

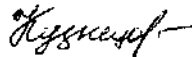
На правах рукописи

Кузнецов Олег Николаевич

Разработка алгоритмического и методического комплекса исследований  
динамической устойчивости электроэнергетических систем со статическими  
накопителями электроэнергии

Специальность 05.14.02 - Электростанции и электроэнергетические системы

Автореферат диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук



Москва – 2003

Работа выполнена на кафедре электроэнергетических систем  
 МОСКОВСКОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА  
 (Технического университета)

Научный руководитель:	-	доктор технических наук, профессор Владимир Андреевич Строев
Официальные оппоненты:	-	доктор технических наук, профессор Михаил Георгиевич Тягунов
		кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник Алексей Констангинович Михайлов
Ведущая организация:	-	Всероссийский электротехнический институт им. В.И. Ленина, г. Москва

Защита диссертации состоится "21" ноября 2003г. в 15 ч 00 мин в аудитории Г-200 на заседании диссертационного совета Д 212.157.03 при Московском энергетическом институте (Техническом университете) по адресу: 111250, г. Москва, Красноказарменная ул., д. 17, 2 этаж. корпус "Г".

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МЭИ(ТУ).

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просим присылать по адресу: 111250, Москва, Красноказарменная 14, Ученый совет МЭИ (ТУ).

Автореферат разослан "\_\_\_" \_\_\_\_\_ 2003 г.

Ученый секретарь  
 диссертационного совета Д 212.157.03,  
 кандидат технических наук, доцент



Бердник Е.Г.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

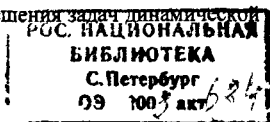
2003-А  
15850

Актуальность темы. В настоящее время известно несколько типов накопителей энергии (НЭ): гравитационные НЭ, инерционные НЭ, воздухоаккумулирующие газотурбинные электростанции, тепловые НЭ и накопители электрической энергии (НЭЭ). В гравитационных НЭ энергия накапливается и выдается при изменении потенциальной энергии рабочего тела (например, гидроаккумулирующая электростанция). В инерционных НЭ энергия накапливается и выдается при изменении кинетической энергии рабочего тела (например, вращающийся маховик, присоединённый к сети переменного тока посредством двигатель-генератора). В воздухоаккумулирующих газотурбинных электростанциях энергия накапливается и выдается при изменении потенциальной энергии сжатого воздуха, который используется для работы газовой турбины. В тепловых НЭ энергия накапливается и выдается при изменении тепловой энергии (в случае нагревания, остывания или изменения фазового состояния) рабочего тела (например, аккумулятирование тепла на электростанции для подогрева питательной воды). В НЭЭ энергия накапливается, хранится и выдается в виде электрической энергии (например, ток в катушке индуктивности или напряжение на зажимах заряженного конденсатора).

Среди приведённых типов НЭ особо, по своим характеристикам, выделяются накопители электроэнергии (сверхпроводниковый индукционный (СПИНЭ), батарейный (БНЭ) и ёмкостной (ЕНЭ)). НЭЭ характеризуются высоким быстродействием и широкими диапазонами энергоёмкостей и мощностей, что позволяет использовать эти накопители для решения задач выравнивания суточных графиков нагрузки, регулирования частоты и улучшения статической и динамической устойчивости электроэнергетических систем (ЭЭС). Среди накопителей электроэнергии наиболее привлекательным по своим свойствам, диапазону мощностей и энергоёмкостей и их удельным показателям является СПИНЭ.

При накоплении, выдаче и хранении энергии в СПИНЭ не происходит преобразования вида энергии, что обуславливает высокий (более 90%) КПД этого типа накопителя. Благодаря наличию тиристорного преобразователя время реверса мощности не превышает 0,01 с, что обуславливает возможность решения задач статической и динамической устойчивости ЭЭС с помощью СПИНЭ, посредством быстрого управления потоками активной мощности в электрической сети.

В современных электроэнергетических системах, в связи с их укрупнением, остро встаёт вопрос повышения пределов передаваемой между энергообъединениями мощности по условиям динамической устойчивости. Для решения задач динамической устойчивости ЭЭС



могут быть применены СПИНЭ малой энергоёмкости, недостаточной для решения задачи регулирования графика нагрузки.

Для проведения расчётов динамической устойчивости ЭЭС, содержащей СПИНЭ, необходимы математические модели, описывающие электромеханические переходные процессы в системе. На сегодняшний день в отечественной и зарубежной литературе предлагаются модели СПИНЭ для расчётов динамических процессов в ЭЭС, различающиеся по степени детализации процессов, происходящих в СПИНЭ. В некоторых моделях используются упрощённые выражения для составляющих полной мощности накопителя и не учитывается изменение заряда в течение переходного процесса. Также не принимаются во внимание технические и физические ограничения, накладываемые на работу накопителя (ограничения по минимальному и максимальному току сверхпроводниковой катушки индуктивности (СПК) и скорости его изменения, наибольшему рабочему напряжению катушки, углу управления вентилями тиристорного преобразователя). Иными словами, модели СПИНЭ для расчёта режимов ЭЭС с НЭЭ разработаны не в полном объёме и не имеют обоснованных степеней детализации, а это не даёт возможности составить комплекс моделей НЭЭ для расчётов динамических режимов ЭЭС с соответствующими рекомендациями по их использованию.

Для решения задач динамической устойчивости с помощью СПИНЭ, который является управляемым элементом ЭЭС, необходим закон управления НЭЭ. Закон управления СПИНЭ может быть определён из чисто физических соображений, например, накопитель управляется по знаку скольжения. Для управления СПИНЭ с целью увеличения пределов динамической устойчивости ЭЭС использовались и более сложные законы управления, где в качестве параметров управления использовались частота сети и напряжение в узле присоединения НЭЭ. При управлении СПИНЭ для демпфирования межсистемных колебаний был разработан всережимный (робастный) закон управления, где ЭЭС и НЭЭ были представлены в линеаризованном виде. В подавляющем большинстве работ, где целью было определить закон управления СПИНЭ в соответствии с задаваемым критерием, полученный закон управления определялся для линеаризованных систем и не проверялся в нелинейных системах, что может привести к нежелательному результату функционирования накопителя в реальных условиях.

Для функционирования СПИНЭ в составе ЭЭС были синтезированы законы управления, которые позволяют решить задачи повышения пределов динамической устойчивости, демпфирования межсистемных колебаний и т.д., но не были выяснены предельные возможности СПИНЭ при управлении переходными процессами.

Применение теории оптимального управления даёт возможность выявить предельные возможности ЭЭС и её элементов в переходном процессе. Кроме того, управление, удовлетворяющее критериям оптимальности, обеспечивает наибольшую область устойчивости. Но полученные оптимальные процессы могут являться только эталоном оптимального переходного процесса ЭЭС, поскольку даже современные вычислительные системы на базе мощнейших компьютеров не могут обеспечить решения задачи оптимального управления в темпе переходного процесса ЭЭС. Тем не менее ни в одной из опубликованных работ по синтезу закона управления НЭЭ не производится сравнения полученных траекторий ЭЭС с эталонными, что не позволяет в полной мере оценить эффективность выбранного закона управления.

Процессы, протекающие в ЭЭС, описываются как дифференциальными, так и алгебраическими уравнениями, причём в большинстве случаев моделируемую систему не удаётся свести к системе только дифференциальных уравнений. Соответственно, принцип максимума Понтрягина в своей исходной формулировке не может быть использован для нахождения оптимальных управлений в динамических системах, описываемых дифференциальными и алгебраическими уравнениями. Возникает необходимость расширения области его применения.

Из сказанного выше вытекает необходимость дальнейшей углублённой проработки вопросов моделирования СПИНЭ, алгоритмизации расчётов электромеханических переходных процессов ЭЭС со СПИНЭ, и вопросов управления переходными режимами.

Цели работы: разработка методов и алгоритмов расчёта и управления электромеханическими переходными процессами ЭЭС со статическими накопителями электроэнергии.

Для достижения указанных целей были поставлены и решены следующие задачи:

- разработка математических моделей накопителей электроэнергии и обоснование степени детализации модели СПИНЭ;
- разработка алгоритма и программы расчёта электромеханических переходных процессов в ЭЭС со СПИНЭ и компенсаторами реактивной мощности;
- рассмотрение и разработка рекомендаций по применению упрощённых моделей СПИНЭ;
- оценка влияния расположения, максимальной мощности, энергоёмкости и степени компенсации реактивной мощности СПИНЭ на динамическую устойчивость ЭЭС;

- разработка алгоритма и программы определения оптимального управления СПИНЭ в ЭЭС в линеаризованном представлении с проверкой работы линейного регулятора в ЭЭС, моделируемой нелинейными уравнениями;
- адаптивное применение принципа максимума Понтрягина к решению задач оптимального управления динамическими системами, которые моделируются, как дифференциальными, так и алгебраическими нелинейными уравнениями;
- разработка алгоритма и программы определения оптимального управления СПИНЭ в ЭЭС в нелинейном представлении;
- разработка квазиоптимального регулятора СПИНЭ.

Методика проведения исследований. Методы математического моделирования электромеханических переходных процессов и исследования динамической устойчивости ЭЭС, теория оптимального управления линейными системами, методика решения уравнения Риккати, метод квазилинеаризации для расчёта оптимального управления, методика структурно-модульного программирования на алгоритмическом языке *Fortran*.

Достоверность результатов проверялась путём проведения сравнительных расчётов. Процессы, полученные с помощью теории оптимального управления, сравнивались с процессами, рассчитанными при управлении отличным от оптимального.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- разработана математическая модель СПИНЭ, включающая физические и технические ограничения;
- рассмотрены упрощенные математические модели СПИНЭ и даны рекомендации по их применению;
- адаптирован принцип максимума Понтрягина и метод квазилинеаризации к решению задач оптимального управления нелинейными динамическими системами, которые моделируются как дифференциальными, так и алгебраическими уравнениями;
- получен закон оптимального управления СПИНЭ для решения задач динамической устойчивости и демпфирования электромеханических колебаний в ЭЭС станция-шины бесконечной мощности с промежуточным отбором мощности;

Практическое значение диссертации. Рассмотренные упрощенные математические модели СПИНЭ, с учётом приводимых в диссертации рекомендаций, могут быть использованы для расчёта установившихся режимов и динамической устойчивости ЭЭС с НЭЭ в учебных, проектных и эксплуатационных целях. Составленный и программно

реализованный алгоритм адаптированного принципа максимума Понтрягина может применяться для отыскания оптимального (эталонного) управления регулируемым устройством, расположенным в любом узле ЭЭС.

Апробация. Основные теоретические положения диссертации докладывались, обсуждались и были одобрены на научно-практической конференции “Автоматизация и управление энергосистемами” (г. Блед, Словения, 1999 г.), на Международной научно-практической конференции “Теоретические и практические проблемы развития электроэнергетики России” в СПбГТУ (г. Санкт-Петербург, 2002 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано шесть печатных работ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из четырех глав, заключения, восьми приложений, списка литературы из 77 наименований. Общий объем диссертации 197 страниц, включая 41 рисунок и 26 таблиц.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе раскрывается актуальность темы исследований диссертации, приведены параметры накопителей энергии различных типов и определена возможность комплексного использования накопителей электроэнергии в составе ЭЭС, а также формируются цели и задачи диссертации.

Во второй главе разработаны математические модели накопителей электроэнергии сверхпроводникового (СПИНЭ), батарейного (БНЭ) и емкостного (ЕНЭ) для расчетов электромеханических переходных процессов в ЭЭС. В состав моделей НЭЭ входят физические и технические ограничения, накладываемые на параметры и рабочие режимы накопителей. Причём ограничения первой группы (угол зажигания вентилей прособразователя, скорость изменения тока сверхпроводниковой катушки и т.п.) являются жёсткими, а ограничения второй группы (напряжение заряда и разряда аккумуляторной батареи, токи заряда и разряда БНЭ и т.п.) могут нарушаться, причём величина и длительность превышения технических ограничений определяется исходя из конструктивных особенностей НЭЭ.

Рассматриваемые типы НЭЭ характеризуются одинаковой структурой и включают в свой состав: аккумулирующий элемент (АЭ) (СПИНЭ – СПК (рис. 1, а), БНЭ – аккумуляторная батарея (рис. 1, б), ЕНЭ – батарея конденсаторов (БК) (рис. 1, б)), устройство связи с энергосистемой (УС) и систему автоматического управления (САУ).

Благодаря одинаковой структуре НЭЭ, их математические модели также имеют подобную структуру. НЭЭ моделируются дифференциальным уравнением заряда АЭ и

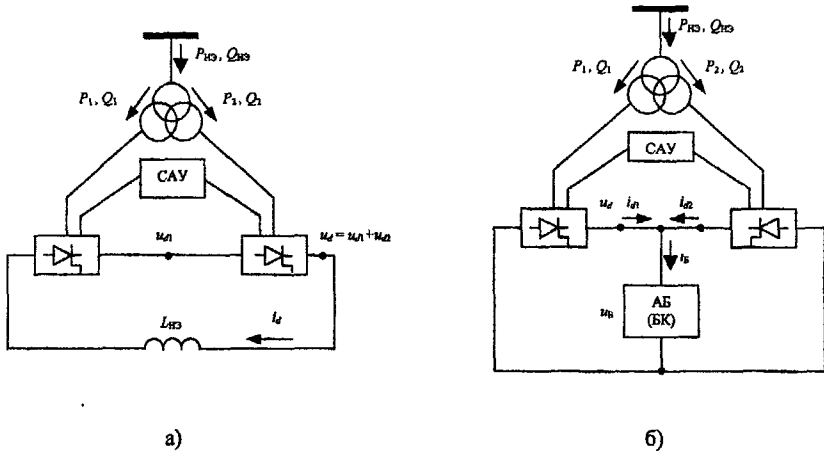


Рис. 1. Схемы накопителей электроэнергии.

нелинейными алгебраическими уравнениями, которые описывают работу УС – тиристорного преобразователя (ТП) совместно с АЭ. Обобщённая математическая модель СПИНЭ, БНЭ и ЕНЭ представлена уравнениями (1)+(4).

$$\frac{dW_{HЭ}}{dt} = \chi, \tag{1}$$

$$P_{HЭ}(W_{HЭ}, U_{HЭ}, \alpha, \gamma) = n_{ТП} P_{ТП} = n_{ТП} \frac{3U_{HЭ}^2}{\pi x_c} \sin \gamma \sin(2\alpha + \gamma), \tag{2}$$

$$Q_{HЭ}(W_{HЭ}, U_{HЭ}, \alpha, \gamma) = n_{ТП} \frac{3U_{HЭ}^2}{\pi x_c} [\gamma - \sin \gamma \cos(2\alpha + \gamma)], \tag{3}$$

$$\gamma = \arccos \zeta - \alpha, \tag{4}$$

где параметры  $\zeta$  и  $\chi$  определены для конкретного типа НЭЭ:

$$\text{для СПИНЭ: } \begin{cases} \chi = n_{ТП} \frac{12U_{HЭ} \sqrt{W_{HЭ}}}{\pi \sqrt{L_{HЭ}}} \left( \cos \alpha - \frac{x_c \sqrt{W_{HЭ}}}{U_{HЭ} \sqrt{L_{HЭ}}} \right), \\ \zeta = \cos \alpha - \frac{2x_c \sqrt{W_{HЭ}}}{U_{HЭ} \sqrt{L_{HЭ}}} \end{cases},$$

$$\text{для БНЭ: } \begin{cases} \chi = i_Б \\ \zeta = -\cos \alpha + \frac{\pi}{6\sqrt{2}} \frac{U_Б}{U_{HЭ}}, \end{cases}$$



$$\text{для ENЭ: } \begin{cases} \chi = n_{\text{ТП}} \frac{4\sqrt{W_{\text{HЭ}}}}{x_c \sqrt{C_{\text{БК}}}} \left( U_{\text{HЭ}} \cos \alpha - \frac{\pi \sqrt{W_{\text{HЭ}}}}{3\sqrt{C_{\text{БК}}}} \right) \\ \zeta = -\cos \alpha + \frac{2\pi \sqrt{W_{\text{HЭ}}}}{3U_{\text{HЭ}} \sqrt{C_{\text{БК}}}} \end{cases}$$

где  $\alpha$  и  $\gamma$  – угол зажигания и коммутации вентилей ТП,  $n_{\text{ТП}}$  – количество ТП,  $W_{\text{HЭ}}$  – заряд НЭЭ, выраженный в МВт·с для СПИНЭ и ЕНЭ и в А·ч для БНЭ,  $U_{\text{HЭ}}$  – напряжение в узле присоединения НЭЭ,  $x_c$  – сопротивление цепи коммутации моста ТП,  $L_{\text{HЭ}}$  – индуктивность СПК,  $i_B$  и  $U_E$  – ток и напряжение на зажимах аккумуляторной батареи,  $C_{\text{БК}}$  – ёмкость батареи конденсаторов.

Далее в диссертации основное внимание уделяется СПИНЭ как наиболее перспективному типу НЭЭ, который обладает широким диапазоном энергоёмкостей и мощностей среди НЭЭ, а также имеет возможность технической осуществимости в промышленных масштабах на современном этапе развития науки, техники и технологий. Область рабочих режимов СПК представлена на рис. 2.

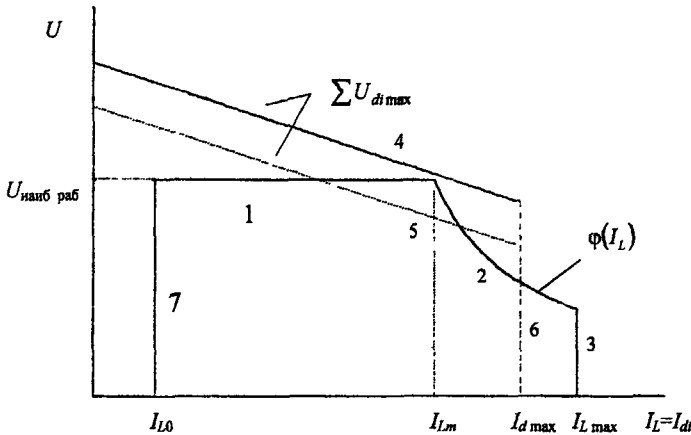


Рис. 2. Область рабочих режимов СПК (кривые 1+3 и 7) и вольтамперные характеристики тиристорного преобразователя (прямые 4 и 5) с ограничением 6.

На параметры СПИНЭ накладываются следующие ограничения:

$$I_L \geq I_{L0}, \tag{5}$$

$$U_L \leq L_{\text{HЭ}} \left[ \frac{di_L}{dt}(I_L) \right]_{\text{max}} = \varphi(I_L), \tag{6}$$

$$U_L \leq U_{L \text{ номб. раб.}}, \quad (7)$$

$$I_d \leq I_{d \text{ макс.}}, \quad (8)$$

$$\alpha \geq \alpha_{\text{мин}} \approx 10^\circ, \quad (9)$$

$$\alpha + \gamma = 180^\circ - \delta_{\text{мин}}, \quad \delta_{\text{мин}} = 15^\circ, \quad (10)$$

где  $I_L$  и  $U_L$  – ток и напряжение на зажимах СПК,  $I_d$  – ток моста ТП,  $I_d = I_L$ . Ограничения (6) показано на рис. 2 в виде кривой 2.

В третьей главе составлена математическая модель ЭЭС, включающая основные элементы: синхронный генератор, электрическую сеть и СПИНЭ с СТК; разработан алгоритм расчёта электромеханических переходных процессов ЭЭС со СПИНЭ и компенсаторами реактивной мощности. Модель электрической сети представлена уравнениями балансов мощностей; модель синхронного генератора представлена тремя дифференциальными уравнениями: движения ротора и переходного процесса в обмотке возбуждения; модель СПИНЭ представлена уравнениями и ограничениями (1)-(10); СТК и батареи конденсаторов для компенсации реактивной мощности моделируются внешними характеристиками  $Q_{\text{СТК (БК)}} = f(U)$ .

Установившиеся режимы ЭЭС со СПИНЭ и компенсаторами реактивной мощности рассчитывались путём решения уравнений балансов узловых мощностей. Для интегрирования дифференциальных уравнений движения ЭЭС совместно с алгебраическими уравнениями сети был применён метод трапеций; для решения нелинейных уравнений – метод Ньютона-Рафсона.

В качестве расчётной была выбрана ЭЭС, схема которой изображена на рис. 3. Закон управления углом зажигания вентиля СПИНЭ был выбран из физических соображений и подразумевает управление СПИНЭ по скольжению  $s$  ротора эквивалентного генератора передающей станции (11):

$$\alpha = \begin{cases} 10^\circ, & \text{при } (s - \varepsilon) > 0 \\ \approx 90^\circ, & \text{при } (|s| - \varepsilon) < 0 \\ 180^\circ - \delta_{\text{мин}} - \gamma, & \text{при } (s + \varepsilon) < 0 \end{cases}, \quad (11)$$

где  $2\varepsilon$  – ширина зоны нечувствительности регулятора.

Далее были рассмотрены упрощённые математические модели СПИНЭ, в которых моделирование процессов осуществлялось без дифференциального уравнения для заряда НЭЭ, с упрощёнными выражениями для составляющих полной мощности ТП и отсутствовали ограничения. В модели №1 накопитель был представлен активной и

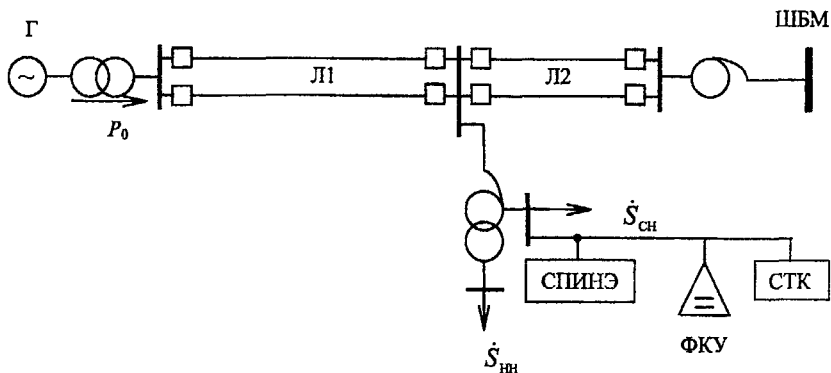


Рис. 3. Схема ЭЭС

реактивной мощностями, которые упрощенно выражены через параметры его режима:

$$P_{НЭ} = 2\sqrt{2}U_{НЭ}I_d \cos\left(\alpha + \frac{\gamma}{2}\right), \quad (12)$$

$$Q_{НЭ} = 2\sqrt{2}U_{НЭ}I_d \sin\left(\alpha + \frac{\gamma}{2}\right), \quad (13)$$

где  $\gamma$  определяется по (4).

В модели №2 накопитель представляется точным выражением по активной мощности и упрощенным по реактивной:

$$P_{НЭ} = \frac{6\sqrt{2}U_{НЭ}I_d}{\pi} \cos \alpha - \frac{6}{\pi} x_c I_d^2, \quad (14)$$

$$Q_{НЭ} = \sqrt{\left(\frac{6\sqrt{2}}{\pi} U_{НЭ} I_d\right)^2 - (P_{НЭ})^2}. \quad (15)$$

В результате сопоставления упрощенных моделей с принятой в диссертации было выяснено, что:

- 1) модель №1 может применяться для изучения качественной стороны влияния СПИНЭ на переходные и установившиеся режимы ЭЭС;
- 2) модель №2 может применяться для расчёта переходных и установившихся режимов ЭЭС со СПИНЭ и, по сравнению с принятой в работе моделью СПИНЭ при расчётах пределов динамической устойчивости, погрешность не превосходит 1%.

В результате расчётов динамической устойчивости (при  $K^{(3)}$  в качестве расчётного возмущения на Л1 или Л2 с последующим отключением одной цепи линии) было выяснено, что:

- 1) с помощью СПИНЭ можно повысить пределы динамической устойчивости и демпфировать электромеханические колебания ЭЭС;
- 2) эффективность использования форсировки возбуждения генераторов для увеличения пределов динамической устойчивости больше, чем эффективность использования СПИНЭ для тех же целей, при расположении последнего на шинах промежуточной подстанции;
- 3) для наибольшей эффективности использования СПИНЭ "должен" как можно ближе находиться к передающей станции или подключаться к её шинам (см. рис. 4, где измененис пределов динамической устойчивости показано относительно величин пределов в ЭЭС без СПИНЭ);

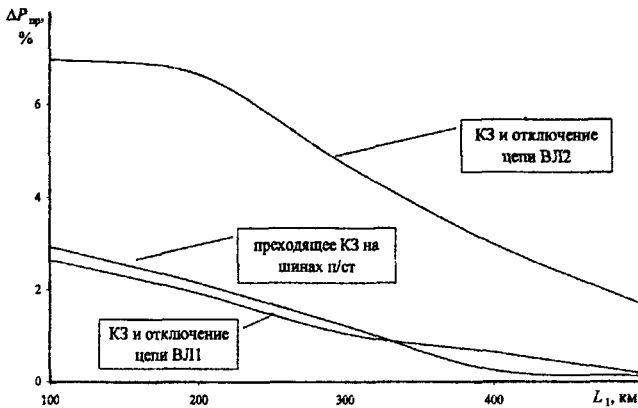


Рис. 4. Эффективность применения СПИНЭ при различных конфигурациях сети ЭЭС в послеаварийном режиме.

- 4) наибольший эффект достигается, когда СПИНЭ расположен между станцией и ЛЭП с отключаемой цепью (см. рис. 4);
- 5) наибольший эффект от применения СПИНЭ имеет место, когда НЭЭ используется в сочетании с форсировкой возбуждения на генераторах (см. рис. 5, где изменение пределов динамической устойчивости ЭЭС со СПИНЭ показано относительно величин пределов в ЭЭС с форсировкой возбуждения и без неё) или в том случае, если на шинах присоединения СПИНЭ мало изменяется напряжение во время переходного процесса;

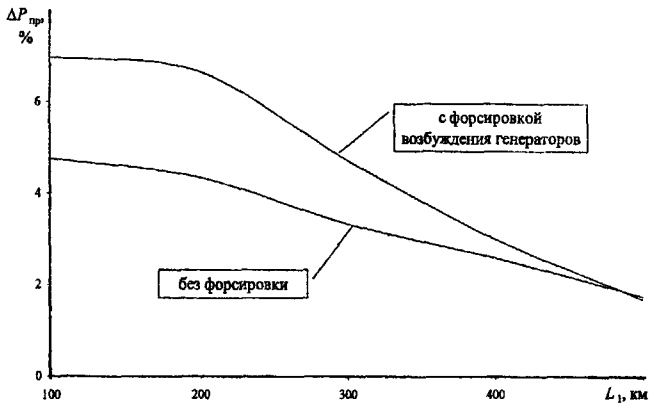


Рис. 5. Эффективность использования СПИНЭ совместно с форсировкой возбуждения генераторов и без неё.

б) в процессе расчётов было выяснено, что наиболее подходящим устройством для компенсации реактивной мощности СПИНЭ, по условиям динамической устойчивости и ведения режимов ЭЭС, является СТК, причём при использовании НЭЭ совместно с СТК приросты пределов динамической устойчивости достигают 11% (рис. 6 где изменение пределов динамической устойчивости показано относительно величин пределов в ЭЭС без СПИНЭ и компенсаторов реактивной мощности).

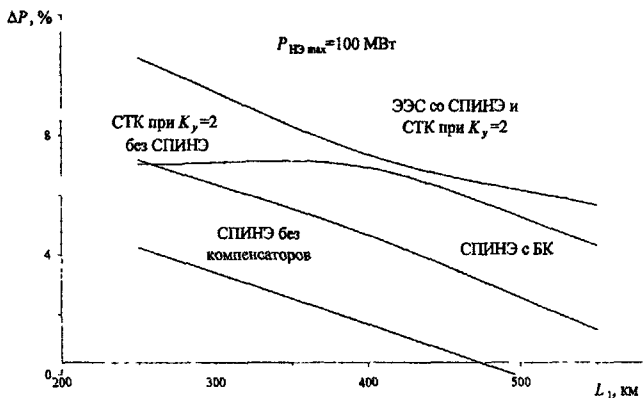


Рис. 6. Приросты пределов динамической устойчивости ЭЭС.

При расчётах динамической устойчивости ЭЭС со СПИНЭ необходимо задаваться определённым значением энергоёмкости накопителя. В результате анализа вариантных

расчётов динамической устойчивости было установлено, что энергоёмкость СПИНЭ для достижения наибольшей эффективности его использования следует принимать численно равной  $(2,6 \div 4,0)P_{\text{НЭЭ max}}$  при условии, что НЭЭ до отключения возмущающего воздействия работает в режиме ожидания с током СПК равном половине его максимального значения.

В четвёртой главе рассмотрен синтез законов регулирования СПИНЭ для управления электромеханическими переходными процессами ЭЭС на основе теории оптимального управления. В качестве метода определения оптимального управления был использован принцип максимума Понтрягина в применении к линейным и нелинейным системам.

Состояния линейной системы описываются следующей системой уравнений:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u}, \quad (16)$$

где  $\mathbf{x}$  и  $\mathbf{u}$  – переменные состояния и управления, соответственно,  $\mathbf{A}$  и  $\mathbf{B}$  – матрицы состояния и управления динамической системы, соответственно. Оптимальное управление минимизирует критерий качества

$$J = \frac{1}{2} \int_0^T [(\mathbf{x}_p \mathbf{Q} \mathbf{x} + \mathbf{u}_p \mathbf{R} \mathbf{u}) \cdot e^{2\alpha_{уст} t}] dt, \quad (17)$$

где  $\mathbf{Q}$  и  $\mathbf{R}$  – матрицы весовых коэффициентов,  $\alpha_{уст}$  – заданная степень устойчивости,  $\alpha_{уст} \geq 0$ .

Оптимальное управление определяется как

$$\mathbf{u} = \mathbf{R}^{-1} \mathbf{B}_T \mathbf{K} \mathbf{x}, \quad (18)$$

где  $\mathbf{K}$  – прямоугольная матрица, находится из решения уравнения Риккати

$$\mathbf{K} \mathbf{B} \mathbf{R}^{-1} \mathbf{B}_T \mathbf{K} + \mathbf{K} (\mathbf{A} + \alpha_{уст} \mathbf{E}) + (\mathbf{A}_T + \alpha_{уст} \mathbf{E}) \mathbf{K} - \mathbf{Q} = 0. \quad (19)$$

Испытание закона управления СПИНЭ, полученного для линеаризованной ЭЭС, в энергосистеме в нелинейном представлении показало влияние нелинейности математической модели ЭЭС, заключающееся в расхождении характеров переходных процессов. Отсюда следует, что законы управления, полученные для линеаризованной ЭЭС, должны быть обязательно проверены в энергосистеме в нелинейном представлении, и оптимальное управление нелинейной динамической системой может быть получено только при применении теории оптимального управления к системе в нелинейном представлении.

Для нелинейной модели ЭЭС принцип максимума Понтрягина был адаптирован к решению задач оптимального управления динамическими системами, которые описываются как дифференциальными, так и алгебраическими уравнениями.

Состояния нелинейной системы описываются двумя системами уравнений:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t), \quad (20)$$

$$0 = \varphi(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t), \quad (21)$$

где  $y$  – вектор переменных,  $u$  – вектор управлений,  $f$  и  $\varphi$  – вектор-функции. Оптимальное управление минимизирует критерий качества

$$J = \int_0^T F(x, u, t) dt = \int_0^T [x^T Q x + u^T R u] dt. \quad (22)$$

Условия оптимальности адаптированного принципа максимума Понтрягина записываются в виде:

$$\left. \begin{aligned} \dot{x} &= f(x, y, u, t) \\ \dot{p} &= - \left[ p^T \cdot \left( \frac{\partial f}{\partial x} + \frac{\partial f}{\partial y} G \right) \right]_{\tau} + \frac{\partial F}{\partial x} \\ 0 &= \varphi(x, y, u) \\ 0 &= \left[ p^T \cdot \left( \frac{\partial f}{\partial u} + \frac{\partial f}{\partial y} I \right) \right]_{\tau} - \frac{\partial F}{\partial u} \\ 0 &= \frac{\partial \varphi}{\partial x} + \frac{\partial \varphi}{\partial y} G \\ 0 &= \frac{\partial \varphi}{\partial u} + \frac{\partial \varphi}{\partial y} I \end{aligned} \right\}, \quad (23)$$

где  $p$  – сопряжённые переменные,  $G = \frac{\partial y}{\partial x}$ ,  $I = \frac{\partial y}{\partial u}$ ,  $\tau$  – символ транспонирования.

Далее задача оптимального управления решается итерационным методом квазилинеаризации, для чего исходная система уравнений (23) линеаризуется в каждой точке траектории процесса и преобразуется в подсистему дифференциальных уравнений, которая представляется в виде

$$\dot{z}^{(k)} = F(z^{(k-1)}) + J(z^{(k-1)}) \cdot z^{(k)}, \quad (24)$$

где  $z = \begin{pmatrix} x \\ p \end{pmatrix}$ ,  $F$  – вектор-функция,  $J = \frac{\partial F}{\partial z}$  – матрица Якоби,  $k$  – номер итерации. Исключение

подсистемы алгебраических уравнений на каждом шаге итерации производится путём преобразования исходной матрицы коэффициентов системы (23) в матрицу соответствующую подсистеме дифференциальных уравнений для  $x$  и  $p$ . Преобразование матрицы осуществляется с помощью прямого хода метода Гаусса. Система уравнений (24) интегрируется методом трапеций и вычисляются значения  $x$  и  $p$  на шаге. Затем, из решения алгебраической подсистемы уравнений определяются значения переменных  $y$ ,  $u$ ,  $G$  и  $I$ .

Основные сложности применения адаптированного принципа максимума Понтрягина состоят в получении системы уравнений (23) и подборе весовых коэффициентов  $Q$  и  $R$  из (22), который осуществляется, исходя из требований быстрого затухания переходного процесса ЭЭС и сходимости итерационного процесса решения.

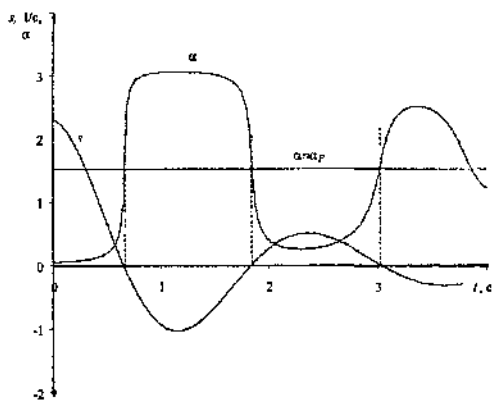


Рис. 7. Оптимальное управление ЭЭС со СПИНЭ.

Применение адаптированного принципа максимума Понтрягина дало траектории оптимальных процессов, которые представлены на рис. 7. Из рис. 7 видно, что при оптимальном управлении СПИНЭ переключение угла  $\alpha$  происходит четко при изменении знака скольжения, а величина отклонения угла управления пропорциональна значению скольжения. Из чего следует, что управление СПИНЭ будет оптимальным в случае присоединения линейного регулятора вида:

$$\alpha = \alpha_F - k_s s, \quad (25)$$

где  $F$  – индекс установившегося послеаварийного режима.

На основе регулятора (25) был разработан квазиоптимальный регулятор СПИНЭ, который использует тот факт, что ускорение ротора генератора пропорционально разности активных мощностей, протекающих в линии в переходном и установившемся режимах, и функционирует на основе измерения и преобразования местных параметров:

$$\alpha = \alpha_F - k_I I_{P_n}, \quad (26)$$

где  $I_{P_n} = - \int_{t=0}^t (P_{Л} - P_{ЛF}) dt$ ,  $P_{Л}$  – мощность в линии, притекающая к промежуточной подстанции от передающей станции в переходном режиме.

Применение закона (26) для управления СПИНЭ даёт быстро затухающий переходный процесс, практически совпадающий с оптимальным (рис. 8), что справедливо для любой конфигурации сети (рис. 3) после снятия возмущения. За расчётное возмущение было принято  $K^{(3)}$  на Л1 или Л2 с последующим отключением одной цепи соответствующей линии.



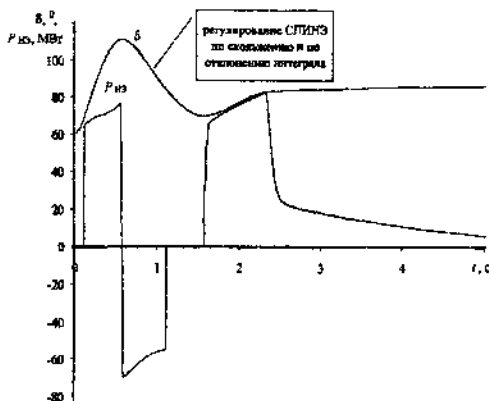


Рис. 8. Квазиоптимальное управление СПИНЭ по местным параметрам.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработаны математические модели известных видов накопителей электрической энергии для анализа установившихся режимов и электромеханических переходных процессов. Разработанные модели имеют одинаковую структуру и различаются составом физических и технических ограничений, что позволяет в расчётах переходить от модели одного вида накопителя к модели другого не изменяя алгоритма расчёта. Для СПИНЭ даны рекомендации по использованию упрощённых моделей.
2. На примере ЭЭС станция-шины бесконечной мощности с промежуточным отбором показано, что при регулировании СПИНЭ по знаку скольжения ротора эквивалентного генератора могут быть решены задачи динамической устойчивости системы и демпфирования электромеханических колебаний. При использовании СПИНЭ совместно с форсировкой возбуждения генераторов передающей станции и СТК величина прироста пределов динамической устойчивости системы составляет 11%.
3. Выявлена тенденция изменения эффективности использования СПИНЭ в зависимости от его положения относительно передающей станции и параметров аварийных и послеаварийных режимов, энергоёмкости и максимальной мощности тиристорного преобразователя накопителя. Наибольший эффект от использования СПИНЭ для повышения динамической устойчивости ЭЭС проявляется при присоединении НЭЭ к шинам генератора.

4. Разработан метод, который позволяет применить принцип максимума Понтрягина к решению задач оптимального управления при моделировании нелинейных динамических систем как дифференциальными, так и алгебраическими уравнениями. Наличие подсистемы алгебраических уравнений приводит к усложнению алгоритма решения задачи оптимального управления, значительно возрастает порядок системы уравнений и ухудшаются условия сходимости итерационного процесса решения. Тем не менее, этот метод позволяет расширить область применения принципа максимума Понтрягина на системы, содержащие управляемые устройства в любом узле ЭЭС.
5. Синтезированы законы управления СПИНЭ на основе принципа максимума Понтрягина для решения задач увеличения пределов динамической устойчивости и демпфирования колебаний ЭЭС. С помощью принципа максимума были найдены предельные возможности управления накопителем в ЭЭС станция-шины бесконечной мощности с промежуточным отбором.
6. Показано, что регулирование СПИНЭ по величине и знаку скольжения обеспечивает близкие к оптимальным переходные процессы в ЭЭС – станция-шины бесконечной мощности с промежуточной подстанцией. При таком управлении накопителем реализуются его предельные возможности в управлении переходным режимом энергосистемы.
7. Получен и испытан закон управления СПИНЭ по отклонению временного интеграла мощности динии. При управлении накопителем по этому закону траектории движения динамической системы практически совпадают с оптимальными. Этот закон управления реализуется на основе измерения и обработки параметров, доступных по месту установки НЭЭ.

Основные положения диссертации изложены в следующих работах:

1. Кузнецов О.Н., Никитин Д.В., Строев В.А. Анализ динамической устойчивости электроэнергетической системы с учётом сверхпроводникового накопителя энергии. // Труды международной конференции «Автоматическое управление в электроэнергетических системах»: 6-9 октября 1999 г. – Блед, Словения. – 1999. С. 149-154.
2. Кузнецов О.Н. Исследование динамической устойчивости электроэнергетической системы при использовании сверхпроводникового индуктивного накопителя энергии совместно с компенсаторами реактивной мощности. // Вестник МЭИ. –2000. –№2. –С. 35-40.

3. Строев В.А., Никитин Д.В., Гремяков А.А., Кузнецов О.Н. Функциональные возможности применения накопителей энергии в электроэнергетических системах. // Вестник МЭИ. –2001. –№1. –С. 33-39.
4. Кузнецов О.Н., Строев В.А. Синтез закона управления СПИНЭ для обеспечения динамической устойчивости ЭЭС. // Седьмая международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов: 27-28 февраля 2001 г. Тез. докл. в 3-х т. Т. 3. –М.: МЭИ, 2001. –С. 304-305.
5. Строев В.А., Никитин Д.В., Кузнецов О.Н. Математические модели накопителей электроэнергии для расчёта режимов электроэнергетических систем. // Труды Международной научно-практической конференции «Теоретические и практические проблемы развития электроэнергетики России». 27-28 июня 2002 г. –С.-П.: СПбГТУ. – 2002. –С. 181-195.
6. Кузнецов О.Н., Строев В.А. Об одном обобщении принципа максимума Понтрягина в задачах управления электромеханическими переходными процессами электроэнергетических систем. // Вестник МЭИ. –2003. –№1. –С. 33-40.

Зак. №12 Тир. 100 экз. Л. 1, 2, 5 подп. в печать 15.10.03г.  
ИЦ МЭИ (ГУ), Красноказарменная ул., д. 13.

#1 5850

2003-A  
15850

3

634