных элементов для регулируемых УПК.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Выполнен комплекс научно-исследовательских работ, обеспечивающих повышение эффективности передачи переменного тока, улучшающих статическую и динамическую устойчивость электроэнергетической системы с регулируемым УПК функции тока.

2. Разработаны математические модели электроэнергетической системы, включающие регулируемое УПК.

3. Предложена форма представления характеристики регулируемого УПК в расчетах установившихся и переходных режимов; рассмотрена методика выбора параметров закона регулирования УПК.

4. На основе анализа статической устойчивости электроэнергетической системы с регулируемой емкостью в УПК показано, что это устройство обес-

печивает существенное увеличение предела передаваемой мощности (30 % и более по сравнению с УПК обычного типа), а также улучшает параметры режима при малых нагрузках.

5. Показано, что зависимость сопротивления УПК от тока существенно влияет на эффективность УПК. Для улучшения статической и динамической устойчивости это сопротивление должно иметь возрастающую зависимость от модуля тока.

6. Проанализированы статические характеристики системы для различных параметров закона регулирования управляемой емкости; выявлены и проанализированы условия возникновения резонансных переходов, пути их возможного устранения.

7. На основе анализа динамической устойчивости при различных характеристиках УПК показано, что в зависимости от параметров закона регулирования УПК можно получить существенное улучшение динамической устойчивости (увеличение предельной мощности по условию сохранения динамической устойчивости до 10 % при трехфазном коротком замыкании по сравнению с УПК обычного типа).

8. Установлено, что параметры закона регулирования УПК, выбранные по условиям улучшения апериодической статической устойчивости и динамической устойчивости в диапазоне возможных рабочих режимов, не приводят к нарушениям колебательной устойчивости.

9. Предложена методика анализа колебательной статической устойчивости исследуемой системы с регулируемым УПК.

10. Сформулированы требования к параметрам и характеристикам емкостных элементов для регулируемых УПК.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные статьи, опубликованные в изданиях по списку ВАК

1. Голов, В. П. Влияние законов регулирования устройств продольной компенсации на устойчивость электроэнергетической системы / В. П. Голов, **А. А. Мартиросян** // Вестник ИГЭУ / Ивановский государственный энергетический университет.—Иваново.—2003.—Вып. 5.—С.41-44.

2. Голов, В. П. Анализ статической колебательной устойчивости электрической системы с регулируемым УПК / В. П. Голов, **А. А. Мартиросян** // Вестник ИГЭУ / Ивановский государственный энергетический университет.—2004.—Вып. 5.—С. 36 – 38.

3. Голов, В. П. Особенности анализа колебательной статической устойчивости электрической системы с регулируемым УПК / В. П. Голов, **А. А. Мартиросян** // Вестник ИГЭУ / Ивановский государственный энергетический университет.—Иваново.—2004.—Вып. 6.—С. 58 – 61.

4. **Мартиросян, А. А.** Совместный выбор законов регулирования АРВ СД и регулируемого УПК в целях улучшения устойчивости электрической

системы / А. А. Мартиросян // Вестник ИГЭУ / Ивановский государственный энергетический университет.—Иваново.—2008.—Вып. 4.—С. 61-65.

Публикации в других изданиях

5. Голов, В. П. Особенности выбора закона регулирования УПК для обеспечения устойчивости электрической системы / В. П. Голов, **А. А. Мартиросян** // Тезисы докладов Международной научно-технической конференции "Состояние и перспективы развития электротехнологии" (X Бенардосовские чтения), 6-8 июня: [в 2 т.]; Министерство образования Российской Федерации, Ивановский государственный энергетический университет, Академия технологических наук Российской Федерации, Верхне-Волжское отделение ; редкол.: В. Н. Нуждин [и др.].—Иваново.—2001.—Т. 1.—С.56.

6. Голов, В. П. Устойчивость электрической системы с управляемой линией электропередачи / В. П. Голов, **А. А. Мартиросян** // Повышение эффективности работы ТЭС и энергосистем: труды ИГЭУ; Министерство общего и профессионального образования Российской Федерации, Ивановский государственный энергетический университет.—Иваново.—1998.—Вып. 2 / под ред. А. В. Мошкарина, В. А. Шуина, Е. С. Целищева.—С.211-214.

7. Голов, В. П. Анализ устойчивости электрической системы с регулируемым УПК / В. П. Голов, **А. А. Мартиросян** // Тезисы докладов Международной научно-технической конференции "Состояние и перспективы развития электротехнологии" (IX Бенардосовские чтения), 8-10 июня; Министерство общего и профессионального образования Российской Федерации, Ивановский государственный энергетический университет, Академия технологических наук Российской Федерации, Верхне-Волжское отделение АТН РФ; редкол.: В. Н. Нуждин [и др.].—С. 40.—Иваново, 1999.

8. Голов, В. П. Выбор законов регулирования УПК линий электропередачи по условиям сохранения колебательной статической устойчивости / В. П. Голов, **А. А. Мартиросян**, О. В. Луганская // Тезисы докладов Международной научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития электротехнологии» (XI Бенардосовские чтения); Федеральное агентство по образованию, ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В. И. Ленина», Академия технологических наук Российской Федерации, Верхне-Волжское отделение АТН РФ, редкол.: В. Н. Нуждин (предс.) [и др.].—Иваново.—2003.—Т. 1.

9. Голов, В. П. Выбор параметров законов регулирования УПК линий для улучшения устойчивости ЭС / В. П. Голов, **А. А. Мартиросян** // Тезисы докладов Международной научно-технической конференции "Состояние и перспективы развития электротехнологии" (XII Бенардосовские чтения), 1-3 июня; Федеральное агентство по образованию, ГОУВПО "Ивановский государственный энергетический университет имени В. И. Ленина", Академия тех-

нологических наук Российской Федерации, Верхне-Волжское отделение АТН РФ; редкол.: В. Н. Нуждин (предс.) [и др.].—Иваново..—2005.—Т. 1.—С.49.

10. Голов, В. П. Анализ статической устойчивости электроэнергетической системы / В. П. Голов, **А. А. Мартиросян**, З. В. Семеновская // Электроэнергетика. Региональная научно-техническая конференция студентов и аспирантов, Иваново, 20-21 апреля 2006 г: тез. докл.; Федеральное агентство по образованию, ГОУВПО "Ивановский государственный энергетический университет им. В. И. Ленина".—Иваново, 2006.—С.11-13.

11. **Мартиросян, А. А.** Колебательная статическая устойчивость электрической системы с регулируемым УПК / А. А. Мартиросян // Тезисы докладов Международной научно-технической конференции "Состояние и перспективы развития электротехнологии" (XIV Бенардосовские чтения), 29-31 мая; Федеральное агентство по образованию, ГОУВПО "Ивановский государственный энергетический университет имени В. И. Ленина", Академия технологических наук Российской Федерации, Верхне-Волжское отделение АТН РФ; редкол.: С. В. Тарарыкин (предс.) [и др.].—Иваново..—2007.—Т. 1.—С. 46.

МАРТИРОСЯН Акоп Арамаисович
ПОВЫШЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ
С ПРИМЕНЕНИЕМ РЕГУЛИРУЕМОЙ ПРОДОЛЬНОЙ КОМПЕНСАЦИИ

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать . Формат 60x84 1/16.

Печать плоская. Усл. печ. л. 1,16. Уч. изд. л. 1,5. Тираж 100 экз. Заказ
ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет
им. В. А. Ленина.

153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34.

Отпечатано в УИУНЛ ИГЭУ.