

На правах рукописи



Архипцев Максим Геннадьевич

**ПЕРЕХОДНЫЕ И УСТАНОВИВШИЕСЯ РЕЖИМЫ
ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЧАСТИ СВОБОДНОПОТОЧНОЙ МИКРОГЭС**

Специальность 05.14.01 – Энергетические системы и комплексы

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Красноярск – 2013

Работа выполнена на кафедре “Электротехнические комплексы и системы”
ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет».

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент,
Встовский Алексей Львович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор,
Лукутин Борис Владимирович
Национальный исследовательский Томский политехнический университет, кафедра «Электроснабжение промышленных предприятий», заведующий кафедрой.

кандидат технических наук, доцент,
Мизрах Енис Аврумович
Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М.Ф. Решетнёва, кафедра “Автоматические системы управления”, профессор.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования “Красноярский государственный аграрный университет”

Защита состоится «19» июня 2013 г. в 10.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.099.07 при Сибирском федеральном университете по адресу: г. Красноярск, ул. Ленина 70, ауд.204.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Сибирского федерального университета.

Автореферат разослан «17» мая 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Татьяна Михайловна Чупак

Актуальность исследования. Для регионов Сибири и Дальнего Востока основным возобновляемым источником энергии является энергия больших и малых рек. Среди разнообразия конструкций деривационных, низконапорных и свободнопоточных мини и микроГЭС – особо перспективными являются последние, вследствие простоты их монтажа и сохранения природного ландшафта. Основными компонентами электрической части такой микроГЭС являются генератор и система управления, которые должны обеспечить удовлетворительное качество электроэнергии при низких частотах вращения ротора генератора.

Разработанные в Политехническом институте Сибирского федерального университета (ПИ СФУ) свободнопоточные микроГЭС имеют низкую стоимость, могут производиться серийно, обладают малыми габаритами, не требуют земляных работ по их установке. Такая микроГЭС имеет оригинальной конструкции ортогональную турбину, обладающую высоким КПД и коэффициентом быстроходности. В качестве электрической части используются разработанные в ПИ СФУ низкоскоростные (частотой вращения от 80 об/мин до 600 об/мин) торцевые синхронные генераторы (НТСГ) с возбуждением от постоянных магнитов и автоматическая система управления с автобалластным регулированием. НТСГ имеют наилучшие массогабаритные и энергетические показатели и малый осевой размер. Автоматическая система управления с автобалластным регулированием простая по схеме и конструкции, дешевая и не вносит искажений в форму выходного напряжения, которая в этом случае зависит только от формы магнитного поля в рабочем зазоре генератора.

Исследование переходных и установившихся режимов НТСГ оригинальной конструкции, защищённой патентом РФ является актуальной задачей, без решения которой нельзя обеспечить проектирование и строительство перспективных, экологически безопасных свободнопоточных микроГЭС.

Целью работы является исследование переходных и установившихся режимов электрической части свободнопоточной микроГЭС на основе математического и трехмерного моделирования процессов в её элементах для формирования рекомендаций по их оптимальному проектированию.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующий комплекс задач:

1. Проанализировать схемные и конструктивные особенности электрической части микроГЭС.
2. Разработать математическую модель переходных электромагнитных процессов торцевого синхронного генератора для оценки величины токов и длительности переходных процессов.
3. Разработать методику исследования электромагнитного поля в объеме НТСГ для определения условий получения синусоидальной формы его выходного напряжения.
4. Средствами трехмерного моделирования выполнить исследование магнитного поля в сегменте НТСГ и сформулировать рекомендации по выбору геометрических параметров его активной части с целью получения синусоидальной формы выходного напряжения.

5. На разработанном экспериментальном стенде провести испытания электрической части свободнопоточной микроГЭС.

Объект и предмет исследования. Объектом исследования является электрическая часть свободнопоточной микроГЭС.

Предметом исследования являются переходные и установившиеся процессы в НТСГ для свободнопоточной микроГЭС и магнитные поля в его рабочем зазоре.

Методы исследования. Для решения поставленных задач использовались методы теории электромагнитного поля, метод конечных элементов в трехмерном моделировании, пакеты прикладных программ Word, MathCad, SolidWorks, Ansoft Maxwell 15.

Достоверность полученных результатов. Достоверность предложенных моделей и обоснованность результатов исследования обеспечивается корректным применением теоретических методов и вычислительных экспериментов; подтверждается данными, полученными в стендовых испытаниях низкоскоростного торцевого синхронного генератора и системы управления режимами работы свободнопоточной микроГЭС.

Научная новизна и значимость заключается в исследовании комплекса задач для электрической части свободнопоточной микроГЭС от стадии проектирования, до стадии её испытаний, при решении которых:

1. Создана на основе теории обобщенной электрической машины математическая модель электромагнитных переходных процессов новой конструкции низкоскоростного торцевого синхронного генератора с магнитоэлектрическим возбуждением, позволяющая оценить величины и длительность переходных токов, необходимые для выбора элементной базы системы управления.

2. Разработана методика исследования трехмерного магнитного поля и проанализирована его форма в торцевом синхронном генераторе с постоянными магнитами.

3. Выработаны условия получения синусоидальности формы магнитной индукции в зазоре генератора, обеспечивающие требуемое качество выходного напряжения электрической части свободнопоточной микроГЭС в рабочих режимах.

Практическая ценность работы заключается в следующем:

1. Получены аналитические выражения, которые позволяют определить характер, величину токов и длительность переходных процессов для новой конструкции НТСГ с магнитоэлектрическим возбуждением, необходимые для выбора элементов системы управления.

2. Разработана простая и надежная методика трехмерного моделирования магнитного поля в активной части НТСГ в программе Ansoft Maxwell 15, которая позволяет оценить форму выходного напряжения электрической части свободнопоточной микроГЭС по распределению магнитной индукции в рабочем зазоре генератора.

3. Разработан и изготовлен стенд для проведения экспериментальных исследований электрической части свободнопоточной микроГЭС в лабораторных условиях.

Реализация результатов работы. Полученные в диссертационной работе результаты выполнены в рамках гранта Минобрнауки РФ (2009-2011г.) и проектов Красноярского краевого фонда поддержки научной и научно-технической деятельности (2009, 2010, 2011, 2012 г.) и используются на НПП “Радиосвязь” (г. Красноярск) при подготовке производства свободнопоточных микроГЭС.

На защиту выносятся:

1. Обоснование выбора вариантов генератора и системы управления микроГЭС.

2. Математическая модель переходных процессов в новой конструкции НТСГ с постоянными магнитами на основе теории обобщенного электромеханического преобразователя энергии и установленных взаимосвязей с теорией электромагнитного поля.

3. Методика и результаты моделирования трехмерного магнитного поля НТСГ в программе Ansoft Maxwell 15 с целью получения условий синусоидальности выходного напряжения.

4. Результаты стендовых испытаний электрической части микроГЭС мощностью 5 кВт.

Личный вклад в работу. Автор непосредственно участвовал в качестве исполнителя на всех этапах проведенных исследований, включая постановку задач, анализ литературы по переходным процессам в генераторах с магнито-электрическим возбуждением, исследование и анализ переходных процессов, трехмерное проектирование НТСГ в программе SolidWorks 2010, рассмотрение и анализ магнитного поля в программе Ansoft Maxwell 15, проведение стендовых испытаний НТСГ мощностью 5 кВт, анализ выходных характеристик после испытаний, обобщение результатов.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались на следующих конференциях: XV Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных г. Томск, 2009; XII Международной научной конференции “Интеллект и наука” г. Железногорск, 2012; VIII Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных, посвященной 155-летию со дня рождения К.Э. Циолковского: Молодежь и наука г. Красноярск, 2012.

Публикации.

По теме диссертации опубликованы 14 научных работ, в том числе 1 в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 7 работ опубликованы в материалах всероссийских и международных конференций, получен 1 патент РФ и 5 свидетельств государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем работы.

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и библиографического списка из 145 наименований. Основная часть работы изложена на 165 страницах машинописного текста, содержит 79 рисунков и 16 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность проводимой работы, сформулирована ее цель, определены основные задачи для её реализации. Сформулирована научная новизна основных результатов и практическая ценность исследований. Представлены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе показано, что среди объектов малой гидроэнергетики особо перспективными являются свободнопоточные микроГЭС. У таких установок низкая стоимость и они не требуют земляных работ при установке. Свободнопоточная микроГЭС состоит из ортогональной турбины и электрической части, объединяющей в себя низкоскоростной генератор, для получения качественного выходного напряжения и автоматическую систему управления автотрансформаторной нагрузки для регулирования режимов работы микроГЭС.

Вторая глава посвящена математическому описанию переходных процессов НТСГ с помощью дифференциальных уравнений на методологической основе обобщенного электромеханического преобразователя. Для определения параметров математической модели используются полевая электромагнитная модель исследуемого генератора и магнитные схемы замещения.

При математическом описании синхронной машины сделан ряд общепринятых допущений, которые дают возможность вместо реальной машины с достаточной степенью точности исследовать идеализированную синхронную машину.

Магнитные свойства стабилизированных магнитов характеризуются внутренней магнитной проводимостью, что позволяет заменить постоянные магниты ротора НТСГ некоторой фиктивной обмоткой возбуждения, подключенной к источнику тока и создающей МДС F_{m0} , а полюсные наконечники стержнями фиктивной демпферной обмотки.

В качестве системы ортогональных координатных осей использованы оси d и q , жестко связанные с ротором. Использование этих координатных осей позволяет получить дифференциальные уравнения равновесия напряжений с постоянными коэффициентами при неизвестных.

Показано, что при анализе переходных процессов типа «сброс-наброс нагрузки», «короткое замыкание», демпферную обмотку можно не учитывать в связи с примерным постоянством частоты вращения ротора. В результате уравнения равновесия напряжений синхронного генератора с постоянными магнитами можно записать аналогично уравнениям обычной синхронной машины. Для проведения расчетов в одной системе координат, выполнено приведение роторной обмотки к статорной.

С учетом вышесказанного дифференциальные уравнения машины представлены в виде:

$$\left. \begin{aligned}
-u_d &= d\psi_d/dt - \omega \cdot \psi_q + r_a i_d \\
-u_q &= d\psi_q/dt + \omega \cdot \psi_d + r_a i_q \\
u_f &= d\psi_f/dt + \omega \cdot r_f I_{m0} \\
\psi_d &= L_d i_d + L_{dm} I_{m0} \\
\psi_q &= L_q i_q \\
\psi_f &= L_{ad} i_d + L_{dm} I_{m0}
\end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где L_d, L_q – полные индуктивности обмотки якоря по продольной и поперечной осям; u_d, u_q, u_f – напряжения обмотки статора и возбуждения, соответственно; ψ_d, ψ_q, ψ_f – потокосцепления обмотки статора и возбуждения; L_{ad} – главная индуктивность якоря по продольной оси; i_d, i_q – токи статора по продольной и поперечной осям, соответственно; r_a, r_f – активные сопротивления статора и обмотки возбуждения; L_{dm} – взаимная индуктивность между обмоткой возбуждения и обмоткой якоря; I_{m0} – эквивалентный ток возбуждения; $L_{dm} I_{m0}$ – потокосцепление обмоток статора и ротора по продольной оси с полем постоянных магнитов.

В уравнения (1) в качестве коэффициентов входят активные сопротивления обмоток якоря, возбуждения и индуктивности само- и взаимоиндукции обмоток, зависящие от формы магнитного поля в рабочем зазоре и, следовательно, от конструкции ротора. Входящие сомножителями в индуктивности магнитные проводимости определены по составленным магнитным схемам замещения, с учетом коэффициентов формы поля, получаемых разложением в гармонический ряд индукций соответствующих полей. Одна из таких схем замещения магнитной цепи приведена на рисунке 1 а, а распределение магнитного поля потока реакции якоря по продольной оси на рисунке 1 б.

Магнитные проводимости получены как обратная величина соответствующих сопротивлений в схемах замещения, с учетом значений коэффициентов формы соответствующих магнитных полей. После этого рассчитываются индуктивные сопротивления.

Так главное индуктивное сопротивление якоря по продольной оси машины:

$$x_{ad} = \frac{2 \cdot m \cdot f_1 \cdot W_1^2 \cdot k_{01}^2}{p} \cdot A_{ad1} \quad (2)$$

где m – число фаз статора; f_1 – частота питающей сети; W_1 – число витков статора; k_{01} – обмоточный коэффициент; $A_{ad1} = A_{ad} / k_{\phi d}$ – магнитная проводимость воздушного зазора по продольной оси, определенная из:

$$A_{ad} = 1/R_{\delta d} \cdot \frac{(1/R_{\sigma} + 1/R_m)}{(1/R_{\delta d} + 1/R_{\sigma} + 1/R_m)} \quad (3)$$

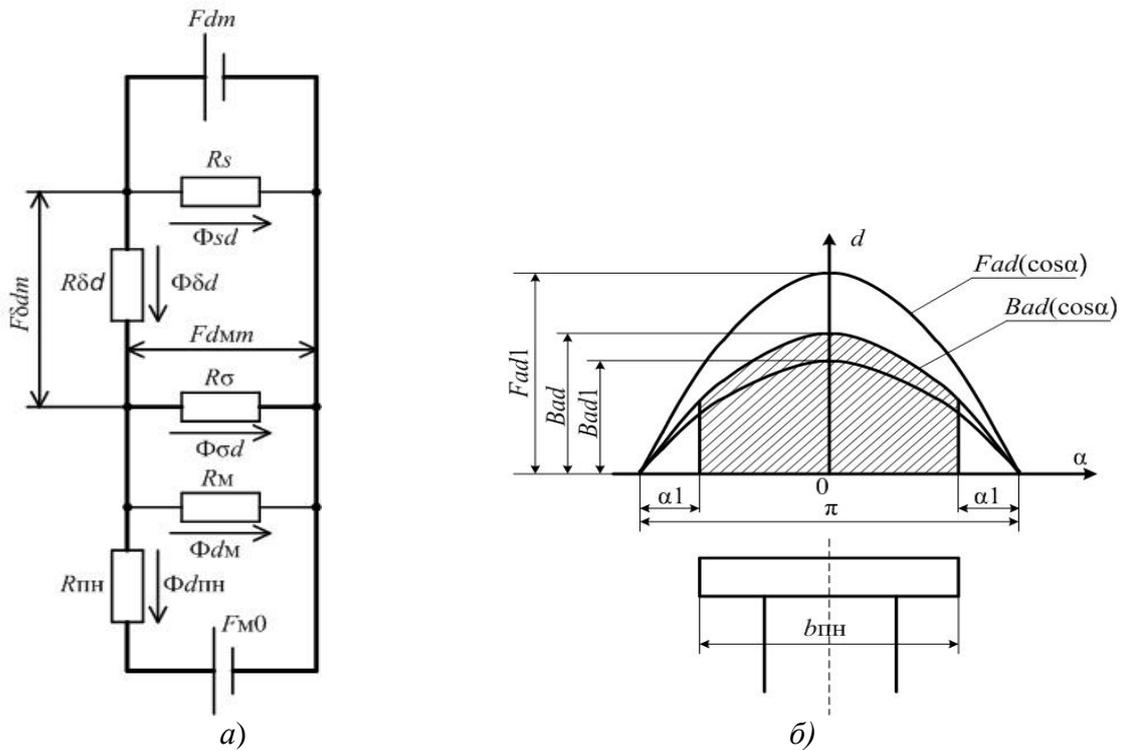


Рисунок 1 – Схема замещения магнитной цепи и распределение магнитного поля потока реакции якоря по продольной оси

Главное индуктивное сопротивление якоря по поперечной оси машины рассчитывается аналогично.

Полные индуктивные сопротивления якоря:

$$x_s = 2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot W_1^2 \cdot A_s; \quad (4)$$

$$x_d = x_{ad} + x_s; \quad x_q = x_{aq} + x_s \quad (5)$$

Для расчета переходных процессов была разработана математическая модель, опирающаяся на математические подходы двух авторов: И.Л. Осина и Г.А. Сипайлова. Достоинство подхода Г.А. Сипайлова заключается в хорошей сходимости получаемых результатов с результатами электромагнитного расчета. Некоторая громоздкость решения и представление тока обмотки возбуждения величиной переменной, общепринятой для машин с электромагнитным возбуждением, осложняет его применение к генераторам с магнитоэлектрическим возбуждением. Для НТСГ с постоянными магнитами последние удобнее заменять фиктивной обмоткой возбуждения, питающейся от источника тока постоянной величины. Такой подход описан И.Л. Осиным. Недостатком в нем является неокончательный вывод выражения фазного тока при коротком замыкании. Вследствие этого за основу расчета был выбран подход И.Л. Осина с учетом операторных функций, используемых в подходе Г. А. Сипайлова.

Исходную систему дифференциальных уравнений (1) можно записать в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned} -u_d(p) &= p \cdot \psi_d(p) - \omega \cdot \psi_q(p) + r_a i_d(p) \\ -u_q(p) &= p \cdot \psi_q(p) + \omega \cdot \psi_d(p) + r_a i_q(p) \\ u_f(p) &= p \cdot \psi_f(p) + r_f I_{m0} \\ \psi_d(p) &= x_d i_d(p) + x_{dm} I_{m0} \\ \psi_q(p) &= x_q i_q(p) \\ \psi_f(p) &= x_{ad} i_d(p) + x_{dm} I_{m0} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

где $u_d(p)$, $u_q(p)$, $u_f(p)$ – изображения выходных напряжений генератора; $\psi(p)$ – изображения потокосцеплений обмоток машины; $i(p)$ – изображения токов.

Решение системы уравнений (6) относительно токов после несложных преобразований имеет вид:

$$i_d(p) = - \frac{U_d(p) \cdot Z_q(p) + U_q(p) \cdot x_q(p) + I_{m0} \cdot \frac{x_{ad}}{r_f + px_{dm}}(p) \cdot [p \cdot Z_q(p) + x_q(p)]}{Z_d(p) \cdot Z_q(p) + x_d(p) \cdot x_q(p)} \quad (7)$$

$$i_q(p) = \frac{U_d(p) \cdot x_d(p) - U_q(p) \cdot Z_d(p) - I_{m0} \cdot \frac{x_{ad}}{r_f + px_{dm}}(p) \cdot [Z_d(p) - p \cdot x_d(p)]}{Z_d(p) \cdot Z_q(p) + x_d(p) \cdot x_q(p)}, \quad (8)$$

где $Z_d(p) = r_1 + p \cdot x_d(p)$, $Z_q(p) = r_1 + p \cdot x_q(p)$ – полные операторные сопротивления синхронного генератора по продольной и поперечной осям, соответственно.

С помощью теоремы разложения определяются корни уравнения. В данном случае они равны: $p_1 = -1/T'_d$; $p_{2,3} = -\frac{r_1}{x_2} \pm \sqrt{(r_1/x_2)^2 - 1 - r_1^2/(x'_d x_q)}$. Выражение под квадратным корнем можно принять равным мнимой единице, так как $r_1^2 \ll x_2^2$. Для определения оригиналов токов рассчитываются корни уравнения.

Выражение для свободной составляющей в этом случае выглядит следующим образом:

$$i_{la}(t) = 0,5 \cdot \sqrt{2} \cdot [I_{ma} \cdot \cos \gamma + I_{2n} \cdot \cos(2 \cdot \omega \cdot t)] \exp(-t/T_a) \quad (9)$$

где $I_{ma} = E_o \left(\frac{x_q}{r_1^2 + x'_d \cdot x_q} + \frac{r_1^2}{r_1^2 + x_d \cdot x_q} \right)$ – максимальное значение свободной

составляющей тока короткого замыкания; $I_{2n} = E_o \left(\frac{x_q}{r_1^2 + x'_d \cdot x_q} - \frac{r_1^2}{r_1^2 + x_d \cdot x_q} \right)$

– амплитуда составляющей тока двойной частоты короткого замыкания; γ – угол поворота ротора принят равным 0, соответствующим максимальному

всплеску свободной составляющей тока короткого замыкания; $x'_d = x_s + \frac{1}{1/x_{ad} + 1/x_{dm}}$ – переходное индуктивное сопротивление якоря по продольной оси; x_s – индуктивное сопротивление рассеяния; $T_a = x_2 / (r_a \cdot \omega)$ – постоянная времени свободной составляющей тока короткого замыкания, определяется из корней уравнения $p_{2,3}$; T'_d – постоянная времени обмотки возбуждения, которая определяется через операторное индуктивное сопротивление $x_d(p)$ и равна 0,15-0,2 с.

Свободная составляющая в явнополюсных машинах имеет колебательный характер (рис.2, а), это обусловлено тем, что магнитное поле пульсирует с частотой $2f_1$ при вращении явнополюсного ротора из-за различной магнитной проводимости по его осям d и q . При максимальном потокоцеплении, поток самоиндукции, создаваемый свободной составляющей тока короткого замыкания, будучи неподвижным в пространстве, индуцирует ЭДС основной частоты в обмотке вращающегося ротора. В результате этого, на аperiodические всплески токов в обмотке возбуждения налагаются периодические токи основной частоты. Эти токи создают магнитные потоки, вращающиеся с синхронной частотой в сторону, противоположную вращению ротора. В результате сложного процесса взаимодействия аperiodических токов статора и периодического тока ротора кратность токов в обмотках дополнительно возрастает.

В машинах с постоянными магнитами, $x_q > x_d$ вследствие низкой магнитной проницаемости магнитов ($\mu_m \leq 2\mu_0$). При $x_q = x_d$ пульсации свободной составляющей тока практически отсутствуют.

Вынужденная составляющая тока короткого замыкания описывается следующим выражением:

$$i'_{kn}(t) = I'_m \exp(-t/T'_d) \cos \omega t \quad (10)$$

где $I'_m = E_o \cdot \left(\frac{x_q}{r_1^2 + x'_d \cdot x_q} - \frac{x_q}{r_1^2 + x_d \cdot x_q} \right)$ – амплитуда вынужденной составляющей тока короткого замыкания.

Общее выражения для результирующего тока трехфазного короткого замыкания выглядит следующим образом:

$$i_k(t) = i_{la}(t) - \left[I'_m \exp(-t/T'_d) + I_{km} \right] \cos \omega t \quad (11)$$

где $I_{km} = \frac{E_o \cdot x_q}{r_1^2 + x_d \cdot x_q}$ – амплитуда установившегося тока короткого замыкания.

По разработанной математической модели рассчитаны токи трехфазного короткого замыкания для низкоскоростного торцевого синхронного генератора мощностью 5 кВт, напряжением промышленной частоты 220/380 В и частотой вращения 250 об/мин, рис. 2 б.

Кривая суммарного тока короткого замыкания представлена на рисунке 2, б. Амплитуда вынужденной составляющей тока уменьшается с изменением индуктивных сопротивлений от значения x'_d до x_d . Знакопеременные моменты, возникающие в результате взаимодействия магнитных потоков движущихся относительно друг друга, весьма велики и опасны для целостности обмоток.

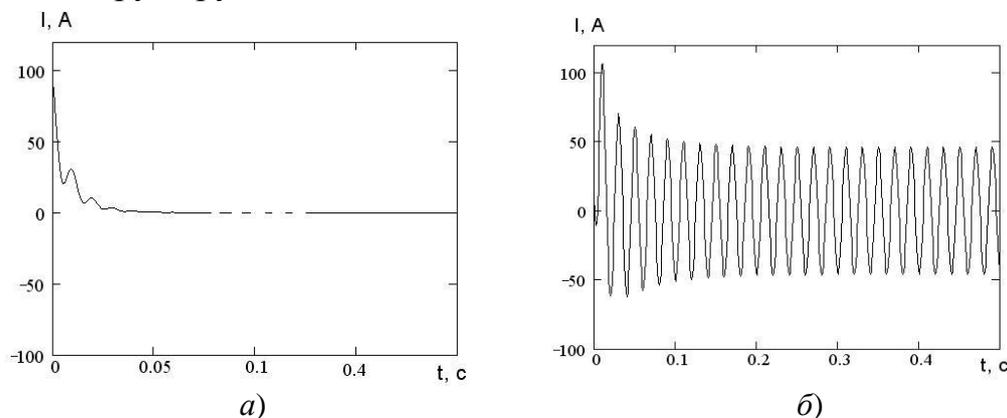


Рисунок 2 – Кривые изменения свободной составляющей (а) и результирующего токов короткого замыкания (б)

В начальный момент короткого замыкания машина испытывает сильный удар, за счет резко возросших токов статорной обмотки и кинетической энергии ротора. В результате этого возникает тормозящий момент, имеющий характер кратковременного импульса.

Процесс внезапного короткого замыкания, происходящего при работе машины под нагрузкой, имеет более сложный характер, но в главнейших чертах аналогичен рассмотренному выше случаю, когда короткое замыкание происходит при холостом ходе. Величина ударного тока короткого замыкания при этом также существенно не изменяется.

В третьей главе представлена модель активной части НТСГ и результаты моделирования трехмерного магнитного поля в его сегменте (рисунок 3) в зависимости от ширины полюсного наконечника.

Цель моделирования – выработать рекомендации по проектированию низкоскоростного торцевого синхронного генератора с синусоидальной формой выходного напряжения; определить условия снижения потоков рассеяния в межполюсных промежутках ротора и получения магнитной индукции в рабочем зазоре НТСГ с формой, близкой к синусоидальной.

Учитывая сложность электромеханического оборудования, его высокую стоимость, а также высокую конкуренцию на этом рынке, можно утверждать, что использование современных систем трехмерного моделирования является практически единственным способом достоверно оценить рабочие, технологические и энергетические характеристики установки еще на стадии концептуального проектирования.

В низкоскоростных генераторах с постоянными магнитами получение синусоидального напряжения на выходе генератора возможно лишь соответствующим выбором геометрии ротора. Моделирование магнитного поля в объеме генератора проводилось в зависимости от соотношения геометрических пара-

метров магнита и полюсного наконечника. Достоинством исследуемой конструкции нового низкоскоростного генератора является возможность изменения геометрии ротора без замены технологического оборудования: достаточно сменить технологической оснастки.

В Политехническом институте Сибирского федерального университета разработана и изготовлена экспериментальная партия НТСГ с постоянными магнитами мощностью 1 кВт. Анализ результатов стендовых испытаний генераторов показал, что форма его выходного напряжения несинусоидальная, что неприемлемо для ряда потребителя, усложняет систему регулирования автотрансформаторной нагрузки, снижая ее надежность и эффективность. Основной сложностью проектирования НТСГ является необходимость жесткого ограничения его радиального габарита, невыполнение которого приводит к существенному увеличению материалоемкости, усложнению элементов их конструкции, невозможности использования серийного технологического оборудования.

Для устранения недостатков экспериментальной партии НТСГ и определения условия получения синусоидального напряжения в проектируемом генераторе мощностью 5 кВт проведено трехмерное моделирование с учетом соотношения геометрических параметров полюсов ротора НТСГ мощностью 1 кВт.

Решение задачи определения условий синусоидальности электромагнитного поля в зазоре генератора проведено с помощью метода конечных элементов (МКЭ) в программе Ansoft Maxwell 15.

В качестве геометрической модели, в программном пакете Solid Works 2010, была построена трехмерная модель НТСГ мощностью 5 кВт.

Для сокращения машинного времени и ограничения вычислительных мощностей ЭВМ, рассматривался сегмент равный четверти активного объема НТСГ (рисунок 3) с циркуляцией магнитного потока. Сегмент состоит из: зубцов – 3; яра статора и ротора – 1; полюсов – 2, состоящих из постоянных магнитов и стальных полюсных наконечников. На каждый полюс генератора приходится по 5 зубцов статора.

Для оценки результатов моделирования, корректного их описания и выработки рекомендаций при проектировании НТСГ, введены 2 коэффициента: коэффициент относительной ширины магнита $k_{ш} = b_m / \tau_{cp}$, где b_m – ширина магнита по среднему диаметру; τ_{cp} – полюсное деление по среднему диаметру и коэффициент относительной ширины полюсного наконечника $k_{мп} = b_{пн} / \tau_{cp}$, где $b_{пн}$ – ширина полюсного наконечника. Моделирование проводилось пошагово, при уменьшении ширины магнита относительно ширины полюсного наконечника.

Первоначально моделирование проводилось на холостом ходу при равенстве полюсного наконечника и магнита ($b_m = b_{пн} = 0,05$ мм, $\tau_{cp} = 0,056$ мм), как принято в изготовленном генераторе мощностью 1 кВт (с коэффициентами $k_{ш} = k_{мп} = \frac{0,050}{0,056} = 0,893$). При этом индукция имеет форму, стремящуюся к трапе-

цеидальной. При уменьшении коэффициента k_{uu} до значения $k_{uu} = 0,8$ (за счет уменьшения ширины магнита относительно ширины полюсного наконечника на 2,5 мм с каждой стороны) при прежних значениях k_{mp} и межполюсных промежутков магнитная индукция имеет форму, стремящуюся к синусоидальной, что является условием получения качественного выходного напряжения.

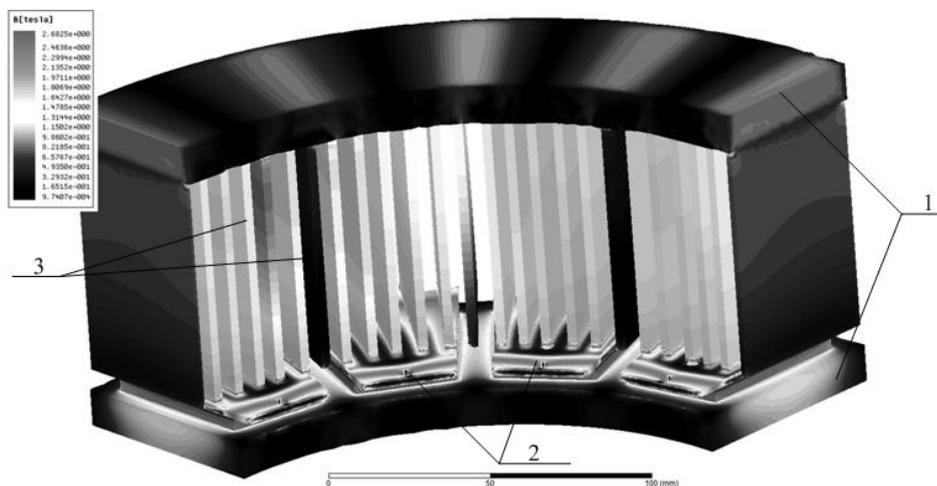


Рисунок 3 – Девяностоградусный сегмент НТСГ в Ansoft Maxwell 15

Для определения амплитудного значения индукции и анализа формы поля при нагрузке, с использованием функции программы Ansoft Maxwell 15 была построена гистограмма распределения магнитной индукции по зубцам статора при $k_{mp} = k_{uu} = 0,893$ и $k_{mp} = 0,893$, $k_{uu} = 0,8$ (рисунок 4). Из нее видно, что при равной ширине магнита и полюсного наконечника ($k_{mp} = k_{uu} = 0,893$) значение индукции больше на 0,05-0,1 Тл, чем при их разной ширине. Но при этом, появляются провалы магнитного потока (огibaющая – штриховая линия). Такие провалы существенно сказываются на качестве выходного напряжения.

Для их исключения, необходимо уменьшать коэффициент k_{uu} за счет уменьшения ширины магнита. В этом случае можно будет добиться формы магнитной индукции, близкой к синусоидальной, при некотором снижении значения магнитной индукции. При $k_{uu} = 0,8$ (ширина полюсного наконечника больше, чем ширина магнита), форма поля сглаживается и становится близкой к синусоиде (огibaющая – сплошная линия). Из гистограммы видно, что максимальное значение индукции в зубцах статора при $k_{uu} = 0,893$ равно 1,7 Тл., а при $k_{uu} = 0,8$ – 1,67 Тл. Данные значения магнитной индукции совпадают с результатами электромагнитного расчета НТСГ ($B_{z1} = 1.665$ при $k_{uu} = 0,893$ и $B_{z1} = 1.645$ при $k_{uu} = 0,8$). Получить меньшую ширину магнита при сохранении прежних энергетических соотношений возможно за счет применения магнитов с большей остаточной индукцией ($B_r = 1,4-1,45$ Тл), а также применением компьютерных технологий проектирования и конструирования генератора.

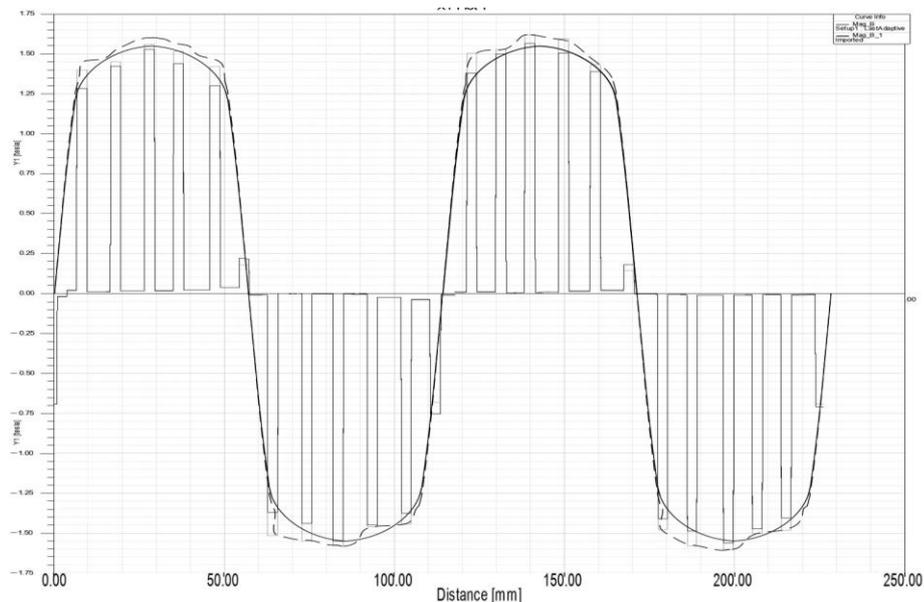


Рисунок 4 – Гистограмма распределения магнитного поля в объеме генератора при нагрузке

С учетом результатов моделирования формы поля НТСГ мощностью 5 кВт был спроектирован генератор такой мощности и изготовлен на НПП “Радиосвязь” по технологии, максимально приближенной к условиям промышленного производства, с учетом технологических возможностей предприятия и на его технологическом оборудовании. При этом полюсный наконечник выполнен шире магнита. При испытаниях НТСГ мощностью 5 кВт, было замечено снижение выходного напряжения примерно на 9%. Одной из основных причин являются возникающие потоки рассеяния при недостаточном расстоянии между полюсами ротора.

Исходя из результатов проведенного ранее моделирования НТСГ мощностью 1 кВт в программном пакете Ansys, для НТСГ мощностью 5 кВт значение межполюсного расстояния было выбрано равным 6 мм ($k_{mp} = 0,893$, $k_{ui} = 0,8$). Для исследования потоков рассеяния с целью их уменьшения, было проведено моделирование при номинальном токе, равном 9,5 А и на холостом ходу (рисунок 5). Значения коэффициентов, как и для оценки формы поля рассматривались для двух случаев: $k_{mp} = 0,893$, $k_{ui} = 0,893$ и $k_{mp} = 0,893$, $k_{ui} = 0,8$.

На холостом ходу и в установившемся режиме, на краях полюса сосредоточены большие потоки рассеяния между полюсами ротора, возникающие из-за недостаточной величины межполюсных промежутков для генератора большей мощности. Поэтому, практическая реализация при коэффициентах $k_{mp} = 0,893$ и $k_{ui} = 0,8$ нецелесообразна, так как величина потоков рассеяния практически не уменьшилась по сравнению с $k_{mp} = 0,893$ и $k_{ui} = 0,893$.

Для определения зависимости величины потоков рассеяния от геометрических параметров ротора, проводилось моделирование при пошаговом уменьшении коэффициентов $k_{ш}$, k_{mp} за счет уменьшения ширины магнита и полюсного наконечника при неизменном диаметре генератора. В результате моделирования была найдена оптимальная величина коэффициента ширины ($k_{mp} = 0,86$ и $k_{ш} = 0,77$) при которой получена синусоидальная форма магнитного поля с незначительными потоками рассеяния на краях полюсов. По итогам моделирования НТСГ мощностью 5 кВт и полюсностью $2p=16$ была построена зависимость выбора коэффициента $k_{ш}$ от мощности генератора (рисунок 6). Аналогичные зависимости построены для НТСГ различной мощности и полюсности. Полученные значения коэффициента k_{mp} для генераторов различной мощности и полюсности приведены в таблице 1.

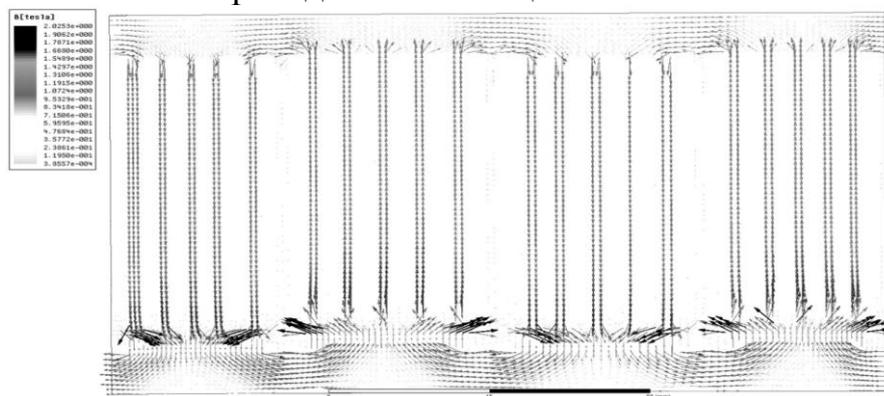


Рисунок 5 – Векторное распределение индукции в зубцах статора на холостом ходу

Таблица 1 – Величина коэффициента k_{mp}

Мощность генераторов	Величина k_{mp} в зависимости от полюсности генераторов		
	$2p=16$	$2p=20$	$2p=24$
$P=1\div 4,5$ кВт	$0,815\div 0,845$	$0,805\div 0,84$	$0,78\div 0,815$
$P=5\div 9,5$ кВт	$0,845\div 0,875$	$0,825\div 0,855$	$0,815\div 0,845$
$P=10\div 15$ кВт	$0,85\div 0,92$	$0,83\div 0,91$	$0,82\div 0,9$

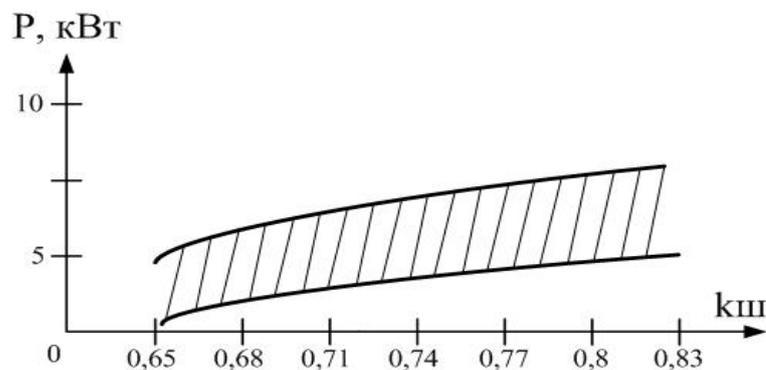


Рисунок 6 – Зависимость мощности от коэффициента $k_{ш}$ при $2p=16$

Трехмерное моделирование в программе Ansoft Maxwell 15 показало высокую точность совпадения с расчетами, проведенными по математической модели.

Основными рекомендациями по проектированию НТСГ являются:

- Для получения в воздушном зазоре формы индукции, близкой к синусоидальной, необходимо ширину полюсного наконечника выполнять больше, чем ширину магнита, пользуясь значениями коэффициентов, приведенными в таблице 1.

- Для уменьшения величины потоков рассеяния, использовать во время проектирования соответствующий выбор коэффициента по таблице и по кривым в зависимости от мощности и полюсности генератора. При проектировании других (чем в табл. 1) вариантов генераторов следует искать компромиссное решение между k_{mp} и $k_{ш}$ (то есть между шириной полюсного наконечника и величиной межполюсного расстояния) или проводить моделирование по методике, разработанной и приведенной в реферируемой работе.

- Проектирование с использованием коэффициентов $k_{ш}$ и k_{mp} и проведением трехмерного моделирования позволит максимально использовать имеющееся технологическое оборудование завода-изготовителя, изготавливая лишь необходимую технологическую оснастку.

Используя полученные рекомендации, можно будет добиться формы поля близкой к синусоидальной с минимальными потоками рассеяния практически без ухудшения массогабаритных показателей генератора.

В четвертой главе приводятся ход и результаты стендовых испытаний; снятие электромагнитных выходных данных и осциллограмм тока и напряжения в переходных режимах низкоскоростного торцевого синхронного генератора с постоянными магнитами мощностью 5 кВт с использованием автоматической системы управления с автобалластным регулированием.

Система управления является одним из важнейших элементов энергоустановки, обеспечивающих статически устойчивый режим работы гидроагрегата и стабилизацию его выходного напряжения.

Задачами системы управления микроГЭС, обеспечивающей требуемые режимы её работы являются: обеспечение качественного питания основных потребителей электроэнергии; отключение неосновных потребителей при снижении нагрузочной способности генератора; полное отключение потребителей и перевод генератора на холостой режим работы при недопустимом снижении выходной частоты; включение и регулирование балластной нагрузки генератора в случае роста выходной частоты выше нормы; нормализация электрического режима генератора при несимметричных нагрузках по фазам выходного напряжения; высокая степень надежности, обеспечивающая безотказную работу в течение продолжительного срока эксплуатации.

Система управления разработана с использованием автобалластных сопротивлений. Достоинствами данного способа стабилизации являются: практическое отсутствие дополнительных искажений формы выходного напряжения, что значительно улучшает качество получаемой потребителями электроэнергии

и возможность стабилизации частоты вращения гидроагрегата, обеспечение удовлетворительных значений напряжения и частоты за счет соотношения величин полезной и балластной нагрузок микроГЭС.

Разработанная система управления модулем (СУ) и алгоритм её работы представлены на рисунке 7. Напряжение с частотой генератора через фильтр нижних частот (ФНЧ), восстанавливающий синусоидальную его форму, поступает на компаратор (ФПН), формирующий прямоугольный импульс, длительность которого определяется периодом входного переменного напряжения. Этот период заполняется импульсами высокостабильной частоты (узел БЗП) и подаётся на преобразователь последовательности импульсов в параллельный двоичный код (ПКС). Данный двоичный код сравнивается с кодом, соответствующим частоте 50 Гц (ССК), и в зависимости от знака отклонения формируются сигналы управления в коде 1-2-4-8.

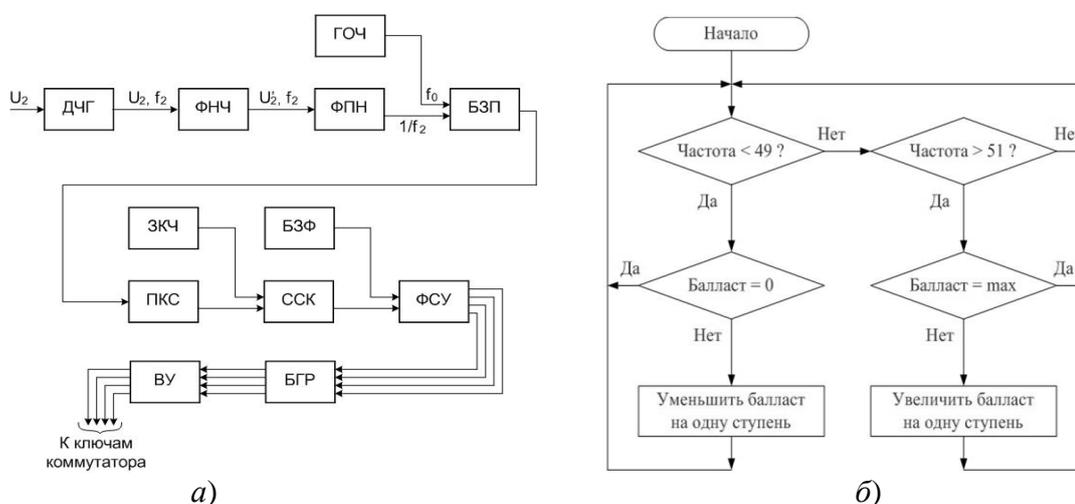


Рисунок 7 – Блок-схема управления системы управления (а) и алгоритм работы схемы управления (б)

Система защиты от ошибок формирования (БЗФ) не позволяет коду достигнуть переполнения или опустошения. Сигналы управления через оптронную гальваническую развязку (БГР) и выходные усилители (ВУ) подаются на силовые ключи коммутатора балластных резисторов. На рис. 7 ДЧГ – датчик текущей частоты генератора; ГОЧ – генератор образцовой (кварцированной частоты); ЗКЧ – задатчик кода стабилизируемой частоты; ФСУ – формирователь управляющих ключами сигналов.

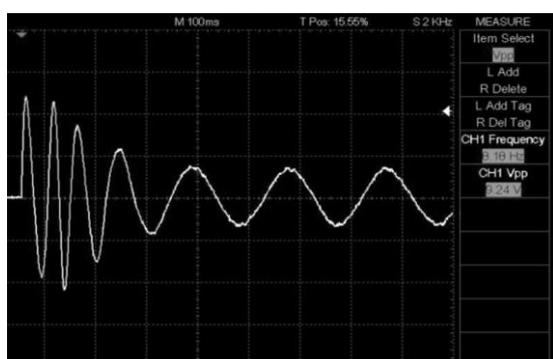
Для рассмотрения переходных процессов в НТСГ с постоянными магнитами, спроектированного по разработанной математической модели (см. главу 2), были проведены стендовые испытания. Главная задача испытаний, заключалась в доказательстве адекватности математической модели переходных процессов и анализе формы выходного напряжения на холостом ходу и при нагрузке.

Вид осциллограммы тока при коротком замыкании (рисунок 8, а) совпадает с графиком короткого замыкания, полученным ранее по математической модели (рисунок 8, б). Большинство амплитудных точек,

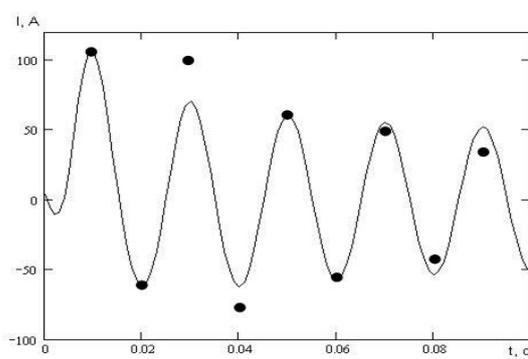
полученной осциллограммы совпадают с амплитудными значениями расчетной кривой тока при коротком замыкании (рисунок 8, б). Это указывает на то, что математическая модель достаточно точно отражает переходные процессы в нем. Несовпадение отдельных точек амплитуд тока при испытаниях с точками, полученных в результате расчета математической модели, обусловлено тем, что в ней не учтено насыщение стали. Величина ударного тока равна: $I_{уд.} = 10I_n$.

Ток генератора снижается до амплитудного значения установившегося тока $I_{уст.} = 4I_n$. Вследствие недостаточной мощности приводного двигателя, его скорость снижалась, и частота изменения тока уменьшалась.

Для проверки результатов моделирования формы поля, описанной в 3 главе, были сняты осциллограммы выходного напряжения (рисунок 9 а, б).



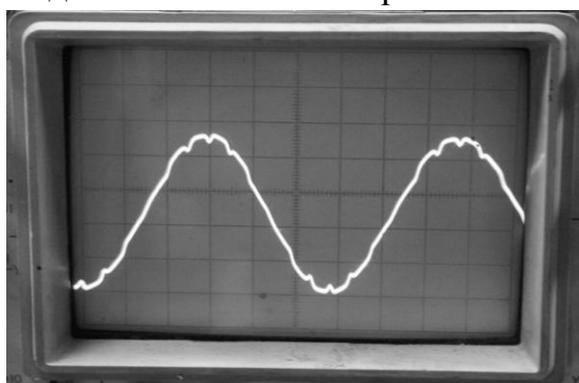
а)



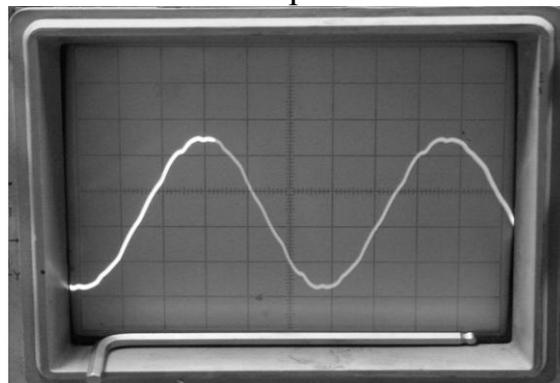
б)

Рисунок 8 – Осциллограмма тока при трехфазном коротком замыкании (а) и кривая тока при коротком замыкании (б)

На холостом ходу (рисунок 9 а), осциллограмма напряжения имеет форму с небольшими провалами, возникающими из-за соотношения между шириной паза и шириной зубца. Этот факт подтвержден трехмерным моделированием зубчатости на полюсном наконечнике, проведенным в 3 главе. При постепенном увеличении нагрузки, форма напряжения сглаживалась (рисунок 9 б) вследствие влияния поперечного магнитного поля статора.



а)



б)

Рисунок 9 – Осциллограммы напряжения на холостом ходу (а) и при нагрузке (б)

По итогам испытаний и для сравнения с результатами математической модели, была построена внешняя характеристика НТСГ (рисунок 10). 4 темных точки – это значения, снятые при испытаниях. По этим точкам построена

внешняя характеристика. Она ниже расчетной на величину ΔU . Как было сказано выше, это обусловлено потоками рассеяния, возникающими между полюсами ротора. Сравнение результатов, посчитанных по математической модели с результатами, полученными по итогам испытаний приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Сравнение результатов

	Значения по математической модели		Значения по результатам испытаний	
	U, В	I, А	U, В	I, А
1	238	0,5	220	0,5
2	235	4	225	4
3	232	7	214	7
4	228	9,5	218	9,5

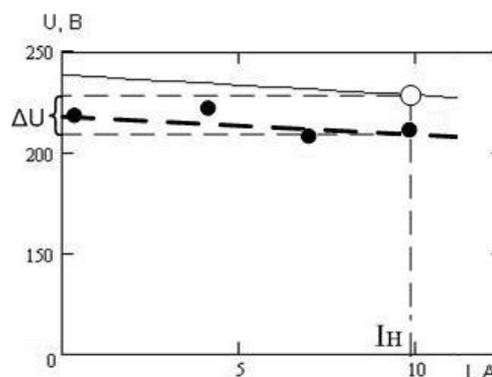


Рисунок 10 – Внешняя характеристика НТСГ

Полученные экспериментальные значения и осциллограммы тока имеют удовлетворительную сходимость с аналитическими и расчетными исследованиями.

Основные выводы и результаты работы

1. На основе теории обобщенной электрической машины, с применением теории электромагнитного поля и магнитных схем замещения разработана математическая модель переходных процессов НТСГ, которая позволяет оценить величину и длительность переходных токов, существенно влияющих на работоспособность и надежность конструкции самого генератора и выбор элементов системы управления.

2. На основании решения дифференциальных уравнений получены выражения для переходных токов и их составляющих, а также токов в установившемся режиме, являющихся основой для выбора элементов системы управления режимами работы генератора.

3. Разработанная методика трехмерного моделирования магнитного поля НТСГ с постоянными магнитами в Ansoft Maxwell 15, который может использоваться в качестве современного инженерного инструментария автоматизации проектирования конструкторской подготовки их промышленного производства и с достаточной степенью точности с учетом особенностей конструкции отображать реальные процессы, происходящие в машине. По результатам проведенного моделирования установлено, что добиться формы выходного напряжения генератора близкой к синусоидальной, можно соответствующим уменьшением ширины магнита, относительно ширины полюсного наконечника. С целью снижения потерь постоянных магнитов ротора при проектировании, определена рекомендуемая величина коэффициента относительной ширины магнита $k_{ш}$ и коэффициента относительной ширины полюсного наконечника $k_{мп}$ для низкоскоростных генераторов различной мощности.

4. Проведенные экспериментальные исследования генератора на испытательном стенде, позволяющем имитировать работу микроГЭС, показали адекватность его математической модели и подтвердили работоспособность генератора в переходном и установившемся режимах. Полученные при этом осциллограммы переходных токов, совпадают с результатами математического моделирования. Осциллограммы формы выходного напряжения совпадают с результатами моделирования формы магнитного поля, проведенными в Ansoft Maxwell 15. Качество напряжения в условиях лабораторных испытаний соответствует требованиям ГОСТ Р 54149-2010 (п. 4.2.1, 4.2.4.1).

Научные публикации по теме диссертации в изданиях, рекомендованных ВАК

1. Архипцев М.Г. Математическое моделирование переходных процессов в торцевом синхронном генераторе с магнитоэлектрическим возбуждением. / М.Г.Архипцев, А.Л.Встовский, В.И.Пантелеев, К.С.Федий // Известия Томского политехнического университета. Том 321, выпуск № 4. – ТПУ 2012.

Патенты и авторские свидетельства

2. Патент 2406213 Российская Федерация, МПК7 Н 02 К 21/24 / Торцевая электрическая машина / А. Л. Встовский, М. П. Головин, К. С. Федий, Е. С. Встовская, М. Г. Архипцев А.№ 2009120866/07. Заявлено 01.06.09. Опубликовано 10.12.10, Бюл.: №34

3. Архипцев М.Г. Программно-вычислительный комплекс «Исследование диаграммы магнитов ротора торцевого синхронного генератора». / М.Г. Архипцев, А.Л. Встовский, К.С. Федий // Свидетельство Роспатента о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2011615947 от 29.07.2011.

4. Архипцев М.Г. Программно-вычислительный комплекс «Программный модуль исследования распределения магнитного поля статора в рабочем зазоре в пределах полюсной дуги». / М.Г. Архипцев, А.Л. Встовский, К.С. Федий, Е.А. Спириин // Свидетельство Роспатента о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2012614061 от 04.05.2012.

5. Архипцев М.Г. Программно-вычислительный комплекс «Программный модуль исследования переходных процессов в торцевом синхронном генераторе». / М.Г. Архипцев, А.Л. Встовский, К.С. Федий // Свидетельство Роспатента о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2012614062 от 04.05.2012.

6. Архипцев М.Г. Программно-вычислительный комплекс «Программа исследования распределения магнитного поля в межполюсном пространстве статора торцевого генератора». / М.Г. Архипцев, А.Л. Встовский, К.С. Федий, Е.А. Спириин // Свидетельство Роспатента о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2012615286 от 13.06.2012.

7. Архипцев М.Г. Программно-вычислительный комплекс «Программный модуль исследования магнитной проводимости полюса магнита торцевого синхронного генератора по продольной оси». / М.Г. Архипцев, А.Л. Встовский, К.С. Федий, Е.А. Спириин // Свидетельство Роспатента о государственной реги-

страции программы для ЭВМ № 2012616219 от 06.07.2012.

Другие научные публикации по теме диссертации

8. Архипцев М.Г. Управление режимами работы свободнопоточной МИКРОГЭС. / М.Г. Архипцев, Е.С. Встовская. // Сборник трудов XV Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных: Современная техника и технологии. Том 1. – ТПУ 2009.
9. Архипцев М.Г. Низкоскоростной торцевой синхронный генератор МИКРОГЭС и его система управления. / М.Г. Архипцев, Е.С. Встовская. // Труды XI Всероссийского студенческого научно-технического семинара: Энергетика: экология, надёжность, безопасность. Том 1 – Электроэнергетическое направление. – ТПУ 2009.
10. Архипцев М.Г. Особенности конструкции низкоскоростного генератора МИКРОГЭС и его системы управления. / М.Г. Архипцев, Е.С. Встовская. // Сборник материалов V Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных: Молодежь и наука: начало XXI века. Часть 4. – СФУ 2009.
11. Архипцев М.Г. Особенности конструкции и определения параметров многополюсного торцевого синхронного генератора. / М.Г. Архипцев, Е.С. Встовская, А.Л. Встовский // Материалы I Всероссийской научно-практической (заочной) конференции: Актуальные вопросы развития современной науки, техники и технологий. – М. – 2009.
12. Архипцев М.Г. Определение индуктивных сопротивлений низкоскоростного торцевого синхронного генератора. / М.Г. Архипцев, А.Л. Встовский, К.С. Федий // Сборник материалов международной заочной научно-практической конференции: Наука и техника в современном мире. – Новосибирск 2012.
13. Архипцев М.Г. Переходные процессы в торцевом синхронном генераторе с магнитоэлектрическим возбуждением. / М.Г. Архипцев, К.С. Федий // Труды XII Международной научной конференции “Интеллект и наука”. – Железногорск 2012.
14. Архипцев М.Г. Расчет параметров низкоскоростного торцевого синхронного генератора. / М.Г. Архипцев, К.С. Федий, А.Л. Встовский // Сборник материалов VIII Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных, посвященной 155-летию со дня рождения К.Э. Циолковского: Молодежь и наука. – СФУ 2012.