

ИНСТИТУТ АВТОМАТИКИ И ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ
НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК КЫРГЫЗСКОЙ РЕСПУБЛИКИ

КЫРГЫЗСКО – РОССИЙСКИЙ СЛАВЯНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМ.
Б.Н.ЕЛЬЦИНА

Диссертационный совет Д.05.16.532

На правах рукописи

УДК.: 51-7:621.311+621.3.013.8(043.3)

ДЖУНУЕВ ТИМУР ТИЛЕГЕНОВИЧ

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ
УСТОЙЧИВОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ
СИСТЕМЫ**

Специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные
методы и комплексы программ и 05.14.02 – Электростанции и
электроэнергетические системы

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Бишкек 2018

**Работа выполнена в Кыргызском государственном
техническом университете им. И. Раззакова**

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Джунуев Тилеген
(КГТУ им. И. Раззакова)

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Чемборисова Наиля Шавкатовна
(МЭИ)

доктор технических наук
Укуев Бейшенбек Такырбашевич
(КГУСТА им. Н. Исанова)

Ведущая организация: Ошский технологический университет
им. М. Адышева
г. Ош 723503, ул. Исанова, 81а.

Защита состоится «25» мая 2018 года в 14:00 часов на заседании Диссертационного совета Д.05.16.532 при Институте автоматики и информационных технологий Национальной академии наук Кыргызской Республики и Кыргызско-Российском Славянском университете им. Б.Н. Ельцина по адресу: 720071, г. Бишкек, пр. Чуй, 265, ауд. 118.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Национальной Академии Наук Кыргызской Республики по адресу: 720071, г. Бишкек, пр. Чуй, 265 «а» и на сайте ИАИТ НАН КР по адресу www.iait.kg . Email: gulsaat@mail.ru.

Автореферат опубликован « » 2018 г.

Ученый секретарь
Диссертационного совета к.ф.-м.н.

Керимкулова Г.К.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Исследование вопросов устойчивости при возникновении переходных процессов в электроэнергетических системах (ЭЭС) является одной из основных задач, решаемых при проектировании ЭЭС, выборе и оперативном ведении режимов, эксплуатации устройств системной автоматики.

Анализ нарушения устойчивости электроэнергетических систем показывает, что значительная их часть могла бы быть предотвращена за счет выполнения более точных расчетов устойчивости на этапе проектирования и настройки системой автоматики или за счет правильного ведения режима.

В связи с этим вопросы математического моделирования основных элементов ЭЭС, обоснованный выбор методов численного интегрирования систем дифференциальных уравнений, разработка алгоритмов и программ расчета переходных процессов выходят на первый план и являются важной актуальной задачей.

Из большого многообразия возмущающих факторов, возникающих в ЭЭС и приводящие к переходным процессам из одного режима в другой, являются асинхронные режимы.

Общая теория асинхронных режимов синхронных машин в литературе рассматривалась неоднократно. Однако многое в этом вопросе оставалось невыясненным, о поведении которых при асинхронных режимах до последнего времени существовало мнение, что момент, развиваемый синхронным генератором, при асинхронном режиме незначительный.

Этот вывод распространяется как на явнополюсные, так и неявнополюсные генераторы, т.е. считалось, что асинхронный режим для всех синхронных генераторов недопустим. Считалось, что генератор, потерявший возбуждение, в асинхронном режиме сможет отдавать активную мощность, близкую к номинальной, только при скольжении 2-5%. При таких скольжениях в роторе будут иметь место потери, в несколько раз превышающие нормальные потери, поэтому такой режим считался опасным для машин. Практически это выражалось в этом, что при потере возбуждения требовалось немедленное отключение от сети синхронных генераторов, установка для этой цели специальных защит, блокировок и т.п. Так, например, при случайном отключении автомата гашение поля, тут же шла команда на отключение генератора, предписывалось немедленное отключение генераторов при всех прочих причинах потери возбуждения.

Возможность работы генераторов без возбуждения повышает надежность снабжения электроэнергией потребителей и снижает аварийность, так как при потере возбуждения, не вызванной причинами, угрожающими сохранности генератора, он может быть оставлен в работе в асинхронном режиме.

Данный вопрос приобретает актуальность, если речь идет об ЭЭС ограниченной мощности, когда отключение даже одного генератора существенно сказывается на режим энергосистемы.

К примеру, на реконструируемой Бишкекской ТЭЦ введены два блока по 150 МВт и если учесть, что мощность нагрузки Бишкекского энергоузла зимой составляет 400-500 МВт, то отключение даже одного блока приводит к дефициту порядка 20-25%. Это ощутимо и повлечет за собой действия автоматики, начнут срабатывать ступени АЧР. В технологической части ТЭЦ начнется разгрузка блока (охлаждение и т.д.), с последующим разворотом блока при включении генератора в сеть. Все вышеуказанное может привести к системной аварии, т.е. энергосистема разделится на две части с разными частотами (т.е. наступит, так называемый, двухчастотный режим). И такие случаи в Кыргызской энергосистеме были.

За время работы в асинхронном режиме появляется возможность выяснить причину потери возбуждения и принять меры к его восстановлению от своего или резервного возбуждения. Возможность даже кратковременной работы синхронного генератора в асинхронном режиме позволяет значительно упростить переход на резервное возбуждение.

Из проведенного анализа следует, что разработка новой методики точного расчета параметров асинхронных режимов при потере возбуждения, необходима, имеет важное научно-производственное значение и является актуальной проблемой.

Цель работы. Повышение эффективности (надежности) режимов функционирования ЭЭС при внештатных ситуациях за счет применения современных технологий математического моделирования и нового метода расчета точных эксплуатационных параметров.

Задачи исследования:

1. Анализ современного состояния Кыргызской энергосистемы и существующих способов исследования асинхронных режимов работы.
2. Разработка и обоснование математических моделей основных устройств ЭЭС в асинхронных режимах ее работы.
3. Разработка математической модели агрегата: турбина – синхронный генератор в асинхронном режиме при потере возбуждения.
4. Разработка методики расчета асинхронного режима при потере возбуждения.
5. Анализ результатов расчетов и разработка рекомендаций по принятию решений в условиях эксплуатации в асинхронном режиме при потере возбуждения.

Методы исследований. В диссертационной работе использованы современные технологии математического моделирования элементов ЭЭС и вычислительного эксперимента, теория электромагнитных и электромеханических переходных процессов в ЭЭС, теория электрических машин. Исследования проводились с применением Microsoft Excel и компьютерного моделирования в среде Matlab. Адекватность разработанной методики расчета подтверждена сравнением с реальными осциллограммами асинхронных режимов, полученных в опытных исследованиях на генераторах, используемых в эксплуатации.

Научная новизна проведенных исследований заключается в том, что:

1. Получена математическая модель синхронного генератора во взаимной системе относительных единиц, описывающих переходные процессы по полным дифференциальным уравнениям, позволяющая определить выходные параметры режима;
2. Разработана математическая модель синхронного генератора при гашении магнитного поля в обмотках ротора;
3. Разработана математическая модель синхронного генератора в асинхронном режиме при потере возбуждения с разомкнутой обмоткой возбуждения;
4. Разработана математическая модель синхронного генератора в асинхронном режиме при потере возбуждения с замкнутой обмоткой возбуждения.
5. Получена математическая модель агрегата: турбина – генератор в асинхронном режиме при потере возбуждения, позволяющая определить параметры режима для условия ресинхронизации синхронного генератора.
6. Впервые разработана методика расчета асинхронного режима синхронного генератора при потере возбуждения на базе системы полных дифференциальных уравнений, позволяющая более точно рассчитывать параметры режима при переходном процессе.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Математическая модель синхронного генератора при гашении магнитного поля в цепи генератора.
2. Математические модели синхронного генератора в асинхронном режиме при потере возбуждения.
3. Методика расчета асинхронного режима при потере возбуждения.
4. Результаты выполненных расчетов асинхронных режимов синхронного генератора при потере возбуждения и рекомендации по принятию решений в условиях эксплуатации в данных режимах

Практическая ценность работы заключается в следующем:

1. Получены параметры режима, которые определяют динамические свойства синхронного генератора в асинхронном режиме при потере возбуждения, на основе которых появляется возможность управления режимом синхронного генератора.
2. Разработаны математические модели синхронного генератора при потере возбуждения, позволяющие исследовать основные особенности протекание асинхронных режимов.
3. На основе разработанной методики расчета асинхронных режимов исследованы влияние активных и индуктивных сопротивлений контуров ротора и статора на протекание переходного процесса в синхронном генераторе в указанном режиме.
4. Определены оптимальные условия для успешной ресинхронизации машины с сетью: диапазон изменения скольжения, нарастание

асинхронного тормозящего момента на валу ротора генератора, темп снижения вращающего момента турбины и т.д.

5. Выявлено, что для покрытия потребляемой от сети реактивной мощности синхронным генератором в асинхронном режиме вполне допустима перегрузка других генераторов, не превышающая 10-15%.

Реализация результатов работы

1. Разработанная методика расчета асинхронных режимов при потере возбуждения используется в учебном процессе на кафедре «Электроэнергетика» КГТУ им. И. Раззакова.
2. Получены акты об использовании разработанной методики расчета асинхронных режимов в ОАО «НЭСК».

Обоснованность и достоверность полученных результатов основывается удовлетворительной сходимостью расчетов с экспериментальными осциллограммами асинхронного режима, а также соответствием полученных результатов данным фундаментальных источников.

Личный вклад автора в совместных работах в среднем составляет 70-80% от полного объема описанных результатов и заключается в разработке математических моделей и алгоритмов расчета асинхронных режимов синхронных генераторов при потере возбуждения, проведении и анализе расчетов их режимных параметров, а также в разработке методики расчета асинхронных режимов при потере возбуждения.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на:

- На восьмой Международной научно-технической конференции. Энергетика: управление, качество и эффективность использования энергоресурсов: – Благовещенск; на теоретической и прикладной научно-технической конференции, 2015;

- на Международном семинаре «Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики». Институт систем энергетики СО РАН и ОАО «Национальная энергетическая холдинговая компания» Кыргызской Республики, г. Бишкек, 2017

- на Международной научно-технической конференции «Энергетика: состояние, проблемы, перспективы». Бишкек, 2017

Публикации. По результатам выполненных исследований опубликовано 12 печатных работ, в том числе 9 в изданиях, рекомендованных ВАК КР, 3 в иностранных изданиях, 4 в личном авторстве и свидетельство на изобретении 2014г.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключение, списка использованных источников и 4 приложений. Она изложена на 145 страницах машинописного текста, содержит 2 таблицы, 37 рисунков и 4-х приложений на 38 стр. Список использованных литературы включает 102 наименования на 11 страницах.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулирована ее цель и научные задачи. Представлены научная новизна и практическая ценность работы. Сформулированы основные положения, выносимые на защиту. Отражен уровень апробации темы диссертации и объем публикаций полученных результатов в печати. Приведены данные по структуре и объему диссертации.

В первой главе проведен обзор литературы по асинхронным режимам при потере возбуждения, дана их краткая характеристика. Проанализировано современное состояние энергосистемы Кыргызской республики, которая в настоящее время работает с дефицитом мощности и весьма чувствительна к любым изменениям параметров режима. Показано, что допустимость асинхронного режима, прежде всего, определяется величиной скольжения. При этом быстродействующая разгрузка генератора (уменьшение момента турбины) после потери возбуждения уменьшает скольжение, и асинхронный режим может оказаться возможным.

Как показал анализ асинхронных режимов, переходные процессы, возникающие в таких режимах, необходимо рассчитывать на основе применения полных дифференциальных уравнений Горева-Парка, позволяющих учитывать все изменения параметров режима и основан на использовании численных методов интегрирования. Для создания методики расчета переходных процессов как в самом генераторе, так и в системе “турбина – генератор” во взаимосвязи с внешней сетью возникла необходимость разработки математических моделей этих элементов для различных этапов переходных процессов:

- а) процесса гашения магнитного поля ротора;
- б) собственно асинхронного режима.

Заключение:

- Получены основные дифференциальные уравнения синхронного генератора, описывающие динамические свойства в асинхронном режиме.
- Разработана базовая математическая модель синхронного генератора во взаимной системе относительных единиц и адаптирование ее для приведенных выше этапов переходных процессов.

Во второй главе выбраны координатные системы d , q – жестко связанные с ротором, позволяющие определять параметры в исходном режиме и момент синхронизации, а в переходном асинхронном режиме используется координатная система d_s , q_s , произвольно вращающаяся относительно синхронных осей.

Генерирующий агрегат рассматривается как структура из пяти элементов: генератора, системы возбуждения, автоматического регулятора возбуждения (АРВ), первичного двигателя (турбины) и автоматического регулятора скорости (АРС) (рис. 1).

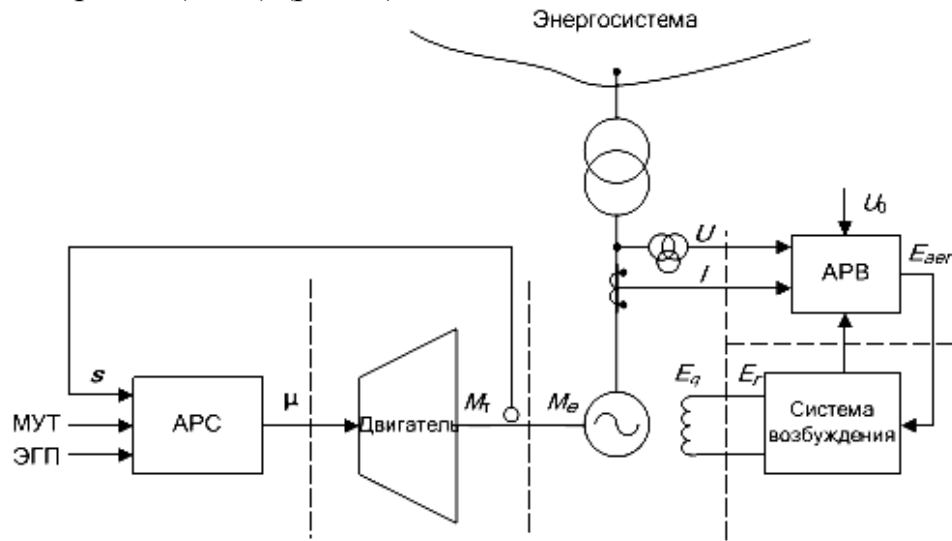


Рис. 1. Структурная схема агрегата

На примере первой турбины рассмотрена динамика процесса изменения мощности и момента на валу турбины при изменении расхода пара, которая с достаточной степенью точности воспроизводится с помощью цепочной структурной схемы (рис. 2)

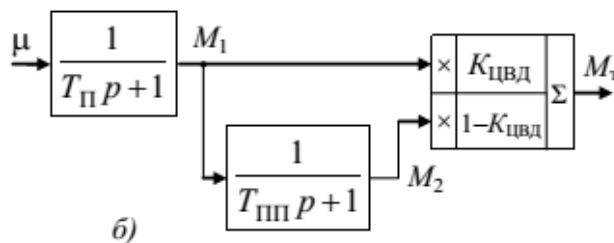
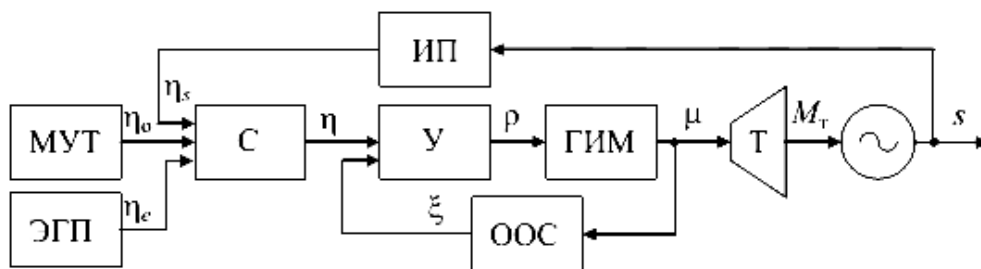


Рис. 2. Цепочная структурная схемы турбины

и которой соответствует следующая система уравнений (1):

$$\begin{aligned} \frac{dM_1}{dt} &= \frac{1}{T_{\Pi}}(\mu - M_1), \\ \frac{dM_2}{dt} &= \frac{1}{T_{\Pi\Pi}}(M_1 - M_2), \end{aligned} \quad (1)$$

Совместно с объектом регулирования (агрегатом турбина – генератор) АРС образует замкнутую систему автоматического регулирования (САР) по отклонению частоты пропорционального типа (рис. 3):



На основе функциональной схемы построена структурная схема АРС паровых и гидравлических турбин (рис. 4).

Регуляторы обладают нечувствительностью z (мертвая зона), которая регламентируется техническими условиям и характеризует техническое совершенство регулятора. Нечувствительность регуляторов паровых турбин $z=0,15$ Гц или 0,03%, гидротурбин $z=30$ мГц или 0,06%. В энергообъединениях Западной Европы к регуляторам скорости предъявляют более высокие требования, нечувствительность регуляторов турбин не должна превышать 10 мГц или 0,02 %.

Переходные процессы, возникающие при гашении магнитного поля ротора и в асинхронном режиме описываются полными дифференциальными уравнениями Горева – Парка:

$$\begin{aligned}
& -p\psi_d - \omega_s(1+s)\psi_q - ri_d = u_d; \\
& \omega_s(1+s)\psi_d - p\psi_q - ri_q = u_q; \\
& p\psi_f + r_f i_f = u_f; \\
& p\psi_{kd} + r_{kd} i_{kd} = 0; \\
& \dots\dots\dots \\
& p\psi_{iq} + r_{iq} i_{ik} = 0; \\
& \dots\dots\dots \\
& J\omega_s p s + \frac{3}{2}(\psi_d i_q - \psi_q i_d) = m_T,
\end{aligned} \tag{2}$$

где $k = 1, 2, \dots, n$, $i = 1, 2, \dots, m$.

$s = \frac{\omega - \omega_s}{\omega_s}$ - скольжение ротора машины относительно синхронной оси,

вращающейся с постоянной угловой частотой ω_s , которое положительно при скорости вращения, большей синхронной; J – момент инерции ротора;

Выражения для потокосцеплений статорных и роторных контуров имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} \psi_d &= L_d i_d + M_{ad} i_f + \sum_{k=1}^{k=n} M_{ad} i_{kd}; \\ \psi_q &= L_q i_q + \sum_{i=1}^{i=m} M_{aq} i_{id}; \\ \psi_f &= \frac{3}{2} M_{ad} i_d + L_f i_f + \sum_{k=1}^{k=n} M_{ad} i_{kd}; \\ \psi_{1d} &= \frac{3}{2} M_{ad} i_d + L_{1d} i_{1d} + M_{ad} i_f + \sum_{k=1}^{k=n} M_{ad} i_{kd}; \\ &\dots\dots\dots \\ \psi_{1q} &= \frac{3}{2} M_{aq} i_q + L_{1q} i_{1q} + \sum_{i=2}^{i=m} M_{aq} i_{iq}, \\ &\dots\dots\dots \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

В настоящее время мощные синхронные машины снабжены с АРВ сильного действия, в данной главе моделирование регулятора сильного действия рассмотрен на примере современного микропроцессорного АРВ типа АРВ-М, структурная схема которой представлена на рис. 5.

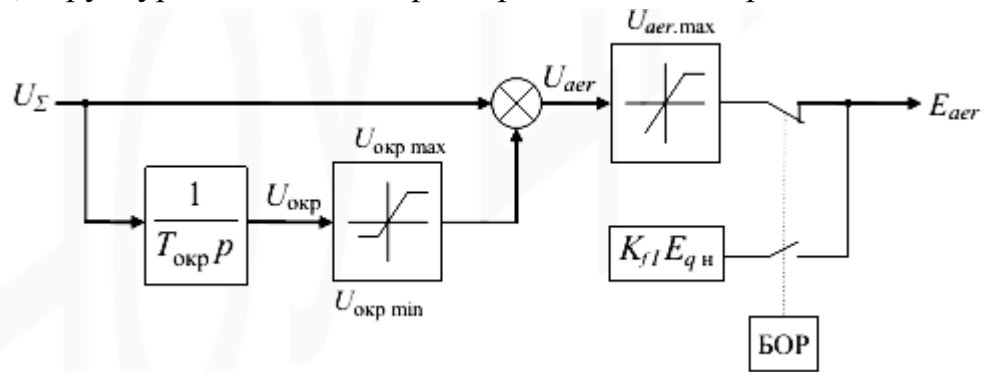


Рис. 5. Структурная модель цифрового регулятора возбуждения сильного действия типа АРВ-М

В АРВ-М реализованы традиционные для регуляторов сильного действия функции ограничения режимных параметров. В структурной модели учтены ограничение перегрузки по току ротора (ОПР) с выдержкой времени, зависящей от кратности перегрузки, ограничение минимального

возбуждения(ОМВ). Могут быть заданы три характеристики ОМВ: при $U \leq 0,9$, $U = 0,1$ и при $U \geq 1,1$. Характеристики ограничения перегрузки и минимального возбуждения аппроксимируются кусочно - линейными функциями. При возникновении режима ограничения вместо канала регулирования по напряжению генератора в работу вступает канал пропорционально-интегрального регулирования ограничиваемого параметра относительно уставки ограничителя. В установившемся режиме ограничиваемый параметр равен уставке. Вывод ограничителя из работы производится, когда выход канала напряжения начинает действовать в сторону, противоположную действию ограничителя.

Рассмотренной структурной схеме и режимам работы АРВ-М соответствует следующая математическая модель регулятора. Сигнал канала напряжения при отклонении напряжения генератора от заданной уставки дает уравнение

$$U_u = K_{OU} E_{qn} (U_0 (1 + \frac{\alpha}{100} s_U f_n) + I_p x_{mp} \frac{K_{mp}}{100} - U) \quad (4)$$

где K_{OU} – коэффициент передачи канала напряжения, е.в.н./е.н.с.,

E_{qn} – номинальная ЭДС возбуждения, е.н.с./е.в.н.,

U_0 – уставка напряжения, е.н.с.,

α – коэффициент, учитывающий зависимость уставки напряжения от частоты, % на 1 Гц отклонения частоты от номинальной f_n ,

I_p – реактивная составляющая тока генератора, н.о.е.,

$x_{тр}$ – сопротивление трансформатора, приведенное к номинальным мощности и напряжению генератора, н.о.е.

Заключение:

- Выбран метод численного интегрирования систем дифференциальных уравнений, описывающих электромагнитные переходные процессы в синхронной машине в асинхронном режиме ее работы при потере возбуждения.

- Разработана универсальная базовая модель синхронного генератора, являющаяся основной для создания математических моделей синхронной машины на всех этапах переходного процесса асинхронного режима при потере возбуждения.

Третья глава посвящена разработке базовой математической модели синхронного генератора, на основе которой разработаны: математическая модель синхронного генератора при гашении магнитного поля ротора, математическая модель синхронного генератора в асинхронном режиме при потере возбуждения, математическая модель агрегата: турбина – синхронная машина, программа и алгоритм расчета переходных процессов при

асинхронном режиме. Впервые разработана методика расчета асинхронных режимов при потере возбуждения.

Математическая модель синхронного генератора в асинхронном режиме при разомкнутой обмотке возбуждения ($i_f=0$) имеет вид:

$$P \begin{bmatrix} i_d \\ 0 \\ i_{1d} \\ i_q \\ i_{1q} \end{bmatrix} = -A \cdot \begin{bmatrix} U_d \\ -U_f \\ 0 \\ U_q \\ 0 \end{bmatrix} \cdot \omega_s - A \cdot s \cdot A \cdot \begin{bmatrix} i_d \\ 0 \\ i_{1d} \\ i_q \\ i_{1q} \end{bmatrix} + A \cdot R \cdot \begin{bmatrix} i_d \\ 0 \\ i_{1d} \\ i_q \\ i_{1q} \end{bmatrix}; \quad (5)$$

Из второго уравнения системы (5) можно получить выражение для напряжения на кольцах ротора:

$$U_f = \left[\frac{A_{21}}{A_{22}} (U_d + (1+s)X_q i_q + (1+s)X_{aq} i_{1q} + R i_d) + \frac{A_{23}}{A_{22}} R_{1d} i_{1d} \right] \Delta t \quad (6)$$

т.е. на каждом шаге интегрирования U_f определяется по (6).

Математическая модель синхронного генератора в асинхронном режиме при замкнутой обмотке возбуждения ($U_f=0$):

$$P \begin{bmatrix} i_d \\ i_f \\ i_{1d} \\ i_q \\ i_{1q} \end{bmatrix} = -A \cdot \begin{bmatrix} U_d \\ -U_f \\ 0 \\ U_q \\ 0 \end{bmatrix} \cdot \omega_s - A \cdot s \cdot A \cdot \begin{bmatrix} i_d \\ i_f \\ i_{1d} \\ i_q \\ i_{1q} \end{bmatrix} + A \cdot R \cdot \begin{bmatrix} i_d \\ i_f \\ i_{1d} \\ i_q \\ i_{1q} \end{bmatrix}; \quad (7)$$

Математическая модель турбины приведена в (1).

При выдаче команды на изменение активной мощности агрегата изменяется уставка АРС. Новому значению мощности агрегата P в установившемся режиме при номинальной частоте соответствует момент турбины

$$M_T = \frac{P}{S_{н\Gamma} \cdot \kappa_{np}}, \quad (8)$$

где κ_{np} - коэффициент приведения момента турбины к номинальным условиям.

Изменение скорости вращения ротора (уравнение механики) определяется, как указывалось ранее, следующим образом:

$$T_J PS = M_T - M_{\mathcal{O}}, \quad (9)$$

где T_J – постоянная инерции агрегата в [сек].

Электромагнитный момент, действующий на валу ротора, определяется как:

$$M_{\mathcal{O}} = \Psi_d i_q - \Psi_q i_d \quad (10)$$

Условная скорость определяется как

$$\omega = \omega_0 + (M_T - M_{\Sigma}) \frac{\omega_s}{T_J} dt \quad (11)$$

АРС турбины, следуя за изменением частоты вращения машины, прикрывает регулирующие клапаны и начинает уменьшать частоту вращения турбины. Уравнение движения ротора с учетом АРС турбины при неполностью открытых окнах золотника имеет вид:

$$M_T = M_{T0} + (M_{T0} - M_T) \frac{\beta}{T_c} t - M_{T.ном} \frac{s}{\delta_{н.р.} T_c} \Delta t \quad (12)$$

При полностью открытых окнах золотника $M_T = M_{T[0]}$ и уравнение изменение момента турбины примет вид:

$$M_T = M_{T(0)} - M_{T.ном} \frac{\Delta t}{\mu_{х.х} T_c} \quad (13)$$

Как известно, в асинхронно работающей машине наличие возбуждения приводит к пульсациям скольжения от величины S_{max} до S_{min} . Выше приведенные формулы моделирования АРС турбины отражают, в общем, все случаи асинхронных режимов.

В случае, когда асинхронный режим протекает без возбуждения (в нашем случае потеря возбуждения) пульсации скольжения отсутствуют. Поэтому момент турбины принимают либо постоянным, либо учитывают реакцию турбины на изменение скорости посредством так называемого коэффициента самовыравнивания. При этом момент турбины можно записать в виде:

$$M_T = M_{T0} - KS, \quad (14)$$

где M_{T0} - момент при синхронной скорости.

Последнее выражение обусловлено тем, что как у паровых, так и у гидравлических турбин при неизменном положении регулирующих устройств (АРС) момент с повышением скорости падает. Такая зависимость момента от скорости приводит к дополнительному механическому демпфированию и способствует затуханию колебаний ротора, аналогично асинхронному моменту, возникающему ротору.

Величина коэффициента K , иногда которую называют коэффициентом самовыравнивания, зависит от типа машины и величины загрузки. Рекомендуют принимать его при номинальной нагрузке равным единице, а при нагрузках от 0 до $0,5 P_n$ равным 0,5.

При численном интегрировании системы дифференциальных уравнений, описывающих переходный процесс в синхронном генераторе в

асинхронном режиме использовался, как указывалось ранее, метод Рунге-Кутты четвертого порядка.

В соответствии с этим система уравнений в разностной форме записывается:

$$\begin{pmatrix} i_{d_{n+1}} - i_{d_n} \\ i_{f_{n+1}} - i_{f_n} \\ i_{1d_{n+1}} - i_{1d_n} \\ i_{q_{n+1}} - i_{q_n} \\ i_{1q_{n+1}} - i_{1q_n} \end{pmatrix} = -|A|^{-1} \cdot \begin{pmatrix} U_{d_n} \\ U_{f_n} \\ 0 \\ U_{q_n} \\ 0 \end{pmatrix} \cdot \Delta t + \left(|A|^{-1} \cdot |s| \cdot |A| \right) \cdot \begin{pmatrix} i_{d_n} \\ i_{f_n} \\ i_{1d_n} \\ i_{q_n} \\ i_{1q_n} \end{pmatrix} \cdot \Delta t + |A|^{-1} \cdot |R| \cdot \begin{pmatrix} i_{d_n} \\ i_{f_n} \\ i_{1d_n} \\ i_{q_n} \\ i_{1q_n} \end{pmatrix} \Delta t, \quad (15)$$

Все параметры режима с индексом «n» определены на предшествующем шаге интегрирования.

Движение ротора (относительное) синхронного генератора определится из выражения (15) (шестое уравнение):

$$\omega_{n+1} = \omega_n + \left[(M_{Tn+1} - M_{Tn}) - (M_{\mathcal{E}n+1} - M_{\mathcal{E}n}) \right] \frac{\Delta t}{T_J}. \quad (16)$$

При этом скольжение S можно записать как $S_{n+1} = \frac{\omega_{n+1} - \omega_n}{\omega_n}$, где $\omega_n = \omega_s$

принята за синхронную скорость.

Разработана методика расчета асинхронного режима при потере возбуждения на основе базовой математической модели синхронного генератора во взаимной системе относительных единиц. За базисную мощность принята номинальная мощность синхронного генератора, а за базисное напряжение – его номинальное напряжение.

На первом этапе расчета рассматривается процесс гашения магнитного поля ротора.

В момент погашения дуги при $t = t_d$ ток в ОВ $t_f = 0$ и, собственно, с этого момента начинается асинхронный режим генератора.

Вторым этапом расчета является определение характеристик параметров асинхронного режима работы синхронного генератора. При потере возбуждения, как указывалось ранее (§ 3.1.3), возможны два режима: асинхронный режим при разомкнутой ОВ, когда имеется разрыв в контуре ОВ и возбудителя и асинхронный режим при замкнутой ОВ, например, когда обмотка возбуждения замкнута на малое сопротивление в случае короткого замыкания в цепи возбуждения, на якорь возбудителя при потере возбуждения в возбудителе и на сопротивление гашения поля в случае отключения АГП. Якорь возбудителя имеет очень малое сопротивление, поэтому замыкание ОВ на якорь возбудителя можно рассматривать как короткое замыкание в цепи возбуждения.

Следует отметить, что в случае разомкнутой ОВ напряжение на ОВ уже не будет величиной постоянной. Поэтому необходимо определить изменения напряжения U_f :

$$U_f = \frac{A_{21}}{A_{22}} (U_d + (1+S)X_q i_q + (1+S)X_{aq} i_{1q} + R i_d) + \frac{A_{23}}{A_{22}} R_{1d} i_{1d}, \quad (17)$$

Т.е. на каждом шаге интегрирования напряжение U_f будет определяться по данному выражению.

В случае замкнутой ОВ $U_f=0$, а далее решается система уравнений в разностной формуле (15).

Следует отметить, что весь процесс расчета от гашения магнитного поля ротора и асинхронного режима непрерывен.

Заключение:

- Разработана математическая модель синхронного генератора при гашении магнитного поля ротора при потере возбуждения.
- Разработана математическая модель синхронного генератора в асинхронном режиме при разомкнутой и замкнутой обмотке возбуждения. Получено выражение для определения напряжения на кольцах ротора в асинхронном режиме, позволяющая использовать модель в расчетах без изменения ее структуры.
- Разработана математическая модель агрегата: турбина – синхронный генератор, которая позволяет представлять турбину различными моделями – уточненной при больших скольжениях ($2\div 4\%$) и приближенной – при малых скольжениях ($0,02\div 0,06\%$).

В четвертой главе проведены аналитические исследования математических моделей режимов работы синхронных генераторов.

Как отмечалось ранее (гл. 1), гашение магнитного поля ротора при потере возбуждения состоит из двух стадий: первой – когда в дугогасящей решётке горит дуга и соответственно, ток ротора протекает как в ОВ, так и в демпферной обмотке (рис. 6, а, б); второй – когда дуга погасла и ток в ОВ $i_f=0$, но ток в демпферной обмотке ещё не затух (рис. 6 а, б). Время гашения дуги составляет около 0,11 с.

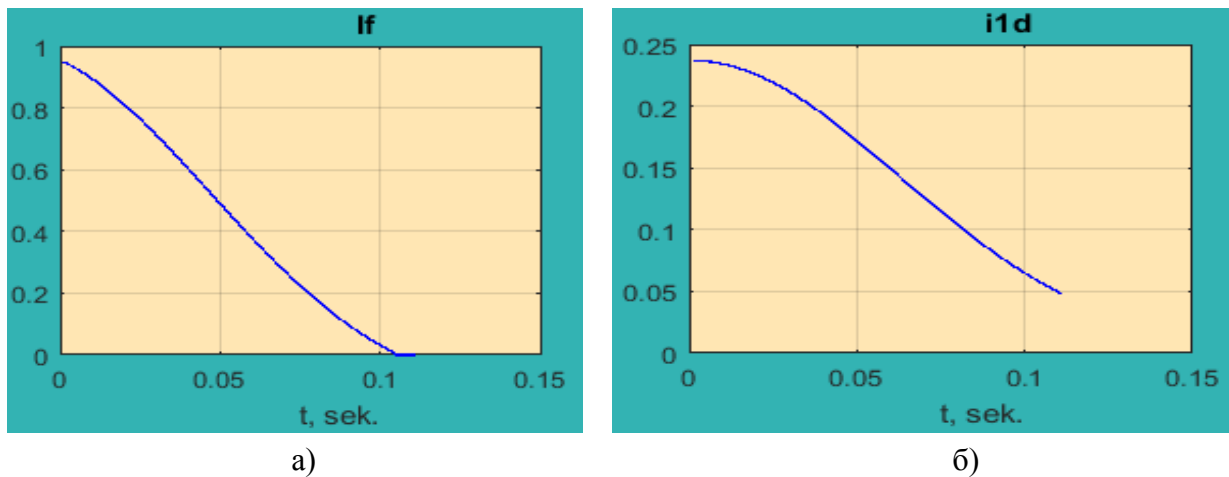


Рис. 6. Изменение токов в ОВ и демпферной обмотке при гашении магнитного поля ротора

На рис. 7, а, б представлены изменения токов во внешней сети, связанной с электрической системой.

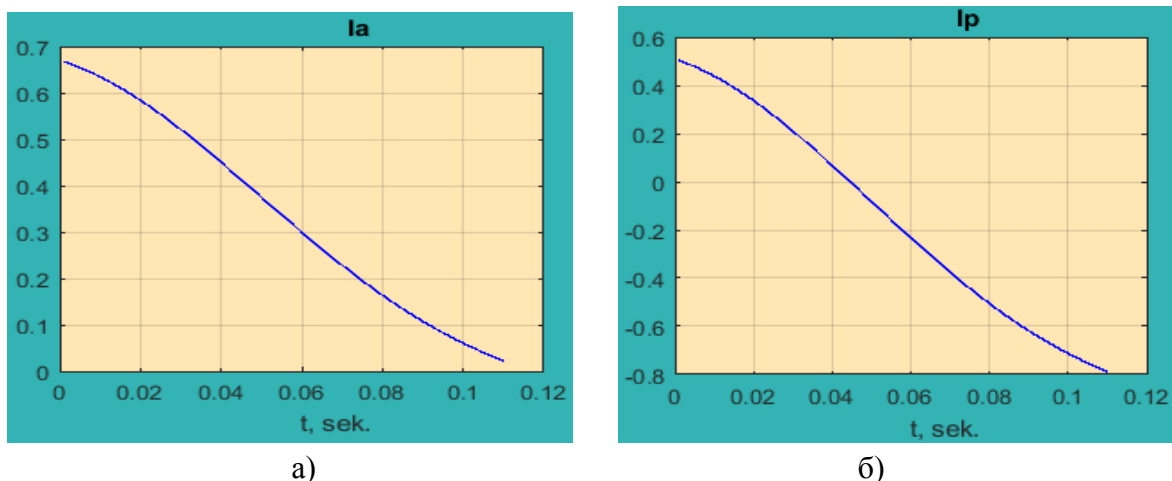


Рис. 7. Кривые изменения активного и реактивного тока синхронного тока

Уменьшение активного и реактивного токов в процессе гашения магнитного поля наглядно видно на векторной диаграмме, представленной на рис. 8, а, в исходном режиме.

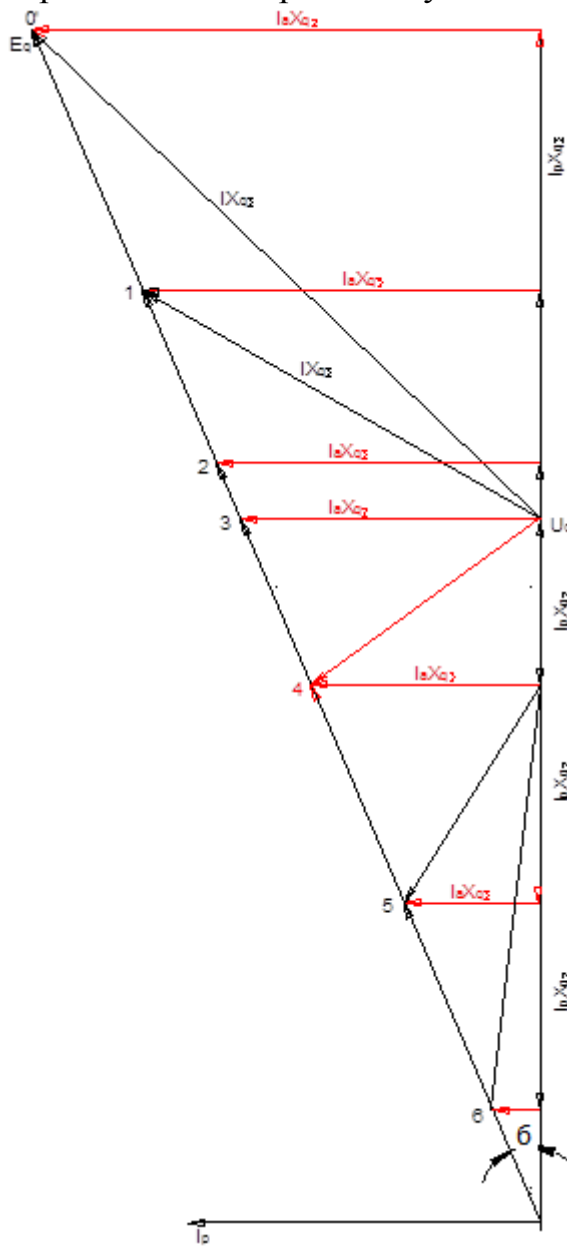
В исходном режиме E_q составляет 1,8 о.е. (точка 0' на векторной диаграмме), угол между напряжением системы U_c и E_q составит $\delta=26.59^\circ$, причем на время гашения поля t угол не меняется. С уменьшением тока возбуждения значение э.д.с. E_q уменьшается по модулю (по прямой 00'). Как видно из векторной диаграммы с уменьшением э.д.с. E_q уменьшаются значения активного $I_a X_{q\Sigma}$ и реактивного $I_p X_{q\Sigma}$ слагаемых падений напряжения (точка 1), так как уменьшаются значения активного I_a и реактивного I_p слагаемых токов, что видно из графиков, представленных на рис. 7, а, б.

В точке 3 реактивный ток, выдаваемый в сеть синхронным генератором равен 0 и угол между напряжением системы U_c и током I равен 0° ($\phi_c=0$) (точка

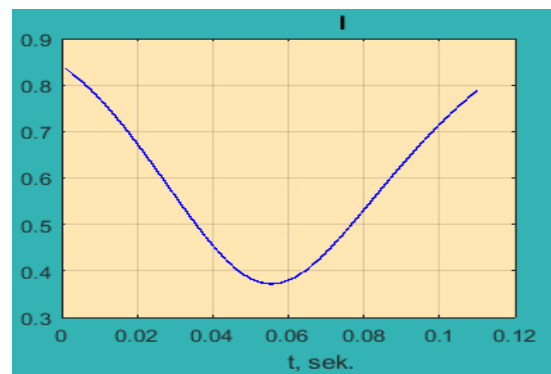
а на рис. 8, г), т.е. генератор не выдает реактивную мощность. Передача активной мощности уменьшается с уменьшением активного тока:

$$I_a = \frac{E_q - U_c}{X_{q\Sigma}}.$$

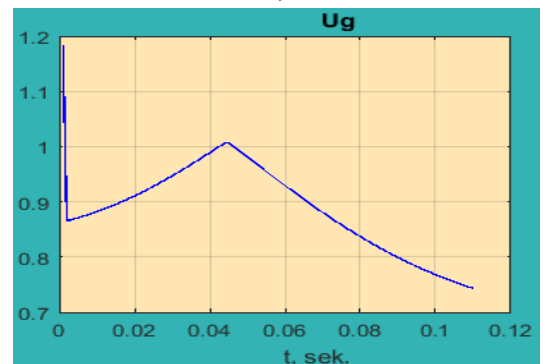
Дальнейшее снижение э.д.с. E_q (точка 4) приводит к потреблению реактивной мощности от сети, но передача активной мощности продолжается, угол φ_c меняет знак (рис. 8 г, точке б), синхронный генератор работает с опережающим $\cos\varphi_c$, т.е. синхронный генератор переходит в режим асинхронного генератора, выдавая в сеть активную мощность и потребляя от сети реактивную мощность.



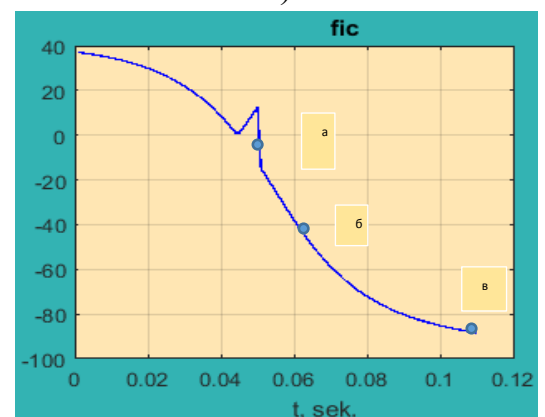
а)



а)



б)



в)

Рис. 8. Векторная диаграмма синхронного генератора (а) при гашении магнитного поля ротора и кривые изменения тока статора (б), напряжения на зажимах генератора (в), угла φ_c (г)

Как показано на векторной диаграмме (рис. 9) в момент погасания дуги реактивный ток достигает своего максимального значения 0,8 о.е. и отстает от напряжения генератора U_r на 90° . Значение активного тока I_a практически равно 0. Как указывалась ранее, с этого момента начинается асинхронный режим генератора, генератор потребляет от сети реактивную мощность и начинает передачу активной мощности (рис. 9).

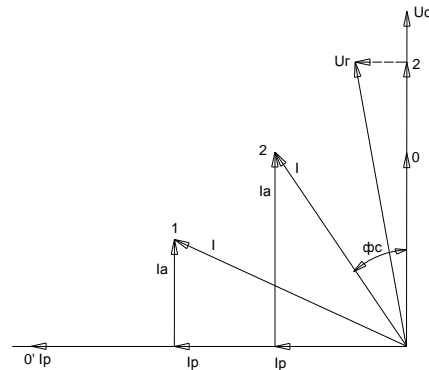


Рис. 9. Векторная диаграмма изменений тока и напряжения в асинхронном режиме

Как видно из векторной диаграммы с увеличением активной составляющей тока статора I_a , а, следовательно, и активной мощности, выдаваемой в сеть, реактивная составляющая тока I_p , а, следовательно, и реактивной мощности, уменьшается (рис. 10). Изменение токов и напряжения на генераторе представлены на рис. 11.

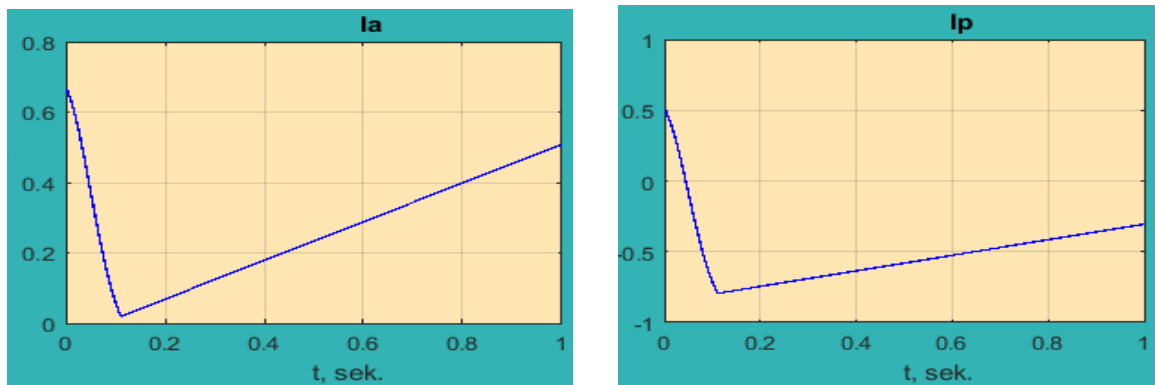


Рис. 10. Изменение активного и реактивного токов при разомкнутой ОБ

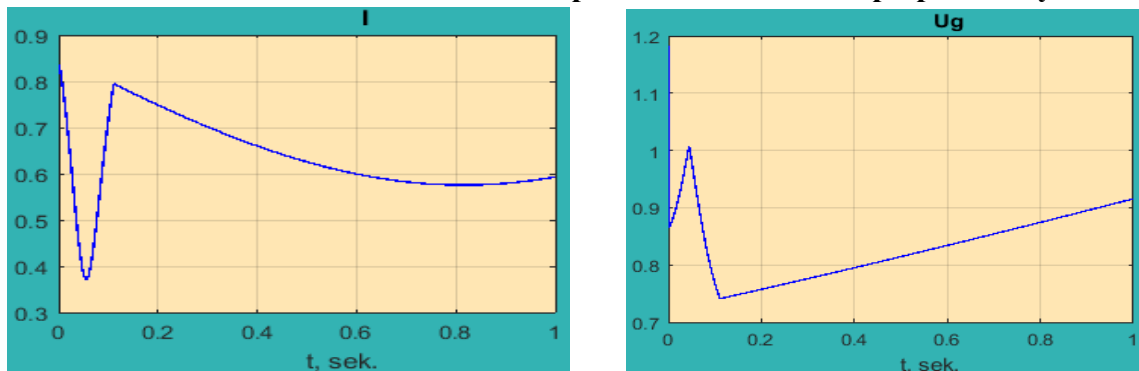


Рис. 11. Изменение полного тока статора и напряжения на выводах генератора при разомкнутой ОБ

Значение электромагнитного момента M_e (рис. 12, а) перед подачей возбуждения составил 0,37 о.е. или 55% от номинального, поэтому уменьшение мощности турбины или снижение статической характеристики АРС составит 45%, т.е. при этом тормозной электромагнитный момент уравнивает вращающий момент турбины.

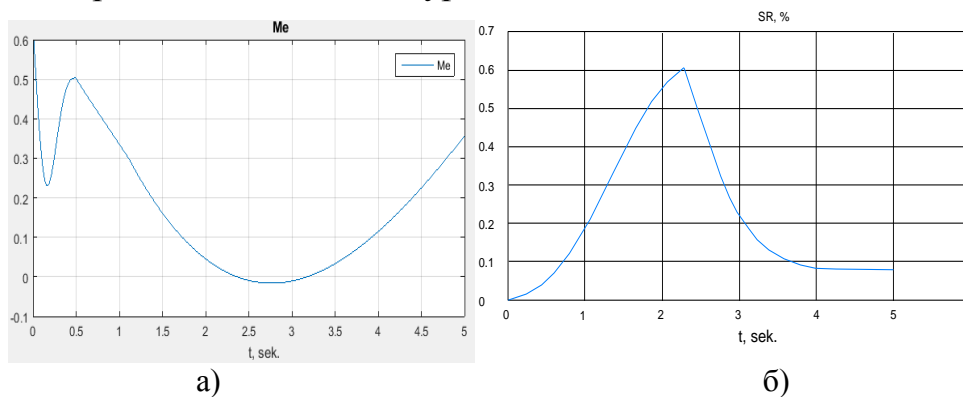


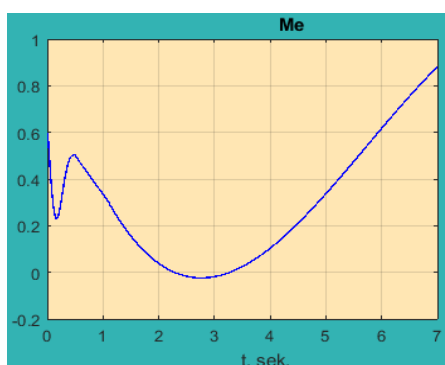
Рис. 12. Кривые изменения электромагнитного момента M_e (а) и скольжения (б) при разомкнутой ОВ

Скольжение s достигает максимального значения (0,5%) в момент времени порядка 2,4 с. и затем уменьшается до нуля (рис. 12, б), т.е. условия втягивание в синхронизм обеспечивается. При этом частота вращения ротора 0,6 % не превышает, как указывалось выше, допустимого значения (10%).

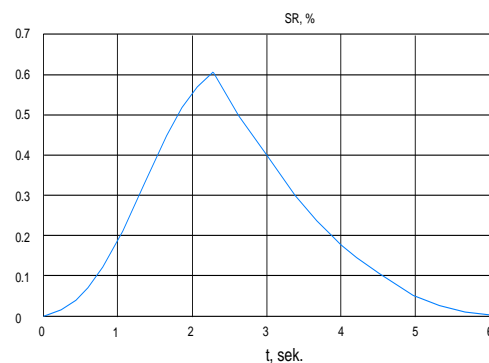
При замкнутой обмотке возбуждения суммарный магнитный поток, проникающий в статор будет больше магнитного потока чем при разомкнутой обмотке. Величина электромагнитного момента в этом случае будет больше, чем при разомкнутой обмотке, вторая слагаемая момента увеличивается.

Кривая асинхронного момента при этом «жесткое», т.е. при значительном увеличении момента скольжение изменяется незначительно и момент, который может развивать синхронный генератор, значительный и в ресинхронизация может наступить при небольшом скольжении, и генератор или сохранит нагрузку полностью, или уменьшит ее незначительно.

На рис. 13 показаны кривые изменения электромагнитного момента и скольжения. На шестой секунде (рис. 13, а) электромагнитный момент достигает значение 0,94 M_e и скольжение (рис. 13, б) практически равно 0, т.е. ресинхронизация обеспечивается без действия АРС турбины. Скольжение достигает своего максимального значения 0,6% от S_n , т.е. не превышает даже одного процента. При таких значениях скольжение асинхронный режим не представляет опасности для синхронного генератора и вполне может быть допущен. После восстановления возбуждение генератор, работающий с таким малым скольжением, спокойно втягивается в синхронизм.



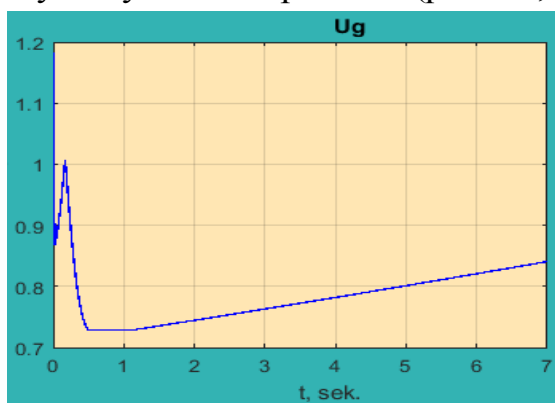
а)



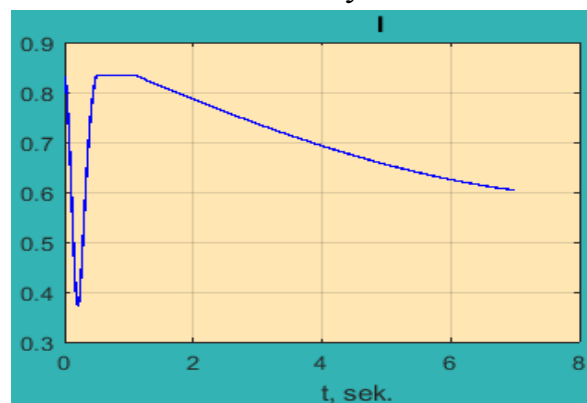
б)

Рис. 13. а) – кривая изменения электромагнитного момента; б) – изменение скольжения

Напряжение на шинах генератора на момент ресинхронизации (рис. 14, а) составляет $0,9U_n$. Такое снижение напряжения вполне допустим, даже если генератор несет номинальную нагрузку, т.е. сброс нагрузки практически отсутствует. Ток при этом (рис. 14, б) близок к номинальному.



а)



б)

Рис. 14. а) – изменение напряжения на шинах генератора; б) – изменения тока статора

Заключение:

- Впервые разработана методика расчета асинхронного режима агрегата: турбина – синхронный генератор при потере возбуждения, которая позволяет рассчитывать переходный процесс непрерывно, начиная от гашения магнитного поля ротора до момента ресинхронизации, выявляет возможность вхождения в синхронизм синхронной машины.
- Проведены исследования асинхронных режимов синхронного генератора при потере возбуждения. Выполнены исследования различных режимов при изменении параметров роторных контуров. Выявлены условия ресинхронизации с внешней сетью синхронной машины.

Список опубликованных работ по теме диссертации

1. **Джунуев, Т.Т.** Применение метода малых колебаний для анализа устойчивости ЭЭС ограниченной мощности [Текст] / Т.Т. Джунуев, Т.А. Джунуев, А.К. Мамакеева // Изв. Кырг. гос. техн. ун-та им. И. Раззакова. – 2014. – № 1(32). – С. 294-296.
2. **Джунуев, Т.Т.** Определение балансирующего узла в энергетической системе ограниченной мощности [Текст] / Т.А. Джунуев, Т.Т. Джунуев // Изв. Кырг. гос. техн. ун-та им. И. Раззакова. – 2014. – № 1(32). – С. 343-345.
3. **Джунуев, Т.Т.** Статическая устойчивость ЭЭС Кыргызской Республики [Текст] / Т. Джунуев, Т.Т. Джунуев, М.Т. Абдылдаева // Изв. Кырг. гос. техн. ун-та им. И. Раззакова. – 2014. – № 1(32). – С. 291-293.
4. **Джунуев, Т.Т.** Макромодели синхронной машины и группы машин в системах ограниченной мощности [Текст] / Т.Т. Джунуев // Вестник амурского государственного университета. Серия: естественные и экономические науки. №67. – Благовещенск, 2014. С. 208-211
5. **Джунуев, Т.Т.** Анализ аварийных режимов работы энергосистемы в условиях отсутствия аварийного резерва [Текст] / Т.Т. Джунуев // Энергетика: управление, качество и эффективность использования энергоресурсов: сб. тр. восьмой Междунар. науч.-техн. конф. – Благовещенск, 2015. – С. 208-211.
6. **Джунуев, Т.Т.** Допустимость применения НАПВ на линии 110 кВ, соединяющей ТЭЦ с системой соизмеримой мощности [Текст] / Т.А. Джунуев, Т.Т. Джунуев // Изв. Кырг. гос. техн. ун-та им. И. Раззакова. – 2015. – № 3(36). – С. 173-176.
7. **Джунуев, Т.Т.** Расчеты асинхронных режимов турбогенераторов при потере возбуждения [Текст] / Т.А. Джунуев, М.Т. Абдылдаева, Т.Т. Джунуев // Изв. Кырг. гос. техн. ун-та им. И. Раззакова. – 2015. – № 3(36). – С. 178-183.
8. **Джунуев, Т.Т.** Резистивная модель синхронной машины. [Текст] / Джунуев Т.Т. Таабалдива Н.Д. // Изв. Кырг. гос. техн. ун-та им. И. Раззакова. – 2015. – № 3(36). – С. 183-189.
9. **Джунуев, Т.Т.** Определение условий ресинхронизации гидрогенераторов, работающих через ЛЭП на систему [Текст] / Джунуев Т.Т. // Теоретический и прикладной научно-технический журнал ИЗВЕСТИЯ КГТУ, №3(36), - Бишкек, 2015, С.183-189
10. **Джунуев, Т.Т.** Разработка базовой математической модели синхронного генератора при потере возбуждения. [Текст] / Джунуев Т.Т. // Теоретический и прикладной научно-технический журнал ИЗВЕСТИЯ КГТУ, №4(44), 2017, с.83-90
11. **Джунуев, Т.Т.** Полная модель синхронной машины в асинхронном режиме при потере возбуждения. [Текст] / Джунуев Т.Т., Мамакеева А.К. // Методические вопросы исследования надежности больших систем

энергетики: Вып. 68. Исследование и обеспечение надежности систем энергетики / Отв. ред. Н.И. Воропай – ИСЭМ СО РАН, 2017 г. – 682 с.

12. **Джунуев, Т.Т.** Разработка базовой математической модели синхронного генератора при потере возбуждения. [Текст] / Джунуев Т.Т., Таабалдиева Н.Д. // Теоретический и прикладной научно-технический журнал ИЗВЕСТИЯ КГТУ, №4(44), - Бишкек, 2017, С.83-90

13. **Свидетельство №351** – Универсальная программа определения балансирующего узла ЭЭЧ ограниченной мощности. Государственная патентная служба КР. – Бишкек, 2014

РЕЗЮМЕ

диссертации Джунуева Тимур Тилегеновича на тему МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальностям 05.13.18 – Элементы и устройства вычислительной техники и системы управления и 05.14.02 – Электростанции и электроэнергетические системы

Ключевые слова: электроэнергетическая система, электрические станции, линии электропередач, синхронный генератор, асинхронный режим, потеря возбуждения автоматическое регулирование возбуждения, турбина, автоматический регулятор скорости.

Объект исследования: асинхронные режимы синхронного генератора и устройства регулирования скоростью при ресинхронизации.

Цель работы – разработка методики расчета асинхронных режимов синхронных генераторов при потере возбуждения и разработка схемы устройства регулятора скорости турбины при вхождении в синхронизм.

Полученные результаты и их новизна. Разработана математическая модель синхронного генератора при гашении магнитного поля ротора при потере возбуждения; разработана математическая модель синхронного генератора в асинхронном режиме при разомкнутой и замкнутой обмотке возбуждения. Получено выражение для определения напряжения на кольцах ротора в асинхронном режиме, позволяющая использовать модель в расчетах без изменения ее структуры; разработана математическая модель агрегата: турбина – синхронный генератор, которая позволяет представлять турбину различными моделями – уточненной при больших скольжениях ($2 \div 4\%$) и приближенной – при малых скольжениях ($0,02 \div 0,06\%$); впервые разработана методика расчета асинхронного режима агрегата: турбина – синхронный генератор при потере возбуждения, которая позволяет рассчитывать переходный процесс непрерывно, начиная от гашения магнитного поля ротора до момента ресинхронизации, выявляет возможность вхождения в синхронизм синхронной машины; проведены исследования асинхронных

режимов синхронного генератора при потере возбуждения. Выполнены исследования различных режимов при изменении параметров роторных контуров. Выявлены условия ресинхронизации с внешней сетью синхронной машины.

Полученные результаты могут быть использованы при расчетах асинхронных режимов синхронных генераторов при потере возбуждения на электрических станциях, что позволит выявить вопрос о сохранении в работе генератора в таких режимах без отключения от сети.

Область применения: электрические станции, электрические системы.

Джунуев Тимур Тилегеновичтин

05.14.02 - Электрчордондор жана электрэнергетикалык тутумдар жана
05.13.05. - Эсептөө техникасынын жана башкаруу тутумунун элементтери
жана түзүлүштөрү адистиктери боюнча техникалык илимдердин
талапкери окумуштуулук даражасына изденүүгө арналган
**“Электрэнергетика тутумунун негизги элементтерин математикалык
моделдөө жана дүүлүктүрүүсүн жоготкон кездеги асинхрондук
режимдерин изилдөөнүн усулун иштеп чыгуу” диссертациясынын**

КОРУТУНДУСУ

Негизги сөздөр: Электроэнергетика тутуму, электр чордондору, электрташучу чубалгылар, синхрондук генератор, асинхрондук режим, дүүлүктүрүүсүн жоготуу, дүүлүктүрүүнү жөнгө келтирүү, турбина, ылдамдыкты автоматтык жөнгө келтирүү.

Изилденүүчү объекттер: синхрондук генератордун асинхрондук режимдери жана ресинхрондоо маалында ылдамдыкты жөнгө келтирүүчү түзүлүштөр.

Иштин максаты: дүүлүктүрүүсүн жоготкон кездеги синхрондук генераторлордун асинхрондук режимдерин эсептөөнүн усулун иштеп чыгуу жана турбина синхронизмге кирген кезде анын ылдамдыгын жөнгө келтирүүчү түзүлүштүн схемасын иштеп чыгуу.

Иштин натыйжалары жана алардын жаңылыгы. Ротор дүүлүктүрүүсүн жоготкондо анын магнит талаасын өчүрүү мезгилиндеги синхрондук генератордун математикалык модели иштелип чыгарылды; Моделдин түзүлүшүн өзгөртпөй туруп, ротордун шакектериндеги чыңалууну аныктай турган туюнтма алынды. Турбина – синхрондук генератор агрегатынын математикалык модели иштелип чыгарылды, бул модель турбинаны ар башка модель менен көрсөтүүгө мүмкүндүк берет: такталган модель - чоң жылмышуу (2-4%) болгондо, болжолдуу модель - кичине жылмышуу (0,02 – 0,06%) болгондо; агрегаттын асинхрондук режимде иштөөсүн эсептеп чыгуунун жаңы ыкмасы биринчи ирет иштелип чыгарылды жана сунушталды: бул ыкма өткөөл жараянды башынан аягына чейин - ротордун магнит талаасын өчүрүүдөн баштап, ресинхрондоо учуруна чейин токтоосуз эсептеп чыгууга жана синхрондук машинаны

синхронизмге киргизүүгө мүмкүндүк берет; синхрондук генератор дүүлүктүрүүсүн жоготкон кездеги асинхрондук режимде иштөөсү изилденди. Ротордук контурдун параметрлери өзгөргөндөгү ар кандай режимдер изилденди. Синхрондук машинанын сырткы тарамдар менен ресинхрондашуусунун шарттары аныкталды.

Иштин натыйжасы электр чордондорундагы синхрондук генераторлор дүүлүктүрүүсүн жоготкон кездеги асинхрондук режимдерин эсептөөгө арналат, бул болсо ушундай режимдер маалында генераторду өчүрбөстөн, иштетүүсүн уланта берүүгө мүмкүндүк берет.

Колдонуу чөйрөсү: электр чордондору, электр тутумдары.

SUMMARY

dissertation of Dzhunuev Timur Tilegenovich on the topic

MATHEMATICAL MODELING AND RESEARCH OF THE STABILITY OF ELEMENTS OF ELECTRIC POWER SYSTEMS

submitted for the degree of Candidate of Technical Sciences in specialties 05.13.18

- Elements and devices of computer facilities and control systems and 05.14.02 -

Power stations and electric power systems

Keywords: electric power system, electric stations, power lines, synchronous generator, asynchronous mode, excitation loss, automatic excitation control, turbine, automatic speed controller.

Object of investigation: asynchronous modes of a synchronous generator and speed control devices for resynchronization.

The purpose of the work is the development of a technique for calculating the asynchronous modes of synchronous generators in the event of a loss of excitation and the development of a device for regulating the speed of a turbine when it enters into synchronism.

The results obtained and their novelty. A mathematical model of a synchronous generator is developed for quenching the magnetic field of the rotor when excitation is lost; The mathematical model of a synchronous generator in an asynchronous mode with an open and closed field winding is developed. An expression is obtained for determining the voltage on the rotor rings in an asynchronous mode, which makes it possible to use the model in calculations without changing its structure; The mathematical model of the unit is developed: a turbine is a synchronous generator that allows the turbine to be represented by different models - refined for large slides ($2 \div 4\%$) and approximate - for small slides ($0.02 \div 0.06\%$); The method for calculating the asynchronous mode of an aggregate has been developed for the first time: a turbine is a synchronous generator with loss of excitation, which makes it possible to calculate the transient process continuously, from blanking the magnetic field of the rotor to the time of resynchronization, reveals the possibility of synchronization of the synchronous

machine; The research of asynchronous modes of a synchronous generator with loss of excitation is carried out. The research of various modes is performed when changing the parameters of the rotor circuits. The conditions of resynchronization with the external network of a synchronous machine are revealed.

The obtained results can be used in calculations of asynchronous modes of synchronous generators with loss of excitation at electric stations, which will allow to reveal the question of keeping the generator operating in such modes without disconnecting from the network.

Scope: electric stations, electrical systems.

ДЖУНУЕВ ТИМУР ТИЛЕГЕНОВИЧ

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ
УСТОЙЧИВОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ
СИСТЕМЫ**

Автореферат диссертации

Подписаны к печати 20.04.2018.

Формат 60x84 1/16 Объем 1.25 п.л.

Бумага офсетная. Тираж 100 экз. Заказ №512

720020, г.Бишкек, ул. Малдыбаева, 34,б
Кыргызский государственный университет строительства,
транспорта и архитектуры им. Н. Исанова

Учебно-издательский центр «Авангард»