

На правах рукописи

Шхати Хамид Вассфи

**Развитие методов математического моделирования
переходных процессов современных генераторов для
повышения эксплуатационных показателей их работы**

Специальность: 05.14.02 – Электростанции и электроэнергетические
системы

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Санкт-Петербург – 2008

Работа выполнена в государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Научный консультант: доктор технических наук,
профессор Смоловик Сергей Владимирович.

Официальные оппоненты:
доктор технических наук, профессор Попов Виктор Васильевич,
доктор технических наук, профессор Савельев Виталий Андреевич,
доктор технических наук, профессор Таджибаев Алексей Ибрагимович.

Ведущая организация: ОАО «Силовые машины», филиал «Электросила», Санкт-Петербург.

Защита диссертации состоится 20 июня 2008 г. в 10 часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.11 при Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу: 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул. 29, Главное здание, ауд. 325.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

Автореферат разослан « ____ » _____ 2008 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д.212.229.11
к.т.н., доцент

Попов М.Г.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Современное состояние Российской электроэнергетики характеризуется быстро растущим спросом на электрическую энергию и определенным отставанием ввода новых генерирующих мощностей. Основными причинами увеличения спроса являются оживление промышленной активности, масштабное жилищное строительство, существенное увеличение спроса в бытовом секторе, а в зимние месяцы (январь, февраль) – понижение температуры.

Для покрытия максимумов потребления задействуются практически все располагаемые резервы электростанций. Режимы электрических сетей характеризуются как весьма напряженные, перегрузка оборудования предотвращается проведением специальных мероприятий (переводом потребителей на электроснабжение от менее загруженных центров питания, ограничением потребления). В условиях повышенного спроса загрузка основных трансформаторных мощностей находилась в интервале между 85 и 100%. До 20% высоковольтных линий электропередачи в эти периоды были загружены на 90 - 95%.

Таким образом, напряженные периоды работы энергосистемы характеризуются полным использованием резервов генерирующих мощностей, полным использованием пропускной способности межсистемных транзитов, значительными величинами потоков мощности по системообразующей сети и автотрансформаторным связям, необходимостью ограничения потребителей в период повышенных нагрузок.

Такая ситуация сложилась вследствие недостаточного внимания к развитию электрических сетей и обеспечению опережающего ввода генерирующих мощностей, что обусловлено сложными условиями развития народного хозяйства в течение переходного периода 1991 - 2001 гг. В связи с большой территориальной протяженностью России и высокой стоимостью сооружения высоковольтных линий (ВЛ) имеется тенденция к предельному использованию их пропускной способности, что на фоне роста нагрузок, приводит к увеличению длительности утяжеленных режимов, характеризующихся сниженными запасами устойчивости. К этому необходимо добавить соображения о существенном старении оборудования сетей и о моральном износе большинства эксплуатируемых релейных защит.

Основой развития электроэнергетики является объединение электроэнергетических систем (ЭЭС) и использования в них синхронных генераторов больших единичных мощностей, достигающих 1000 и 1200 МВт. Механическая прочность элементов валопроводов мощных агрегатов снижается с ростом единичной мощности, а при некоторых режимах (отключение короткого замыкания, особенно в случае отказа основного выключателя, автоматическое повторное включение, в том числе неуспешное) механические напряжения валопровода могут превысить допустимые. Электромеханические параметры таких генераторов ухудшены, и обеспечение устойчивости и надежности работы ЭЭС обеспечивается за счет примене-

ния различных систем управления, важное место среди которых занимают системы автоматического регулирования возбуждения генераторов, частоты вращения турбин, активной мощности электрических станций и т.д. Достижение высоких демпферных свойств реализуется благодаря использованию в АРВ в качестве параметров стабилизации сигналов производной напряжения статора, отклонения частоты напряжения статора и производной частоты. Однако повышение качества демпфирования электромеханических колебаний ротора генератора за счет повышения быстродействия аппаратуры и усиления воздействий на обмотку возбуждения генератора приводит и к увеличению механических нагрузок на валопровод. Новые возможности моделирования (например, на основе широко распространенной системы программирования MatLab) позволяют реализовать весьма сложные исследовательские модели и получить представления о направлениях развития систем автоматического управления, обеспечивающих подавление нежелательных воздействий на турбоагрегат, обусловленных односторонним подходом к оптимизации настроечных параметров системы регулирования возбуждения, направленных на повышение показателей демпфирования на частотах электромеханических колебаний. В результате выполнения работы удалось разработать рекомендации по подавлению нежелательных явлений резонансного характера на турбоагрегатах, оснащенных старыми типами АРВ, а также определить направления развития структуры перспективных цифровых АРВ.

Общей чертой электрических машин с высоким использованием активных материалов является существенная зависимость основных параметров от режимов работы, обусловленная влиянием насыщения магнитной цепи и протеканием вихревых токов в массивных участках магнитопроводов. Указанные обстоятельства требуют совершенствования методов расчета установившихся режимов и переходных процессов. Потребность внедрения уточненных методов моделирования и расчета повышается в связи ухудшением электромеханических параметров высокоиспользуемых генераторов и увеличением механических нагрузок на элементы конструкции агрегатов. В этой связи большое значение имеет уточнение реальных демпферных свойств турбоагрегатов, в том числе на частотах крутильных колебаний. На основе анализа естественных факторов демпфирования, свойственных конструкции валопровода, удалось уточнить реальные показатели демпфирования и оценить их влияние на протекание переходных процессов.

Значительное внимание в работе уделено исследованию процессов при конечных возмущениях в ЭЭС. Проанализированы возможные неблагоприятные сочетания воздействий ударного характера, вызывающие опасные значения скручивающих моментов, снижающих ресурс валопровода. Показано, что существующая методика определения нормативных величин для расчета механических характеристик валопровода нуждается в корректировке.

На основе рассчитанных величин ударных электромагнитных и скру-

чивающих моментов были выполнены расчеты механических напряжений в элементах конструкции турбоагрегата.

Цели и задачи работы. Целями работы являлись разработка и совершенствование методов математического моделирования турбоагрегатов с высокоиспользуемыми генераторами, которые оснащены современными системами возбуждения, для исследования демпферных свойств и переходных процессов при конечных возмущениях, а также разработка мероприятий по возможному снижению опасных воздействий на валопровод.

Для достижения поставленных целей потребовалось:

- выполнить исследование демпферных свойств регулируемого турбоагрегата, оснащенного быстродействующей системой возбуждения, в диапазоне низших частот крутильных колебаний;
- выполнить оценку возможного дополнительного демпфирования крутильных колебаний на основе учета демпфирования, связанного с отклонением скорости перемещения лопаточного аппарата турбины от скорости парового объема («паровое» демпфирование) и демпфирования, обусловленного трением в элементах лопаточного аппарата («конструкционное» демпфирование);
- разработать алгоритмы расчета переходных процессов с учетом насыщения сердечников на путях основного магнитного потока и путях потоков рассеяния;
- разработать методы расчета напряжений во внешней сети, пригодные для моделирования процессов при несимметричных коротких замыканиях и последовательных коммутациях;
- разработать комплексные математические модели в среде MatLab, учитывающие реальную структуру систем возбуждения агрегатов, включая электромагнитный момент вспомогательного генератора системы возбуждения (для независимой тиристорной и диодной бесщеточной систем);
- выполнить расчеты переходных процессов при различных сочетаниях ударных воздействий на валопровод: коротких замыканиях и их отключении, выполнении автоматических повторных включений линии электропередачи, в том числе и неуспешных АПВ для оценки возможности появления опасных скручивающих моментов;
- выполнить оценку эффективности применения фильтрации сигналов и дополнительных сигналов регулирования для подавления слабодемпфированных составляющих на частотах крутильных колебаний;
- оценить возможности применения линейно-квадратичного управления и оптимального оценивания состояния на основе применения фильтра Калмана для обеспечения высоких демпферных свойств в области частот крутильных колебаний;
- выполнить анализ естественных факторов демпфирования, свойственных конструкции валопровода, и уточнить реальные демпферные свойства агрегатов;

- оценить воздействия на валопровод агрегата таких мероприятий по повышению динамической устойчивости, как электрическое торможение и импульсное регулирование турбины;
- выполнить расчеты напряжений в элементах конструкции валопровода на основе метода конечных элементов с использованием программных комплексов ANSYS, SOLIDWORKS, KOSMOSWORKS и других.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

- в среде MatLab разработаны математические модели турбоагрегата различной полноты для исследования переходных процессов турбоагрегата с быстродействующим возбудителем для анализа процессов при конечных возмущениях и демпферных свойств;
- выполнена оценка улучшения показателей демпфирования крутильных колебаний за счет учета «парового» и «конструкционного» демпфирования;
- в разработанных программных комплексах реализован учет насыщения сердечников генератора на путях основного магнитного потока и потоков рассеяния контуров;
- разработанный метод моделирования переходных процессов во внешней сети позволяет воспроизводить многократные возмущения (короткие замыкания, отключение участков линии электропередачи, их повторное включение, в том числе неуспешное);
- установлена возможность появления слабодемпфированных колебаний валопровода, обусловленных работой системы возбуждения генератора;
- выполнена оценка эффективности ряда мероприятий, позволяющих обеспечить демпфирование крутильных колебаний валопровода. Одним из них является использование в законе регулирования сигналов, пропорциональных относительным углам закручивания элементов валопровода. Второе связано с применением линейно-квадратичного управления и оптимального оценивания состояния;
- проведено исследование скручивающих моментов при коротких замыканиях в высоковольтной сети и последующих коммутациях; выявлены наиболее опасные сочетания аварийных воздействий на агрегат; рассмотрены воздействия на валопровод, обусловленные применением мероприятий по повышению уровня динамической устойчивости.

Практическая ценность и реализация результатов работы. Разработанное программное обеспечение, полученные выводы и рекомендации могут быть использованы в проектных и эксплуатационных организациях при определении условий работы турбогенераторов в ЭЭС, расчетах величин скручивающих моментов при авариях. Разработанное программное обеспечение используется в научной работе кафедры «Электрические системы и сети» СПбГПУ при решении задач анализа аварий в энергосистемах и их перспективного развития.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались на научных семинарах кафедры «Электрические системы и сети» а также на научно-технических конференциях, проводимых в СПбГПУ. По теме диссертации опубликовано 25 печатных работ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, семи глав, заключения, списка литературы из 617 наименований и трех приложений. Содержание работы изложено на 393 страницах, иллюстрируется 86 рисунками и 50 таблицами.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, выполнен обзор предыдущих исследований, методов расчета переходных процессов с учетом крутильных колебаний валопроводов, а также анализа демпферных свойств энергосистем и их элементов.

Отмечена необходимость разработки уточненных методов расчета переходных процессов, поскольку резкое увеличение единичных мощностей генераторов достигалось в основном за счет роста электромагнитных нагрузок, что заметным образом изменяло и основные параметры, определяющие поведение машин в установившихся и переходных режимах. Накопление опыта эксплуатации мощных генераторов указало как на необходимость учета целого ряда дополнительных факторов при анализе переходных процессов (повышенных активных сопротивлений контуров, моментно-скоростных характеристик первичных двигателей), так и на необходимость корректировки обобщенной теории, основанной на использовании идеализированной модели синхронной машины. Последнее касается учета насыщения стали в нормальных и аварийных режимах работы.

Первая глава диссертации посвящена анализу изменения параметров мощных турбогенераторов, обусловленного повышением степени использования активных материалов, что затрагивает и валопровод агрегата, который содержит большое количество элементов и имеет значительное число собственных частот крутильных колебаний, некоторые из которых лежат в диапазоне 3-50 Гц.

Отмечено, что весьма велика вероятность возникновения опасных резонансных явлений под влиянием воздействий небольшой амплитуды, с частотой, совпадающей с одной из собственных частот валопровода. Источниками таких воздействий могут являться работа систем автоматического регулирования или взаимодействие турбоагрегата с системами регулирования других силовых электромеханических устройств.

Выполненный обзор позволил сформулировать требования к математическим моделям для проведения исследований. Современные программы численного моделирования систем и процессов становятся все более автоматизированными, облегчая пользователю процесс постановки и решения широкого класса сложных задач. Система математического моделирования MATLAB и программа имитации динамических систем *Simu-*

link компании MathWorks содержат большое количество профессиональных приложений для конкретных областей применения. Например, очень сильной стороной системы MatLab — *Simulink* является возможность одновременного анализа нелинейной системы и качества демпфирования в соответствующей линеаризованной модели. Уравнения исходной нелинейной модели системы численно линеаризуются, после чего возможно вычисление любых показателей качества процессов — собственных значений, собственных векторов, показателей управляемости и наблюдаемости и так далее. Заключительная часть первой главы посвящена анализу направления развития методов расчета переходных процессов в электрических системах.

Вторая глава диссертации посвящена вопросам моделирования переходных процессов синхронных машин и процессов во внешней по отношению к генератору электрической сети. Сформулирован новый подход к построению схем замещения синхронных машин, основанный на обращении матриц их индуктивных сопротивлений, определяющих связь потокосцеплений и токов контуров:

$$\bar{\Psi} = \bar{X} \times \bar{I} \quad (1)$$

Матрица \bar{X} для СМ, имеющей на роторе n контуров в продольной оси и m контуров в поперечной, имеет вид (2); она может быть разделена на независимые подматрицы \bar{X}_d, \bar{X}_q ; в общем случае все индуктивные сопротивления взаимной индукции $x_{a1d} \dots x_{nd}, x_{afd} (x_{a1q} \dots x_{amq})$ различны; при использовании допущения о существовании единого магнитного потока взаимной индукции все недиагональные члены матрицы равны сопротивлениям взаимной индукции x_{ad}, x_{aq} .

$$\bar{X} = \begin{pmatrix} x_d & 0 & x_{a1d} & \bullet & \bullet & x_{and} & x_{afd} & 0 & \bullet & \bullet & 0 \\ 0 & x_q & 0 & \bullet & \bullet & \bullet & \bullet & x_{a1q} & \bullet & \bullet & x_{anq} \\ x_{1ad} & 0 & x_{1d} & \bullet & \bullet & x_{1nd} & x_{1fd} & 0 & \bullet & \bullet & 0 \\ \bullet & \bullet & \bullet & \bullet & \bullet & \bullet & \bullet & \bullet & \bullet & \bullet & \bullet \\ x_{fad} & 0 & x_{f1d} & \bullet & \bullet & x_{fnd} & x_f & 0 & \bullet & \bullet & 0 \\ 0 & x_{1aq} & 0 & \bullet & \bullet & \bullet & 0 & x_{1q} & \bullet & \bullet & x_{1mq} \\ 0 & x_{2aq} & 0 & \bullet & \bullet & \bullet & 0 & x_{21q} & x_q & \bullet & x_{2mq} \\ \bullet & \bullet & \bullet & \bullet & \bullet & \bullet & \bullet & \bullet & \bullet & \bullet & \bullet \\ 0 & x_{maq} & 0 & \bullet & \bullet & \bullet & 0 & x_{m1q} & \bullet & \bullet & x_{mq} \end{pmatrix} \quad (2)$$

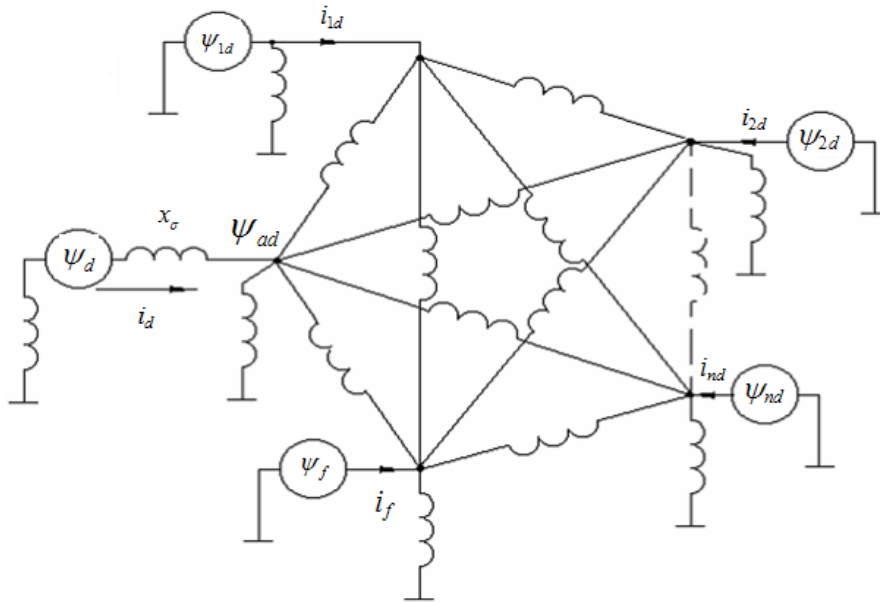


Рис.1.Схемы замещения синхронной машины в продольной оси, полученные на основе обращения матрицы \bar{X}_d^* с учётом выделения индуктивного сопротивления рассеяния статора x_σ .

Одной из важных задач, решаемых с помощью схем замещения является определение эквивалентных параметров и ЭДС синхронной машины. Эти объекты соответствуют упрощенной математической модели СМ за счет исключения из статорных уравнений членов, соответствующих трансформаторным ЭДС и ЭДС вращения. Статорные уравнения системы СМ при этом приобретают вид:

$$\begin{aligned} \Psi_q + r.I_d &= -U_d \\ \Psi_d - r.I_q &= U_q \end{aligned} \quad (3)$$

После введения таких упрощающих допущений уравнения (3) описывают составляющие изображающих векторов квазиустановившихся синусоидальных величин. На основании обычных схем замещения определяются эквивалентные ЭДС роторных контуров СМ в продольной (E_q'') и поперечной (E_d'') осях, которые носят название сверхпереходных.

Эквивалентные индуктивные сопротивления, за которым включены ЭДС E_q'' , E_d'' , называются сверхпереходными индуктивными сопротивлениями, соответственно, в продольной и поперечной осях. Однако для многоконтурных моделей СМ построение схем замещения, близких по структуре к классическим, оказывается трудноразрешимой задачей. К тому же не вполне наглядно и определение сверхпереходных индуктивных сопротивлений и ЭДС. Однако эти задачи могут быть решены на основе использования обращенных матриц \bar{X}_d , \bar{X}_q .

Преобразования рассматриваются только для продольной оси.

Выполнив обращение матрицы \bar{X}_d выделенной из (2), получим:

$$\bar{I}_d = (\bar{X}_d)^{-1} \times \bar{\Psi}_d \quad (4)$$

Обозначив $(\bar{X}_d)^{-1} = \bar{Y}_d$, перепишем (4) в виде:

$$\bar{I}_d = \bar{Y}_d \times \bar{\Psi}_d \quad (5)$$

По структуре матрицы \bar{Y}_d всегда может быть восстановлена схема соединений узлов, то есть построена схема замещения, что иллюстрируется рис.1. Следует указать, что член обратной матрицы y_{11} представляет собой величину, обратную сверхпереходному сопротивлению по продольной оси (поскольку равен сумме проводимостей ветвей, примыкающих к данному узлу). После введения в рассмотрение потокосцепления взаимоиндукции по формуле $\Psi_{ad} = \Psi_d - x_{\sigma} I_d$ может быть сформирована матрица \bar{X}_d^* , в которой член x_{11} заменен на x_{a1d} (вместо x_d). После обращения матрицы \bar{X}_d^* , полученная система уравнений для определения токов контуров

$$\bar{I}_d = \bar{Y}_d^* \times \bar{\Psi}_d$$

может быть представлена следующим образом ($s = n + 2, y_{11} = 1/x_{ad}''$):

$$\begin{aligned} I_d &= y_{11} \cdot \Psi_{ad} + y_{12} \cdot \Psi_{1d} + y_{13} \cdot \Psi_{2d} + \dots + y_{1s} \cdot \Psi_f \\ I_{ld} &= y_{21} \cdot \Psi_{ad} + y_{22} \cdot \Psi_{1d} + y_{23} \cdot \Psi_{2d} + \dots + y_{2s} \cdot \Psi_f \\ I_f &= y_{s1} \cdot \Psi_{ad} + y_{s2} \cdot \Psi_{ld} + y_{s3} \cdot \Psi_{2d} + \dots + y_{ss} \cdot \Psi_f \end{aligned} \quad (6)$$

$$I_d \cdot x_{ad}'' = \Psi_{ad} + y_{12} \cdot \Psi_{ld} \cdot x_{ad}'' + y_{13} \cdot \Psi_{2d} \cdot x_{ad}'' + \dots + y_{1s} \cdot \Psi_f \cdot x_{ad}'' \quad (7)$$

Заменив Ψ_{ad} на разность $\Psi_d - x_{\sigma} I_d$, и учитывая, что $x_d'' = x_{\sigma} + x_{ad}''$, перепишем (7) в следующем виде:

$$\Psi_d = x_d'' \cdot I_d - [x_{ad}'' (y_{12} \cdot \Psi_{ld} + y_{13} \cdot \Psi_{2d} + \dots + y_{1s} \cdot \Psi_f)] \quad (8)$$

Очевидно, что выражение в квадратных скобках представляет собой сверхпереходную ЭДС.

Разработанный подход позволяет построить наглядные схемы замещения для многоконтурных моделей синхронных машин, не отвечающих допущению о существовании единого магнитного потока взаимоиндукции.

В заключительной части главы выполнена разработка комплексной математической модели включающей синхронный генератор, повышающий трансформатор и линии электропередачи, связывающие генератор с двумя системами шин с неизменным напряжением. В основу положена дифференциальная форма записи первого закона Кирхгофа:

$$\sum_{j=1}^m p \cdot i_j = 0, \quad (9)$$

где: m - число элементов, присоединенных к узлу.

Подстановка правых частей дифференциальных уравнений в (9) позволяет получить расчетные выражения вида:

$$\mathbf{u}_d = \begin{vmatrix} F_1 & H_1 \\ F_2 & H_2 \\ F_1 & G_1 \\ F_2 & G_2 \end{vmatrix}, \quad \mathbf{u}_q = \begin{vmatrix} H_1 & G_1 \\ H_2 & G_2 \\ F_1 & G_1 \\ F_2 & G_2 \end{vmatrix}, \quad (10)$$

где выражения F, G, H зависят только от интегрируемых переменных.

Математическое моделирование крутильных колебаний валопровода турбоагрегата, выполнялось на основе записи уравнений движения сосредоточенных масс, соединенных упругими безынерционными связями. Взаимные колебания элементов валопровода описываются следующей системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} T_6 \cdot \frac{ds_6}{dt} &= -M_6 + C_{26} \cdot (\delta_2 - \delta_6) + H_{26} \cdot (s_2 - s_6), \\ T_2 \cdot \frac{ds_2}{dt} &= -M_2 + C_{12} \cdot (\delta_1 - \delta_2) + H_{12} \cdot (s_1 - s_2) - C_{26} \cdot (\delta_2 - \delta_6) - H_{26} \cdot (s_2 - s_6), \\ T_1 \cdot \frac{ds_1}{dt} &= M_1 + C_{21} \cdot (\delta_2 - \delta_1) + H_{21} \cdot (s_2 - s_1) - C_{12} \cdot (\delta_1 - \delta_2) - H_{12} \cdot (s_1 - s_2) - \kappa_{n1} \cdot s_1, \\ &\dots \\ T_n \cdot \frac{ds_n}{dt} &= M_n - C_{n-(n-1)} \cdot (\delta_n - \delta_{n-1}) - H_{n-(n-1)} \cdot (s_n - s_{n-1}) - \kappa_{ni} \cdot s_n, \\ \frac{d\delta_i}{dt} &= \omega_c \cdot s_i. \end{aligned} \quad (11)$$

$i=6, 2, \dots, n$,

где δ_i – угол закручивания соответствующей массы, рад;

s_i – скольжение i -го элемента валопровода относительно синхронной оси;

ω_c – синхронная частота вращения, рад/с;

M_i – вращающий или тормозящий момент, приложенный к соответствующей массе, о.е.;

T_j – механическая инерционная постоянная i -го элемента валопровода, с ;

$C_{(i+1)-i}$ – жесткость участка валопровода, о.е./рад.;

$H_{(i+1)-i}$ – коэффициент демпфирования крутильных колебаний, обусловленный внутренним трением в материале, о.е.;

κ_{ni} – коэффициент демпфирования, обусловленный отклонением частоты вращения лопаткой i ступени турбины относительно парового объема, о.е.

Третья глава диссертации посвящена вопросам моделирования переходных процессов валопровода турбоагрегата. Валопровод мощного турбоагрегата содержит большое число элементов и имеет длину, достигающую 60-80 м. Такая конструкция имеет значительное число собственных частот крутильных колебаний, некоторые из которых лежат в диапазоне 3-50 Гц. Большую опасность представляют собой режимы, обусловленные воздействием значительных по величине знакопеременных моментов, возникающих при коротких замыканиях, и имеющих составляющие с частотой

тами 50 и 100 Гц. Нормативные документы требуют обеспечения прочности валопровода при внезапном коротком замыкании на выводах генератора из режима номинальной нагрузки при напряжении на зажимах статора, равном $1,05U_{ном}$. В диссертации уделено большое внимание анализу условий возникновения скручивающих моментов еще большей амплитуды с частотой 50 Гц при отключениях коротких замыканий и/или коммутациях в сети.

Необходимо отметить, что весьма велика вероятность возникновения опасных резонансных явлений под влиянием воздействий небольшой амплитуды, с частотой, совпадающей с одной из собственных частот валопровода. Источники таких неблагоприятных воздействий в энергосистеме весьма разнообразны, и их характеристики рассмотрены в диссертации.

Оснащение турбоагрегата современными системами автоматического регулирования или взаимодействие турбоагрегата с системами регулирования других силовых электромеханических и особенно электронных устройств может также представлять значительную опасность для валопровода. В то же время устройства, основанные на применении силовой электроники способны выявлять и подавлять субсинхронные колебания.

Особое место среди указанных систем автоматического регулирования занимает система регулирования возбуждения генератора, поскольку возбудитель турбоагрегата расположен на одном валу с генератором и представляет собой мощную электрическую машину, работающую в нестационарном режиме. Электромагнитный момент возбудителя, зависящий от управляющих воздействий АРВ, реализуемых с помощью управляемого тиристорного преобразователя, приложен к валопроводу. В ряде работ, выполненных отечественными и зарубежными исследователями, указывается на возможность взаимодействия электромагнитных моментов генератора и возбудителя, а также усиления крутильных колебаний вала на низкой собственной частоте за счет действий системы возбуждения. Следует указать, что наибольшее количество поломок валов приходится именно на участок между генератором и возбудителем, о чем свидетельствуют данные аварийной статистики.

В главе выполнен анализ основных факторов, влияющих на демпфирование возмущенного движения валопровода. Основными из них являются демпфирование, обусловленное отклонением скорости лопаточного аппарата относительно парового объема и затухание колебаний из-за рассеяния энергии в конструктивных элементах роторов турбины.

Демпфирование, обусловленное отклонением скорости лопаточного аппарата относительно парового объема. Природа этого явления связана с так называемым саморегулированием турбины, – при увеличении частоты вращения сверх синхронной вращающий момент первичного двигателя уменьшается, при снижении частоты – увеличивается. Обусловленные этим явлением демпферные свойства хорошо проявляются на сравнительно низких частотах колебаний, совпадающих с частотой электромеханических колебаний ротора генератора относительно приемной системы (1

– 2 Гц). На этих частотах величина коэффициента, определяющего показатель демпфирования, может достигать величины $\kappa_n = 1 \dots 1,5$ о.е. Очевидно, что при более высоких частотах колебаний и, главное, сложных формах этих колебаний, которые нужно спроектировать на движение лопаточного аппарата (главным образом роторов частей низкого давления) показатель демпфирования будет заметно ниже. Осторожная оценка позволяет ориентироваться на показатель демпфирования порядка $\kappa_n = 0,35 \dots 0,5$ о.е. Этот вид демпфирования будет ниже для краткости называться «паровым».

Демпфирование, обусловленное механическими факторами. Демпфирование, обусловленное внутренним трением в материале валопровода является очень низким, и используемый большинством авторов показатель $H = 0,005$ о.е. является правильным. Однако роторы валопровода представляют собой весьма сложную конструкцию. Основным источником потерь энергии при возбуждении крутильных колебаний вала является трение в местах крепления лопаток к дискам и верхних частей лопаток (роторов низкого давления) относительно проволочных бандажей. Экспертные оценки и осциллограммы колебательных процессов валопровода показывают, что показатель демпфирования, обусловленный потерями на трение в элементах конструкции роторов турбины, может находиться на уровне $H = 0,1 \dots 0,2$. Этот вид демпфирования будет называться механическим или «конструкционным».

Хотя работающий в электрической системе синхронный генератор представляет собой существенно нелинейный объект, собственно крутильные колебания являются практически линейными. Поэтому линеаризованная математическая модель системы обеспечивает достаточную точность, чтобы идентифицировать и анализировать параметры колебаний и разрабатывать соответствующие контрмеры. Результаты линеаризации обычно проверяются компьютерным моделированием на нелинейной модели. Большую эффективность обеспечивает комбинированное применение частотных и корневых методов.

В табл.1, приведены характеристические числа, иллюстрирующие собственные демпферные свойства валопроводов нескольких турбоагрегатов, то есть рассчитанные без учета электромагнитных моментов генератора и возбудителя. В соответствии с рекомендациями принималось, что демпфирование, определяемое отклонением скорости лопаточного аппарата турбины относительно парового объема, пренебрежимо мало, а коэффициенты демпфирования, обусловленные внутренним трением в материале, одинаковы и равны $H = 0,005$.

Таблица 1.

Характеристические числа, иллюстрирующие собственные демпферные свойства турбоагрегатов различных типов

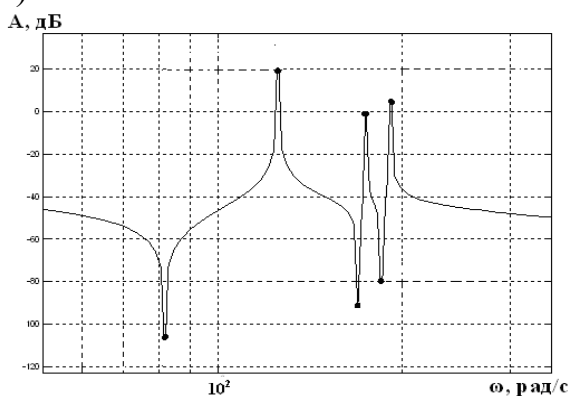
ТВВ-200 Г1		ТВВ-500 Г2		ВВС-720 Г3		ТВВ-1000 Г4	
Вещ. Часть	Мним. Часть	Вещ. Часть.	Мним. Часть	Вещ. Часть	Мним. Часть	Вещ. Часть	Мним. Часть
-0,02	407,27i	-0,024	299,86i	-0,037	553,66i	-0,021	237,19i
-0,006	191,16i	-0,053	227,79i	-0,043	426,64i	-0,002	180,31i
-0,017	174,21i	-0,007	200,57i	-0,009	315,79i	-0,002	141,61i
-0,002	125,12i	-0,004	163,88i	-0,005	217,24i	-0,002	110,5i
		-0,001	94,546i	-0,001	109,05i	-0,0006	75,581i

Приведенные в табл.1. собственные значения дополнительно иллюстрируются частотными характеристиками валопровода агрегата с генератором ТВВ-200 (рис.2). Из этих данных следует, что валопровод весьма чувствителен к возмущениям на низшей (Г1) или второй (Г2) собственной частоте. Как следует из приведенных ниже результатов, именно на этой частоте могут проявиться неблагоприятные демпферные свойства, определяемые работой системы возбуждения генератора.

На рис.2 приведены результаты, характеризующие валопровод турбоагрегата ТВВ-200: а) особые точки частотной характеристики и б) расположение нулей и полюсов передаточной функции на плоскости корней.

Ниже приведены результаты иллюстрирующие влияние на показатели устойчивости изменения коэффициента демпфирования α , обусловленного отклонением частоты вращения лопаток турбины относительно парового объема.

а)



б)

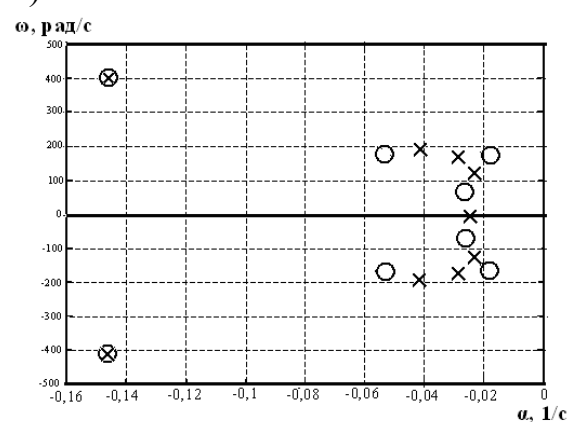


Рис.2. Иллюстрация демпфирующих свойств валопровода ТВВ-200 при коэффициенте “парового” демпфирования $\kappa_n = 0,05$.

а) Участок частотной характеристики и особые точки,

б) Расположение нулей и полюсов передаточной функции.

Анализ влияния указанных факторов на показатели демпфирования дает основание заключить, что затухание маловозмущенных колебаний существенно улучшается. Наиболее информативным оказываются графики, иллюстрирующие изменение вещественных частей корней характеристического уравнения в функции κ_n для валопровода турбоагрегата ТВВ-200 и турбоагрегата ТВВ-500. Изменение показателей демпфирования различных частот иллюстрируется рис. 3,а,б. При изменении коэффициента κ_n от 0.0 до 1 демпфирование различных составляющих колебаний происходит по-разному. Наименьшим показателем демпфирования отличается частота 174.2 рад/с (2), демпфирование на частоте 125.12 рад/с (1) оказывается также весьма низким, а наибольшими показателями демпфирования обладают частоты 407 рад/с (4) и 191 рад/с (3).

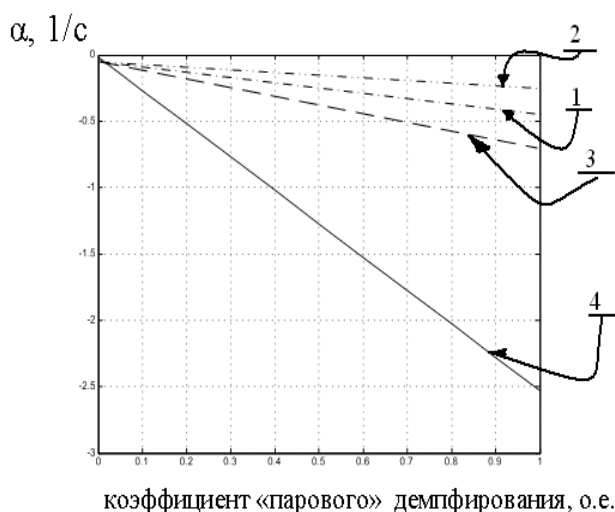


Рис.3,а. Зависимость вещественных частей корней системы на частотах ω , равных 125 (1), 174 (2), 191 (3) и 407 (4), рад/с в функции κ_n для валопровода ТВВ-200.

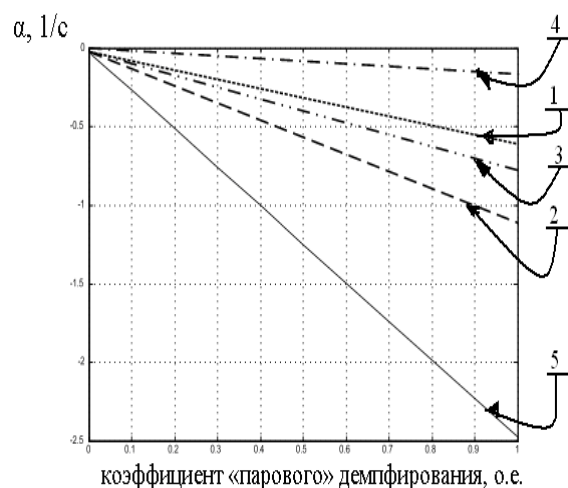
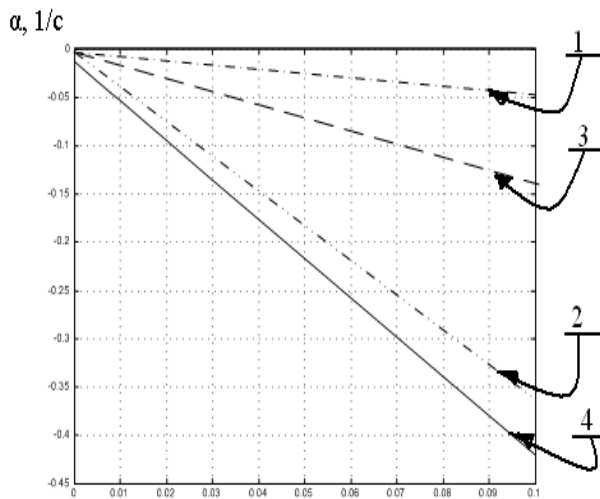


Рис.3,б. Зависимость вещественных частей корней системы на частотах ω , равных 227/9 (4), 94.5 (1), 200.5 (3), 163 (2), и 299 (5), рад/с в функции κ_n для валопровода ТВВ-500.

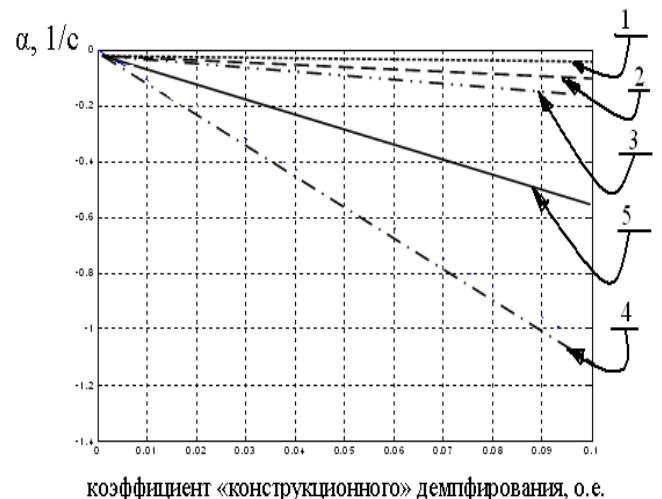
Воздействие «конструкционного» демпфирования на показатели устойчивости на частотах крутильных колебаний также иллюстрируется расчетами характеристических корней.

Весьма информативными являются графики, показывающие изменение вещественных частей корней характеристического уравнения в функции H для валопровода турбоагрегата ТВВ-200. При изменении коэффициента H от 0.0 до 0.1 показатели демпфирования на различных частотах изменяются по-разному (рис. 4): наибольшие показатели у частот 407 рад/с(4) и 174 рад/с (2), а наименьшие показатели у частот 125 рад/с (1) и 191 рад/с(3).



коэффициент «конструкционного» демпфирования, о.е.

Рис. 4,а. Зависимость вещественных частей корней системы на частотах ω , равных 125 (1), 174 (2), 191 (3) и 407 (4), рад/св функции коэффициента H для валопровода ТВВ-200.



коэффициент «конструкционного» демпфирования, о.е.

Рис. 4,б. Зависимость вещественных частей корней системы на частотах ω , равных 94.5 (1), 163 (2), 200.5 (3) 227.9 (4) и 299 (5), рад/с в функции коэффициента H для валопровода ТВВ-500.

Технология использования собственных значений и собственных векторов позволяет получить обширные представления об уровне демпфирования колебаний в рассматриваемой сложной системе. В то время как набор собственных значений определяет уровень устойчивости и скорость затухания возмущений, соответствующие собственные векторы определяют форму протекания переходных процессов.

В диссертации рассматриваются формы крутильных колебаний валопроводов турбоагрегатов ТВВ-200, ТВВ-500 и ТВВ-1000.

Турбоагрегат с генератором ТВВ-200

Агрегат состоит из 5 сосредоточенных масс (роторов): возбудителя, генератора и 3-х цилиндров турбины. Тормозящий момент возбудителя при выполнении данных расчетов принят равным нулю.

Расчет форм колебаний, как указывалось, выполняется для свободно движущейся механической системы при отсутствии демпфирования. Показанная графически форма колебаний, является собственным вектором, характеризующим угловые перемещения элементов ротора. Нулевая форма принята равной 1. Формы крутильных колебаний валопровода пронумерованы последовательно согласно возрастанию частоты и числу изменений фазы. Таким образом, форма 1 имеет самую низкую частоту и только одно изменение фазы. Вообще, форма с номером n имеет n -ую частоту и n изменений фазы на 180 градусов.

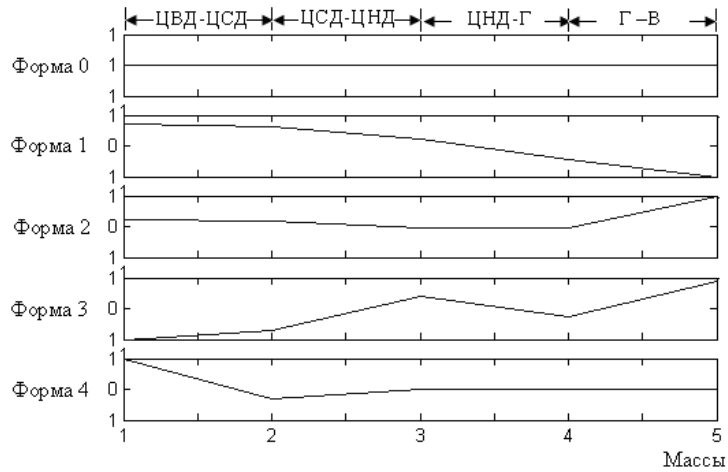


Рис.5.Формы крутильных колебаний турбогенератора ТВВ-200.

Знание форм колебаний помогает проанализировать физику протекания переходных процессов валопровода, вызванных воздействием аварийных электромагнитных моментов.

Анализ результатов расчета собственных векторов (форм колебаний) дает представления о характере развития колебательных процессов и потенциально опасных участках валопровода. Так, для турбоагрегата с генератором ТВВ–200 наиболее опасным является участок вала между генератором и возбудителем (рис.5), - на нем колебания с частотой 191,16 рад/с имеют наибольшую амплитуду. Неблагоприятным фактором служит совпадение фаз и большие амплитуды колебаний второй и третьей форм колебаний (174,21 и 125,12 рад/с). Наиболее подробно с помощью анализатора спектра проанализирован валопровод турбоагрегата с генератором ТВВ–200. Частотные характеристики (Рис.6), иллюстрируют особенности крутильных колебаний между элементами валопровода.

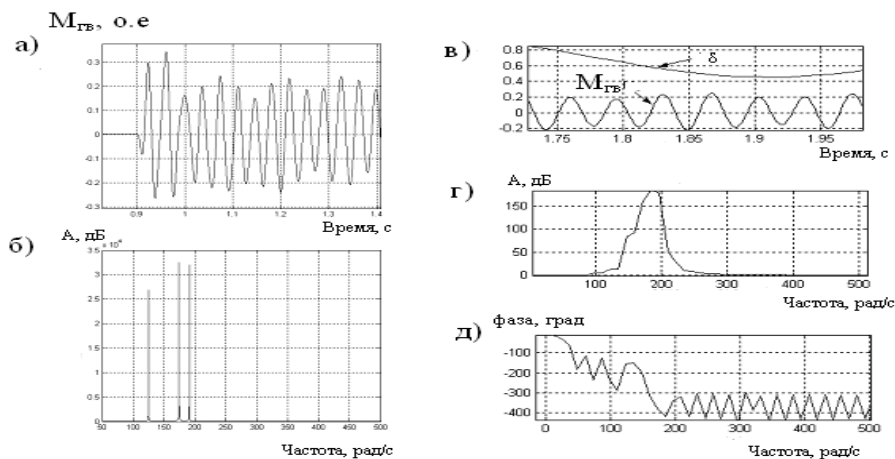


Рис.6. Характеристики скручивающих моментов между генератором и возбудителем ($M_{ТВ}$): изменение момента во времени (а) и его амплитудная частотная характеристика (б); сигналы (в), поступающие в анализатор спектра, и результаты работы анализатора – амплитудный (г) и фазовый (д) спектры колебаний момента $M_{ТВ}$.

Четвертая глава диссертации посвящена обзору развития и вопросам математического моделирования систем автоматического регулирования возбуждения генераторов.

Длительное время развивалась конкуренция между независимыми тиристорными системами возбуждения и диодными бесщеточными системами (ДБСВ). Сильной стороной последних является отсутствие контактно-щеточного аппарата, слабой – пониженное быстродействие.

В главе выполнена разработка подробных моделей возбудительных систем на основе уравнений переходных процессов синхронной машины (статорные уравнения записаны в алгебраической форме, а переходные процессы роторных контуров описываются дифференциальными уравнениями). Управляемый и неуправляемый мостовые преобразователи описываются внешними характеристиками. Подробное математическое моделирование независимой тиристорной и диодной бесщеточной систем возбуждения позволяет правильно воспроизводить изменения приложенного к валу электромагнитного момента возбудителя, что уточняет общую модель турбоагрегата. В предыдущей главе показано, что учет совместного изменения электромагнитных моментов основного генератора и возбудителя является важным фактором, определяющим общие демпферные свойства турбоагрегата.

В главе рассмотрено влияние системы возбуждения на демпферные свойства турбоагрегата при использовании различных методов улучшения демпферных свойств регулируемой системы. Такая постановка задачи вызвана тем обстоятельством, что применение достаточно больших коэффициентов усиления по каналам стабилизации АРВ-СД приводит к появлению слабодемпфированных составляющих колебаний на низшей частоте крутильных колебаний валопровода.

Для противодействия этому выполнено исследование эффективности использования дополнительных сигналов регулирования для подавления крутильных колебаний. В качестве одного из таких мероприятий в диссертации рассматривалась возможность введения дополнительного сигнала регулирования возбуждения по взаимному скольжению между элементами валопровода.

Так, использование сигнала взаимного скольжения между возбудителем и третьим цилиндром паровой турбины (табл. 2) позволяет существенно улучшить показатели демпфирования на частотах крутильных колебаний и одновременно использовать достаточно большие коэффициенты регулирования по производной частоты напряжения. Использование указанного дополнительного сигнала обеспечивает весьма высокие показатели демпфирования электромеханических колебаний ротора, достигаемые за счет настройки каналов стабилизации АРВ-СД.

Таблица 2.

Влияние на показатели устойчивости дополнительного канала регулирования по взаимному скольжению между элементами валопровода и его производной.

а) $x_{л} = 0,025$ о.е.		б) $x_{л} = 0,5$ о.е.	
Вещ. Часть	Мним. Часть	Вещ. Часть	Мним. Часть
-0,032702	407,27i	-0,032793	407,27i
-6,9356	314,14i	-11,793	314,15i
-0,47066	191,48i	-0,44898	191,41i
-1,329	175,15i	-1,3279	175,13i
-0,088346	126,46i	-0,177	125,87i
-95,316		-95,176	
-27,016	25,668i	-24,545	29,224i
-46,108		-49,467	
-39,208		-38,93	
-1,0838	17,708i	-25,381	
-25,602		-20	
-20		-2,0858	10,67i
-3,8721		-3,8577	
-2,3874		-1,2404	1,844i
-0,26751		-0,33204	
-0,7462		-1	
-1			

В заключительной части главы рассмотрено применение технологии LQG-регулирования для повышения демпферных свойств агрегата. LQG (от английского Linear Quadratic Gaussian – Линейно-квадратичное Гауссово) управление – современная методика разработки оптимальных динамических регуляторов, основанная на построении линейного оптимального управления по квадратичному критерию качества с учетом гауссовых управляющих и возмущающих воздействий. Метод позволяет улучшить эффективность регулирования и оптимизировать величину сигнала управления, что иллюстрируется данными табл. 3.

Таблица 3.

Эффективность применения LQG-регулятора

а) $x_{л} = 0,025$ о.е.б) $x_{л} = 0,5$ о.е.

Вещ. Часть	Мним. Часть
-0,03296	407,27i
-0,032956	407,27i
-6,7606	314,15i
-6,8331	314,22i
-5,2218	188,76i
-2,7016	188,49i
-8,2879	179,08i
-9,1718	173,78i
-7,236	124,24i
-6,2503	122,12i
-4,4009	12,525i
-4,3993	12,375i

Вещ. Часть	Мним. Часть
-0,032957	407,27i
-0,03296	407,27i
-11,658	314,15i
-11,713	314,20i
-5,2113	188,63i
-2,6257	188,39i
-8,4499	179,26i
-9,4421	173,61i
-6,908	123,73i
-5,9272	121,67i
-3,9106	7,3784i
-3,9337	7,2878i

Пятая глава диссертации посвящена описанию методики учета насыщения сердечников неявнополусных синхронных машин и оценке влияния насыщения на параметры установившихся режимов работы и протекание переходных процессов при коротких замыканиях.

Определение магнитных сопротивлений статора в продольной оси производится по характеристике намагничивания «сердечник статора – зубцы – воздушный зазор» по величине продольной составляющей потока воздушного зазора (в о. е. – потокосцепления Ψ_{ad}). Ток возбуждения находится с учетом потока рассеяния обмотки возбуждения, который в турбогенераторах обычно велик. После определения потокосцепления Ψ_{ad} и соответствующего ему тока возбуждения находится величина, пропорциональная полному потоку ротора. Характеристику намагничивания удобно перестроить таким образом, чтобы можно было пользоваться непосредственно величиной потокосцепления контура возбуждения, выраженной в относительных единицах.

Рис.7, иллюстрирует методику учета насыщения турбогенераторов. По характеристике намагничивания по продольной оси определяется насыщенное значение магнитного сопротивления взаимоиндукции. Далее определяются н.с. возбуждения с учетом продольной реакции якоря, потокосцепление рассеяния контура возбуждения, потокосцепление контура возбуждения, потокосцепление контура возбуждения и н.с. возбуждения:

$$\begin{aligned} R_{adH} &= \frac{AC}{AB} \cdot R_{\delta i}, \\ F_2 &= F_1 + F_{ad}, \\ \phi_{\sigma f} &= F_2 \cdot \lambda_{\sigma f}, \\ \Phi_f &= \Phi_{ad} + \Phi_{\sigma f}, \\ F_f &= F_2 + F_m. \end{aligned}$$

Магнитные сопротивления в поперечной оси находят с помощью соответствующей характеристики намагничивания (кривая 2). Рабочей точкой, определяемой величиной продольного магнитного потока, является точка D. Магнитные сопротивления схемы замещения по поперечной оси вычисляют на основе отношения:

$$R_{aqH} = \frac{2F_{aq} R_{\delta q}}{\Delta\phi_{aq1} + \Delta\phi_{aq2}}.$$

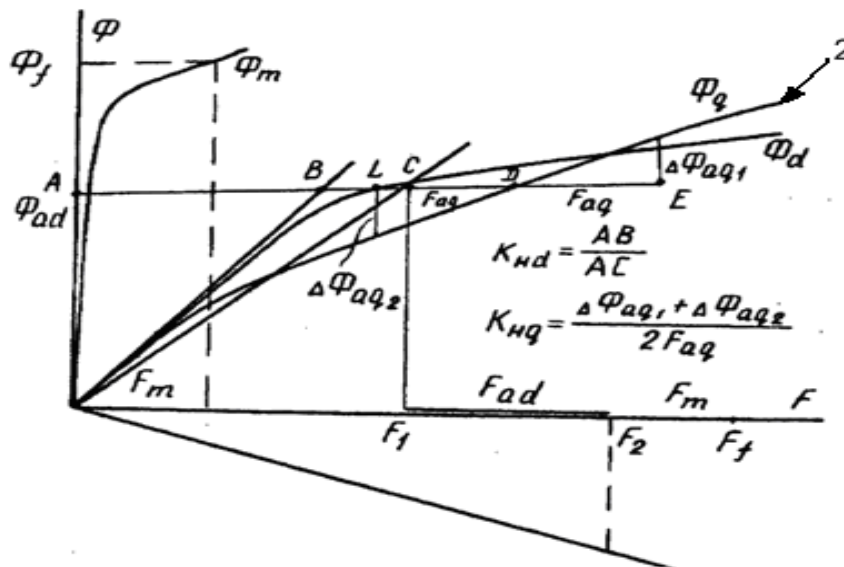


Рис.7. Определение коэффициентов насыщения для индуктивных сопротивлений в продольной и поперечной оси турбогенератора

Учет насыщения на путях потоков рассеяния контуров. Для правильного определения токов и характера движения ротора при расчетах переходных процессов необходимо кроме насыщения сердечников основным магнитным потоком учитывать насыщение на путях потоков рассеяния контуров статора и ротора. Точное определение указанных зависимостей – достаточно сложная задача, поскольку индуктивные сопротивления определяются результирующим магнитным полем, обусловленным токами во всех контурах машины. Потоки рассеяния частично замыкаются по тем же элементам магнитной цепи, по которым проходит основной магнитный поток, и уровень насыщения на путях потоков рассеяния зависит от величины основного магнитного потока. В тоже время при процессах типа внезапного короткого замыкания наибольшее влияние оказывает насыщение на путях рассеяния статора. В работе обосновано допущение о возможности построения аппроксимирующего выражения для индуктивного сопротивления рассеяния контура, зависящего только от тока данного контура. Влияние насыщения на индуктивное сопротивление рассеяния статора от тока рекомендовано использовать в виде, полученном на основе обработки расчетов магнитного поля получено аппроксимирующее выражение вида:

$$X_{\sigma H} = X_{\sigma} [(1 - K_n) + K_n (b_n^* + b_z^* \cdot e^{-\alpha I^2})],$$

где I – полный ток статора (амплитудное значение); b_n^* – относительная ширина паза; b_z^* – относительная ширина зубца; K_n – коэффициент, учитывающий долю пазового рассеяния в общей величине рассеяния статора. Для крупных машин $K_n = 0,6 - 0,8$, $\alpha = 0,05 - 0,06$.

Таблица 4.

Результаты расчета установившихся режимов турбогенераторов

x_d	x_q	δ_r	I_f / I_{f0}	E'_q	x_σ	x'_d
ТВВ-200-2						
1,869	1,869	38,3	2,5	1,043	0,194	0,273
ТВВ-200-2 с учётом насыщения						
1,61	1,34	34,37	2,67	1,075	0,183	0,27
ТВВ-500-2						
2,56	2,56	42,7	3,2	1,079	0,222	0,365
ТВВ-500-2 с учётом насыщения						
2,17	1,7	37,8	3,42	1,117	0,215	0,345

В табл.4 приведены результаты расчетов установившихся режимов турбогенераторов ТВВ–200 и ТВВ–500. Следует отметить понижение величины индуктивных сопротивлений в продольной (на 12–18%) и поперечной (на 25–30%) осях, уменьшение угла (в среднем 12%) и увеличение тока возбуждения на 7–8%.

Отмеченные изменения индуктивных сопротивлений, тока возбуждения и внутреннего угла, а также зависимость параметров от режима работы машины оказывают влияние на характеристики мощности, показатели устойчивости и протекание переходных процессов при возмущениях.

На основе разработанной методики выполнено исследование влияния насыщения сердечников мощных турбогенераторов на скручивающие моменты при коротких замыканиях. Расчеты проведены для значений коэффициентов демпфирования $H=0,005$, $k_n=0,005$, режимов холостого хода и номинальной нагрузки ($P = 0,85 \text{ о.е.}$, $Q = 0,526 \text{ о.е.}$) при $t_{к.з.}=0,12 \text{ с}$, $x_{л.} = 0,025 \text{ о.е.}$, $r_{л.}=0,05 x_{л.}$.

Таблица 5.

Скручивающие моменты при коротких замыканиях на зажимах генератора из режима номинальной нагрузки

Вид к.з.	$M_e \text{ max}$	$M_{гв} \text{ max}$	$M_{1г} \text{ max}$	$M_{21} \text{ max}$	$M_{32} \text{ max}$	$M_{43} \text{ max}$
ТВВ-200-2						
3 фазн	4,8397	0,4467	2,3071	1,4878	0,5706	-
%н.с.3ф	96,05	95,87	96,28	97,65	98,53	
2 фазн	7,1492	0,25	1,9068	1,1101	0,4879	-
%н.с.2ф	94,86	90,35	92,14	94,40	96,95	
ТВВ-200-2 с учётом насыщения						
3 фазн	5,0387	0,4659	2,396	1,5236	0,5791	-
2 фазн	7,5364	0,2767	2,0693	1,1759	0,5032	
ТВВ-500-2						
3 фазн	4,2153	0,2782	2,0023	1,4129	1,2298	0,5465
%н.с.3ф	96,77	93,29	96,12	96,26	97,61	98,30
2 фазн	6,4866	0,1976	1,7805	1,2299	0,9355	0,4541
%н.с.2ф	95,11	84,55	91,80	92,25	94,60	96,30
ТВВ-500-2 с учётом насыщения						
3 фазн	4,3556	0,2982	2,083	1,4677	1,2599	0,5559
2 фазн	6,8198	0,2337	1,9394	1,3332	0,9889	0,4715

Из табл.5 видно, что влияния насыщения при коротких замыканиях на зажимах генератора из режима номинальной нагрузки приводит к увеличению расчетных значений скручивающих моментов на 5% при трехфазном к.з. и до 15 % при двухфазном к.з. по сравнению с расчетом без учета насыщения, результаты для генераторов других типов и других расчетных условий подробно представлены в пятой главе диссертации.

Шестая глава посвящена выявлению наиболее опасных сочетаний ударных воздействий на валопровод, вызванных переходными процессами и коммутациями в примыкающей к генератору электрической сети.

Возмущения, приложенные к валопроводу турбогенератора в виде скачкообразного изменения среднего значения электромагнитного момента и наложенного на это изменение знакопеременного момента, распространяются по валу в виде колебательных изменений скручивающих моментов в сечениях между массивными элементами. Основной целью выполненных в последующих разделах работы расчетов было установить, насколько достигаемые значения скручивающих моментов превосходят так называемые расчетно-нормативные.

В качестве расчетно-нормативных значений скручивающих моментов для участков валопровода используются величины, полученные при трехфазном или двухфазном коротком замыкании из режима номинальной нагрузки на зажимах генератора. В табл.6. приведены их максимальные значения при расчёте до 0.12 с.

Таблица 6.

Расчетно-нормативные значения скручивающих моментов (короткое замыкание на зажимах генератора в режиме номинальной нагрузки $P = 0,850.e., U_{Г} = 1,050.e.$).

Вид к.з.	Me max	Mгв max	M1г max	M21 max	M32 max	M43 max
ТВВ-200-2						
3 фазн	5,2416	0,4885	2,4254	1,5603	0,5889	-
2 фазн	7,8252	0,2658	1,9821	1,1339	0,4935	-
% к 2ф	66,98	183,78	122,36	137,60	119,33	
ТВВ-500-2						
3 фазн	4,5881	0,2805	2,1103	1,5096	1,2171	0,5421
2 фазн	7,430	0,2143	1,9244	1,3551	0,9637	0,4676
% к 2ф	61,75	130,89	109,66	111,40	126,29	115,93

Необходимо отметить, что в соответствии с принятой методикой в качестве расчетного режима принимается режим номинальной нагрузки при повышенном до $U_{Г} = 1,050.e.$ напряжении. Следует также указать, что расчеты выполняются при использовании каталожных значений параметров, то есть при использовании так называемых «насыщенных» значений

сверхпереходных сопротивлений. В частности, приведенные в таблице величины рассчитаны при взятых из каталогов величинах сверхпереходных сопротивлений генераторов ($x_d'' = 0,2$ о.е. для ТВВ-200 и $x_d'' = 0,242$ о.е. для ТВВ-500). Все последующие результаты получены при использовании «ненасыщенных» значений параметров и учете насыщения сердечников по методике, приведенной в главе 3.

Скручивающие моменты валопровода мощного турбоагрегата при отключении неудаленных коротких замыканий

Рассматривались короткие замыкания различной длительности в начале линии электропередачи. Индуктивное сопротивление линии изменялось в пределах от $x_L = 0,025$ о.е. до $0,3$ о.е.. Активное сопротивление линии варьировалось в пределах от $0,05x_L$ до $2x_L$.

При отключении трёхфазных замыканий, длительность которых превышает нормативную, что может быть вызвано отказом основного выключателя и действием УРОВ, возможно появление электромагнитных моментов, приближающихся к соответствующим величинам при коротких замыканиях на зажимах генератора или даже превосходящих их.

В табл.7, приведены величины электромагнитных моментов и соответствующих скручивающих моментов в функции длительности короткого замыкания при относительно жесткой связи генератора с приемной энергосистемой.

Таблица 7.

Электромагнитный и скручивающие моменты в функции угла отключения к.з. при $x_L=0,025$ о.е. и $r_L = 0,05 x_L$ ($M_{\text{emax } 1}$ – максимальное значение электромагнитного момента во время к.з., $M_{\text{emax } 2}$ – в момент отключения к.з.)

Δt к.з.,с	M_e max1	M_e max 2	$\delta_{\text{откл}}$	$M_{\text{ГВ}}$ max	$M_{1Г}$ max	M_{21} max	M_{32} max	M_{43} max
0,19	3,240	3,00	1,364	0,133	3,429	2,805	1,561	0,610
0,20	3,240	3,044	1,44	0,185	3,264	2,71	1,412	0,616
0,21	3,240	3,123	1,528	0,246	3,621	2,71	2,04	0,785
0,218	3,240	3,12	1,57	0,162	3,696	2,847	2,128	0,792
0,22	3,240	3,1	1,616	0,10	3,656	3,098	2,067	0,762
0,23	3,240	3,10	1,714	0,247	3,741	3,824	1,763	0,664
0,24	3,240	2,99	1,84	0,237	4,15	3,859	1,98	0,765
0,25	3,240	2,91	1,94	0,12	4,01	3,336	2,069	0,775
0,26	3,240	2,7	2,04	0,249	3,527	2,93	1,659	0,629
0,265	3,240	2,66	2,064	0,265	3,248	2,803	1,509	0,611

Данные табл.7, показывают, что на возникновение опасных скручивающих моментов существенное влияние оказывает возбуждение колебаний последовательными возмущениями, причем важным фактором оказывается фаза приложения второго возмущения. Достижимые значения скручивающих моментов в отдельных сечениях валопровода могут в $1,5 - 1,97$

раза превосходить нормативные, причем достигаются они отнюдь не при максимальных величинах возмущающих электромагнитных моментов.

В табл.8, приведены величины электромагнитных и скручивающих моментов, воздействующих на турбоагрегат при увеличении внешнего индуктивного сопротивления. Они показывают, что и при значительном увеличении сопротивления связи с приемной системой появление опасных величин моментов является весьма вероятным.

Таблица 8

Электромагнитный и скручивающие моменты при затянувшемся к.з. в функции индуктивного сопротивления линии при постоянном угле отключения ($r_{л} = 0,05 * x_{л}$, $\delta_{откл} = 1,57$ рад.)

$X_{л}$	Δt к.з.,с	M_e max 1	M_e max 2	$\delta_{откл}$	$M_{гв}$ max	$M_{1г}$ max	M_{21} max	M_{32} max	M_{43} max
0,025	0,218	3,240	3,12	1,57	0,162	3,696	2,847	2,128	0,792
0,05	0,215	3,240	2,92	1,57	0,204	3,49	2,547	2,038	0,777
0,1	0,212	3,240	2,564	1,57	0,212	3,082	2,227	1,821	0,721
0,2	0,197	3,240	2,092	1,57	0,098	2,375	1,927	1,163	0,526

В процессе выполнения расчетов было установлено, что на величину электромагнитного момента в момент отключения короткого замыкания существенное влияние оказывает величина активного сопротивления внешней сети, определяющая скорость затухания апериодической слагающей тока линии. В табл. 9 приведены результаты расчета электромагнитных и скручивающих моментов при коротком замыкании в начале линии электропередачи ($x_{л} = 0,025$ о.е.) при изменении активного сопротивления линии.

Таблица 9.

Электромагнитный и скручивающие моменты при затянувшемся к.з. в функции активного сопротивления линии при постоянном угле отключения ($r_{л} = 0.05x_{л}$, $x_{л} = 0,025$ о.е., $\delta_{откл} = 1.84$ рад.)

$r_{л} / X_{л}$	Δt к.з.,с	M_e max 1	M_e max 2	$\delta_{откл}$	$M_{гв}$ max	$M_{1г}$ max	M_{21} max	M_{32} max	M_{43} max
0,0005	0,241	3,240	4,72	1,84	0,279	4,179	3,567	1,93	0,76
0,005	0,243	3,240	4,1	1,84	0,242	4,038	3,579	1,96	0,765
0,01	0,243	3,240	3,647	1,84	0,215	4,075	3,607	1,99	0,773
0,02	0,244	3,240	3,174	1,84	0,192	4,139	3,657	2,032	0,785
0,05	0,24	3,240	2,99	1,84	0,237	4,15	3,859	1,98	0,765
0,1	0,278	3,240	3,06	1,84	0,205	4,215	3,75	2,069	0,796
0,2	0,279	3,240	3,312	1,84	0,227	4,266	3,826	2,082	0,802
0,3	0,275	3,240	3,628	1,84	0,251	4,33	3,915	2,105	0,811
0,4	0,273	3,240	3,923	1,84	0,275	4,4	4,01	2,135	0,823
0,5	0,244	3,240	4,2	1,84	0,398	4,468	4,108	2,168	0,835
1,0	0,242	3,240	5,093	1,84	0,37	4,736	4,47	2,3	0,88
2,0	0,244	3,240	5,546	1,84	0,355	5,156	4,673	2,553	0,955

Из результатов табл. 9 следует, что с увеличением активного сопротивления линии электропередачи величина электромагнитного момента в момент отключения к.з. снижается, затем, начиная с величин отношения $r_{л}/x_{л} \geq 0,2$, возрастает, причем при достаточно больших активных сопротивлениях величины скручивающих моментов существенно превышают расчетно-нормативные.

В табл. 10 приведены результаты расчетов электромагнитных и скручивающих моментов при увеличенных индуктивных сопротивлениях связи генератора с эквивалентной приемной системой $x_{л} = 0,1$ о.е. Эти результаты показывают, что даже при весьма значительном внешнем индуктивном сопротивлении отключение короткого замыкания при большой величине угла представляет серьезную опасность для валопровода.

Таблица 10.

Электромагнитный и скручивающие моменты при затянувшемся к.з. в функции активного сопротивления линии при постоянном угле отключения ($r_{л} = (0,005-2,0)x_{л}$, $x_{л} = 0,1$ о.е., $\delta_{откл} = 1,57$ рад.)

Rл / Xл	Δt к.з.,с	Me max 1	Me max 2	$\delta_{откл}$	Mгв max	M1г max	M21 max	M32 max	M43 max
0,005	0,207	3,240	3,60	1,57	0,212	3,032	2,175	1,733	0,682
0,05	0,207	3,240	2,593	1,57	0,224	2,976	2,244	1,673	0,682
0,1	0,207	3,240	2,646	1,57	0,228	2,993	2,278	1,665	0,682
0,2	0,21	3,240	2,767	1,57	0,238	3,153	2,315	1,825	0,729
0,5	0,21	3,240	3,339	1,57	0,288	3,316	2,523	1,888	0,756
1,0	0,212	3,240	3,627	1,57	0,293	3,624	2,715	2,102	0,812
2,0	0,22	3,240	3,323	1,57	0,141	3,78	3,258	2,017	0,74

Таблица 11.

Электромагнитный и скручивающие моменты при затянувшемся к.з. в функции активного сопротивления линии при постоянном угле отключения ($r_{л} = (0,005-1,5)x_{л}$, $x_{л} = 0,3$ о.е., $\delta_{откл} = 1,57$ рад.)

Rл / Xл	Δt к.з.,с	Me max 1	Me max 2	$\delta_{откл}$	Mгв max	M1г max	M21 max	M32 max	M43 max
0,005	0,181	3,240	2,211	1,57	0,182	2,711	1,365	1,545	0,647
0,05	0,18	3,240	1,781	1,57	0,202	2,799	2,559	1,611	0,658
0,1	0,18	3,240	1,761	1,57	0,198	2,829	2,565	1,611	0,657
0,2	0,183	3,240	1,777	1,57	0,187	2,780	2,427	1,542	0,635
0,5	0,186	3,240	1,938	1,57	0,662	2,768	2,281	1,452	0,602
1,0	0,198	3,240	2,032	1,57	0,144	2,168	1,819	1,201	0,551
1,5	0,214	3,240	2,048	1,57	0,139	2,747	2,009	1,590	0,648

Анализ данных таблиц 9-11 и рис. 8 и 9 показывает, что даже при значительных величинах внешних индуктивных сопротивлений продолжает сохраняться опасность появления больших скручивающих моментов. Осложняющим фактором продолжает оставаться повышенное активное сопротивление линии электропередачи, характерное для линий классов 110 –

220 кВ.

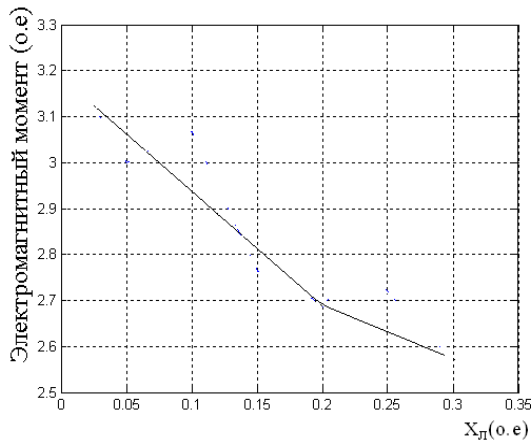


Рис.8. Зависимость электромагнитного момента от индуктивного сопротивления x_L при отключении трёхфазного к.з. ($\delta_{откл}=1,57$ рад.).

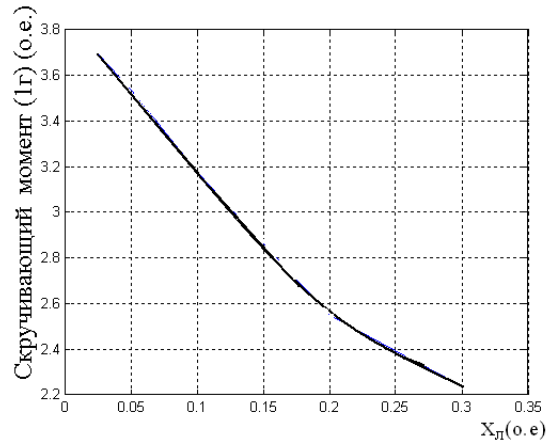


Рис.9. Зависимость скручивающего момента ($M_{TГ}$) от x_L при отключении трёхфазного к.з. ($\delta_{откл}=1,57$ рад.)

Скручивающие моменты при коротких замыканиях и коммутациях в высоковольтной сети

Результаты, приведенные в табл. 12 иллюстрируют тот известный факт, что при неблагоприятном значении угла между э.д.с. генератора и эквивалентным напряжением приемной системы в момент выполнения повторного включения могут достигаться весьма значительные величины ударных электромагнитных и скручивающих моментов. По этой причине на большинстве электрических станций релейные защиты блокируют АПВ при определенной разнице углов. Максимальные значения моментов составляют: $M_e=111\%$, $M_{Гв}=344\%$, $M_{1Г}=224\%$, 200% , 208% , $M_{21}=214\%$, 171% , $M_{32}=166\%$ для турбогенератора ТВВ-200, и $M_e=148\%$, 147% , 152% , $M_{Гв}=260\%$, $M_{1Г}=221\%$, 213% , $M_{21}=265\%$, 280% , 264% , $M_{32}=184\%$, $M_{43}=177\%$, для турбогенератора ТВВ-500.

Таблица 12,а.

Скручивающие моменты при АПВ линии.(ТВВ-200)

Δt к.з.,с	M_e max 1	M_e max 2	Δt апв	M_e max 3	$\delta_{откл}$	$M_{Гв}$ max	$M_{1Г}$ max	M_{21} max	M_{32} max	M_{43} max
0,23	3,55	3,53	0,02	6,78	1,677	0,507	4,688	2,394	0,766	
0,23	3,55	3,53	0,04	5,43	1,831	0,404	3,644	2,096	0,704	
0,23	3,55	3,53	0,06	4,325	1,985	0,685	5,434	3,35	0,98	
0,23	3,55	3,53	0,081	5,15	2,094	0,427	3,089	2,049	0,704	
0,23	3,55	3,53	0,096	6,86	2,175	0,546	4,865	2,689	0,833	
0,23	3,55	3,53	0,1	6,631	2,199	0,484	5,064	2,74	0,844	
0,23	3,55	3,53	0,15	6,14	2,382	0,529	4,525	2,584	0,805	
0,23	3,55	3,53	0,2	5,757	2,473	0,574	4,587	2,679	0,835	
0,23	3,55	3,53	0,25	5,474	2,492	0,398	4,311	2,396	0,772	
0,23	3,55	3,53	0,3	5,306	2,437	0,555	4,209	2,461	0,780	
0,23	3,55	3,53	0,35	5,149	2,316	0,44	4,177	2,44	0,779	
0,23	3,55	3,53	0,4	4,924	2,116	0,414	3,806	2,135	0,71	
0,23	3,55	3,53	0,45	4,467	1,843	0,394	3,834	2,17	0,716	
0,23	3,55	3,53	0,5	3,61	1,49	0,35	3,262	2,05	0,704	

При этом следует отметить, что максимальные значения скручиваю-

ших моментов не обязательно и не всегда соответствуют максимальным электромагнитным моментам. Значительное влияние имеет не только величина возмущения, но и момент его приложения к валу.

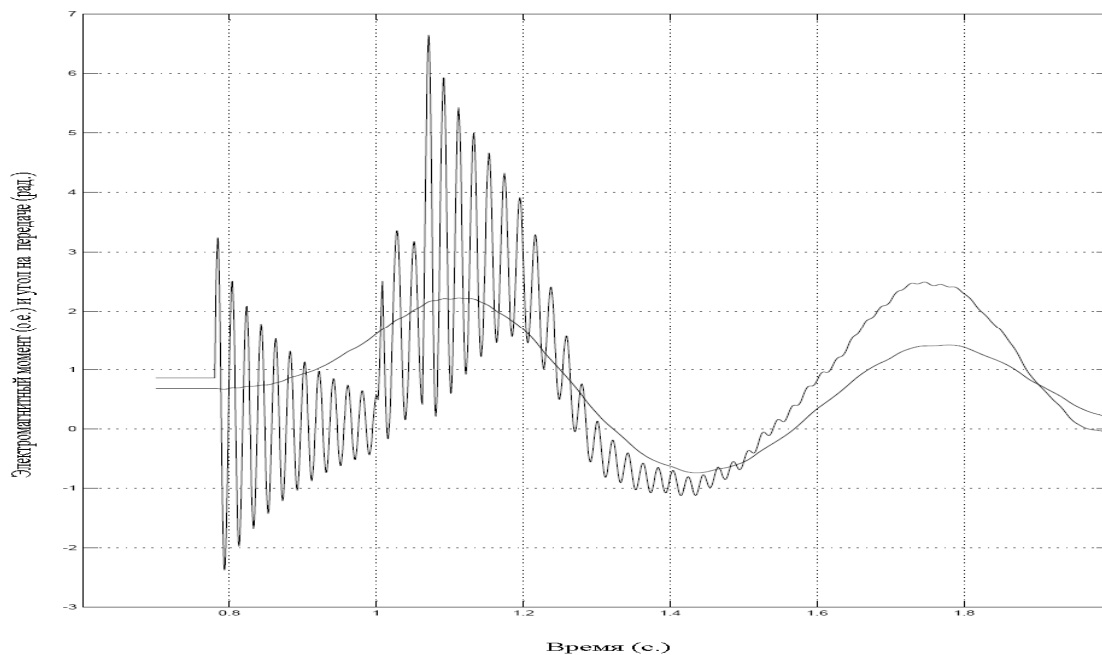
Таблица 12,б.

Скручивающие моменты при АПВ линии (ТВВ-500)

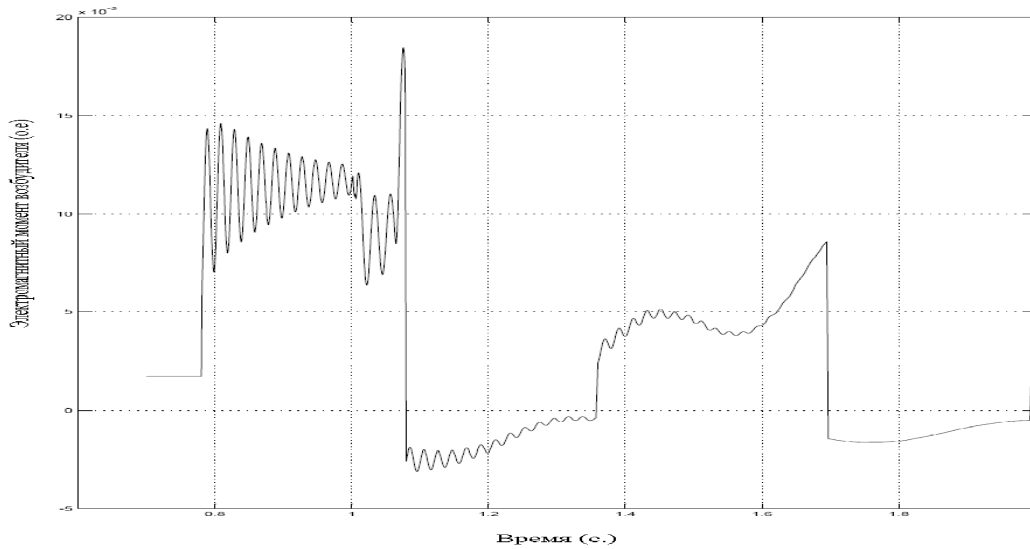
Δt к.з.,с	Me max 1	Me max 2	Δt апв	Me max 3	$\delta_{\text{откл}}$	M _{ГВ} max	M _{1Г} max	M ₂₁ max	M ₃₂ max	M ₄₃ max
0,22	3,24	2,5	0,02	7,05	1,787	0,63	4,413	4,221	1,59	0,761
0,22	3,24	3,375	0,03	4,0	1,869	0,556	4,02	3,82	1,85	0,83
0,22	3,24	3,375	0,04	6,8	1,925	0,345	4,68	2,588	1,938	0,834
0,22	3,24	3,375	0,05	5,758	2,008	0,694	4,35	2,49	1,715	0,813
0,22	3,24	3,375	0,062	6,646	2,094	0,4	3,7	2,6	1,69	0,74
0,22	3,24	3,375	0,07	6,787	2,162	0,511	4,504	3,01	2,008	0,811
0,22	3,24	3,375	0,08	4,802	2,233	0,732	4,22	4,005	2,24	0,904
0,22	3,24	3,375	0,09	7,006	2,273	0,46	4,382	4,23	2,11	0,928
0,22	3,24	3,375	0,1	5,04	2,316	0,582	4,11	3,421	1,601	0,633
0,22	3,24	3,375	0,15	4,91	2,516	0,459	4,433	4,0	2,30	0,962
0,22	3,24	3,375	0,2	5,00	2,585	0,459	3,292	2,52	1,94	0,74
0,22	3,24	3,375	0,25	4,98	2,585	0,505	2,93	2,47	1,504	0,642
0,22	3,24	3,375	0,3	4,873	2,569	0,61	4,118	3,03	1,982	0,828
0,22	3,24	3,375	0,4	4,657	2,333	0,459	3,706	2,805	1,765	0,788
0,22	3,24	3,375	0,45	4,425	2,094	0,459	2,89	2,47	1,504	0,642
0,22	3,24	3,375	0,5	3,81	1,809	0,459	3,426	2,73	1,81	0,752

На рис.10,а,б,в представлены результаты расчёта переходного процесса турбогенератора ТВВ-500 при отключении трёхфазного к.з.

а)



б)



в)

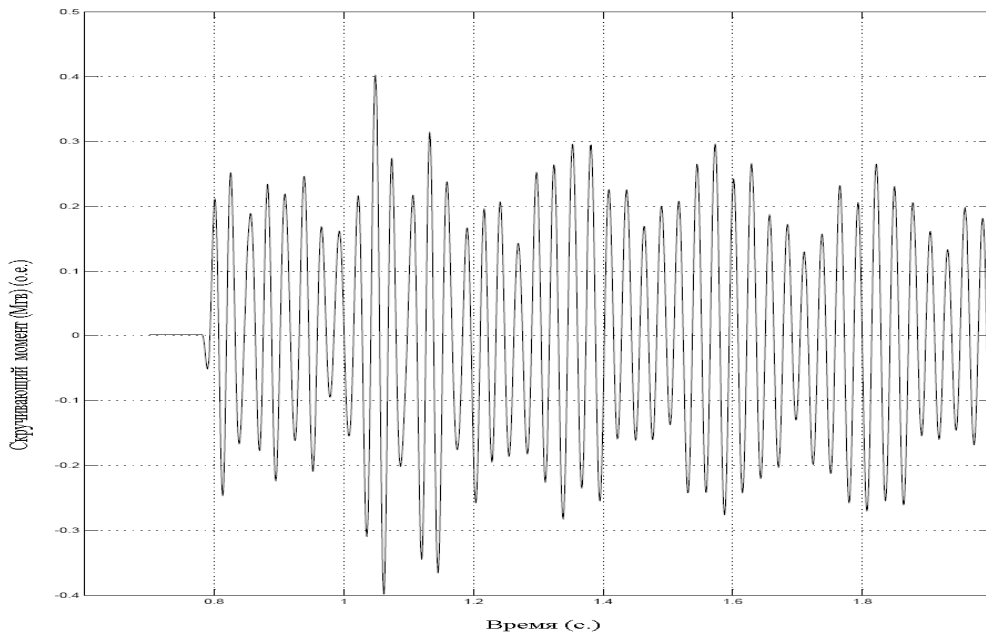


Рис.10. Трёхфазное к.з. с последующим АПВ линии ($t_{к.з.}=0,22с.$, $\delta_{апв} = 120$ эл.град., $x_{л1}=0,025$, $x_{л2}=0,375$), ТВВ-500.

- а) электромагнитный момент и угол электропередачи,
- б) электромагнитный момент возбуждателя,
- в) скручивающий момент (Мгв).

Процесс при неуспешном АПВ линии электропередачи представляет собой наиболее сложную комбинацию последовательных возмущений, прикладываемых к валопроводу. Эти возмущения включают в себя возникновение короткого замыкания, отключение к.з., повторное включение на короткое замыкание и его отключение. Расчеты выполнены при изменении параметров линий электропередачи, длительности короткого замыкания и паузы АПВ.

Так, в таблице 13,а приведены результаты расчетов электромагнитного и скручивающих моментов для турбогенератора ТВВ-500 при постоянном времени короткого замыкания ($\Delta t_{к.з.} = 0,12$ с) и постоянной длительности паузы АПВ ($\Delta t_{АПВ} = 0,32$ с) при изменении отношения активного и реактивного сопротивлений линий электропередачи.

Таблице 13,а.

Скручивающие моменты при **неуспешном** АПВ линии

гл2/ хл2	Δt к.з., с	Me max 1	Me max 2	Δt . неу апв	Me max 3	$\delta_{откл}$	Me max 4	Мгв max	М1г max	М21 max	М32 max	М43 max
0,0005	0,12	3,24	2,65	0,32	2,867	1,124	2,34	0,635	2,46	1,976	1,327	0,58
0,005	0,12	3,24	2,591	0,32	2,98	1,125	2,349	0,624	2,427	1,973	1,328	0,582
0,029	0,12	3,24	2,431	0,32	3,322	1,119	2,309	0,57	2,304	1,962	1,334	0,589
0,05	0,12	3,24	2,39	0,32	3,485	1,109	2,494	0,542	2,283	1,962	1,335	0,59
0,5	0,12	3,24	1,793	0,32	3,987	0,9	1,592	0,421	2,138	1,993	1,330	0,582
0,7	0,12	3,24	1,791	0,32	4,121	0,858	1,505	0,425	2,159	2,038	1,322	0,584
1,0	0,12	3,24	1,789	0,32	4,329	0,841	1,449	0,434	2,171	2,069	1,293	0,626
1,5	0,12	3,24	1,787	0,32	4,76	0,904	1,547	0,462	2,179	2,098	1,287	0,662
2,0	0,12	3,24	1,789	0,32	5,350	1,049	1,861	0,508	2,174	2,108	1,477	0,735

Результаты этих расчетов подтверждают ранее установленную зависимость максимальной величины электромагнитного момента генератора от соотношения активного и реактивного сопротивлений линии электропередачи: при увеличении относительной величины активного сопротивления возрастает величина электромагнитного момента, соответствующая началу второго короткого замыкания после включения линии, однако, снижается величина M_e после отключения второго к.з. (это обусловлено большой величиной индуктивного сопротивления оставшейся в работе линии электропередачи). Однако последовательно приложенные к валу возмущения вызывают значительные по величине скручивающие моменты, особенно в сечении между генератором и возбудителем, которые превосходят расчетно-нормативные значения в 1,51 – 2,26 раза.

В таблице 13,б приведены значения моментов при неуспешном АПВ в зависимости от длительности первого короткого замыкания. В этом случае наибольшие по величине моменты между генератором и турбиной и между цилиндрами низкого давления турбины соответствуют времени короткого замыкания $t_{к.з.} = 0,16$ с. Скручивающий момент между генератором и турбиной превышает расчетно-нормативный на 46%, между цилиндрами - на 62%.

Таблице 13,б

Скручивающие моменты при **неуспешном** АПВ линии (ТВВ–500)

Δt к.з.,с	Me max 1	Me max 2	Δt . Неу апв	Me max 3	$\delta_{откл}$	Me max 4	Мгв max	М1г max	М21 max	М32 max	М43 max
0,12	3,24	2,39	0,32	3,485	1,109	2,494	0,542	2,283	1,962	1,335	0,59
0,13	3,24	2,096	0,32	3,552	1,116	2,152	0,358	2,049	1,601	1,250	0,584
0,14	3,24	2,58	0,32	3,497	1,102	2,03	0,371	2,230	1,622	1,58	0,685
0,15	3,24	2,383	0,32	3,551	1,117	1,93	0,464	2,523	2,159	1,56	0,64
0,16	3,24	2,784	0,32	3,453	1,139	1,805	0,316	3,023	2,448	1,435	0,612
0,18	3,24	3,001	0,32	3,346	1,292	1,891	0,46	2,586	2,371	1,603	0,689
0,2	3,24	3,196	0,32	2,886	1,636	2,410	0,456	2,105	1,505	1,249	0,593

Влияние момента приложения какого-либо из последовательных возмущений хорошо иллюстрируется данными таблицы таблице 13,в в которой приведены результаты расчета моментов при изменении длительности паузы АПВ. Следует обратить внимание на вторую, третью и четвертую строки таблицы. Можно заметить, что величины электромагнитных моментов, соответствующих длительностям паузы АПВ 0,24, 0,26 и 0,28 с приблизительно одинаковы. Однако, небольшая разница в моменте времени, соответствующем приложению к валу электромагнитного момента, определяет большие различия в величинах скручивающих моментов в различных сечениях валопровода.

Таблица 13,в

Скручивающие моменты при **неуспешном** АПВ линии (ТВВ–500)

Δt к.з.,с	Me max1	Me max2	Δt . Неу апв	Me max3	$\delta_{откл}$	Me max4	Мгв max	М1г max	М21 max	М32 max	М43 max
0,12	3,24	2,39	0,22	3,58	1,347	3,492	0,384	3,413	3,530	2,195	0,893
0,12	3,24	2,39	0,24	3,742	1,314	3,201	0,510	3,498	2,621	1,530	0,650
0,12	3,24	2,39	0,26	3,755	1,289	3,00	0,408	2,658	1,962	1,537	0,712
0,12	3,24	2,39	0,28	3,643	1,22	2,732	0,252	2,49	3,00	1,478	0,657
0,12	3,24	2,39	0,30	3,538	1,150	2,497	0,491	2,790	2,43	1,909	0,801
0,12	3,24	2,39	0,32	3,485	1,109	2,494	0,542	2,283	1,962	1,335	0,59

Наибольший по величине скручивающий момент между генератором и турбиной (165,8%) возникает при длительности паузы АПВ 0,24 с, а наибольший скручивающий момент между двумя цилиндрами низкого давления (199%) – при длительности паузы АПВ 0,28 с. Отмеченное свойство валопровода мощного турбоагрегата требует детального обследования условий появления опасных величин моментов на основе вариантных расчетов с варьированием влияющих параметров, особенно моментов времени приложения возмущающих воздействий. На рис.11, показано изменение электромагнитного момента) и угла на передаче (рад.) при **неуспешном** АПВ линии (ТВВ–500).

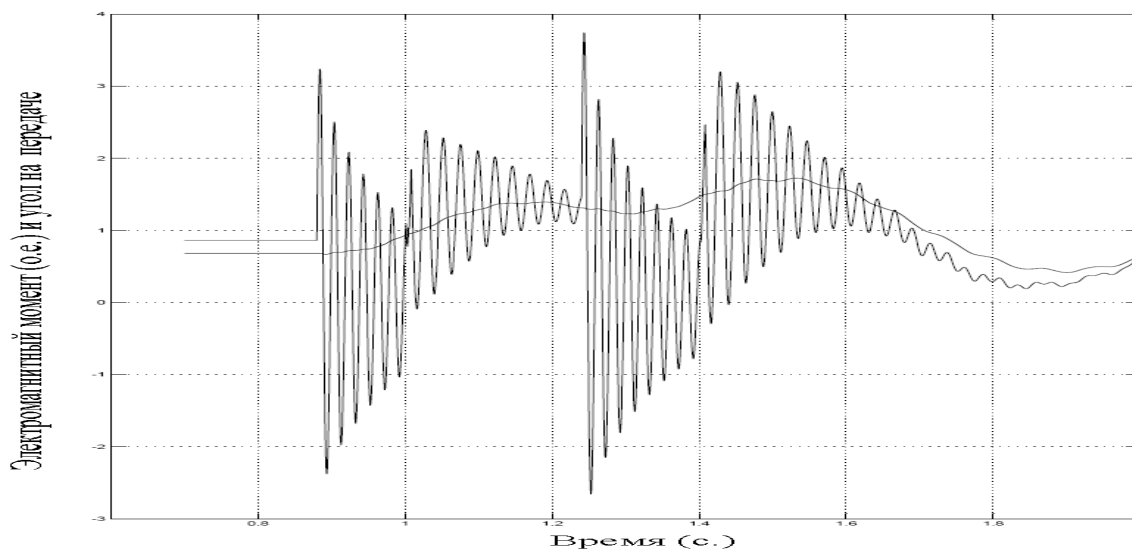


Рис.11. Электромагнитный момент (M_e) и угол на передаче (рад.) при **неуспешном** АПВ линии (ТВВ-500) ($\Delta t_{к.з.} = 0,12$ с, $\Delta t_{АПВ} = 0,24$ с), $x_{л1} = 0,025$ о.е., $r_{л1} = 0,05x_{л1}$, $x_{л2} = 0,375$ о.е. ($r_{л2} = 0,05x_{л2}$).

В седьмой главе приведены результаты расчетов механических напряжений в элементах конструкции турбогенератора на основе метода конечных элементов. Рассчитанные в шестой главе величины скручивающих моментов позволили решить ряд практических задач, в частности, выполнить расчеты прочности фланцевых соединений валов.

В качестве расчетного метода использованы методы теории сопротивления материалов и метод конечных элементов (МКЭ) в варианте метода перемещений.

Для рассматриваемых участков разработаны трехмерные конечно-элементные модели, учитывающие особенности поведения конструкции.

Цель работы состоит в определении предельно допустимого вращающего момента, который можно приложить к валам, при условии чистого кручения, а также рассмотрено изменение напряженного деформированного состояния (НДС) фланцевого соединения валов в зависимости от радиуса перехода с вала на фланец.

Для расчета соединения между генератором и возбудителем потребовалось разделить задачу на две:

расчет самого вала как единого целого, в предположении, что фланцевое соединение прочно скреплено, для определения напряжения в зоне фланца.

расчет болтового соединения.

Модель участка вала между генератором и возбудителем состоит из двух валов с диаметрами $D=340$ мм и $D=500$ мм с фланцем диаметром $D=670$ мм, соединенные 16 болтами М32 с диаметром расположения осей болтов $D=590$ мм.

Болты выполнены из стали с пределом текучести $\sigma_T=800$ МПа. Валы выполнены из стали с пределом текучести $\sigma_T=550$ МПа.

Рассмотрены 5 вариантов конструкций в зависимости от радиусов скругления в месте перехода вала на фланец (рис.12).

Для моделирования скручивающего и изгибающего момента, к большему валу прикреплена достаточно толстая пластина, к которой по краям прикладываются усилия.

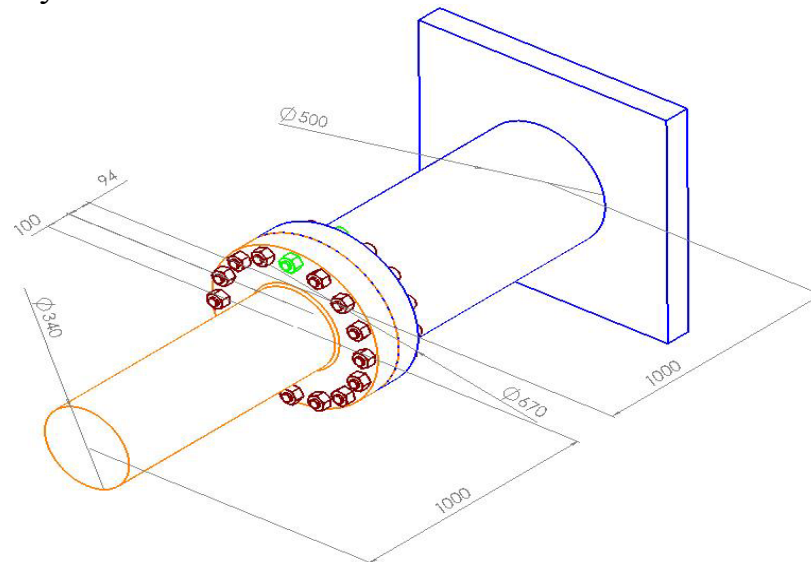


Рис. 12. Общий вид модели.

В результате расчетов получены следующие зависимости:

1. Зависимость напряжений от крутящего момента для различных радиусов скругления при приложении момента 1 МНм приведены на рис.13.
2. На рис.15, приведено изменение напряженного состояния вала от радиуса скругления, в процентах по отношению к базовому варианту с $R=10$ мм.
3. В табл.14 приведены предельно допускаемые скручивающие моменты.

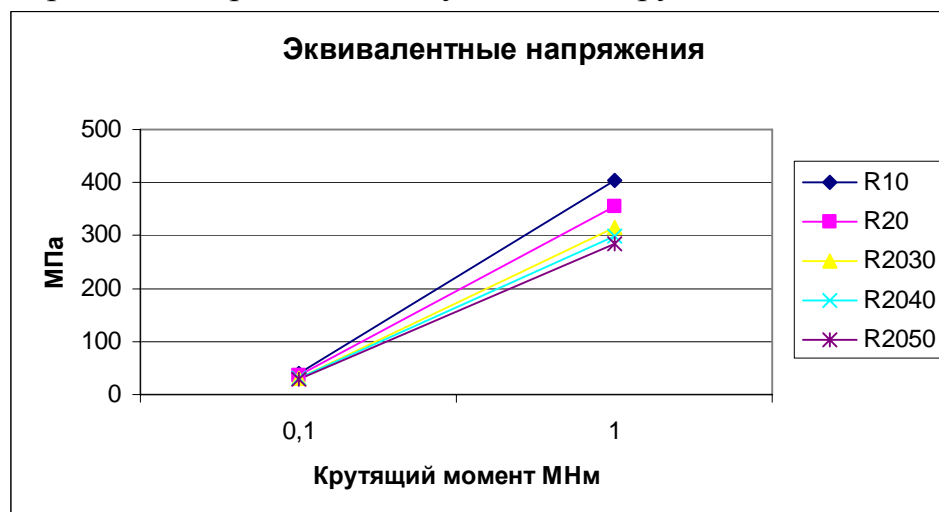


Рис.13. Зависимость напряжений от крутящего момента для различных радиусов скругления.

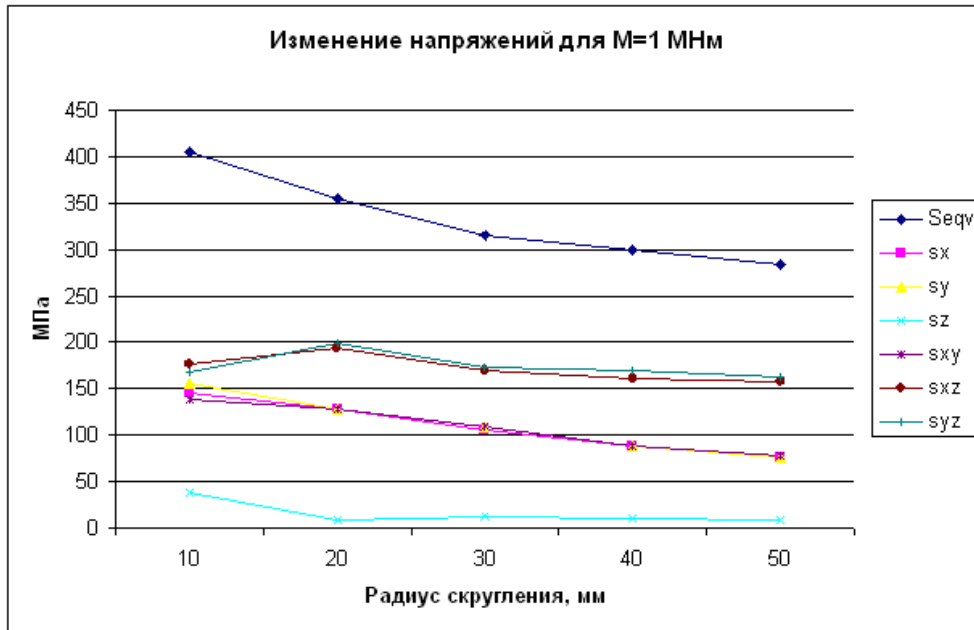


Рис.14. Изменения напряженного уровня для валов при изменении радиуса скругления для крутящего момента 1 МНм.

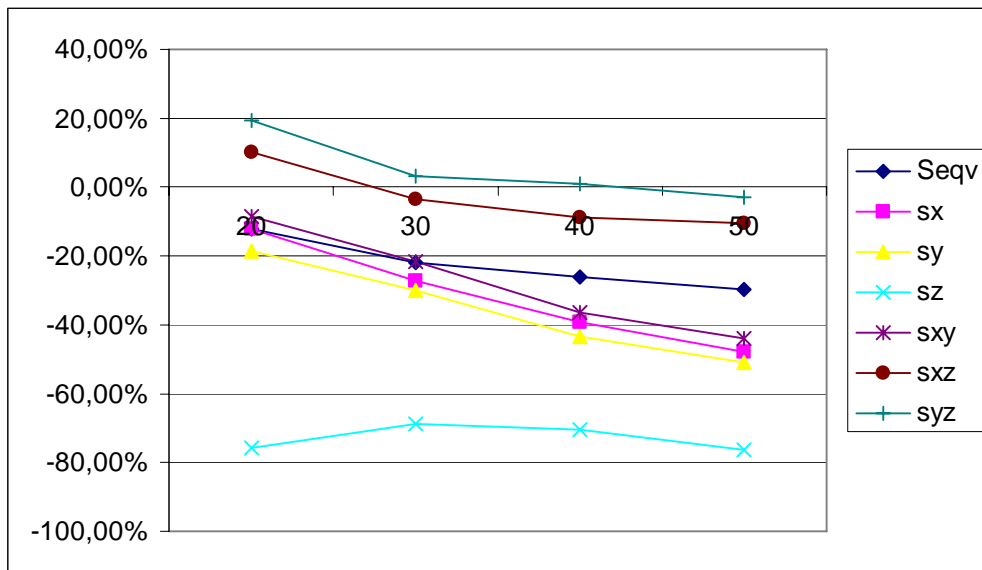


Рис.15. Изменение напряженного состояния вала от радиуса округления, в процентах по отношению к базовому варианту с R=10 мм.

Таблица 14.

Изменения предельно-допускаемого момента от радиуса скругления.

	R=10мм	R=20 мм	R=30 мм	R=40мм	R=50 мм
Мкр.предельно допускаемый в МНм.	0,682	0,778	0,87	0,92	0,965

Для расчета данного соединения потребовалось разделить задачу на четыре задачи:

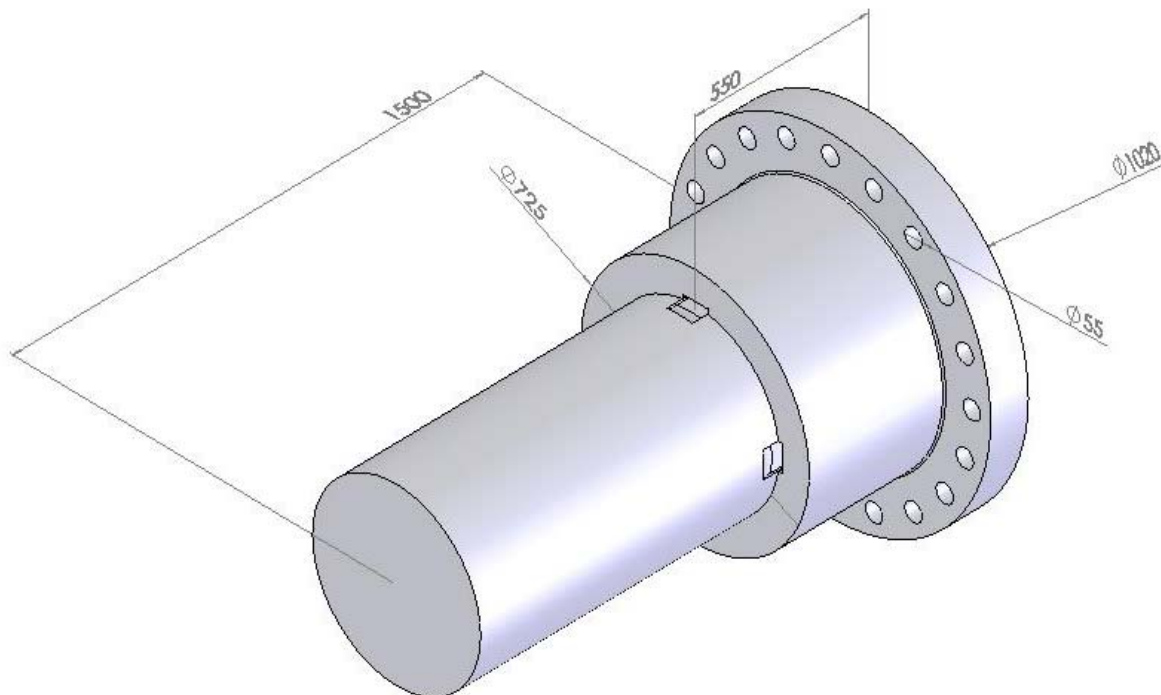
- расчет самого вала на усилие от шпонки и посадочное давление от полумуфты.
- расчет полумуфты на усилие от шпонки и посадочное давление от вала
- расчет шпонки
- расчет болтового соединения.

Модель участка вала между генератором и турбиной состоит из фланцевого соединения валов соединенных между собой 20 болтами М55. Полумуфты с валом соединены 4 шпонками.

Болты выполнены из стали с пределом текучести $\sigma_T=800$ МПа. Валы выполнены из стали с пределом текучести $\sigma_T=637$ МПа., Полумуфты выполнены из стали с пределом текучести $\sigma_T=735$ МПа.

Рассмотрены 5 вариантов конструкций в зависимости от натяга, создаваемого при посадке полумуфты на вал. Вал рассматривается отдельно от полумуфты. Вид модели с размерами представлен на рис. 16,а,б.

а.)



б.)

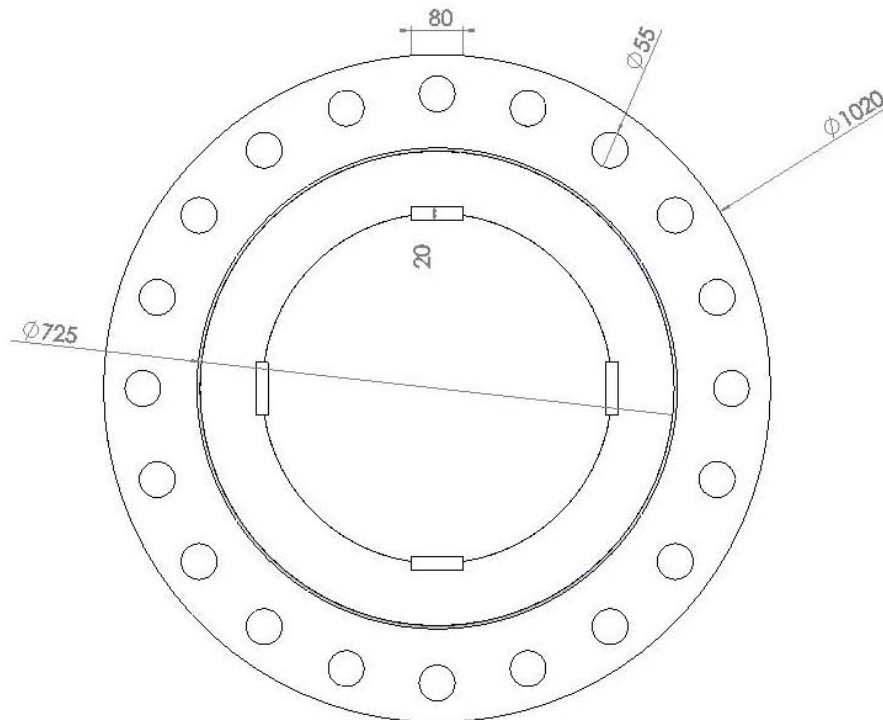


Рис. 16, Общий вид модели.

Нагрузка:

1. Равномерно распределенные усилия от шпонки приложенные к пазу, которые суммарно дают задаваемый скручивающий момент.
2. Давление на посадочные поверхности в связи с посадкой с натягом полумуфты на вал.

Результаты расчетов по определению зависимости напряжений от крутящего момента при посадке с натягом приведены на рис.17.

В результате расчетов определена зависимости напряжений от крутящего момента, при посадке без натяга приведены на рис.18.

Из расчета видно, что предельно допустимый крутящий момент, при посадке с натягом, чуть меньше 5 МНм. Поскольку разница между допускаемыми и действующими напряжениями находится в пределах точности расчета, то за предельный допустимый скручивающий момент можно принять 5 МНм при обеспеченной для этого момента посадкой $\Delta = 1,171$ мм.

Из расчета видно, что предельно допустимый крутящий момент при посадке без натяга меньше 1 МНм.

Из приведенных результатов видно снижение на 33% поля напряжений при посадке с натягом.

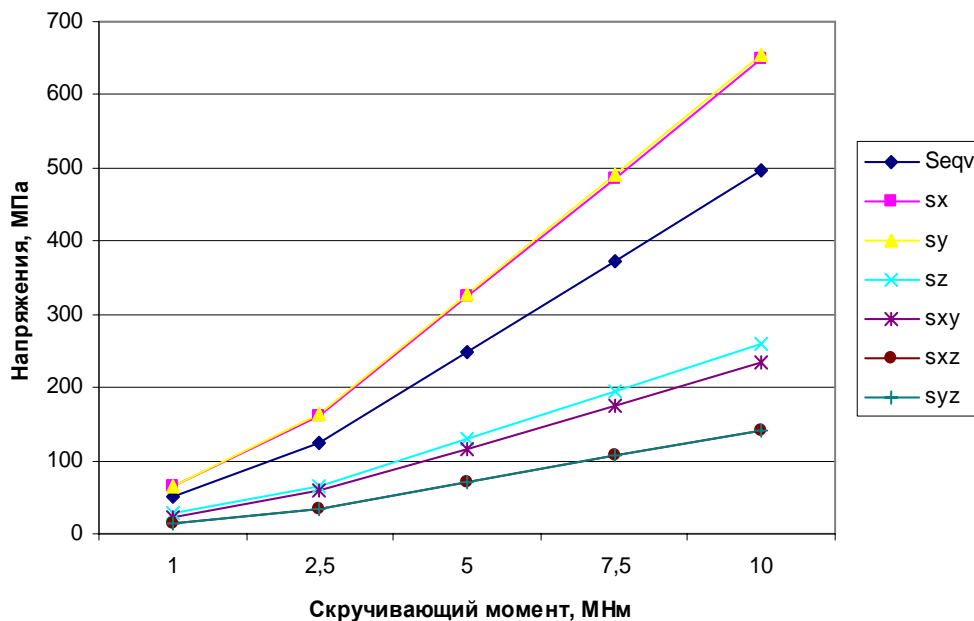


Рис. 17. Напряжения при посадке с натягом.

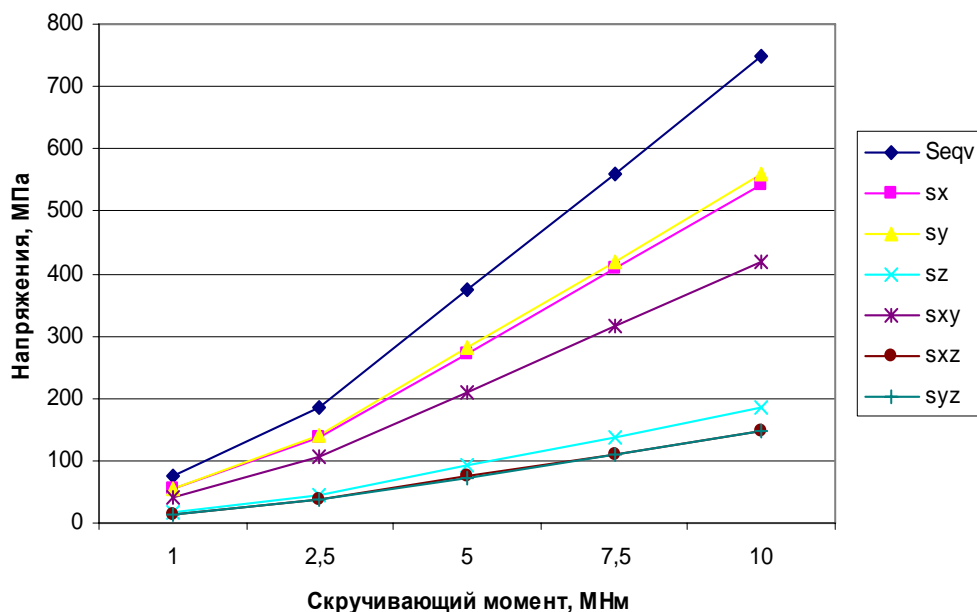


Рис.18. Напряжения при посадке без натяга

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЕ

1. В среде MatLab разработана методика математического моделирования переходных процессов турбогенераторов, оснащенных быстродействующими системами возбуждения с учетом крутильных колебаний валопровода. Использование среды MatLab обусловило возможность координированного применения методов анализа устойчивости маловозмущенного движения и расчета переходных процессов на основе исходных нелинейных уравнений.
2. Расчеты переходных процессов выполнены с учетом насыщения сердеч-

ников синхронных машин, что позволило уточнить величины воздействующих электромагнитных моментов. Показано, что неучет насыщения может привести к достаточно большим погрешностям в определении воздействующих моментов.

3. Впервые проведены расчеты при многократно воздействующих на турбоагрегат аварийных возмущениях (короткое замыкание, отключение ВЛ, неуспешное АПВ, отключение повторного короткого замыкания). Показано, что при подобных последовательных возмущениях величины скручивающих моментов в сечениях валопровода могут превосходить так называемые расчетно-нормативные.
4. При использовании современных систем возбуждения, использующих «сильные» законы регулирования, возникает опасность возникновения слабодемпфированных крутильных колебаний валопровода на первой или второй собственной частоте (в зависимости от конструкции турбоагрегата). Основной причиной возникновения слабодемпфированных составляющих движения является использование в законе регулирования сигнала производной частоты напряжения (производной скольжения ротора генератора). Однако, исключение указанного сигнала регулирования из закона управления приводит к резкому снижению показателей демпфирования электромеханических колебаний ротора генератора.
5. Большой эффективностью обладает использование дополнительных сигналов регулирования возбуждения, основанных на измерении взаимных скольжений между элементами валопровода. Использование этих сигналов позволяет существенно повысить демпферные свойства валопровода на частотах крутильных колебаний и одновременно использовать необходимые величины коэффициентов каналов стабилизации АРВ-СД, обеспечивающие хорошие показатели затухания электромеханических колебаний ротора.
6. Фильтрация сигналов позволяет ослабить указанный нежелательный эффект, но также приводит к заметному снижению показателей демпфирования электромеханических колебаний.
7. Наибольшей эффективностью обладает структура регулирования, основанная на оптимальном ЛКГ-регуляторе с фильтром Калмана. Применение указанной структуры регулирования обеспечивает высокие показатели демпфирования на частотах крутильных колебаний и одновременно повышенный уровень демпфирования электромеханических колебаний ротора генератора. Выполнена оценка применения теории оптимального управления для повышения показателей колебательной устойчивости регулируемого турбоагрегата.
8. Показана большая опасность коротких замыканий в сети высокого напряжения, при затянутых коротких замыканиях и коммутациях в высоковольтной сети при повышенных активных сопротивлениях линий электропередачи.
9. Целесообразно рекомендовать изменить подход к определению расчет-

но-нормативных значений скручивающих моментов; а именно определять их при отключении затянувшегося неудаленного короткого замыкания в высоковольтной сети.

10. Мероприятия по повышению уровня динамической устойчивости параллельной работы турбогенератора должны проверяться с точки зрения появления опасных скручивающих моментов.
11. С точки зрения снижения опасных воздействий на валопровод наиболее благоприятным мероприятием по повышению динамической устойчивости является сокращение времени коротких замыканий.
12. Влияние насыщения на скручивающие моменты при коротких замыканиях на зажимах генератора в режиме холостого хода приводит к возрастанию расчетных величин приблизительно на 1%. Влияние насыщения на скручивающие моменты при коротких замыканиях в начале линии в режиме номинальной нагрузки приводит к их возрастанию на 4% при 3-х фазном к.з. и на 10 % при 2-х фазном. Влияние насыщения при отключении неудаленных затянувшихся к.з. приводит к увеличению значений максимальных скручивающие моменты на 7% по сравнению с расчетом без учета насыщения.
13. Разработаны комплексные модели турбоагрегатов, включающие математические модели систем возбуждения, учитывающие электромагнитный момент вспомогательного генератора. Изменение напряжения и тока возбуждения определяется работой автоматического регулятора возбуждения и режимом работы основного генератора. Учет электромагнитного момента возбудителя приводит к заметному изменению (до 20%) скручивающего момента, воздействующего на участок валопровода между генератором и возбудителем.
14. Выполнено исследование факторов дополнительного демпфирования крутильных колебаний, обусловленных «паровым» и «конструкционным» демпфированием. Учет указанных факторов создает определенные запасы устойчивости маловозмущенного движения понижающих, например, опасность появления слабодемпфированных составляющих движения вследствие неоптимальной настройки АРВ-СД. Показано, что учет этих факторов не снижает опасных величин скручивающих моментов, воздействующих на валопровод при аварийных возмущениях.
15. Разработанные методы расчета экстремальных скручивающих моментов в сечениях валопровода позволили выполнить расчеты механических напряжений в элементах конструкции валопровода.
16. Выявлено неблагоприятное влияние увеличенных активных сопротивлений, характерных для линий электропередачи класса 110 – 220 кВ. Установлено, что при соотношении $r_{\text{л}}/x_{\text{л}} \geq 0,5$ может иметь место значительное (до 155% при $r_{\text{л}} = x_{\text{л}}$) увеличение электромагнитных и скручивающих моментов при отключении коротких замыканий, автоматическом повторном включении линии (особенно при неуспешном АПВ).

Основные положения диссертации опубликованы в работах

1. Шхати Х. В. Разработка мероприятий по снижению опасных воздействий крутильных колебаний на турбоагрегаты на основе компьютерного моделирования. Автореферат по Дис. Канд.техн. наук. СПб.: СПбГТУ.2001, –20с.
2. Шхати Х.В., Смоловик С.В. Скручивающие момент, воздействующие на валопровд турбоагрегата при коммутациях в сети // Фундаментальные исследования в технических университетах: Материалы IV Всероссийской конференции по проблемам науки и высшей школы. 8–9 июня 2000г. Санкт–Петербург. СПб.:СПбГПУ.
3. Шхати Х.В., Смоловик С.В. Скручивающие моменты, воздействующие на валопровд турбоагрегата при коротких замыканиях и коммутациях в сети // Научно–технические ведомости СПбГТУ №2, 2006г. –С.59–63.
4. Шхати Х. В. Смоловик С.В. Влияние системы регулирования возбуждения турбоагрегата на демпферные свойств в области частот крутильных колебаний // Материалы IV Всероссийской конференции по проблемам науки и высшей школы. 8–9 июня 2000г. Санкт–Петербург. СПб.: СПбГПУ.
5. Шхати Х. В. Смоловик С.В. Уточнение математической модели синхронного генератора для расчёта скручивающих моментов, воздействующих на валопровд турбоагрегата при коммутациях в сети // Фундаментальные исследования в технических университетах: Материалы VIII Всероссийской конференции по проблемам науки и высшей школы. 26–27 мая 2004г. Санкт–Петербург. СПб.:СПбГПУ, – С163.
6. Шхати Х. В. Смоловик С.В. Скручивающие моменты валопровода мощного турбоагрегата при отключении удаленных коротких замыканий // Фундаментальные исследования и инновации в технических университетах: Материалы XI Всероссийской конференции по проблемам науки и высшей школы. 18–19 мая 2007года, Санкт–Петербург. СПб.: Изд–во Политехн. ун–та,2007. –С.553–562.
7. Шхати Х. В. Смоловик С.В. Использование структуры регулирования, построенной на основе теории оптимального управления // Фундаментальные исследования и инновации в технических университетах: Материалы XI Всероссийской конференции по проблемам науки и высшей школы. 18–19 мая 2007года, Санкт–Петербург. СПб.: Изд–во Политехн. ун–та,2007. –С563–571.
8. Шхати Х. В. Смоловик С.В. Применение фильтрации сигналов для подавления колебательной неустойчивости на частотах крутильных колебаний // Научные исследования и инновационная деятельность: Материалы науч. –практ. Конф. СПб.:Изд–во Политехн. Ун–та, 18–20 июня 2007г. –С.193–200.

9. Шхати Х. В., Смолоник С.В. Исследование эффективности использования дополнительных сигналов в законе регулирования возбуждения // Научные исследования и инновационная деятельность: Материалы науч. –практ. Конф. СПб.:Изд–во Политехн. Ун–та, 18–20 июня 2007г. –С.200-206.
10. Шхати Х.В., Смолоник С.В. Исследование скручивающих моментов, воздействующих на валопровод турбоагрегата при неуспешном АПВ линии // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2007. № 4. – С.197–201.
11. Шхати Х. В., Смолоник С.В. Влияния насыщения сердечников мощных турбогенераторов на скручивающие моменты при коротких замыканиях // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2008. №2.
12. Шхати Х. В., Кадхем Б. Т., Смолоник С.В. Учёт дополнительных факторов демпфирования крутильных колебаний валопровода // Научно–технические ведомости СПбГПУ. 2008. №2.
13. Шхати Х. В., Кадхем Б. Т., Смолоник С. В. Формы крутильных колебаний валопровода турбоагрегата // Фундаментальные исследования в технических университетах: Материалы XII Всероссийской конференции по проблемам науки и высшей школы. 16–17 мая 2008г. Санкт-Петербург. СПб.:СПбГПУ
14. Шхати Х. В., Кадхем Б. Т., Смолоник С. В. Учёт дополнительных факторов демпфирования при исследовании крутильных колебаний валопровода // Фундаментальные исследования в технических университетах: Материалы XII Всероссийской конференции по проблемам науки и высшей школы. 16–17 мая 2008г. Санкт-Петербург. СПб.:СПбГПУ
15. Шхати Х. В., Смолоник С. В. Расчеты механических напряжений в элементах конструкции турбогенератора на основе метода конечных элементов // Фундаментальные исследования в технических университетах: Материалы XII Всероссийской конференции по проблемам науки и высшей школы. 16–17 мая 2008г. Санкт–Петербург. СПб.:СПбГПУ
16. Шхати Х. В., Кадхем Б. Т., Смолоник С.В. Демпфирование крутильных колебаний валопровода турбоагрегата с помощью АРВ // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2007. № 4. –С202–206.
17. Семенов Н.К., Шхати Х. В. Реализация системы оптимального управления возбуждением генератора в системе MatLab // Материалы Всероссийской межвузовской научно–технической конференции студентов и аспирантов 28 ноября–3 декабря 2005г. Часть II. –С.11–12.
18. Семенов Н.К., Шхати Х. В. Моделирование процесса отключения короткого замыкания в среде MatLab. // Материалы Всероссийской межвузовской научно–технической конференции студентов и аспирантов 28 ноября–3 декабря 2005г. Часть II. –С.6–7.

- 19.Беляев А. Н., Кабанов И. А., Смолоник С. В. Шхати Х. В. Сравнение современных подходов к моделированию электроэнергетических систем // Материалы Всероссийской научно–технической конференции ВятГТУ. –Киров, 2001.
- 20.Belyaev A. N., Smolovik S. V. and Shuhati H. W. Analysis of voltage behavior during network connection of different types of distributed generation units // Proceedings of “SPb–IEEE Conference 03”, 2003 St-Petersburg IEEE Chapters conference.
- 21.Shuhati H. W., Kuhmai A. A. and Smolovik S. V. Investigation of Torsional Dynamics Caused by the Short–Circuits and Commutations in the Network. // Proceedings of IEEE Power Engineering Society PowerTech 2005, St–Petersburg, Russia.
- 22.Al-Sewedi H. A. Shuhati H. W. Guided torsional wave on hollow piezoelectric ceramic cylinders // AMSE Press,1990 , Vol.6 No.1. –pp.45–51.
- 23.Al-Sewedi H. A. Shuhati H. W. Torsional wave propagation in the infinite piezoelectric hollow cylinders with circumferential polarization // Technology & engineering magazine, Bagdad April 1991. pp.416–420.
- 24.Al-Sewedi H. A. Shuhati H. W. Acoustical waveguiding behavior of piezoceramic hollow rods // Second Basrah conference of mechanical engineering research 20–21 April 1993 pp.135–140..
- 25.Basim T. Kadhem, Andrey N. Belyaev, Hamed W. Shuhati and Serguei V. Smolovik Torsional Natural Frequencies and Mode Shapes for different Turbine-Generator Shaft // IVth international scientific symposium elektroenergetika 2007. Technical university of Kosice, Slovakia.sep.19–21, 2007. –pp.230–234.