

На правах рукописи



Талeб Джабер Гаиб

**ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ МНОГОАГРЕГАТНЫХ
АВТОНОМНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ С ГАЗОТУРБИННЫМ И
ДИЗЕЛЬНЫМ ПРИВОДОМ**

Специальность 05.14.02 – Электростанции
и электроэнергетические системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2009

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

Научный руководитель — доктор технических наук, профессор
Смоловик Сергей Владимирович

Официальные оппоненты — доктор технических наук, профессор
Савельев Виталий Андреевич,
Кандидат технических наук, доцент
Герасимов Сергей Евгеньевич

Ведущая организация — ОАО «Звезда - энергетика»

Защита состоится “ 26 ” июня 2009 г. в 10⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.11 при ГОУ ВПО «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 “ ____ ” _____ 2009г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.229.11
кандидат технических наук, доцент

Попов М.Г.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. К синхронным генераторам, используемым в качестве источников электроснабжения в автономных системах, предъявляют жесткие требования в части надежности их работы и качества вырабатываемой электроэнергии, возможность выполнения которых определяется их конструкцией и способностью обеспечивать заданные параметры в статических и динамических режимах, а также сохранять устойчивость параллельной работы. В связи с развитием топливно-энергетической базы России, расширяется применение газопоршневых, газотурбинных и дизельных электростанций.

В автономной системе электроснабжения, основанной на использовании тихоходных дизельных генераторов (ДГ) средней и большой мощности (10 – 40 МВт), могут наблюдаться слабодемпфированные низкочастотные процессы, обусловленные проявлением так называемой оборотной частоты дизеля. Колебания мощности дизеля с оборотной частотой вызываются неравномерностью давления в цилиндрах. В условиях параллельной работы синхронного генератора с дизельным приводом с мощной электрической системой это явление может усугубляться совпадением оборотной частоты с собственной частотой колебаний ротора. Сложившаяся практика борьбы с этими колебаниями предполагает в качестве основного мероприятия повышение величины механической инерционной постоянной, то есть значительное утяжеление и удорожание генератора. Подавление таких колебаний возможно за счет оптимизации конструкции демпферной системы генератора и соответствующей настройки системы возбуждения.

В связи со стремлением к снижению массогабаритных показателей конструкция современных генераторов с газотурбинным приводом является достаточно напряженной, и механические воздействия на элементы агрегата при аварийных воздействиях приближаются к предельным. С этой точки зрения представляет интерес вопрос о методике расчета предельно-допустимого скручивающего момента, воздействующего на узел соединения приводного двигателя с генератором, при внезапных коротких замыканиях в электрической сети. Традиционно в качестве расчетной величины момента, воздействующего на данное сечение вала принимают величину электромагнитного момента генератора, воздействующего на агрегат при трехфазном коротком замыкании на выводах генератора из режима холостого хода. Однако выполненными исследованиями удалось показать, что заметно большие по величине скручивающие моменты могут возникать в ходе качаний генератора после отключения короткого замыкания. С этой точки зрения наиболее опасным вариантом является параллельная работа с мощной энергосистемой или узлами мощной синхронной нагрузки, характерной для нефтегазодобывающих комплексов. На величины скручивающих моментов оказывают влияние величина индуктивного сопротивления, связывающего генератор с энергосистемой и доаварийный режим работы электростанции. Достаточно неблагоприятные условия создаются при параллельной работе разнотипных генераторов, заметно различающихся по

мощности. В практике эксплуатации имели место разрушения участков валопровода, передающих вращающий момент от редуктора к генератору.

Рассмотренные в диссертации вопросы применения автономных электростанций имеют большую актуальность для энергосистемы Ирака, которая переживает период медленного восстановления полностью разрушенной в результате войн и оккупации системы централизованного электроснабжения.

Цель и задачи работы. В работе решались две основные проблемы:

1. Исследование переходных процессов системы автономного электроснабжения, основанной на использовании тихоходных дизель-генераторов большой мощности для определения настроек системы регулирования возбуждения, необходимых для обеспечения показателей качества электрической энергии в условиях вынужденных колебаний.

2. Исследование переходных процессов системы автономного электроснабжения, основанной на применении газотурбинного привода, для разработки комплекса мероприятий, обеспечивающих снижение до безопасных величин скручивающих моментов, возникающих в аварийных ситуациях.

Задачи диссертации можно сформулировать следующим образом:

1. Разработка математической модели многоагрегатной дизель-генераторной электростанции для анализа колебательных процессов системы автономного электроснабжения в различных условиях работы.

2. Определение особенностей колебательных процессов в условиях различных режимов работы генераторов с дизельным приводом.

3. Анализ влияния систем автоматического регулирования возбуждения на качество переходных процессов при стационарных возмущениях для определения требований к оборудованию и уточнения настроечных параметров системы регулирования возбуждения.

4. Разработка математической модели валопровода автономной электростанции с газотурбинным приводом для исследования крутильных колебаний и определения условий возникновения опасных скручивающих моментов.

5. Разработка комплекса мероприятий по снижению скручивающих моментов, воздействующих на участок вала между генератором и редуктором приводного двигателя при коротких замыканиях и аварийных процессах в электрической сети.

Научная новизна диссертации определяется следующими положениями:

- разработана математическая модель многоагрегатной автономной электростанции с дизельным приводом для анализа колебательных процессов системы автономного электроснабжения и оценки показателей качества электрической энергии. На основании выполненных исследований даны рекомендации по выбору настройки канала регулирования автоматических регуляторов возбуждения, обеспечивающих удовлетворение требований

качества электрической энергии и ограничений на характеристики колебательных режимов;

- разработана математическая модель системы автономного электроснабжения, содержащей многоагрегатную электростанцию с газотурбинным приводом, узлы синхронной и асинхронной нагрузки, для анализа электромеханических переходных процессов системы, опасных для механической прочности агрегатов;

- разработан комплекс мероприятий, обеспечивающих снижение опасных скручивающих моментов в системе газотурбинного привода генераторов.

Практическая ценность и реализация результатов работы.

Полученные в диссертации научные положения, выводы и рекомендации, а так же разработанное программное обеспечение могут быть использованы в проектных, научно-исследовательских и эксплуатационных организациях при определении требований к системе возбуждения, допустимости тех или иных эксплуатационных режимов и разработке мероприятий и рекомендаций по повышению уровня устойчивости и качества напряжения в автономных системах электроснабжения.

В практике эксплуатации имели место случаи разрушения муфты, соединяющей выходной вал редуктора газовой турбины и вал генератора. Предположительно это происходило из-за нескольких последовательных аварийных возмущений, действовавших на агрегат (короткое замыкание, включение на мощный узел синхронной нагрузки с большой разностью фазовых углов после отключения КЗ). Разработанные в диссертации математические модели и комплекс мероприятий по снижению опасных скручивающих моментов позволяют повысить показатели эксплуатационной надежности автономных газотурбинных электростанций.

Методические и программные разработки использовались в научно-исследовательских работах кафедры «Электрические системы и сети» СПбГПУ и выполняемых по договорам с рядом организаций.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались на научных семинарах кафедры «Электрические системы и сети». По теме диссертации опубликовано 3 печатные работы.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы. Диссертация содержит 149 страницы машинописного текста, 55 рисунков, 16 таблиц, список литературы из 102 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дается общая характеристика и анализ современного состояния систем автономного энергоснабжения. Обоснована актуальность выбранной темы исследования.

В первой главе дан обзор направлении развития автономной энергетики, приведены материалы, иллюстрирующие перспективы развития дизельных, газотурбинных и газопоршневых электростанциях, рассматривается ряд научно-технических и методологических проблем систем автономного энергоснабжения на основе многоагрегатной системы с газотурбинным и дизельным приводом. Рассматриваются вопросы подавления колебаний мощности и напряжения синхронных генераторов с дизельным приводом и расчета опасных скручивающих моментов синхронных генераторов систем автономного электроснабжения

Источники электрической энергии малой энергетики расположены главным образом на территориях, не охваченных сетями единой энергетической системы (ЕЭС) России. Во многих регионах России отсутствует централизованное электроснабжение от единой энергосистемы. В таких регионах получили широкое развитие системы автономного электроснабжения, способные, при отсутствии связи с внешней энергосистемой, длительно обеспечивать электроснабжение и теплоснабжение объектов различного назначения.

Развитие малой энергетики для Ирака тоже считается актуальным, так как большинство иракских электростанции было повреждено или полностью разрушено в течение войны 1991. Большинство электростанций работает значительно ниже их номинальной мощности. В Ираке строительство объектов малой энергетики признано одним из перспективных направлений развития энергетики и объявлено государственной программой.

Во второй главе рассматриваются математические модели элементов автономной системы электроснабжения. Разработана математическая модель синхронного генератора с дизельным приводом для определения колебаний электромагнитного момента при возмущениях со стороны первичного двигателя и математическая модель синхронного генератора с газотурбинным агрегатом с целью расчета и снижения опасных величин скручивающих моментов, воздействующих на валопровод при коротких замыканиях.

Исследования математической модели многоагрегатной дизель–генераторной станции проводились с двумя видами регулятора частоты вращения – с широко распространенным на зарубежных дизельных электростанциях регулятором фирмы «Вудвард» и регулятором частоты вращения изодромного типа.

Математическая модель системы возбуждения генератора базируется на моделях диодной бесщеточной системы возбуждения и унифицированного регулятора возбуждения сильного действия (АРВ-СД) с возможностью подключения некоторых дополнительных сигналов регулирования.

Решение задачи математического моделирования генератора с газотурбинным приводом связано с определенными трудностями. При исследовании крутильных колебаний обязателен учет быстропереходных процессов статорных цепей элементов энергосистемы (генераторов,

синхронных и асинхронных электродвигателей, линий электропередачи), поскольку одним из основных факторов, вызывающих высокочастотные колебания вала, является знакопеременная составляющая электромагнитного момента.

Математическое моделирование высокочастотных электромеханических процессов, связанных с крутильными колебаниями валопровода агрегата (газовая турбина, редуктор, генератор), выполнялось на основе записи дифференциальных уравнений движения сосредоточенных масс, соединенных упругими безинерционными связями. Использование данной модели позволяет с достаточной точностью изучать крутильные колебания агрегатов, исследовать влияние на них переходных процессов, протекающих в электроэнергетической системе. Крутильные колебания валопровода, схематически представленного на рис.1, описываются следующей системой дифференциальных уравнений:

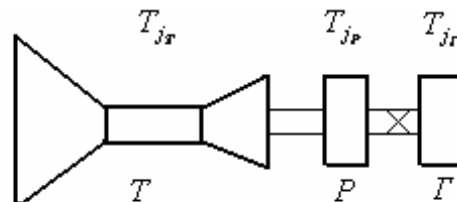


рис.1 . Расчетная схема валопровода турбогенератора

символом \otimes показана муфта со срезывающимися штифтами

$$\frac{1}{T_{j_D}} * \frac{ds_D}{dt} = C_{ГД} (\delta_{Г} - \delta_{Д}) + H(s_{Г} - s_{Д}) + M_T + \alpha s_D ; \quad (1)$$

$$\frac{1}{T_{j_{Г}}} * \frac{ds_{Г}}{dt} = -C_{ГД} (\delta_{Г} - \delta_{Д}) - H(s_{Г} - s_{Д}) - M_e ; \quad (2)$$

$$\frac{1}{\omega_c} * \frac{d\delta_{Д}}{dt} = s_{Д} ; \quad (3)$$

$$\frac{1}{\omega_c} * \frac{d\delta_{Г}}{dt} = s_{Г} , \quad (4)$$

где δ_i - угол закручивания соответствующей массы (Д – турбина с редуктором, Г – генератор), рад;

ω_c – синхронная частота вращения, рад/с;

s_i – скольжение, о.е.;

M_T - момент приводного агрегата, о.е.;

M_e - электромагнитный момент, о.е. ;

T_j - механическая инерционная постоянная, с;

C - жесткость участка, о.е./рад;

H - коэффициент демпфирования крутильных колебаний, обусловленный внутренним трением в материале, о.е.;

α - коэффициент демпфирования крутильных колебаний, обусловленный отклонением скорости лопаточного аппарата турбины относительно продуктов сгорания.

Обработка приемов математического моделирования и предварительное исследование переходных процессов при конечных возмущениях электроэнергетической системы, содержащей генератор с газотурбинным приводом выполнено в простейшей схеме ЭЭС «генератор-линия-шины мощной энергосистемы», результаты которой принимались в качестве эталонных, и лишь затем расчеты были произведены в условиях автономной энергосистемы.

На рис. 2 приведена зависимость, иллюстрирующая изменение максимальной величины скручивающего момента в сечении вала между генератором и редуктором в зависимости от величины механической инерционной постоянной приводной системы (газовая турбина – редуктор).

Эта зависимость показывает, что увеличение инерции вращающихся масс приводного двигателя по отношению к ротору генератора приводит к увеличению скручивающих моментов, воздействующих на сечение вала при одной и той же амплитуде возмущающего момента (вызванного коротким замыканием на зажимах генератора). Для системы с газотурбинным приводом характерно соотношение инерционных постоянных $T_{jд}/T_{jг}$ в диапазоне 3-4,5.

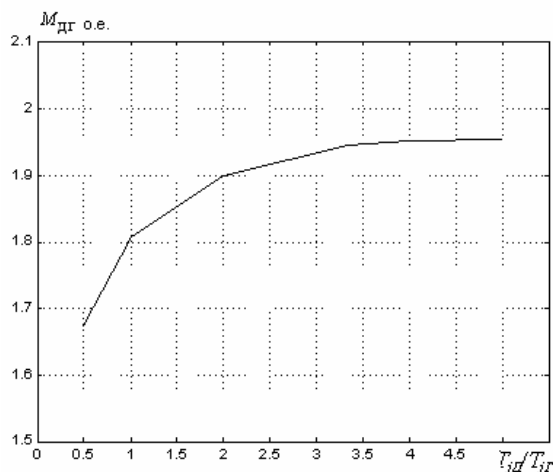


Рис. 2. Зависимость скручивающего момента в сечении вала между генератором и турбиной в функции отношения инерционных постоянных ($T_{jг} = const$).

Расчет корней характеристического полинома, соответствующего исходной системе дифференциальных уравнений показывает, что среди собственных значений есть две комплексно-сопряженные пары: $-2.3489 + 14.301i$ и $-0.37085 + 126.87i$, характеризующие взаимное движение ротора генератора относительно приемной системы и крутильные колебания ротора генератора относительно редуктора газовой турбины.

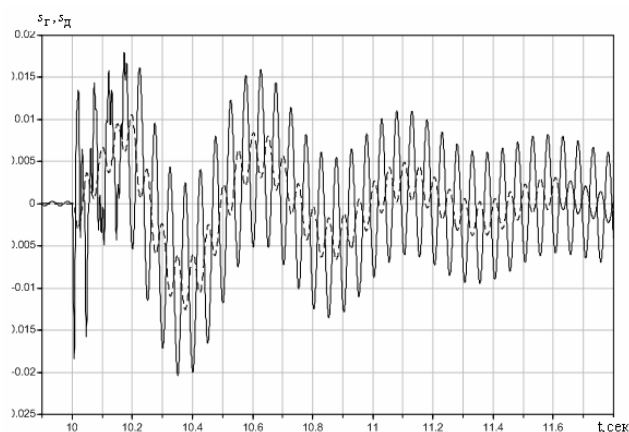


Рис. 3. Скольжения вращающихся масс ротора генератора (—) и турбины (-----) при переходном процессе, вызванном двухфазным коротким замыканием на шинах станции.

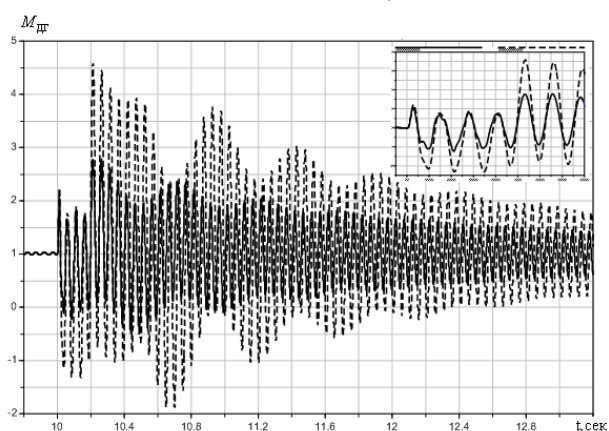


Рис.4. Кривые переходных процессов, связанные с крутильными колебаниями валопровода агрегата (двух- (—) и трехфазное (-----) КЗ длительностью 0,18 сек.) скручивающий момент между ротором генератора и турбиной; на врезке – те же переменные на интервале 0,2 с.

Колебания электромагнитного момента генератора, вызванные короткими замыканиями (знакопеременные моменты характеризуются частотами 50 и 100 Гц), обуславливают появление скручивающих моментов, воздействующих на валопровод агрегата (в данном случае – участок вала между генератором и редуктором, то есть на муфту со срезными штифтами). Расчеты переходных процессов подтверждают полученный результат, поскольку во всех представленных кривых присутствуют указанные составляющие движения. Необходимо указать, что рассчитанные величины скручивающих моментов превосходят моменты среза штифтов защитных муфт, что подтверждает потенциальную возможность нарушения механической прочности вала и аварийной остановки агрегатов после короткого замыкания в сети.

Двухчастотные колебания скольжений ротора генератора и турбины (рис.3) при коротких замыканиях на шинах станции длительностью 0,18 сек. происходят в фазе на низкочастотной составляющей движения (2,28 Гц) и в противофазе на высокочастотной составляющей (20,2 Гц), что проявляется в появлении скручивающих моментов (рис.4) между различными массами.

Ударное значение электромагнитного момента при двухфазном КЗ превосходит аналогичный показатель при трехфазном замыкании в $5,823/4,594 = 1,27$ раза, и в то же время максимальное значение скручивающего момента (рис.4, врезка) после отключения короткого замыкания при трехфазном КЗ превышает аналогичный показатель при двухфазном в $4,587/2,779 = 1,65$ раза.

В третьей главе рассмотрены способы снижения колебаний электромагнитной мощности и сохранения приемлемого качества напряжения в условиях параллельной работы генераторов электрической станции с дизельным приводом с мощной системой, а также в условиях автономной работы электростанции с различным числом агрегатов.

На основе анализа влияния различных коэффициентов регулирования рассмотрена возможность применения регулирования возбуждения для уменьшения амплитуды колебаний мощности при параллельной работе с мощной энергосистемой в условиях стационарного возмущения вращающего момента дизеля, обусловленного его спецификой. Установлено, что использование в законе регулирования возбуждения сигнала по производной тока статора позволяет снизить амплитуды колебания электромагнитного момента.

Расчет корней характеристического уравнения, выполненный для указанных условий, дал следующие результаты:

Таблица 1.

Корни характеристического уравнения при $K_{ou} = -50$:

-164,96	-17,94±16,32i	-1,00
-38,46	-14,29	-0,10
-33,33	-10,00	
-25,64	-4,65	
-20,00	-3,33	
-18,83	-1,31±9,69i	

Применение в законе регулирования возбуждения дополнительного сигнала, пропорционального производной тока статора (Табл. 2) приводит к

Таблица 2.

Корни характеристического уравнения при использовании коэффициента регулирования по производной тока статора ($K_{is1} = -3$)

-157,83	-17,94±16,32i	-1,33±9,73i
-38,46	-14,29	-1,00
-33,33	-12,58	-0,10
-30,39±7,47i	-10,00	
-25,64	-3,33	
-20,00	-3,08	

появлению корня с высоким показателем затухания ($-30,39$ 1/с) и частотой, близкой к частоте электромеханических колебаний ротора. Это снижает амплитуды колебаний электромагнитной мощности, что иллюстрируется рис.5, однако при этом возрастает интенсивность работы системы возбуждения и амплитуда колебаний напряжения генератора (рис.6).

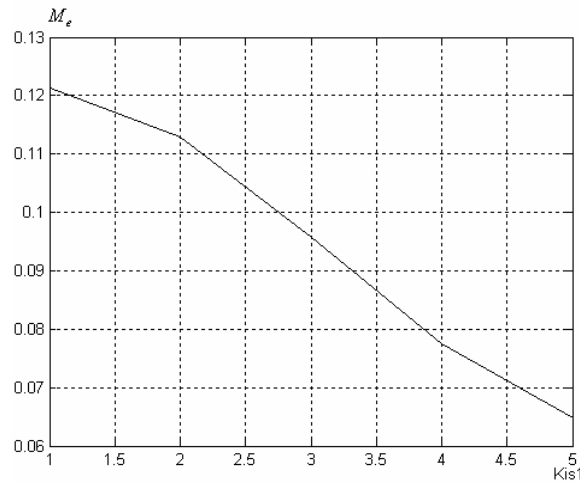


Рис. 5. Зависимость амплитуды колебаний электромагнитного момента M_e генератора от коэффициента регулирования по производной тока статора K_{is1} (-1,-2,-3,-4,-5), при $K_{0u} = -50$, $X_L=0.2$

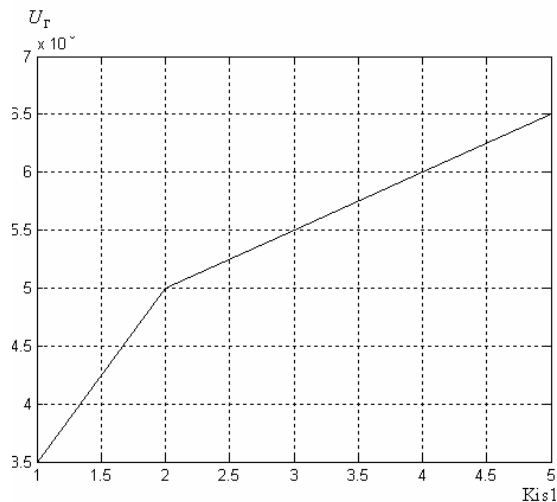


Рис.6. Зависимость амплитуды колебаний напряжения U_{1m} в начале линии от коэффициента регулирования по производной тока статора K_{is1} (-1,-2,-3,-4,-5), при $K_{0u} = -50$, $X_L=0.2$

Таким образом, для условий параллельной работы генератора с мощной системой может быть определено компромиссное значение коэффициента регулирования по производной тока статора (порядка $K_{is1} = -4$), обеспечивающее снижение колебаний электромагнитной мощности генератора и приемлемое качество напряжения.

Условия работы одиночного синхронного генератора на автономную нагрузку являются достаточно благоприятными. Так, возмущение момента первичного двигателя с амплитудой 6% не приводит к каким-либо опасным последствиям с точки зрения колебаний электромагнитной мощности и

напряжения на статоре. Полученные результаты подтверждаются и расчетами корней характеристического уравнения, приведенными в табл.3. При использовании канала регулирования по производной тока статора появляется пара комплексно-сопряженных корней, имеющих значительную отрицательную вещественную часть и мнимую часть, близкую по величине к частоте собственных колебаний ротора генератора.

Таблица 3

Корни характеристического уравнения при использовании коэффициента регулирования по производной тока статора. ($K_{plS}=-3$)

-158,54	-20,00	$-3,76 \pm 6,94i$
-38,21	$-17,94 \pm 16,32i$	-3,33
-33,33	-11,22	-0,10
$-31,53 \pm 6,64i$	-10,00	
-25,64	-5,57	

Таким образом, можно сделать вывод о том, что при автономной работе одиночного генератора на нагрузку колебания мощности подавляются применением канала регулирования по производной тока статора, а колебания напряжения не носят опасного характера.

Более сложные условия возникают в автономной энергосистеме, содержащей в общем случае несколько разнотипных синхронных машин при заданной амплитуде и частоте периодического возмущения со стороны первичного двигателя одного из генераторов. Принималось, что соотношение мощностей исследуемого и параллельно работающего с ним генераторов составляет 1:2.

Следующий ряд зависимостей более подробно иллюстрирует поведение генераторов системы при использовании каналов регулирования по производной статорного тока (рис. 7,8)

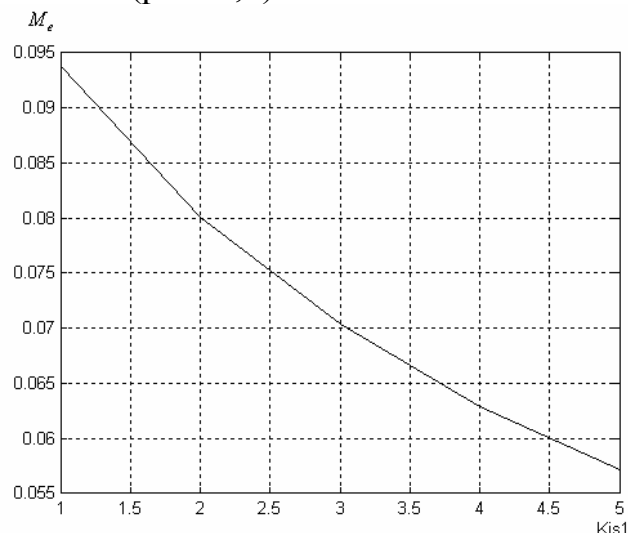


Рис.7. Зависимость амплитуды колебаний электромагнитного момента (M_e) генератора при регулирования по производной тока статора K_{is1} (-1,-2,-3,-4,-5) ,

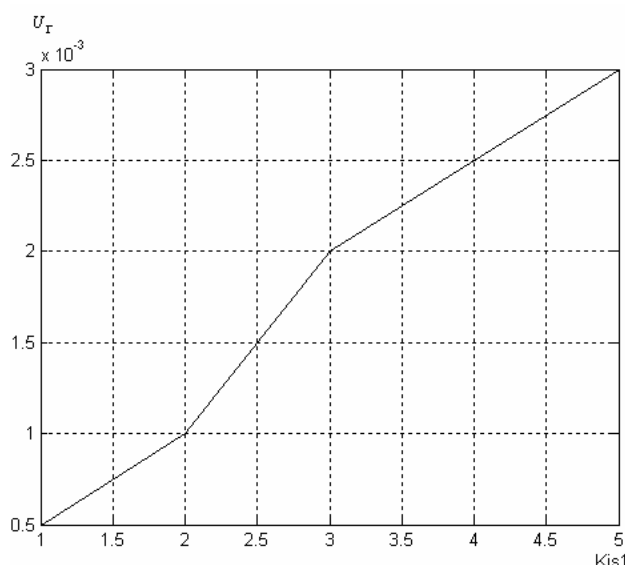


Рис.8..Зависимость амплитуды колебаний напряжения (U_{1m}) начале линии при регулировании по производной тока статора K_{is1} (-1,-2,-3,-4,-5)

Полученные результаты иллюстрируются также и расчетами корней характеристического уравнения. Так, в табл.4 приведены значения корней, рассчитанные с учетом сигнала по производной статорного тока.

Таблица 4.

Корни характеристического уравнения при использовании коэффициента регулирования по производной тока статора. ($K_{plS}=-3$)

-165,23	-20,00	-3,33
-38,15	$-17,94 \pm 16,32i$	$-2,83 \pm 8,90i$
-33,33	-11,21	-0,10
-25,91	-10,00	
-25,64	-4,60	

Таким образом и в случае параллельной работы с генераторами близкой мощности удастся обеспечить подавление колебаний электромагнитного момента и не допустить заметных колебаний напряжения (в данном случае при $K_{is1} = -3$).

Следует отметить, что чем больше будет мощность остальных параллельно работающих генераторов, тем больше данный случай будет приближаться к варианту работы генератора параллельно с системой большой мощности.

В четвертой главе проводится анализ причин разрушения муфт между генератором и редуктором, которые имели мести на агрегатах автономной электростанции с газотурбинным приводом в результате коротких замыканий и последующих переходных процессов. На основании серии расчетов разработаны и обоснованы мероприятия, предотвращающие появление опасных величин скручивающих моментов при аварийных возмущениях.

На второй главе была проанализирована простейшая схема ЭЭС «генератор-линия-шины мощной энергосистемы», результаты которой были

использованы при исследовании переходных процессов автономной системы (рис. 9).

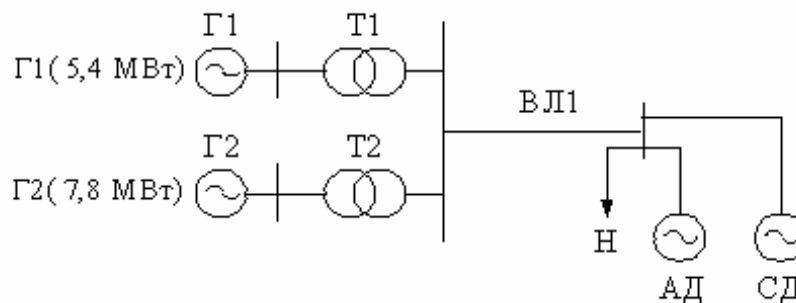


Рис. 9. Упрощенная модель энергосистемы

Система электроснабжения содержит два разнотипных синхронных генератора с газотурбинным приводом (генератор Г1, мощностью 5,4 МВт и генератор Г2 мощностью 7,8 МВт).

Для расчетной схемы рис.9. принимались следующие параметры эквивалентных синхронного и асинхронного двигателей:

Таблица 5.

Параметры эквивалентного синхронного двигателя в собственных относительных единицах.

x_d , о.е.	1,128	x_s , о.е.	0,09
x_q , о.е.	0,731	r_f , о.е.	0,000623
x'_d , о.е.	0,29	r_{rd} , о.е.	0,00446
x''_d , о.е.	0,17	r_{rq} , о.е.	0,00305
x''_q , о.е.	0,16	T_J , сек.	7
r_a , о.е.	0,05	$P_{СД}$, о.е.	0,2

Таблица 6.

Параметры эквивалентного асинхронного двигателя в собственных относительных единицах

$k_{заг}$, о.е.	0,3	r_a , о.е.	0,073
$P_{СТ}$, о.е.	0,05	$x_{srd ном}$, о.е.	0,447
x_d , о.е.	13,063	$x_{srd пуск}$, о.е.	0,237
b_M , о.е.	0,6	$r_{rd ном}$, о.е.	0,05
x_s , о.е.	0,293	$r_{rd пуск}$, о.е.	0,11
T_J , сек.	0,189	$P_{АД}$, о.е.	0,3

Расчет показателей статической устойчивости двухгенераторной модели ЭЭС представлен в таблице 7.

Таблица 7.

Показатели устойчивости двухгенераторной модели ЭЭС

Ближайшие к границе устойчивости корни характеристического полинома	
-7.05 + 1.95i	-1.25
-6.62	-1.10 + 1.79i
-4.73 + 18.97i	-1
-3.09	-0.801 + 130.97i
-2.94	-0.66
-2.44	-0.47
-2.31	-0.342 + 12.875i
-2.16+20.79i	-0.0692 + 121.59i

Рассмотрены следующие мероприятия по снижению скручивающих моментов:

1. Установка разделительных трансформаторов.

Установка разделительных трансформаторов 6/6 кВ уменьшает аварийные величины скручивающего момента между роторами генераторов Г1 и Г2 и турбинами в $2.201/1.487 = 1.48$ и $2.296/1.455 = 1.58$ раз, соответственно. Снижению подвергаются также и послеаварийные величины, которые в данном опыте будут меньше указанных.

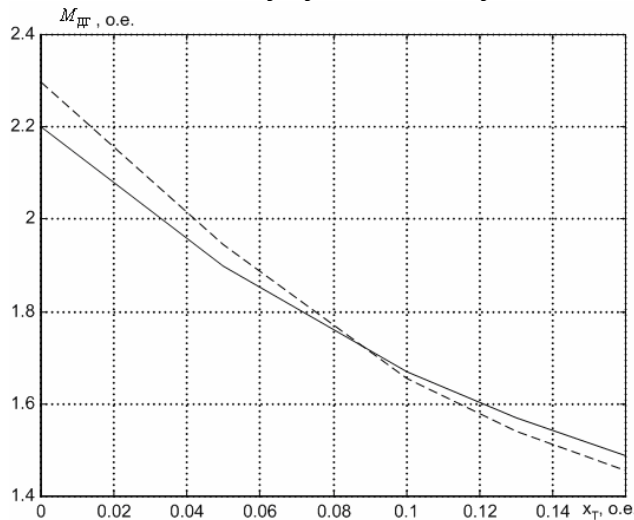


Рис. 10. Зависимость скручивающих моментов между ротором генератора Г1 (сплошная линия) и Г2 (пунктир) и турбиной в аварийном режиме от величины индуктивного сопротивления разделительного трансформатора 6/6 кВ.

2. Снижение скручивающих моментов с помощью последовательного электрического торможения при предельном времени отключения КЗ.

Установка устройства последовательного электрического торможения уменьшает послеаварийную величину скручивающего момента между ротором генераторов Г1 и Г2 и турбиной в $2.063/1.541 = 1.34$ и $2.735/1.96 = 1.40$ раз, соответственно.

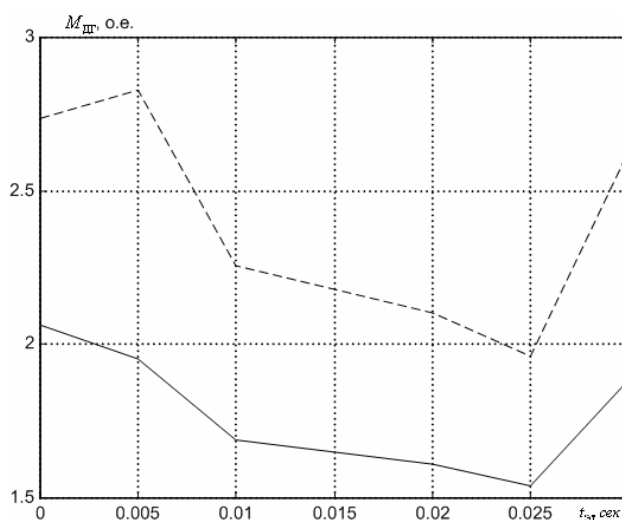


Рис. 11. Зависимость скручивающих моментов между ротором генератора Г1 (сплошная) и Г2 (пунктир) и турбиной в *послеаварийном режиме* от момента включения устройств электрического торможения

Совместное применение различных мероприятий по подавлению крутильных колебаний валопровода при предельном времени отключения двухфазного короткого замыкания иллюстрируется Табл. 8.

Таблица 8.

Таблица 4.5. Сравнение эффективности различных мероприятий по подавлению крутильных колебаний валопровода

Генераторы	Мероприятие	Скручивающий момент генератора Г1 о.е.		Скручивающий момент генератора Г2, о.е.		Примечания
		аварийный	послеаварийный	аварийный	послеаварийный	
Г1+Г2	в отсутствие противоаварийных мероприятий ($P_{Г} = 0,55$ о.е.)	2,201	2,063	2,296	2,735	увеличение ударного момента по отношению к установившемуся режиму в $2,201/0,85 = 2,6$ и $2,735/0,85 = 3,2$ раза, соответственно
	в отсутствие противоаварийных мероприятий (<i>режим сниженной нагрузки</i> $P_{Г} = 0,45$ о.е.)	2,08	1,909	2,19	2,608	увеличение ударного момента по отношению к установившемуся режиму в $2,08/0,85 = 2,4$ и $2,608/0,85 = 3,1$ раза, соответственно
	1) установка разделительного трансформатора (при $\square t_{КЗ} = 0,063$ сек. и $x_T = 0,16$ о.е., $P_{Г} = 0,55$ о.е.)	1,487	–	1,455	–	снижение на 33% и 30% в аварийном режиме, соответственно

2) применение последовательного электрического торможения (при предельном $\square t_{КЗ} = 0,08$ сек., $P_{Г} = 0,55$ о.е.)	–	1,541	–	1,96	снижение на 26% и 29% только в послеаварийном режиме, соответственно
3) установка разделительного трансформатора ($x_T = 0,09$ о.е.) и применение последовательного электрического торможения ($R_T = 0,15$ о.е., $t_{ЭТ} = 0,01$ сек., $\square t_{ЭТ} = 0,15$ сек.) при предельной длительности КЗ $\square t_{КЗ} = 0,08$ сек., $P_{Г} = 0,55$ о.е.	1,727	1,329	1,736	1,575	снижение на 22% и 25% в аварийном, а также на 36% и 43% в послеаварийном режимах, соответственно
4) установка разделительного трансформатора (при $\square t_{КЗ} = 0,08$ сек. и $x_T = 0,16$ о.е., режим сниженной нагрузки $P_{Г} = 0,45$ о.е.)	1,369	1,519	1,351	1,797	снижение на 34% и 38% в аварийном, а также 26% и 31% в послеаварийном режимах, соответственно

Заключение

Основные научные и практические результаты, полученные в работе заключается в следующем.

1. На языке Modelica реализована математическая модель дизель – генератора и системы его регулирования, позволяющая воспроизвести требуемые режимы системы автономного электроснабжения.
2. Выполнено математическое описание элементов автономной энергосистемы, в том числе, разработаны математические модели регулятора частоты вращения изодромного типа и регулятора частоты вращения фирмы «Вудвард».
3. Рассмотрены условия демпфирования колебаний, вызванных неравномерностью вращающего момента первичного двигателя (дизеля) в условиях ЭЭС различной структуры. Определены особенности колебательных процессов при параллельной работе с системой бесконечной

мощности и при работе многоагрегатных систем автономного электроснабжения.

4. Установлена высокая эффективность использования канала регулирования возбуждения по производной тока статора. Показано, что подавление колебаний электромагнитной мощности генератора за счет регулирования возбуждения приводят к увеличению колебаний напряжения на шинах приемной станции. Даны рекомендации по выбору настройки канала регулирования по производной тока статора, обеспечивающих удовлетворение всех ограничений.

5. Выполнено исследование переходных процессов автономной системы электроснабжения, оснащенной генераторами с газотурбинным приводом. Поскольку в практике эксплуатации имели место случаи разрушения муфт между редуктором газовой турбины и генератором (одновременно на обоих агрегатах), то рассмотрены процессы при изолированной работе каждого из генераторов на нагрузку и при их параллельной работе. Именно этот последний случай является наиболее тяжелым с точки зрения величин скручивающих моментов, воздействующих на валопроводы в аварийных и послеаварийных режимах.

6. Показано, что наиболее эффективным мероприятием, снижающим скручивающие моменты, является установка разделительного трансформатора 6/6 кВ. Реализация указанного мероприятия уменьшает аварийные и послеаварийные величины скручивающего момента между ротором генератора и турбиной в $1.375/0.9128 = 1.5064$ и $1.65/1.342 = 1.2295$ раз, соответственно, при одиночной работе генератора Г1 (5,4 МВт) и в $1.828/0.956 = 1.9121$ и $2.092/1.457 = 1.4358$ раз, соответственно, при одиночной работе генератора Г2 (7,8 МВт).

6. Установка устройства последовательного электрического торможения практически не влияя на величину скручивающего момента в аварийном режиме уменьшает послеаварийную величину скручивающего момента между ротором генератора и турбиной для генератора Г1 в $1.65/1.389 = 1.19$ раз; а для Г2 в $2.092/1.438 = 1.455$ раз;

7. Показано, что отключение части синхронной нагрузки практически не влияет на величину скручивающего момента в аварийном режиме, но уменьшает послеаварийную величину скручивающего момента между ротором генератора и турбиной для Г1 в $1.65/1.454 = 1.135$ раз; для Г2 в $2.092/1.923 = 1.088$ раз;

8. При совместном применении различных мероприятий по подавлению крутильных колебаний валопровода показано, что при параллельной работе генераторов эффективность демпфирования аварийной величины скручивающего момента между ротором генератора и турбиной определяется, главным образом, установкой разделительных трансформаторов 6/6 кВ и при $x_T = 0,12$ снижение составляет для Г1 порядка 33%; а для Г2 снижение составляет порядка 30%, .

9. Максимальная эффективность снижения величины скручивающего момента достигается за счет совместного применения разделительного

трансформатора, последовательного электрического торможения и отключения 15% синхронной нагрузки, для Г1 снижение составляет около 35%; а для Г2 снижение составляет около 38%.

10. Несмотря на значительно бóльшие исходные величины скручивающего момента для генератора Г2, за счет применения рассмотренных противоаварийных мероприятий конечные значения момента практически идентичны полученным для генератора Г1.

Основное содержание диссертации отражено в следующих публикациях:

1. Талев, Д. Г. Снижение скручивающих моментов газотурбинных агрегатов автономной системы электроснабжения // Науч.-техн. вед. СПбГТУ. – 2008. - № 4. - С. 180 – 182.
2. Талев, Д. Г. Подавление колебание мощности и напряжения синхронных генераторов с дизельным приводом // Материалы XII Всероссийской конференции по проблемам науки и высшей школы (Фундаментальные исследования и инновации в технических университетах) 14 мая 2008г. – СПб. : изд-во СПбГПУ, 2008. – С. 185.
3. Талев, Д. Г. Расчет опасных скручивающих моментов синхронных генераторов систем автономного электроснабжения // Материалы XII Всероссийской конференции по проблемам науки и высшей школы (Фундаментальные исследования и инновации в технических университетах) 14 мая 2008г. – СПб. : изд-во СПбГПУ, 2008. – С. 186.
4. Талев, Д. Г. Оценка величин и мероприятий по подавлению скручивающих моментов газотурбинных агрегатов автономной системы электроснабжения // Материалы XIII Всероссийской конференции по проблемам науки и высшей школы (Фундаментальные исследования и инновации в технических университетах) 18 мая 2009г. – СПб. : изд-во СПбГПУ, 2009. – С. 241.
5. Талев, Д. Г. Роль автономной энергетики в решении проблем энергетического обеспечения потребителей Ирака // Материалы XIII Всероссийской конференции по проблемам науки и высшей школы (Фундаментальные исследования и инновации в технических университетах) 18 мая 2009г. – СПб. : изд-во СПбГПУ, 2009. – С. 242.