

На правах рукописи



ДЕХТЕРЕВ АНТОН ИВАНОВИЧ

**ИДЕНТИФИКАЦИЯ МОДЕЛИ И  
КОНТРОЛЬ УСТОЙЧИВОСТИ ЭЭС ПО ДАННЫМ  
СИНХРОНИЗИРОВАННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ**

Специальность 05.14.02 – Электрические станции и  
электроэнергетические системы

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Новосибирск – 2011

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении  
высшего профессионального образования  
«Новосибирский государственный технический университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
Фишов Александр Георгиевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
Манусов Вадим Зиновьевич

кандидат технических наук, доцент  
Шепилов Олег Николаевич

Ведущая организация: ЗАО «Институт автоматизации энергетических  
систем», г. Новосибирск

Защита состоится « 16 » июня 2011 г. в 10:00 часов на заседании  
диссертационного совета Д 212.173.01 при Новосибирском государственном  
техническом университете по адресу: 630092, г. Новосибирск, пр. Карла  
Маркса, 20

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского  
государственного технического университета.

Автореферат разослан 16 мая 2011 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Тимофеев И.П.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** В настоящее время в России при оперативно-диспетчерском управлении режимом электроэнергетической системы (ЭЭС) контроль устойчивости и допустимости режима осуществляется с помощью максимально и аварийно допустимых перетоков (МДП, АДП) в контролируемых сечениях сети, заранее рассчитываемых для прогнозируемых и планируемых режимов. Заблаговременность их определения порождает необходимость учета дополнительных запасов устойчивости и, как следствие, недоиспользование пропускной способности электрической сети. Кроме того, существующая технология контроля статической устойчивости требует подробной информации о режимных параметрах, топологии электрической сети и параметрах схем замещения всех элементов электрической сети, которая поступает от устройств телемеханики и из эксплуатационных баз данных. Большой объем данных, ошибки, погрешности их определения и сбора замедляют процесс контроля статической устойчивости и вносят значительные погрешности в результаты.

В условиях развития рынка в электроэнергетике эти обстоятельства приводят к тому, что снижается экономическая эффективность ЭЭС.

Следует отметить, что контроль статической устойчивости выполняется только в установившихся нормальных и послеаварийных режимах. Переход к послеаварийному установившемуся режиму является многостадийным процессом, в котором на квазиустановившемся этапе в результате действия регуляторов мощности и напряжения возможно нарушение статической устойчивости. Контроль запасов устойчивости на этой стадии следует выполнять в темпе переходного процесса, что не предусмотрено действующими нормативами по устойчивости.

Широкое внедрение устройств синхронизированных векторных измерений (Phasor Measurement Unit (PMU)) предоставляет новые технические возможности для построения систем мониторинга запасов статической устойчивости (СМЗУ), работающих в режиме реального времени с учетом актуальных схемно-режимных условий.

### Цели работы

- исследование возможности использования матрицы собственных и взаимных проводимостей (СВП) ЭДС генераторов в качестве модели электрических связей генераторов ЭЭС при определении пределов выдаваемой мощности по условию статической устойчивости в реальном времени;

- разработка метода идентификации матрицы СВП ЭДС генераторов на основе синхронизированных векторных измерений без контроля параметров и топологии электрической сети;
- исследование особенностей идентификации матрицы СВП для схем различной конфигурации;
- разработка рекомендаций по снижению погрешностей, возникающих при идентификации матрицы СВП ЭДС генераторов на основе синхронизированных векторных измерений и расчете пределов выдаваемой мощности генераторов.

Для достижения поставленных целей в работе сформулированы и решены следующие **задачи**:

- проведен анализ технологии синхронизированных векторных измерений (Wide Area Measurement System (WAMS)) как информационной основы построения систем мониторинга и управления режимами ЭЭС;
- сформулированы необходимые и достаточные условия идентификации матрицы СВП ЭДС генераторов ЭЭС по данным синхронизированных измерений режимных параметров;
- разработан алгоритм цифрового фильтра для сглаживания расчетных значений СВП;
- разработан метод расчета параметров эквивалентного генератора, замещающего группу генераторов с синфазно движущимися в переходном процессе роторами;
- разработана программа идентификации матрицы СВП ЭДС генераторов ЭЭС и расчета пределов выдаваемых мощностей генераторов по данным синхронизированных регистрограмм;
- обоснованы рекомендации по снижению погрешностей идентификации матрицы СВП ЭДС генераторов ЭЭС;
- разработан алгоритм мониторинга запасов устойчивости режима ЭЭС (СМЗУ) на основе матрицы СВП ЭДС генераторов ЭЭС;
- экспериментально на физических моделях подтверждена работоспособность системы мониторинга устойчивости ЭЭС, построенной на основе идентификации матрицы СВП ЭДС генераторов по данным синхронизированных регистрограмм режимных параметров на шинах электростанций.

**Научная новизна основных положений и результатов работы** состоит в следующем:

- доказана возможность идентификации СВП ЭДС генераторов на основе синхронизированных измерений режимных параметров на шинах электростанций без контроля параметров и топологии электрической сети для генераторов, между которыми в переходных процессах возникает взаимное движение;
- доказана возможность определения пределов выдаваемых мощностей генераторов на основе актуальных значений СВП ЭДС генераторов в темпе протекания электромеханического переходного процесса и в послеаварийном режиме;
- выявлены причины и получены оценки погрешностей расчета СВП ЭДС генераторов по данным синхронизированных измерений режимных параметров и обоснованы рекомендации по их снижению;
- для мониторинга статической устойчивости режима ЭЭС предложена новая система понятий: текущий индивидуальный, текущий групповой (максимально возможный) пределы мощности генератора и послеаварийный предел мощности генератора по устойчивости.

#### **Практическая значимость результатов работы:**

- разработанный метод идентификации СВП ЭДС генераторов по данным синхронизированных измерений режимных параметров позволяет сформировать компактную модель ЭЭС, на основе которой могут мониториться ограничения по статической устойчивости без контроля параметров элементов и топологии электрической сети в реальном времени с учетом актуальных схемно-режимных условий;
- результаты исследований идентификации СВП ЭДС генераторов и предложенный алгоритм СМЗУ на основе синхронизированных регистрограмм переходных процессов позволяют решать задачу расстановки регистраторов РМУ в ЭЭС;
- разработанные алгоритм цифрового фильтра, метод эквивалентирования генераторов с синфазно движущимися роторами и рекомендации по снижению погрешностей позволяют осуществить практическую реализацию мониторинга устойчивости режимов ЭЭС;
- на основе данных о запасах статической устойчивости, получаемых в режиме реального времени, могут быть построены новые системы противоаварийного управления, работающие по принципу «ПОСЛЕ».

### **Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Компактной моделью ограничений по устойчивости режима ЭЭС для их мониторинга является матрица СВП ЭДС генераторов, идентификация которой возможна по регистрограммам режимных параметров на шинах электростанций.

2. Идентификация матрицы СВП ЭДС генераторов может быть осуществлена путем решения системы линейных алгебраических уравнений выдаваемых генераторами мощностей по значениям мощностей в процессах взаимного движения роторов.

3. Причинами неустойчивости идентификации СВП ЭДС генераторов по данным синхронизированных измерений режимных параметров в переходных режимах являются синфазность движения части роторов генераторов и наличие интервалов времени с несущественными изменениями параметров электрического режима.

4. Требуемые стабильность и погрешность идентификации матрицы СВП ЭДС генераторов по регистрограммам режимных параметров могут быть обеспечены выбором «окна» идентификации на регистрограммах переходного процесса, замещением групп генераторов с синфазно движущимися роторами эквивалентными генераторами и применением цифровых сглаживающих фильтров.

**Достоверность результатов работы** обеспечена сочетанием теоретических исследований, основанных на моделировании режимов ЭЭС, методов мониторинга устойчивости с проверкой результатов на физических моделях ЭЭС. При этом моделирование и исследования выполнялись в два этапа:

*1 этап.* Моделирование электромеханических переходных процессов выполнялось в программно-вычислительном комплексе (ПВК) Mustang, а алгоритмов мониторинга по экспериментальным специализированным программам. На этом этапе решались задачи:

- проверки основных теоретических положений в идеальных условиях (без погрешностей и искажений в измерениях);
- предварительного анализа функционирования и совершенствования разработанных алгоритмов мониторинга.

*2 этап.* Моделирование электромеханических переходных процессов выполнялось на электродинамических моделях (ЭДМ) ЭЭС, измерения

производились с использованием цифровых регистраторов процессов. На этом этапе решались задачи:

- проверки теоретических положений в наиболее близких к реальности условиях;
- верификации моделей, созданных на ЭДМ ЭЭС и в ПВК Mustang, на основе сравнения осциллограмм изменения режимных параметров.

Свидетельством достоверности основных результатов является хорошая согласованность расчетных пределов выдаваемых мощностей генераторов, а также групп генераторов с синфазно движущимися роторами, полученных традиционным методом утяжеления режима, с пределами, полученными на основе идентифицируемых по регистрограммам переходных процессов матриц СВП ЭДС генераторов.

### **Апробация результатов работы.**

Отдельные результаты работы и работа в целом обсуждались на семинарах кафедры АЭС и факультета энергетики НГТУ, а также на Всероссийских и Международных конференциях в Новосибирске, Томске, Екатеринбурге, Санкт-Петербурге и Таджикистане.

Результаты работы использованы при выполнении научных работ магистрантами и аспирантами кафедры АЭС НГТУ. Разработанная программа идентификации матрицы СВП использована при создании макета СМЗУ на базе ЭДМ ЭЭС НГТУ. Акт внедрения результатов работы автора представлен в приложении диссертации.

### **Публикации.**

Всего опубликовано 5 работ по теме диссертации: работ, опубликованных в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК – 2; работ, опубликованных в сборниках международных и всероссийских конференций – 3.

### **Структура и объем диссертации.**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников из 66 наименований и приложений. Общий объем диссертационной работы составляет 197 страниц, включая 11 таблиц и 52 рисунка.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цели и основные задачи исследования, отражены научная новизна работы, ее практическая значимость и основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** рассматриваются состояние проблемы устойчивости режимов в современных ЭЭС и использование распределенных синхронизированных векторных измерений как измерительной основы для функционирования систем мониторинга устойчивости режимов ЭЭС.

В современных ЭЭС актуальность проблемы обеспечения устойчивости параллельной работы генераторов обусловлена следующими причинами:

- использование преимущественно в развивающихся странах длинных линий электропередач, где центры генерации географически удалены от центров потребления на значительные расстояния;
- современные процессы укрупнения и интеграции объединенных энергосистем увеличивают возможные масштабы, а также сложность предотвращения возникновения и ликвидации аварий, связанных с нарушением устойчивости параллельной работы генераторов;
- формирование электроэнергетических рынков во многих странах вызвало увеличение загрузки транзитных связей и снижение запасов устойчивости.

Повысить эффективность управления режимами ЭЭС, не снижая надежности ее работы, позволят системы мониторинга устойчивости режима ЭЭС, работающие в реальном времени, учитывающие актуальные схемно-режимные условия.

В настоящее время разработка таких систем ведется на платформе технологии распределенных синхронизированных векторных измерений режимных параметров (WAMS).

Основой WAMS (русский аналог – система мониторинга переходных режимов (СМПР)) являются высокоточные синхронизированные измерения фаз и действующих значений напряжений и токов (векторная оценка сигналов) в различных, географически удаленных узлах ЭЭС.

Для регистрации синхронизированных векторных измерений напряжений и токов используются специальные регистраторы (Phasor Measurement Unit (PMU)), имеющие вход для приема импульсов синхронизации от систем глобальной синхронизации времени (GPS, ГЛОНАС и другие). Устройство векторных измерений на основе полученных мгновенных значений фазных



напряжений и токов выполняет расчет прямой последовательности, затем производит векторные оценки сигналов по первым гармоникам, после чего измерениям присваиваются метки времени.

Выбор мест установки устройств векторных измерений зависит от целей использования этих измерений, а также от типа и назначения систем: мониторинг – WAMS, управление – Wide Area Control System (WACS), защита – Wide Area Protection System (WAPS).

Для сбора данных с нескольких устройств PMU используются специальные устройства сбора, промежуточного хранения и передачи – концентраторы данных. Данные могут предоставляться системам по существующим или вновь сооружаемым волоконно-оптическим каналам связи в виде непрерывного потока данных (большинство приложений WAMS), а также в виде синхронизированных регистрограмм изменения режимных параметров в электромеханическом переходном процессе (реализовано в СМПР).

Для получения векторных оценок сигналов используются рекурсивные и нерекурсивные алгоритмы. Наиболее эффективными методами получения векторных оценок являются методы, основанные на дискретном преобразовании Фурье.

Для сглаживания векторных оценок сигналов при отклонении частоты сети от номинальной, а также при несбалансированной трехфазной системе применяются цифровые фильтры с передискретизацией или с усреднением.

Основной особенностью векторных измерений является представление в виде вектора на комплексной плоскости только установившегося сигнала одной частоты. В связи с этим понятие векторных измерений в быстрых, электромагнитных переходных процессах теряет смысл. Векторные измерения, полученные за интервал, включающий в себя коммутацию или последующий электромагнитный переходный процесс, должны быть помечены, как недостоверные. Электромеханический переходный процесс может быть рассмотрен как последовательность установившихся режимов, таким образом, векторные измерения, полученные в темпе протекания электромеханических переходных процессов, наряду со значениями, полученными в установившихся режимах, могут использоваться в дальнейших расчетах.

В приложении диссертации приводится общее описание стандарта синхронизированных векторных измерений в энергосистеме.

**Во второй главе** рассматриваются классические модели и методы контроля устойчивости ЭЭС, а также модель и метод, основанные на

синхронизированных измерениях.

В основе классических методов контроля статической устойчивости режимов ЭЭС лежит метод малых колебаний.

Основные положения метода малых колебаний сводятся к тому, что допуская небольшое возмущение исходного состояния, составляют систему нелинейных дифференциальных и алгебраических уравнений. При малых отклонениях оказывается возможным линеаризовать дифференциальные уравнения, описывающие свободные колебания. После линеаризации системы уравнений в точке положения равновесия возможно получение характеристического уравнения. Затем на основе полученных корней характеристического уравнения и двух теорем А.М. Ляпунова судят о факте и характере нарушения устойчивости.

Для сложных ЭЭС ввиду высокого порядка характеристического уравнения применяют различные критерии (методы) устойчивости, которые позволяют по тем или иным признакам судить о нарушении устойчивости.

Условно устойчивость режима ЭЭС разделяют на колебательную и апериодическую. Обеспечение колебательной устойчивости режимов ЭЭС вплоть до пределов по апериодической устойчивости является задачей размещения и настройки систем автоматического регулирования, при этом при планировании и управлении режимами ориентируются на пределы по статической апериодической устойчивости. Их определение, как правило, производят при совмещении в едином процессе расчета нормального режима и оценки его статической апериодической устойчивости путем утяжеления исходного режима ЭЭС в соответствии с заданным вектором утяжеления.

Кроме предельных значений мощности по условию устойчивой параллельной работы генераторов, минимальных значений напряжений по условию устойчивости двигательной нагрузки к ограничениям по допустимости режима относятся максимальные значения тока элементов электрической сети (линий, трансформаторов), минимально и максимально допустимые напряжения в узлах сети.

При планировании режимов ЭЭС для контроля устойчивости режима ЭЭС используются универсальные показатели – коэффициенты запаса по мощности и напряжению. При оперативно-диспетчерском управлении для контроля допустимости режимов используются значениями МДП и АДП, установленных для контролируемых связей и сечений.

В качестве альтернативной модели ЭЭС для расчета и контроля ограничений по статической устойчивости в данной работе предложено

использовать матрицу СВП ЭДС генераторов. Матрица СВП отражает электрические связи между ЭДС генераторов в установившемся режиме в соответствии с выражениями (1) для активных и реактивных мощностей:

$$P_i = E_i'^2 \cdot g_{ii} - \sum_{k=1, k \neq i}^n (E_i' \cdot E_k' \cdot g_{ik} \cdot \cos \delta'_{ik} + E_i' \cdot E_k' \cdot b_{ik} \cdot \sin \delta'_{ik});$$

$$Q_i = -E_i'^2 \cdot b_{ii} - \sum_{k=1, k \neq i}^n (E_i' \cdot E_k' \cdot g_{ik} \cdot \sin \delta'_{ik} - E_i' \cdot E_k' \cdot b_{ik} \cdot \cos \delta'_{ik}),$$
(1)

где  $E'$  – действующее значение переходной ЭДС генератора;

$g_{ii}, b_{ii}$  – собственные активная и реактивная проводимости  $i$ -го генератора;

$g_{ik}, b_{ik}$  – взаимные активная и реактивная проводимости между  $i$ -м и  $k$ -м генераторами;

$\delta'_{ik}$  – взаимный угол между переходными ЭДС  $i$ -го и  $k$ -го генераторов.

Матрица СВП ЭДС генераторов традиционным способом может быть получена путем эквивалентирования исходной схемы электрической сети или в процессе прямого хода по Гауссу при решении системы линейных уравнений установившегося режима и исключении всех промежуточных узлов сети, кроме узлов примыкания ЭДС генераторов.

Недостатком традиционного метода расчета СВП ЭДС генераторов является необходимость в информации о параметрах элементов и топологии электрической сети. При изменении топологии весь расчет необходимо повторять заново.

В настоящей работе предлагается идентифицировать матрицу СВП ЭДС генераторов на основе данных синхронизированных измерений режимных параметров на шинах генераторов.

Учитывая, что величина и угол переходной ЭДС генератора могут быть вычислены по результатам измерений напряжения, активной и реактивной мощности на его шинах, использование выражений (1) позволяет получить систему линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) относительно неизвестных СВП ЭДС генераторов.

Число неизвестных элементов матрицы может быть сокращено при принятии допущения о равенстве взаимных проводимостей, т.е. симметричности матрицы СВП ЭДС генераторов. Использование в большинстве случаев сбалансированных групп соединения обмоток силовых трансформаторов позволяет считать данное допущение правомерным.

Условиями идентификации матрицы СВП ЭДС генераторов являются:

- равенство числа уравнений, составленных по выражению (1), числу неизвестных СВП;

- значимое изменение режимных параметров для того, чтобы уравнения, составленные по выражениям (1), были линейно независимыми.

Особенностью идентификации СВП ЭДС генераторов является квадратичная зависимость числа неизвестных СВП  $N$  от числа генераторов  $n$ :

- без ШБМ –  $N = n \cdot (n + 1)$ ;
- с ШБМ (исключая, случай работы генератора на ШБМ без собственной нагрузки) –  $N = n \cdot (n + 3)$ .

Для ускорения процесса идентификации СВП могут быть использованы выражения (2), описывающие изменение мощности генератора:

$$\begin{aligned} \Delta P_i &= \sum_{k=1, k \neq i}^n (E'_i \cdot E'_k \cdot \Delta \delta'_{ik} \cdot g_{ik} \cdot \sin \delta'_{ik} - E'_i \cdot E'_k \cdot \Delta \delta'_{ik} \cdot b_{ik} \cdot \cos \delta'_{ik}); \\ \Delta Q_i &= - \sum_{k=1, k \neq i}^n (E'_i \cdot E'_k \cdot \Delta \delta'_{ik} \cdot g_{ik} \cdot \cos \delta'_{ik} + E'_i \cdot E'_k \cdot \Delta \delta'_{ik} \cdot b_{ik} \cdot \sin \delta'_{ik}), \end{aligned} \quad (2)$$

где  $\Delta \delta'_{ik}$  – изменение взаимного угла между переходными ЭДС  $i$ -го и  $k$ -го генераторов.

На основе полученной матрицы СВП ЭДС генераторов, используя выражения (1), могут быть рассчитаны предельные режимы отдельно взятого генератора для разных векторов утяжеления.

Используя предложенный метод идентификации СВП ЭДС генераторов без контроля топологии и параметров электрической сети, может быть построена система мониторинга запасов статической устойчивости режима ЭЭС (СМЗУ), функционирующая в реальном времени с учетом актуальных схемно-режимных условий. Алгоритм работы СМЗУ представлен на рис. 1.

Для мониторинга пределов мощностей генераторов в реальном времени в работе введена система понятий: текущий индивидуальный, текущий групповой (максимально возможный) пределы мощности генератора и послеаварийный предел мощности генератора по устойчивости.

*Текущий индивидуальный предел мощности генератора* – предел мощности, полученный на основе актуальной матрицы СВП и текущих действующих значений ЭДС генераторов при условии постоянства углов роторов остальных генераторов.

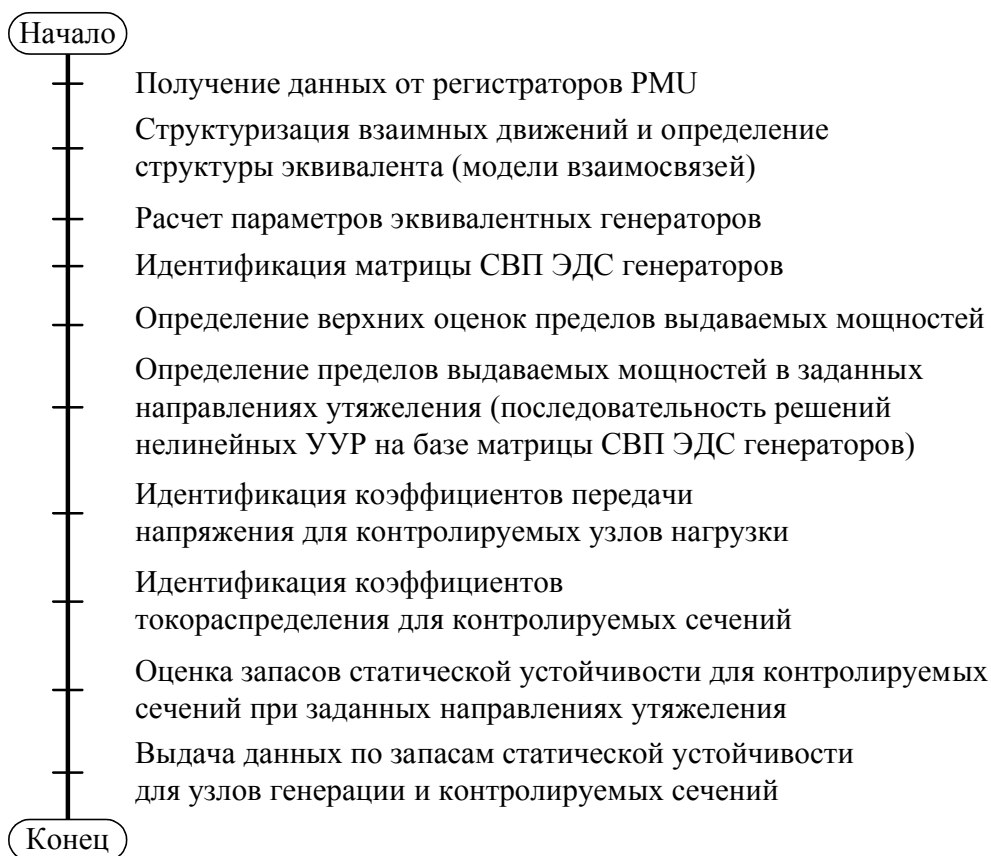


Рис. 1. Алгоритм работы СМЗУ.

*Текущий групповой (максимально возможный) предел мощности генератора* – предел мощности, полученный на основе актуальной матрицы СВП и текущих действующих значений ЭДС генераторов при условии, что нагрузка остальных генераторов обеспечивает максимум выдаваемой мощности рассматриваемого генератора.

*Послеаварийный предел мощности генератора по устойчивости* – предел мощности, полученный на основе актуальной матрицы СВП ЭДС генераторов путем утяжеления в заданном направлении установившегося послеаварийного режима с учетом действия систем регулирования мощности и возбуждения генераторов, ограничений по току ротора и статора.

**В третьей главе** представлены результаты экспериментов на математических и физических моделях ЭЭС, проведенных для проверки теоретических положений и работоспособности предложенных алгоритмов, а также метод расчета параметров эквивалентного генератора, замещающего группу генераторов с синфазно движущимися роторами. Проверка осуществлялась для схем различной конфигурации, с различным числом генераторов в схеме и разного рода нагрузок. Для получения электромеханических переходных процессов в схемах моделировались

различные возмущения.

Результаты расчета пределов выдаваемой мощности генератора для простейшей схемы электропередачи «Генератор с собственной нагрузкой – ШБМ» представлены на рис. 2.

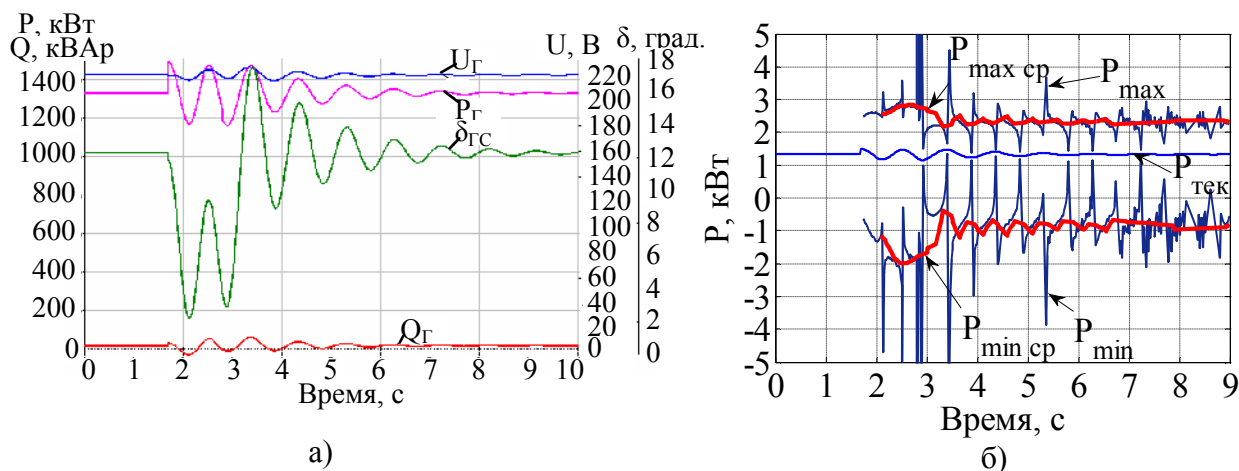


Рис. 2. Изменение режимных параметров на выводах генератора (а) и результаты оценки пределов выдаваемой мощности генератора (б) для простейшей схемы.

Применение цифрового сглаживающего фильтра обеспечивает получение более стабильных результатов  $P_{\max ср}$  и  $P_{\min ср}$  по сравнению с исходными значениями  $P_{\max}$  и  $P_{\min}$  (рис. 2).

При появлении в схеме групп генераторов с синфазно движущимися роторами (синфазная группа) идентификация полной матрицы СВП ЭДС становится невозможной, поскольку отсутствует изменение взаимных углов роторов генераторов внутри групп. Каждая синфазная группа должна входить в систему уравнений, как один эквивалентный генератор.

Основным условием эквивалентного представления синфазной группы является неизменность режима генераторов, не входящих в рассматриваемую группу. Для этого:

- мощность эквивалентного генератора принимается равной сумме соответствующих мощностей генераторов, входящих в синфазную группу.
- величина и фазовый угол напряжения на выводах эквивалентного генератора принимаются равными величине и фазовому углу напряжения наиболее мощного генератора.
- в ветви с взаимными сопротивлениями вводятся фиктивные идеальные трансформаторы (с нулевыми сопротивлениями) с соответствующими комплексными коэффициентами трансформации.
- переходное сопротивление эквивалента определяется по выражению (3):

$$X'_{d_{\text{экв}}} = \frac{Q_{\Gamma_{\text{экв}}} - Q'_{\Gamma_{\text{экв}}}}{P_{\Gamma_{\text{экв}}}^2 + Q_{\Gamma_{\text{экв}}}^2} \cdot U_{\Gamma}^2, \quad (3)$$

где  $P_{\Gamma_{\text{экв}}}$ ,  $Q_{\Gamma_{\text{экв}}}$  – активная и реактивная мощности эквивалентного генератора без учета внутреннего сопротивления;  $Q'_{\Gamma_{\text{экв}}}$  – реактивная мощность эквивалентного генератора с учетом потерь на внутреннем сопротивлении.

С учетом полученного значения переходного сопротивления эквивалентного генератора по известным выражениям определяются величина и внутренний угол переходной ЭДС эквивалентного генератора.

При замещении синфазной группы одним эквивалентным генератором отсутствует возможность определения СВП внутри группы и, следовательно, невозможно контролировать запасы устойчивости внутри этой группы. Однако при воздействии возмущения и отсутствии взаимного движения роторов группы генераторов не возникает и опасности нарушения устойчивости их параллельной работы. Вынужденное эквивалентное представление группы генераторов с синфазно движущимися роторами имеет и позитивное последствие, так как снижается размерность модели ЭЭС для контроля устойчивости.

Проверка достоверности оценок пределов выдаваемой мощности генератора и синфазной группы по данным синхронизированных измерений проводилась на ЭДМ ЭЭС для схем, приведенных на рис. 3.

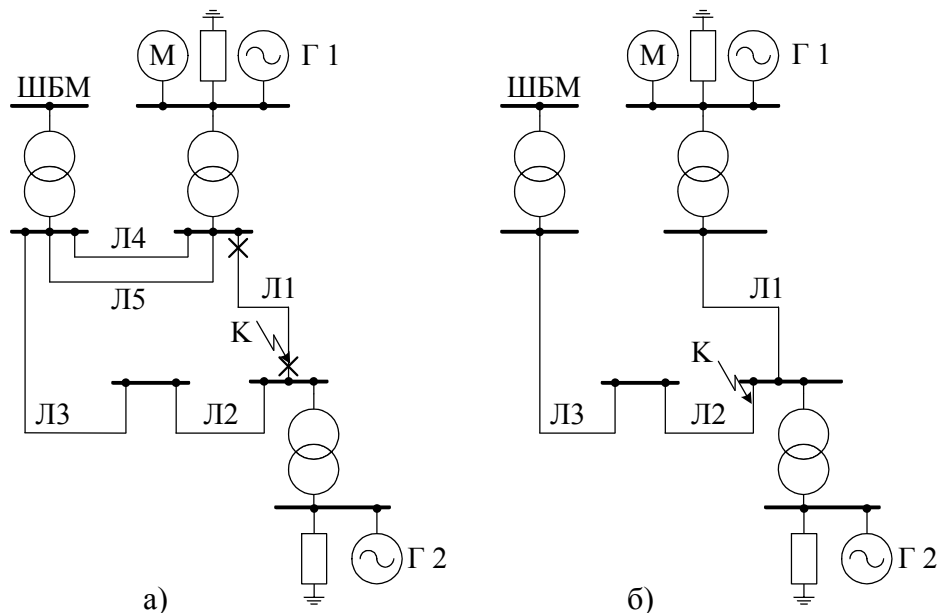


Рис. 3. Двухмашинные схемы с ШБМ.

Результаты расчета и эксперимента приведены в табл. 1.

Пределы выдаваемых мощностей генератора и синфазной группы

	Метод утяжеления		На основе матрицы СВП	
	Математическая модель	Физическая модель	Математическая модель	Физическая модель
схема, представленная на рис. 3а				
$P_{\max}$ , кВт	4,9	4,7	4,78	4,57
$P_{\min}$ , кВт	-0,35	-	-0,32	-0,60
схема, представленная на рис. 3б				
$P_{\max}$ , кВт	7,42	7,45	7,3	7,40
$P_{\min}$ , кВт	2,08	1,82	1,2	1,63

Из таблицы видно, что верхние пределы выдаваемых мощностей генераторов и синфазной группы, рассчитанные на основе матрицы СВП, хорошо согласуются с результатами, полученными традиционным методом утяжеления на математических и физических моделях.

**В четвертой главе** анализируются факторы, влияющие на погрешность определения СВП ЭДС генераторов.

Анализ результатов, полученных на математических и физических моделях ЭЭС, выявил следующие факторы, влияющие на погрешность определения СВП и пределов выдаваемых мощностей генераторов:

1. Погрешности исходных данных:
  - задания параметров (сопротивлений) генераторов;
  - измерений режимных параметров.
2. Структуры и амплитуды взаимных движений роторов генераторов.
3. Модельные факторы:
  - комбинации выражений, отражающих связь электрических мощностей генераторов и их изменений, используемых в системе уравнений идентификации СВП;
  - допущение о постоянстве СВП на интервале, на котором выполняются выборки измерений режимных параметров для составления системы уравнений идентификации СВП;
  - допущение о симметричности матрицы СВП;
  - учет нагрузки постоянными сопротивлениями;
  - замещение группы генераторов с синфазно движущимися роторами в переходном процессе одним эквивалентным генератором.

Основной причиной возникновения значительных погрешностей при идентификации матрицы СВП является плохая обусловленность СЛАУ. Указанный недостаток связан с особенностью метода идентификации матрицы СВП – использование в СЛАУ одних и те же выражений (1) и (2), но для



разных моментов времени переходного электромеханического процесса. Не смотря на значительные изменения режимных параметров, рассматриваемая система уравнений относится к разряду плохо обусловленных. Сложность обеспечения обусловленности СЛАУ возрастает с увеличением числа генераторов в ЭЭС.

В результате плохой обусловленности СЛАУ влияние «внешних» факторов (погрешности измерения, задания исходных данных и методологические факторы) на погрешность решения СЛАУ существенно, ведет к большим погрешностям в определении матрицы СВП и последующем расчете запасов статической устойчивости.

На рисунке 4 представлены расчетные значения проводимостей (индекс «расч»), полученные в темпе протекания переходного процесса, и истинные значения проводимостей (индекс «ор»).

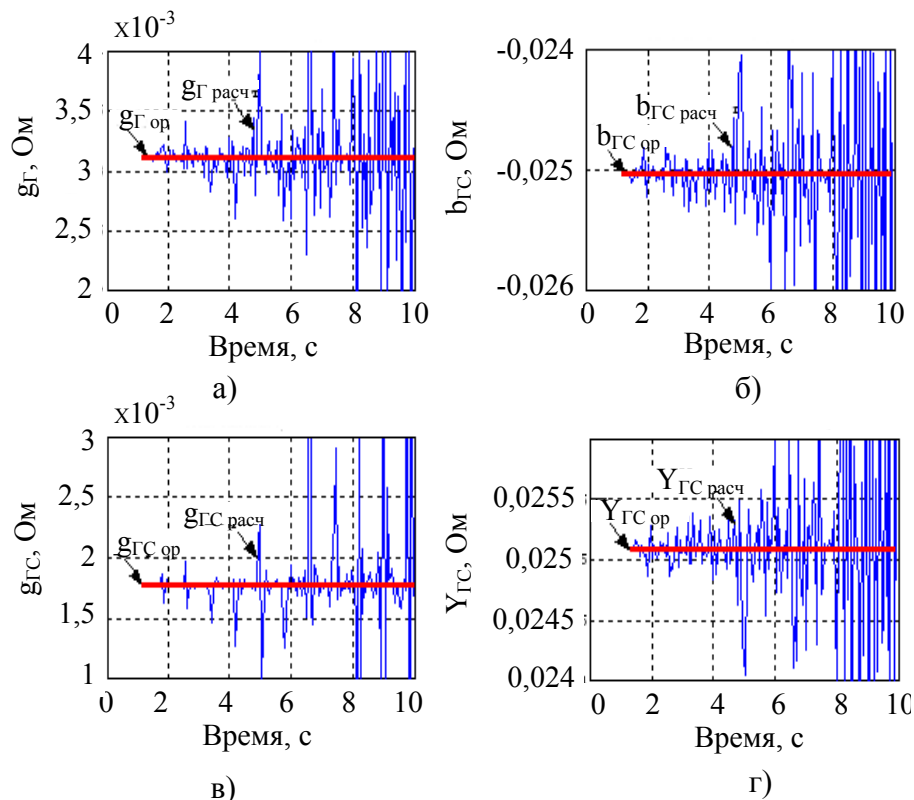


Рис. 4. Результаты расчета СВП для простейшей схемы электропередачи:

- а) активная собственная проводимость ( $g_r$ );
- б) реактивная взаимная проводимость ( $b_{ГC}$ );
- в) активная взаимная проводимость ( $g_{ГC}$ );
- г) полная взаимная проводимость ( $Y_{ГC}$ ).

На основе проведенного исследования предлагаются следующие пути снижения погрешностей определения СВП и последующего определения запасов статической устойчивости:

- предпочтительно использовать при составлении СЛАУ выражения (1);

- повышать обусловленность СЛАУ, проводя идентификацию матрицы СВП на интервале протекания электромеханического переходного процесса, исключая зоны с малым изменением режимных параметров (переходы через локальные экстремумы);
- формировать требования к погрешности измерения режимных параметров с учетом погрешностей всего измерительного канала (учитывая погрешности измерительных трансформаторов тока и напряжения). Предложенный в работе метод идентификации матрицы СВП и расчета запасов статической устойчивости предъявляет высокие требования к измерениям режимных параметров. Относительная погрешность измерений должна быть не хуже 0,2%;
- использовать цифровые фильтры для сглаживания получаемых значений СВП в результате действия «внешних» факторов, а также влияния демпферного момента и систем регулирования;
- замещать синфазные группы генераторов одним эквивалентным для исключения условий неразрешимости СЛАУ, связанных с отсутствием взаимного движения между некоторыми генераторами.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Технология синхронизированных векторных измерений в ЭЭС позволила как усовершенствовать существующие алгоритмы контроля, управления и защиты, так и предоставила возможность решить ряд задач, которые ранее с использованием измерений от SCADA-систем (Supervisory for Control and Data Acquisition (диспетчерское управление и сбор данных)) решить было нельзя. К таким задачам относится и идентификация матриц СВП ЭДС генераторов без контроля параметров и топологии электрической сети.

Матрица СВП представляет собой компактную модель ЭЭС, описывающую электрические связи между ЭДС генераторов. На ее основе могут быть рассчитаны пределы мощностей генераторов в квазиустановившихся и послеаварийном режимах.

На основе теоретических положений, полученных в данной работе, может быть создана система мониторинга запасов статической устойчивости режимов ЭЭС, функционирующая в реальном времени. По данным мониторинга может осуществляться корректировка управляющих воздействий противоаварийных систем, позволяющая значительно повысить экономическую эффективность использования электрической сети без снижения надежности ее работы.

Условием наблюдаемости режима в системе мониторинга статической устойчивости параллельной работы генераторов является установка РМУ во всех узлах генерации.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ ОТРАЖЕНО В ПУБЛИКАЦИЯХ

*Научные работы, опубликованные в изданиях, рекомендованных ВАК:*

1. Фишов А.Г., Дехтерев А.И. Мониторинг запасов устойчивости на основе системы мониторинга переходных процессов // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – Новосибирск: Изд-во НГAVT, 2009. – №1 – С. 102–106.

2. Фишов А.Г., Дехтерев А.И. Анализ условий идентификации угловых характеристик мощности генераторов на примере простейшей схемы // Научный вестник НГТУ. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2010. – №1(38) – С. 75–83.

*Работы, опубликованные в сборниках научных трудов, трудах международных и всероссийских конференций:*

3. Фишов А.Г., Дехтерев А.И. Система мониторинга запасов статической устойчивости на основе WAMS-технологий // Энергетика: экология, надежность, безопасность: сб. трудов XV Всероссийской научно-технической конференции (Томск, 9–11 дек. 2009 г.). – Томск: Изд-во ТПУ, 2009 – С. 5–7.

4. Фишов А.Г., Дехтерев А.И. Особенности расчета запасов статической устойчивости в режиме реального времени // Электроэнергетика глазами молодежи: сб. трудов Всероссийской молодежной научно-технической конференции (Екатеринбург, 17–19 нояб. 2010 г.). – Екатеринбург: Изд-во УрФУ – 2010. – Т.1, С.225–230.

5. Фишов А.Г., Дехтерев А.И. Определение параметров эквивалентного генератора в системе мониторинга запасов статической устойчивости ЭЭС // XXXIX Неделя науки СПбГПУ: материалы международной научно-практической конференции (Санкт-Петербург, 6–11 дек. 2010 г.). – СПб: Изд-во Политехн. ун-та. – 2010. – Ч.2, С. 26–28.

Отпечатано в типографии

Новосибирского государственного технического университета

630092, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20

тел./факс (383) 346-08-57

Формат 60 X 84/16, объем 1,25 п.л., тираж 100 экз.

заказ №865 подписано в печать 13.05.2011 г.