

На правах рукописи

Мохамед Емад Джасем

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ТУРБО- И
ГИДРОГЕНЕРАТОРОВ НА ПОКАЗАТЕЛИ СТАТИЧЕСКОЙ И
ДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ РАБОТЫ**

Специальность 05.14.02 – Электростанции
и электроэнергетические системы

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Санкт-Петербург - 2005

Работа выполнена на кафедре "Электрические системы и сети" Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Санкт-Петербургского государственного политехнического университета».

Научный руководитель - доктор технических наук, профессор
Смоловик Сергей Владимирович

Официальные оппоненты - доктор технических наук, профессор
Павлов Геннадий Михайлович
кандидат технических наук,
Мельничников Сергей Александрович

Ведущая организация - научно-исследовательский институт по
передаче электрической энергии
постоянным током высокого напряжения
(ОАО НИИПТ)

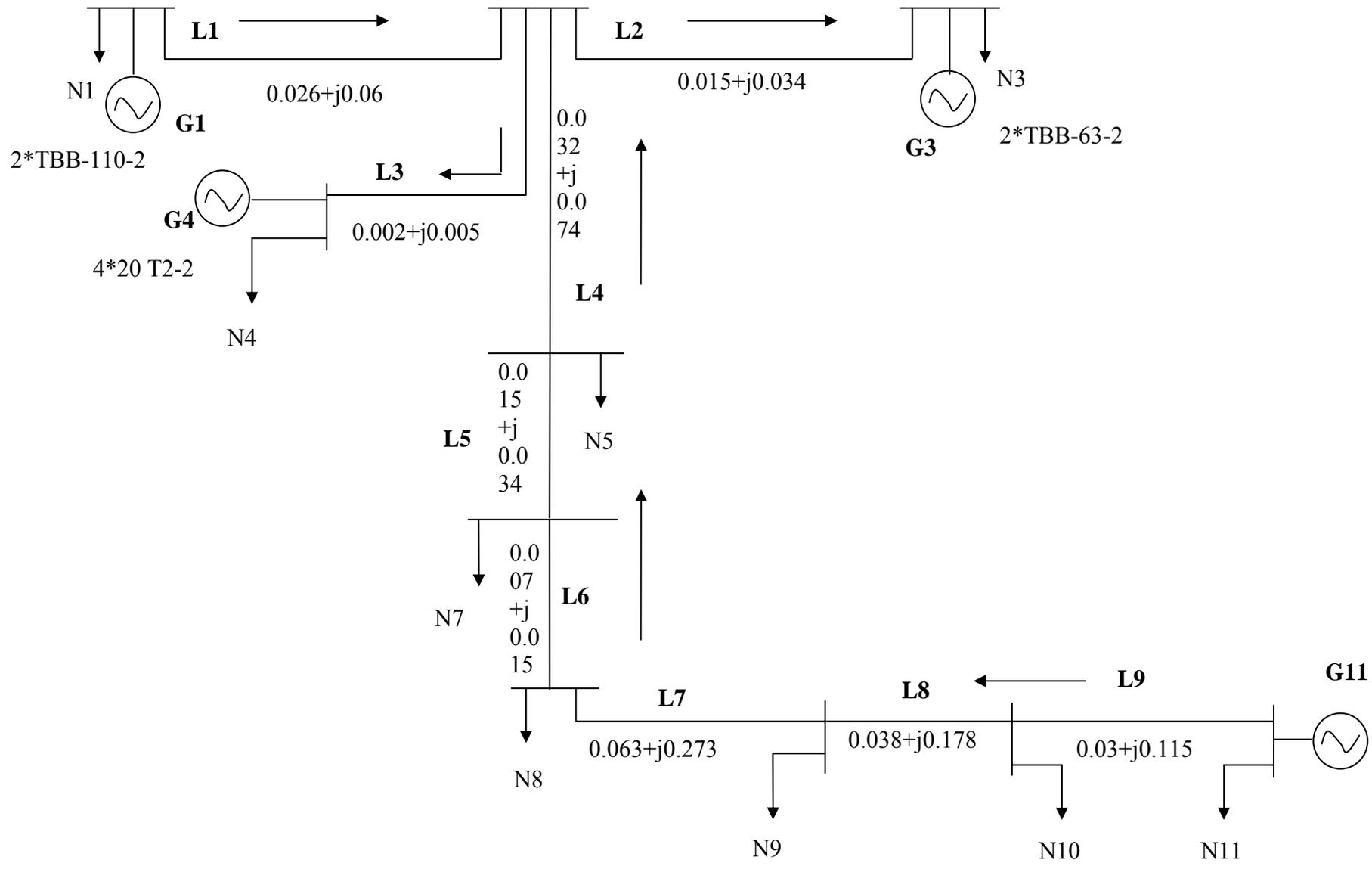
Защита состоится "10" июня 2005 г. в 10⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета К 212.229.02 при Санкт-Петербургском государственном политехническом университете по адресу: 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29. Главное здание, ауд. 325.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

Автореферат разослан " " мая 2005 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета К 212.229.02
кандидат технических наук, доцент

Попов М.Г.



Общая характеристика работы

Актуальность проблемы.

Развитие энергетики развитых и развивающихся стран характеризуется увеличением выработки электроэнергии за счет преимущественного ввода тепловых электростанций с агрегатами больших единичных мощностей.

Повышение номинальной мощности генераторов является основным направлением развития турбо- и гидрогенераторостроения. Наиболее передовые производители генераторов достигли единичных мощностей турбогенераторов 1000 – 1300 МВт и гидрогенераторов 700 – 800 МВт. При этом мощности электрических станций также достигают значительных величин. Например, узел Сургутских ГРЭС имеет мощность 7200 МВт; АЭС Фукусима в Японии достигает мощности 9300 МВт. Весьма мощными являются гидростанции: Саяно-Шушенская ГЭС в России имеет установленную мощность 6400 МВт; наиболее мощной гидростанцией в мире на сегодня является ГЭС Итайпу (Бразилия/Парагвай), на которой установлено 18 генераторов по 700 МВт, то есть 12600 МВт. На реке Янцзы в Китае сооружается еще более мощная гидростанция: ГЭС Три ущелья после завершения строительства должна иметь мощность 18200 МВт. Основным движущими факторами являются экономичность производства, снижение капитальных затрат на сооружения (здания тепловых электростанций и сооружения ГЭС), а также экономика эксплуатации. Сдерживающими факторами являются мощность энергосистемы, в которую включается мощный генератор или электростанция (обычно считается, что мощность наиболее крупного генератора не должна превышать 0,5% от мощности объединенной энергосистемы, к которой он подключается), а также уровень токов короткого замыкания.

Для энергосистемы Ирака, которая до событий 2003 года имела установленную мощность около 10 000 МВт, из которых только 910 МВт составляли гидростанции, вопрос об использовании генераторов предельных мощностей не стоит. Тепловые электростанции Ирака (в значительной мере построенные советскими и российскими специалистами) в основном используют агрегаты мощностью 110 и 200 (220) МВт. Однако следует отметить, что и в производстве турбогенераторов средней мощности применяются все более совершенные технологии охлаждения обмоток, которые позволяют повысить плотности токов в обмотке статора сократить вес и стоимость генератора.

Увеличение плотности тока в обмотке статора влечет за собой весьма неблагоприятное изменение параметров синхронной машины, - увеличение синхронных и переходных индуктивных сопротивлений и уменьшение величины механической инерционной постоянной T_J . Указанные факторы неблагоприятно влияют как на параметры установившегося режима работы машины в энергосистеме, так и на показатели устойчивости при конечных

возмущениях. Например, турбогенератор ТФП – 160 – 2УЗ, установленный на Северо-Западной ТЭЦ имеет одно из самых больших значений синхронного индуктивного сопротивления ($x_d = 2,53 \text{ o.e.}$). Необходимо иметь в виду, что эффективность устройств автоматического регулирования и противоаварийного управления в значительной мере определяется соответствием настроечных параметров и выходных сигналов режимам и характеристикам регулируемых объектов.

В связи со сказанным исследование влияния параметров мощных гидро- и турбогенераторов на показатели статической и динамической устойчивости является весьма актуальным.

Целью работы является исследование влияния основных электромеханических параметров мощных синхронных генераторов различных типов на показатели статической и динамической устойчивости. В качестве показателя уровня динамической устойчивости принята величина предела динамической устойчивости, рассчитываемая в простейшей схеме электропередачи. Одной из задач диссертации является анализ характера влияния различных параметров турбо- и гидрогенераторов на предел динамической устойчивости и выявление среди них наиболее значимых. В задачи диссертации также входил анализ уровня динамической устойчивости района энергосистемы Ирака и выработка предложений по повышению устойчивости.

Научная новизна диссертационной работы определяется следующими положениями:

- выполнением обзора изменения параметров мощных гидро- и турбогенераторов, которое обусловлено совершенствованием систем охлаждения обмоток статора и ротора и повышением степени использования активных материалов и оценки влияния указанных факторов на рост индуктивных сопротивлений генераторов и снижение величин механических инерционных постоянных;
- реализацией в программной среде Visual Basic / Excel методики автоматического поиска предела динамической устойчивости на первом колебании угла, предназначенной для сравнения уровней динамической устойчивости генераторов при изменении их параметров, длительности короткого замыкания, применения мероприятий по повышению динамической устойчивости и так далее;
- реализацией метода расчета переходных процессов в электроэнергетической системе на основе вычисления мгновенных значений переменных с помощью выражений, отвечающих балансу производных токов, для выполнения расчетов переходных процессов при несимметричных коротких замыканиях для выполнения уточненных расчетов пределов динамической устойчивости с учетом дополнительных тормозных моментов, воздействующих на ротор при коротких замыканиях;
- исследованием влияния параметров мощных синхронных машин на показатели статической и динамической устойчивости, определением основных влияющих факторов.

Практическая ценность работы

Разработанное программное обеспечение, полученные выводы и рекомендации могут быть использованы в проектных и эксплуатационных организациях при определении условий эксплуатации мощных синхронных генераторов в ЭЭС, расчетах показателей статической устойчивости и переходных процессов при конечных возмущениях в энергосистеме. Предложения по повышению уровня динамической устойчивости ЭЭС Ирака будут представлены руководству энергокомпании. Разработанное программное обеспечение используется в научной работе кафедры «Электрические системы и сети» СПбГПУ при анализе электромеханических переходных процессов в энергосистемах.

Выработанные в процессе работы приемы анализа и расчетные методики могут использоваться при рассмотрении перспективных вопросов установки мощных генераторов в энергосистемах различной структуры.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и получили одобрение на научных семинарах кафедры «Электрические системы и сети» СПбГПУ и на научно-технических конференциях «Фундаментальные исследования в технических университетах» 2003-2005 годах.

Публикации. По результатам исследований опубликовано 3 печатных работы.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа включает введение, четыре главы и основные выводы, изложенные на 4 страницах. Содержит 53 рисунков 26 таблиц, список литературы из 110 наименований. Общий объем работы 131 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы. Определены цель исследования, решаемые для ее достижения задачи, сформулирована научная новизна и практическая ценность и основные результаты диссертации.

В первой главе выполнен обзор основных тенденций современного электромашиностроения. Показано, что основными направлениями развития являются создание турбо- и гидрогенераторов предельных мощностей (1000 – 1500 МВт), а также разработка унифицированных конструкций генераторов средней мощности, использующих наиболее прогрессивные решения в области охлаждения обмоток и повышения степени использования активных материалов. Все это приводит к ухудшению электромеханических параметров, то есть к увеличению индуктивных сопротивлений и снижению величины механической инерционной постоянной.

Связь электромеханических параметров показателем использования активных материалов (линейной токовой нагрузкой статора – AS) хорошо

прослеживается на примере турбогенераторов серии ТВВ, параметры которых приведены в табл. 1.

Параметры генераторов серии ТВВ различной мощности.

Таблица 1

$P_{\text{НОМ}}$, МВт	165	200	320	500	1000
$U_{\text{НОМ}}$, кВ	18	15,75	20	20	24
$I_{\text{НОМ}}$, А	5670	8625	10200	17000	32100
D_i , см	123,5	123,5	126,5	131,5	155
L_t , см	395	435	610	635	800
A_s , А/см	1295	1335	1380	1975	2370
B_0 , Тл	0,81	0,85	0,85	0,85	0,887
X_d	1,7	1,84	1,7	2,56	2,43
X_d'	0,3	0,27	0,26	0,36	0,37
X_d''	0,213	0,19	0,173	0,243	0,246
T_{d0} , с	5,42	6,3	5,88	9,2	6,2
$G_{\text{ром}}$, ТОНН	33,5	42	55	65	99,7
GD^2 тм ² /Тл, с	17,8/3,15 (7,3)*	21.2/3.0 (6,6)*	29,8/1,96 (6,3)*	40/1,68 (5,9)*	78/1,45 (5,5)*

- с учетом махового момента паровой турбины.

Следует обратить внимание на сравнительно небольшое увеличение переходного индуктивного сопротивления $x'd$ на фоне существенного возрастания синхронных сопротивлений, что обусловлено малым сопротивлением рассеяния обмотки возбуждения.

Во второй главе приведены уравнения переходных процессов синхронной машины, записанные с использованием относительных единиц x_{ad} . Уравнения записаны с учетом быстропереходных процессов статорной цепи, поскольку одним из важных факторов, уточняющих процесс выбега ротора, является знакопеременная составляющая электромагнитного момента и дополнительные тормозные моменты, воздействующие на ротор в процессе короткого замыкания. При расчете пределов динамической устойчивости используется модель синхронной машины, основанная на применении сверхпереходных э.д.с. E_q'' , E_d'' .

Система уравнений для расчета мгновенных значений напряжений в узловых точках эквивалентной системы ЭЭС формируется на основе дифференциальной формы записи первого закона Кирхгофа:

$$\sum_{j=1}^m p \cdot i_j = 0, \quad (1)$$

где: m - число элементов, присоединенных к узлу.

На основании решения составленных на основе (1) уравнений определяются напряжения на зажимах статора генератора в режиме любого несимметричного короткого замыкания, что позволяет уточнить характер движения ротора генератора при коротких замыканиях.

Величина предела динамической устойчивости рассчитывается в простейшей схеме электроэнергетической системы (Рис.1.). Значение предела устойчивости оценивается в долях пропускной способности внешней по отношению к станции линии электропередачи, которую целесообразно принять равной единице (полагая $X_{л} = 1$). При поиске предела предполагается, что имеется возможность произвольно изменять установленную мощность станции. При изменении мощности станции в ходе последовательных приближений (рис.2) к пределу динамической устойчивости режим работы генераторов сохраняется номинальным. В каждом проверяемом на устойчивость режиме генераторы работают в одних и тех же (номинальных) условиях, и, таким образом, при изменении значений установленной мощности в ходе поиска предела все эдс генератора будут сохраняться неизменными. Поэтому зависимости предельной мощности $P_{пр}$ от кратности k_F увеличения эдс E_r по отношению к синхронной эдс установившегося режима E_{q0} оказываются весьма информативными при варьировании параметров генератора.

Значение предела динамической устойчивости электропередачи рассчитывается для нескольких (обычно трех) значений кратности форсирования возбуждения k_F . Величина предела рассчитывается в функции кратности форсирования возбуждения K_F . Форсирование возбуждения предполагается безынерционным, а длительность форсировки определяется продолжительностью процесса (то есть считается, что заданное потолочное значение напряжения возбуждения удерживается до максимума угла).

Зависимости $P_{пр} = f(k_F)$ позволяют производить сравнение уровней динамической устойчивости генераторов при изменении их параметров. Пределы динамической устойчивости оцениваются по первому колебанию угла. Устойчивость переходного процесса определяется в программе на основании исследования знаков скольжения "s" и его производной ps после отключения короткого замыкания. Величина предела рассчитывается в функции кратности форсирования возбуждения K_F .

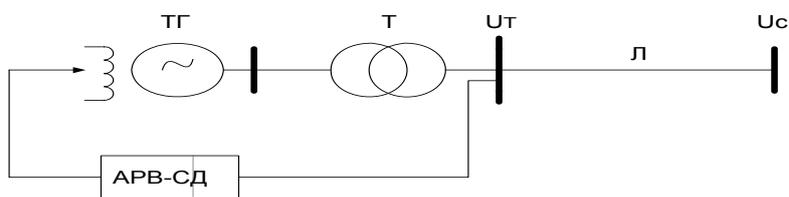


Рис. 1. Расчетная схема электроэнергетической системы.

Рис.2. иллюстрирует последовательное изменение мощности эквивалентного генератора в ходе поиска предела динамической устойчивости. Вычислительный процесс прекращается, когда два последующих значения предельных мощностей различаются меньше наперед заданной точности ϵ .

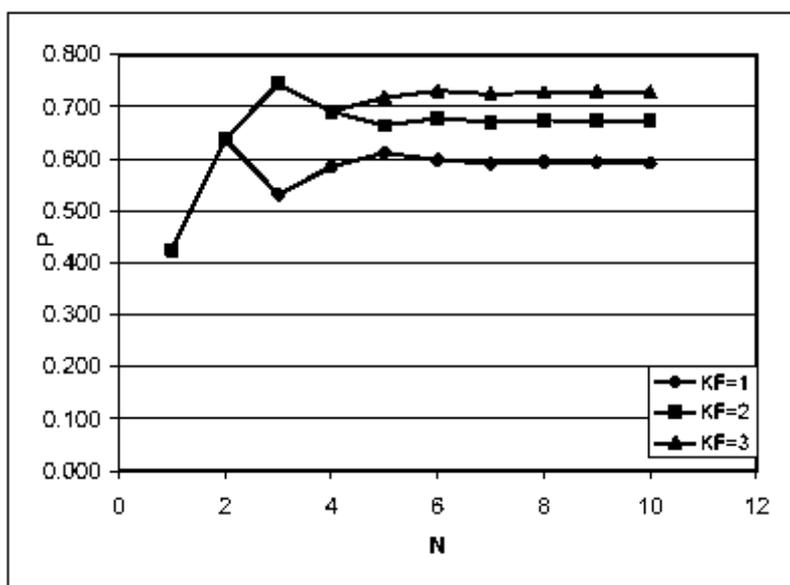


Рис.2. Изменение мощностей эквивалентного генератора в ходе поиска величины предела динамической устойчивости (генератор СВФ 1690/185 – 64).

Следует отметить, что найденная описанным способом величина предела динамической устойчивости в силу выбранной системы относительных единиц ($X_{\text{БАЗ}} = X_{\text{вн}} = 1,0$, $P_{\text{станции}} = \text{var.}$) численно равна предельному значению внешнего индуктивного сопротивления электростанции, вычисляемую при $P_{\text{БАЗ}} = S_{\text{станции}} = 1$, $X_{\text{вн}} = \text{var.}$ В книге А.А. Юрганова и В.А. Кожевникова «Регулирование возбуждения синхронных генераторов», 1996 приводятся величины внешних эквивалентных индуктивных сопротивлений, найденные для нескольких известных тепловых электростанции России. Практика показывает, что для большинства электростанций величина $X_{\text{вн}}$ лежит в диапазоне 0,25 – 0,45 (максимальная величина – 0,49 (Кольская АЭС)). Таким образом, найденная величина предела динамической устойчивости может быть связана с конкретными условиями работы электростанции в электроэнергетической системе.

В третьей главе приведены результаты расчета пределов динамической устойчивости двух гидрогенераторов – генератора СВФ-1690/185-64 Красноярской ГЭС и капсульного генератора СГКВ-480/115-64 Шекснинской ГЭС, а также двух мощных турбогенераторов, отличающихся высоким использованием активных материалов и ухудшенными параметрами - ТВВ-500-2 и ТВВ-1000-2.

Гидрогенератор СВФ-1690/185-64 отличается достаточно высокими величинами синхронных индуктивных сопротивлений X_d , X_q и весьма большим переходным индуктивным сопротивлением X_d' . Однако, величина механической инерционной постоянной генератора T_J достаточно велика, а постоянная времени контура возбуждения (за счет сравнительно большого активного сопротивления этого контура), напротив, уменьшена, что повышает эффективность влияния регулирования возбуждения на показатели динамической устойчивости.

В таблице 2 представлены результаты расчета пределов динамической устойчивости при двухфазном на землю к.з. длительностью 0,12 с гидрогенератора СВФ-1690/185-64.

Таблица 2.

К _Ф	Р
1	0,592
2	0,673
3	0,728

На основе данных таблицы 2 можно заключить, что гидрогенератор, несмотря на увеличенные значения индуктивных сопротивлений, обладает достаточно высоким уровнем динамической устойчивости.

Использование форсирования возбуждения с $K_F = 2$ приводит к возрастанию величины предела на 13,6%, с $K_F = 3$ увеличивает предел на 23%.

Рассмотрено также влияние других существенных электромеханических параметров на величину предела динамической устойчивости.

В таблице 3 и на рис. 3 приведены зависимости $P_{пр}$ от величины механической инерционной постоянной T_J .

Таблица 3

T _J	3.45	4.10	5.4	6.0	7.3	8.6	9.3	10.5	11.2	12.5	13.1	14.4	15.1	17.0
K _{F1}	0.50	0.52	0.5	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
K _{F2}	0.54	0.57	0.6	0.6	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
K _{F3}	0.58	0.61	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8

Из этих зависимостей следует любопытный вывод о том, что увеличение механической инерционной постоянной T_J сверх некоторой величины не способствует повышению уровня динамической устойчивости, причем до некоторой степени это связано с используемой кратностью форсирования возбуждения.

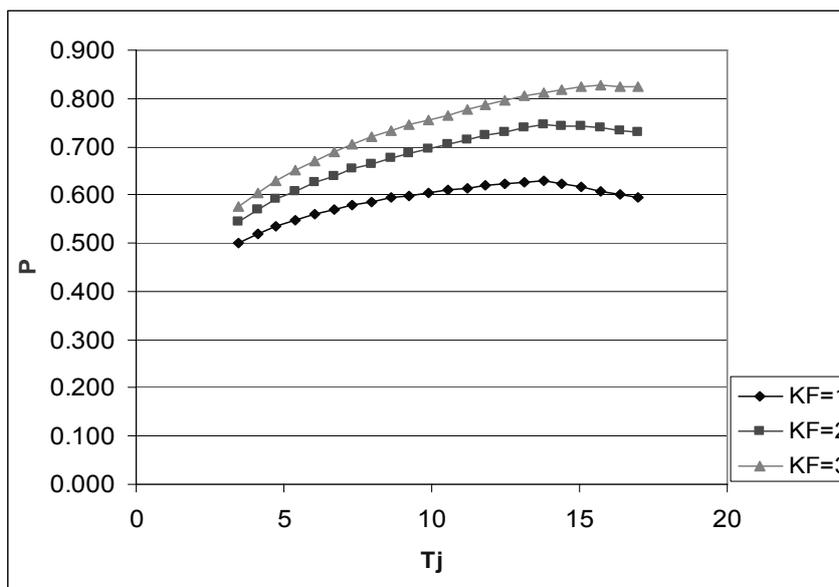


Рис.3. Зависимости предельной мощности от T_J .

Отмеченное снижение предела при увеличении T_J не имеет большого практического значения и связано с методикой поиска предела динамической устойчивости. Для практики важны два следующих вывода: с уменьшением

механической инерционной постоянной предел динамической устойчивости быстро снижается; влияние сниженных значений T_J может быть скомпенсировано интенсивными воздействиями на обмотку возбуждения генератора.

Анализ влияния остальных параметров показал, что достаточно заметное отрицательное влияние на величину предела имеет увеличение индуктивного сопротивления рассеяния контура возбуждения. Полученные зависимости иллюстрируются рис.4.

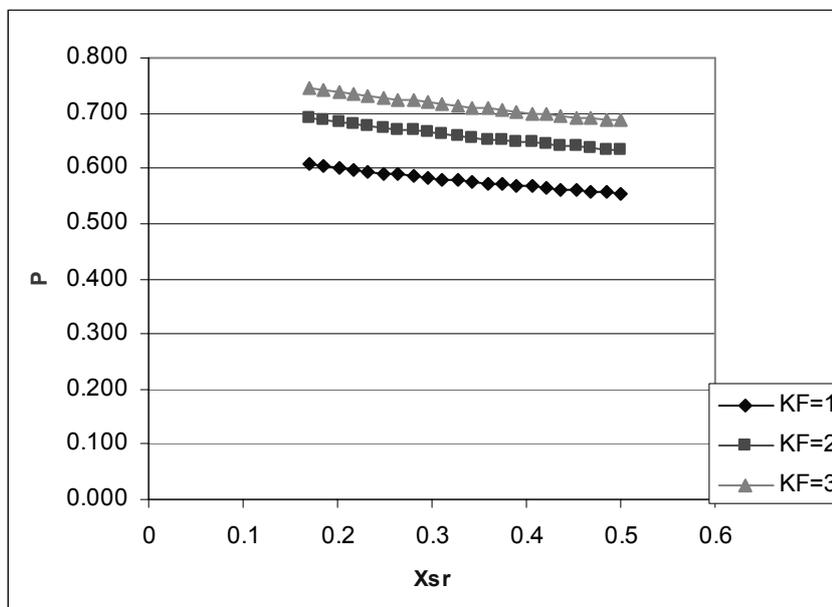


Рис.4. Зависимость предела динамической устойчивости от индуктивного сопротивления рассеяния контура возбуждения X_{sr} .

Гидрогенератор капсульного типа СГКВ-480/115-64 отличается существенно ухудшенными параметрами. Это обусловлено своеобразной конструкцией, уменьшенным воздушным зазором, малым междуполюсным расстоянием, что определяет повышенное значение рассеяния контура возбуждения и необычно большую величину переходного индуктивного сопротивления X_d' . Сниженная величина механической инерционной постоянной определяет весьма низкие значения пределов динамической устойчивости.

В таблице 4 приведены результаты расчета пределов динамической устойчивости при двухфазном коротком замыкании на землю при длительности короткого замыкания $t_{к.з.} = 0,12$ с. Следует отметить, что для генератора этого типа более вероятной является длительность короткого замыкания $t_{к.з.} = 0,16 - 0,2$ с, поскольку электростанции с такими генераторами присоединяются к сетям 110 – 220 кВ (Эти результаты рассмотрены ниже).

Таблица 4.

KF	P
1	0,317
2	0,424
3	0,487

Данные табл. 4 характеризуют крайне низкий уровень динамической устойчивости капсульного генератора и одновременно весьма высокую эффективность форсирования возбуждения. Так, двукратная форсировка увеличивает предел на 33,7%, трехкратная – на 53,6%. Таким образом, при анализе динамической устойчивости гидрогенераторов капсульного типа следует ориентироваться на высокую эффективность регулирования возбуждения, которая может дополнять другие мероприятия по повышению уровня устойчивости.

Выявлено весьма негативное влияние большой величины рассеяния контура возбуждения (у генератора этого типа величина индуктивного сопротивления X_{sr} составляет 0,327). Некоторое уменьшение X_{sr} может оказать существенное положительное влияние на уровень динамической устойчивости генераторов капсульного типа.

Изменение времени короткого замыкания оказывает существенное влияние на пределы динамической устойчивости, особенно у генераторов с малой величиной механической инерционной постоянной. Так на рис. 5 приведены зависимости $P_{пр} = F(t_{к.з.})$ для капсульного генератора.

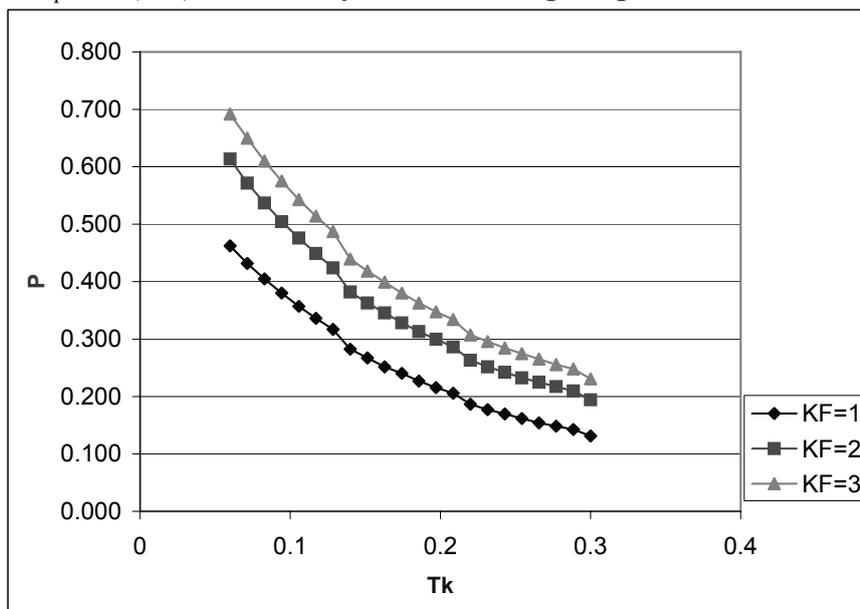


Рис. 5. Зависимость предела динамической устойчивости от длительности короткого замыкания (генератор СГКВ-480/115-64).

На основании данных рис. 5 можно сделать вывод о существенном снижении пределов устойчивости капсульного генератора при увеличении длительности к.з. Одновременно можно утверждать, что динамическая устойчивость параллельной работы капсульного гидрогенератора может быть обеспечена за счет сокращения длительности аварийного режима до 0,06 – 0,07 с.

Рассмотрено влияние изменения параметров турбогенератора ТВВ-500 на уровень устойчивости. Указанный генератор отличается исключительно высокими синхронными индуктивными сопротивлениями, однако в силу специфики конструкции ротора турбогенератора, индуктивное сопротивление рассеяния обмотки возбуждения оказывается малым, что обуславливает

сравнительно небольшое увеличение сопротивления X_d' (в основном за счет увеличения сопротивления рассеяния обмотки статора). Поэтому и снижение пределов получается не столь значительным. В таблице 5 приведены результаты расчета пределов для указанного генератора (для двухфазного на землю к.з. длительностью 0,12 с).

Таблица 5.

KF	P
1	0,577
2	0,615
3	0,645

Рассмотрим кратко такие же зависимости В таблице 6 приведены зависимости пределов динамической устойчивости в функции k_F для турбогенератора ТВВ-1000, у которого постоянная времени T_r существенно ниже.

Таблица 6.

KF	P
1	0,530
2	0,610
3	0,662

За счет указанного фактора при $k_F = 2,0$ значения пределов турбогенераторов практически сравниваются.

Таким образом, на основании выполненных расчетов можно утверждать, что основными влияющими на «естественный» уровень динамической устойчивости параметрами являются переходное индуктивное сопротивление и механическая инерционная постоянная времени генератора. При условии применения форсирования возбуждения значительную роль в повышении предела может сыграть постоянная времени T_r .

На основе методики, кратко изложенной выше, были составлены расчетные программы и выполнены численные оценки влияния учета таких факторов, как активные сопротивления статорной цепи синхронной машины и дополнительных тормозных моментов, воздействующих на ротор при несимметричных коротких замыканиях.

Можно отметить, что учет дополнительных тормозных моментов существенно сказывается только на движении ротора капсульного генератора. Если учесть влияние дополнительного воздействия на ротор генератора, то при вычислениях пределов устойчивости получатся следующие результаты, представленные в таблицах 7 и 8.

Таблица 7

Учет влияния дополнительных тормозных моментов, генератор СВФ-1690/185-64.

KF	P	С учетом r_a	Доп.моменты
1	0,592	0,602	0,611
2	0,673	0,678	0,685
3	0,728	0,731	0,738

Таблица 8.

Учет влияния дополнительных тормозных моментов, генератор СГКВ-480/115-64.

КФ	Р	С учетом r_a	Доп.моменты
1	0,317	0,356	0,391
2	0,424	0,472	0,508
3	0,487	0,532	0,553

Таким образом, существенное уточнение предела динамической устойчивости имеет место только у капсульного генератора, обладающего повышенными активными сопротивлениями статорной цепи. Этот фактор следует принимать во внимание при оценке уровня динамической устойчивости. То же самое можно сказать и по поводу учета дополнительных тормозных моментов. Благодаря сниженному значению постоянной T_r у капсульного генератора сохраняется очень высокая эффективность форсирования возбуждения.

Расчеты статической устойчивости показали, что современный автоматический регулятор возбуждения обеспечивает высокие показатели демпфирования практически вне зависимости от параметров генератора.

Однако, изменение параметров существенно влияет на положение области устойчивости на плоскости коэффициентов демпфирования. Для капсульного генератора область устойчивости заметно смещена в сторону отрицательных значений коэффициента регулирования по частоте напряжения. При этом за счет малой величины постоянной времени контура возбуждения могут быть обеспечены очень высокие показатели демпфирования (таблица 9).

Таблица 9.

Показатели демпфирования системы с капсульным гидрогенератором.

$$(k_{0\omega} = -27,5; k_{1\omega} = 2,15)$$

Номер	ВЕЩЕСТВЕННАЯ ЧАСТЬ	МНИМАЯ ЧАСТЬ	НОМЕР	ВЕЩЕСТВЕННАЯ ЧАСТЬ	МНИМАЯ ЧАСТЬ
1	-42.51	11.56	7	-8.18	.000
2	-42.51	-11.56	8	-3.67	.000
3	-6.326	10.41	9	-22.44	.556
4	-6.326	-10.41	10	-22.44	-.556
5	-4.265	8.085	11	-19.55	.000
6	-4.265	-8.085	0	.0000	.000

В четвертой главе приведены результаты исследования динамической устойчивости района энергосистемы центральной части Ирака.

Расчетная схема рассматриваемого района энергосистемы представлена на рис. 6. Основными элементами района ОЭС являются три тепловые электростанции сравнительно небольшой мощности (в перспективе предусматривается их расширение) Г1 – 220 МВт (2 турбогенератора ТВВ-

110), Г3 – 126 МВт (2 турбогенератора ТВВ-63) и Г4 – 80 МВт (4 турбогенератора Т2-20). Общая установленная мощность электростанций района составляет 426 МВт. Расстояние от центральной подстанции (узел 2) до электростанций составляет: до Г1 – 65 км, до Г3 – 36 км, до Г4 – 16 км. Расстояние от ПС 2 до мощного узла энергосистемы (Г11, ТЭС Аль-Юсифия) составляет 180 км. Между центральной подстанцией района и генератором Г11 имеется 6 промежуточных подстанций с небольшими нагрузками. Конфигурация данного района энергосистемы обусловлена расположением населенных пунктов, пунктов нефтедобычи и нефтеперерабатывающего завода. Все линии выполнены двухцепными на напряжении 230 кВ. Однако, большая часть линий расположена на двухцепных опорах, что весьма часто приводит к одновременному отключению обеих цепей. Кроме того, опоры протяженных ВЛ4 и ВЛ5 повреждены и линии работают как одноцепные. Это создает определенные проблемы с устойчивостью при авариях на этих линиях.

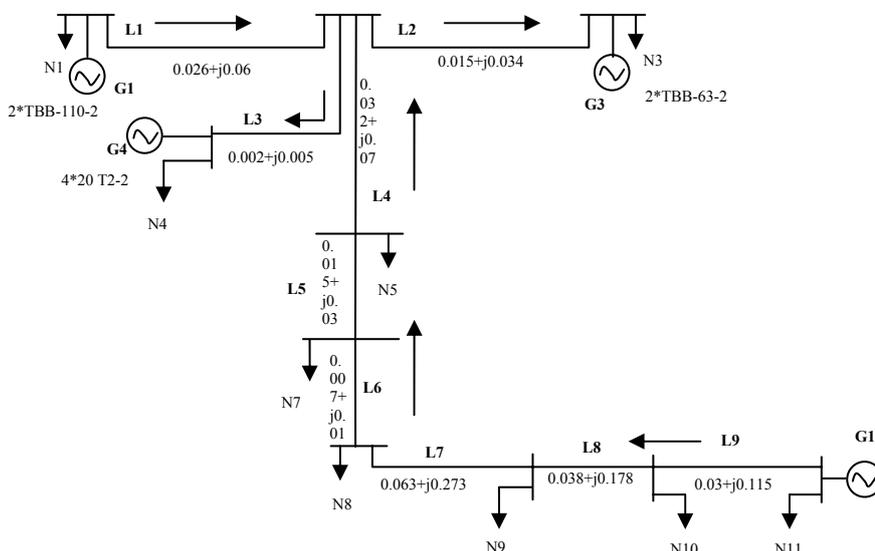


Рис. 6. Энергосистема центрального района Ирака.

Характерной особенностью режима работы рассматриваемого энергорайона является стабильный дефицит активной мощности, который может достигать 200 – 230 МВт. Этот фактор оказывает существенное влияние на характер протекания переходных процессов. Так, при коротких замыканиях на ВЛ5 ($t_{к.з.} = 0,12$ с) с последующим разрывом в цикле паузы АПВ ($t_{АПВ} = 0,5$ с) происходит нарушение динамической устойчивости группы генераторов (Г1, Г3, Г4) относительно мощной системы, представленной эквивалентным генератором Г11. При сокращении времени АПВ до предельно допустимого для условий Южного Ирака (0,33 – 0,35 с) происходит ресинхронизация затормозившейся дефицитной части системы после нескольких асинхронных проворотов. Однако, как показывает изменение активной и реактивной мощности поврежденной линии, характеристики переходного процесса неприемлемы. После ресинхронизации асинхронные провороты переходят в синхронные качания, напряжения восстанавливаются, и параметры режима

возвращаются к нормальным значениям. Тем не менее процесс сопровождается опасными величинами электромагнитного момента генераторов Г1, Г3, Г4 (Рис. 7) Поэтому следует рассмотреть вопрос о применении дополнительных мероприятий по повышению уровня динамической устойчивости.

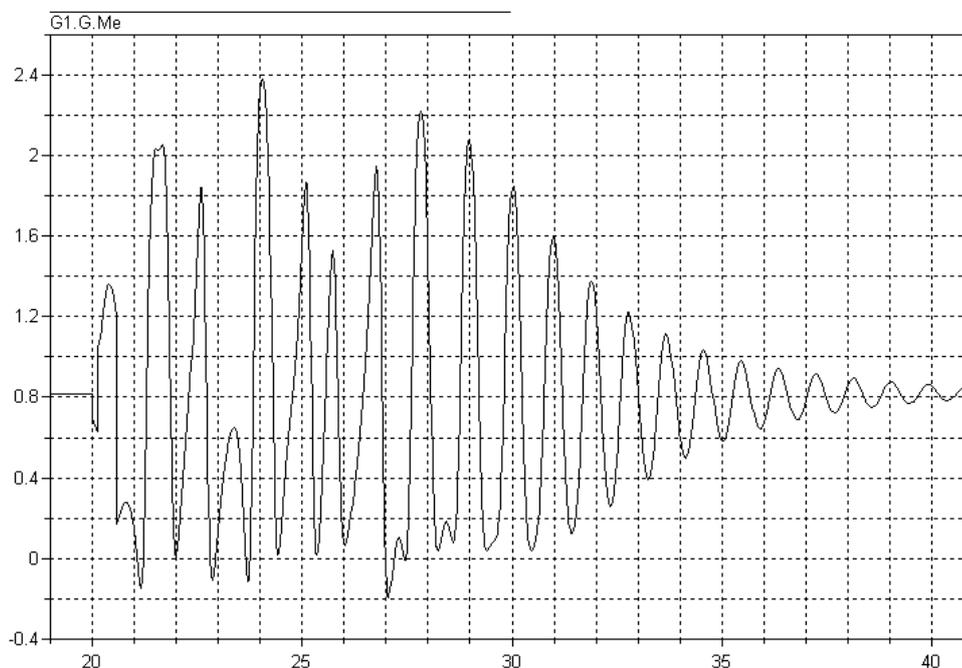


Рис.7. Изменение электромагнитной мощности генератора Г1 в процессе ресинхронизации и последующих синхронных качаний.

В качестве мероприятий по повышению уровня динамической устойчивости рассмотрены: усовершенствование АРВ генераторов, отключение нагрузки и кратковременное искусственное снижение напряжения на шинах подстанции ПС2.

При использовании «сильного» закона регулирования возбуждения характер изменения электромагнитной мощности и напряжения начинает различаться уже начиная с момента времени $t = 0,4$ с после начала переходного процесса. Поскольку частота в отделившемся районе энергосистемы падает, то каналы регулирования по отклонению частоты и производной частоты обеспечивают развозбуждение, несмотря на сниженное напряжение. Это действие АРВ обеспечивает уменьшение электромагнитной мощности генераторов и существенно меньшее торможение роторов, что, в конечном итоге, обеспечивает устойчивость процесса. Следует отметить, что несмотря на благоприятный исход процесса, его характеристики (длительность, снижение напряжения, колебания электромагнитных мощностей генераторов) остаются крайне неблагоприятными, что обуславливает необходимость применения дополнительных мероприятий по повышению динамической устойчивости.

В качестве более эффективного мероприятия рассмотрено отключение части нагрузки при аварии на ВЛ 5. Расчеты показали, что эффективность мероприятия начинает ощущаться при условии отключения около 22,5% (140

МВт) нагрузки района одновременно с отключением линии. Характера переходного процесса при этом существенно облегчается.

Несмотря на высокую эффективность кратковременного (на 0,5 с) отключения части потребителей, применение такого мероприятия по повышению уровня динамической устойчивости все-таки является нежелательным. В связи с этим было рассмотрено возможное применение кратковременного понижения напряжения (до уровня, приблизительно соответствующего однофазному короткому замыканию на шинах 230 кВ ПС2) на время $\Delta t = 0,25 - 0,35$ с.

На рис.8 представлены результаты расчета переходного процесса, вызванного двухфазным на землю коротким замыканием на ВЛ 5 с ее последующим отключением на $\Delta t_{\text{АПВ}} = 0,45$ с. В качестве дополнительного мероприятия по повышению устойчивости используется включение на ПС 2 трансформатора мощностью 32 МВА, к вторичной обмотке которого присоединен реактор мощностью 30 МВА. Такое присоединение создает эффект приблизительно соответствующий (с точки зрения напряжения прямой последовательности) однофазному короткому замыканию на шинах 230 кВ подстанции.

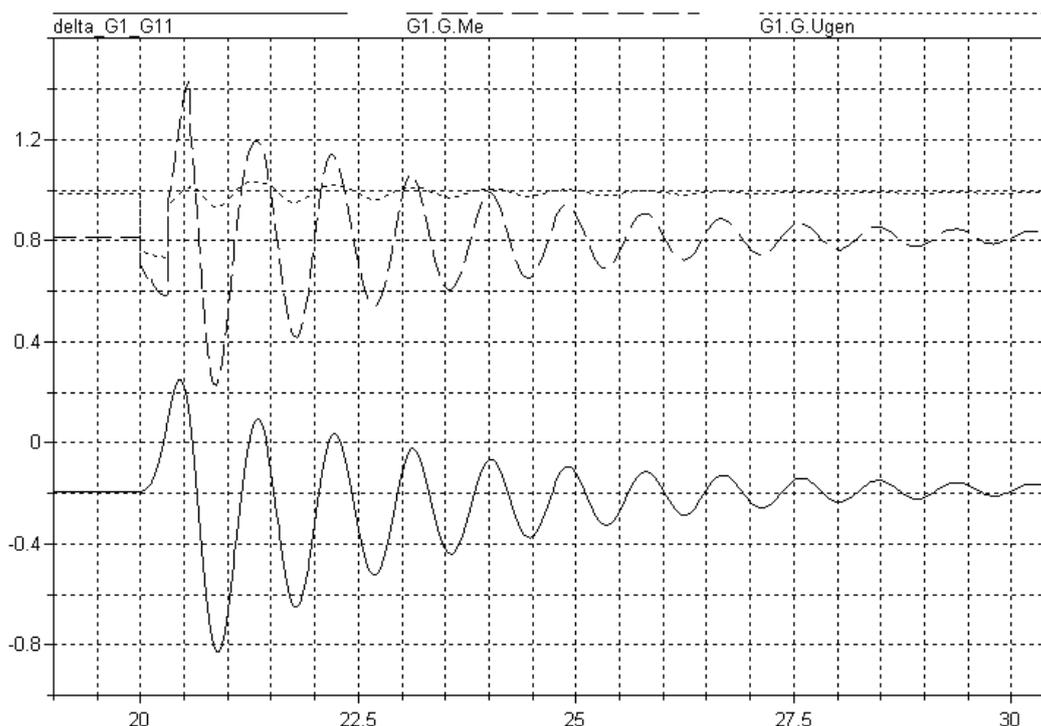


Рис.8. Эффект кратковременного снижения напряжения на шинах ПС2.

Из кривых рис.8 хорошо видно, что использование кратковременного снижения напряжения изменяет характер движения роторов генераторов Г1 – Г4 и существенно облегчает протекание переходного процесса (Например, следует сравнить изменение электромагнитной мощности Г1 на рис.7 и рис.8). Указанное мероприятие сохраняет свою эффективность даже в условиях отсутствия регулирования возбуждения с применением производных режимных параметров в законе регулирования. График изменения напряжения,

приведенный на рис. 8, показывает, что снижение напряжения, вызванное аварией и дополнительной коммутацией на ПС 2, не является опасным для устойчивости нагрузки. В то же время применение кратковременного снижения напряжения заметно облегчает протекание переходных процессов и позволяет избежать отключения потребителей.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Выполнен обзор изменения параметров мощных гидро- и турбогенераторов, обусловленного совершенствованием систем охлаждения обмоток статора и ротора и повышением степени использования активных материалов. Отмечено значительное влияние указанных факторов (у турбогенераторов) и особенностей конструкции (у гидрогенераторов) на электромеханические параметры. Изменение последних выражается в увеличении синхронных (до величин $X_d = 2,0 - 2,6$ о.е.) и переходных (до $X_d' = 0,4 - 0,57$ о.е.) индуктивных сопротивлений, а также снижении величин механических инерционных постоянных. Рост переходных индуктивных сопротивлений наиболее выражен у гидрогенераторов из-за повышенного рассеяния обмотки возбуждения. Наиболее неблагоприятными параметрами (в основном в силу особенностей конструкции) обладает гидрогенератор капсульного типа, имеющий существенно уменьшенную величину механической инерционной постоянной T_J и одновременно увеличенные синхронные и особенно переходные индуктивные сопротивления. Отмеченное ухудшение электромеханических параметров обычно сопровождается некоторым увеличением активных сопротивлений обмотки возбуждения и соответствующим снижением постоянной времени контура возбуждения (до $T_r = 1,3$ с у генератора капсульного типа), что заметно повышает эффективность регулирования возбуждения.
2. Обзор развития систем возбуждения показывает, что типовым решением является использование тиристорных систем возбуждения с автоматическим регулятором возбуждения сильного действия с весьма высокими потолками форсирования и динамическими характеристиками. Применение современных систем возбуждения позволяет скомпенсировать неблагоприятное изменение параметров генераторов.
3. В программной среде Visual Basic / Excel реализована методика автоматического расчета предела динамической устойчивости на первом колебании угла. Метод предназначен для сравнения уровней динамической устойчивости генераторов при изменении их параметров, длительности короткого замыкания, применения мероприятий по повышению динамической устойчивости и так далее.
4. Реализован метод расчета переходных процессов в электроэнергетической системе на основе вычисления мгновенных значений переменных. Определение напряжений в узловых точках сети выполняется с помощью выражений, отвечающих балансу производных токов, что позволяет

выполнять расчет переходных процессов при несимметричных коротких замыканиях и их пофазном отключении. Метод предназначен для выполнения расчетов движения ротора в ходе короткого замыкания (при необходимости и после его отключения) для выполнения уточненных расчетов пределов динамической устойчивости с учетом дополнительных тормозных моментов, воздействующих на ротор при коротких замыканиях.

5. На основе расчетов пределов динамической устойчивости показано, что уровень динамической устойчивости современных гидрогенераторов и турбогенераторов с ухудшенными параметрами остается достаточным и обеспечивает сохранение параллельной работы при нормативной тяжести возмущений. Исключение составляет гидрогенератор капсульного типа, абсолютные значения пределов динамической устойчивости которого являются весьма низкими и не обеспечивают необходимых запасов устойчивости в реальных условиях эксплуатации.
6. Несмотря на неблагоприятные параметры генераторов, остаются весьма высокими показатели демпфирования, обеспечиваемые автоматическим регулятором возбуждения сильного действия. Благодаря сниженному значению постоянной времени T_r у капсульного генератора сохраняется очень высокая эффективность регулирования возбуждения, обеспечивающая, при точной настройке АРВ, показатели демпфирования колебательных процессов на уровне $\alpha = -4,5 - -5$ 1/с. Необходимо учитывать смещение области устойчивости генератора капсульного типа во второй квадрант.
7. Наиболее эффективным мероприятием, обеспечивающим необходимый уровень динамической устойчивости генераторов с ухудшенными параметрами является сокращение времени короткого замыкания (для капсульного генератора до $t_{к.з.} \leq 0,06$ с).
8. Учет влияния активных сопротивлений статорных цепей и дополнительных тормозных моментов, воздействующих на ротор генератора при коротком замыкании, приводит к заметному уточнению предела динамической устойчивости только у генератора капсульного типа. У остальных генераторов, имеющих ухудшенные параметры, но типовые величины механической инерционной постоянной, величина предела динамической устойчивости увеличивается всего лишь на несколько процентов.
9. В программной среде Modelica разработана математическая модель района электроэнергетической системы Ирака, позволившая выполнить исследование динамической устойчивости и разработать предложения по применению мероприятий по повышению уровня устойчивости.
10. Показано, что в сложившихся условиях устойчивость параллельной работы дефицитного энергорайона не обеспечивается без применения дополнительных мероприятий. Рассмотрено применение на генераторах модернизированных автоматических регуляторов возбуждения, реализующих «сильный» закон регулирования возбуждения, быстродействующее автоматическое отключение части нагрузки и

кратковременное искусственное снижение напряжения на одной из узловых подстанций района.

11. Расчеты динамической устойчивости показали, что наибольшую эффективность в рассматриваемых условиях дефицитной энергосистемы имеет кратковременное искусственное понижение напряжения. Эффективность данного мероприятия сохраняется даже в условиях работы существующих (не модернизированных) систем возбуждения генераторов.

Основные положения диссертации отражены в публикациях.

1. Мохамед Емад Джасем. Исследования влияния параметров мощных генераторов на предел динамической устойчивости электропередачи.
// Материалы VII всероссийской конференции по проблемам науки и высшей школы. 20-21 июля 2003 года, Санкт-Петербург.- СПб.; СПбГПУ, 2003г. – С. 175.
2. Мохамед Емад Джасем. Особенности ограничения токов короткого замыкания сдвоенного реактора с электромагнитной связью.
// Материалы VII всероссийской конференции по проблемам науки и высшей школы. 20-21 июля 2003 года, Санкт-Петербург.- СПб.; СПбГПУ, 2003г. – С. 176.
3. Мохамед Емад Джасем. Влияния параметров турбо-и гидрогенераторов на показатели статической и динамической устойчивости параллельной работы. // Материалы VI Международной конференции «Компьютерное моделирование 2005» и школа-семинар «Виртуальные лаборатории для естественнонаучных дисциплин». 28 июня – 2 июля 2005 года, Санкт-Петербург.-СПБ.; СПбГПУ, 2005г. – С. 184.