



Железняк Владимир Николаевич

**Оценка влияния режимов работы на комплекс оборудования
ударного генератора повышенной мощности**

2.4.1. Теоретическая и прикладная электротехника

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург
2024

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Научный руководитель: **Коровкин Николай Владимирович**
профессор, доктор технических наук

Официальные оппоненты: **Назолин Андрей Леонидович**
доктор технических наук, заведующий лабораторией виброакустической диагностики машин, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт машиноведения им. А. А. Благонравова Российской академии наук» (ИМАШ РАН), г. Москва

Солёный Сергей Валентинович
кандидат технических наук, доцент, проректор по образовательным технологиям и инновационной деятельности, заведующий кафедрой «Электромеханика и робототехника», Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» (ГУАП), г. Санкт-Петербург

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II», г. Санкт-Петербург

Защита состоится 25 декабря 2024 г. в 11:00 часов на заседании диссертационного совета У.2.4.1.39 при Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» по адресу: 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, главный учебный корпус, ауд. 118.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке и на сайте Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»: <https://library.spbstu.ru/ru/>

Автореферат разослан «22» ноября 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета У.2.4.1.39
кандидат технических наук, доцент

Миневич Татьяна Геннадьевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы.

Идея применения электрических машин в качестве источников мощных токовых импульсов для создания сверхсильных магнитных полей была предложена советским академиком П.Л. Капицей и воплощена в жизнь в виде однофазного импульсного синхронного генератора М.П. Костенко еще в 1924г. Первые ударные генераторы в СССР были изготовлены заводом «Электросила» под руководством М.П. Костенко и имели мощность 1,2 МВА и 15 МВА при скорости вращения 3000 об/мин.

Опыт применения ударных генераторов, стремительное развитие науки и техники того времени подтолкнуло научную и инженерную мысль к применению в качестве ударных генераторов сперва традиционные синхронные турбогенераторы, а позже, разрабатывать генераторы специальной конструкции для увеличения мощности короткого замыкания. В 1925 г компанией «Метрополитен-Виккерс» был построен первый импульсный быстроходный двухполюсный генератор, способный выдавать большие кратности токов короткого замыкания за счет пониженных значений сверхпереходного индуктивного сопротивления по продольной оси x''_d . На основе успешного применения данного ударного генератора ряд мировых компаний перешли на проектирование и изготовление ударных генераторов в двухполюсном и четырехполюсном исполнении. В то же время заводом «Электросила» был разработан и изготовлен ударный генератор модельной мощности 83 МВА, мощностью короткого замыкания 1200 МВА.

Стремительное развитие отечественной энергетики и реализация плана ГОЭЛРО подтолкнуло, на тот момент, единственный энергомашиностроительный завод имеющий опыт изготовления ударных генераторов, завод «Электросила», начал разрабатывать ряд ударных генераторов для создания импульса для испытаний электрических аппаратов, предназначенных для применения на сооружаемых объектах энергетики. Тогда были созданы ударные генераторы модельной мощности 2,5 МВА, 12 МВА, 25 МВА. Эти ударные генераторы впервые были размещены в специализированных испытательных центрах, созданных для проведения различного рода импульсных испытаний электротехнического оборудования. Первым из них был стенд Всесоюзного электротехнического института (ВЭИ) – 1941г.

Дальнейшее увеличение единичных мощностей энергетических объектов и, как следствие, электрических аппаратов, потребовало увеличения мощности короткого замыкания, которую должны были обеспечивать ударные генераторы испытательных центров. В 1964г был сооружен и введен в работу испытательный центр «НИЦ Бескудниково» самый мощный в СССР тот момент и действующий в настоящее время. Там установлены ударные генераторы типа ТИ-75-2 мощностью короткого замыкания 1200 МВА и ТИ-100-2, самого мощного эксплуатируемого отечественного ударного генератора мощностью короткого замыкания 2500 МВА. На этой мощности короткого замыкания остановилось развитие отечественных ударных генераторов, причем зарубежные образцы были изготовлены были на мощность короткого замыкания 6200 МВА при 1800 об/мин – компанией «Mitsubishi», 4300 МВА при 750 об/мин – компанией «Siemens».

В разработке ударных генераторов и генераторов кратковременного действия на заводе «Электросила», а также в профильных специализированных предприятиях и институтах принимали участие выдающиеся ученые и инженеры: Я.Б. Данилевич, И.А. Глебов, Э.Г. Кашарский, Л.П. Гнедин, Г.М. Хуторецкий, В.М. Фридман, Ф.Г. Рутберг, Ф.М. Детинко, Г.А. Сипайлов, Н.В. Шилин и др. Также в становлении теоретической и экспериментальной базы по освоению ударных генераторов участвовал Ленинградский политехнический институт и Томский политехнический институт.

В настоящее время, для обеспечения энергетической независимости России остро встал вопрос о создании нового современного испытательного центра большой мощности с размещением ударных генераторов единичной мощностью порядка 5000 МВА. Для оценки возможности создания ударного генератора подобной мощности необходимо систематизировать накопленный опыт проектирования, изготовления и эксплуатации ударных генераторов различной мощности, определить и систематизировать основные параметры и зависимости, определяющие мощность ударного генератора и возможность ее повышения. Применение методов оптимизации расчета параметров является одним из ключевых современных подходов к проектированию, впервые примененному для ударных генераторов с целью обеспечения повышенной мощности. При расчете основных параметров ударных генераторов, выборе его компоновки необходимо учитывать особые режимы работы, анализ и моделирование которых был выполнен в диссертационной работе. Также на стадии проектирования необходимо определить характеристики надежности, мероприятия ее обеспечения и повышения, рекомендации к совершенствованию конструкции ударных генераторов. Всё это определяет актуальность поставленных задач и результаты их решения, приведенные в диссертационной работе.

Цель диссертации заключается в анализе режимов испытаний современного электротехнического оборудования в лабораториях большой мощности испытательных центров, оценки влияния этих режимов на параметры и конструкцию ударных генераторов для повышения мощности короткого замыкания и определении требований к оборудованию, обеспечивающему работоспособность ударных генераторов.

Достижение цели выполняется решением следующих задач:

- 1) определение основных параметров, влияющих на мощность короткого замыкания ударных генераторов;
- 2) систематизация и формирование рекомендаций по применению основных параметров ударных генераторов для проектирования;
- 3) оптимизация параметров ударных генераторов для повышения мощности короткого замыкания;
- 4) разработка требований к основному обеспечивающему оборудованию комплекса ударного генератора для обеспечения работоспособности и надежности ударного генератора.

Предметом исследования диссертационной работы является ударный генератор повышенной мощности, работающий в комплексе с обеспечивающим оборудованием.

Достоверность полученных расчетных результатов подтверждается удовлетворительным согласованием с экспериментальными данными на основе анализа проектирования и испытаний ударного генератора-аналога ТИ-100-2.

Личный вклад автора состоит в определении цели и задач исследования; проведении обзора, получении всех основных теоретических результатов; разработке методов расчета, постановке и проведении вычислительных экспериментов на основе комплекса программ и численных моделей, самостоятельно разработанных автором; обработке, обобщении и анализе результатов расчетов с данными натурных испытаний; подготовке основных публикаций по представленной работе и апробацию результатов исследования на всероссийских и международных конференциях.

Научная новизна

1. Выполнен анализ опыта испытаний и эксплуатации ударного генератора-аналога для верификации аналитической методики электромагнитного расчета, позволяющей выполнять расчетную оценку основных параметров и характеристик ударного генератора повышенной мощности;

2. Впервые определены, систематизированы и внедрены в АО «Силовые машины» основные параметры, определяющие мощность короткого замыкания ударного генератора и возможность ее повышения.

3. Впервые определены общие критерии оптимизации параметров ударного генератора и применены алгоритмы оптимизации для повышения мощности короткого замыкания на примере четырехполюсного ударного генератора мощностью порядка 5000 МВА;

4. Выполнен анализ режимов работы ударного генератора для испытания электротехнического и электроэнергетического оборудования для оценки возможности практической реализации ударного генератора повышенной мощности;

5. Впервые разработаны в АО «Силовые машины» технические требования к оборудованию, обеспечивающему работоспособность ударного генератора в лаборатории большой мощности испытательного центра и разработаны рекомендации по мероприятиям, позволяющим обеспечить надежность эксплуатации комплекса оборудования ударного генератора.

Практическая значимость полученных в диссертационной работе результатов заключается в том, что ее результаты направлены на разработку ударного генератора повышенной мощности короткого замыкания до уровня 5000 МВА и более с целью реализации энергетической стратегии Российской Федерации в части обеспечения максимальной технологической и энергетической независимости страны от импортных поставщиков электротехнического оборудования и услуг с учетом разрабатываемых инновационных отечественных образцов электротехнического и электроэнергетического оборудования для сохранения надежности энергосистемы и ее развития при постоянно растущей потребности в электроэнергии и повышении единичной мощности генерирующих объектов.

Разработки и результаты диссертационного исследования:

1. Внедрены и используются для расчетной оценки возможности повышения мощности короткого замыкания ударного генератора до уровня 5000 МВА с перспективой увеличения;

2. Внедрены и используются при оценке возможности практической реализации ударного генератора повышенной мощности в испытательном центре;

3. Используются при разработке требований к оборудованию, обеспечивающему работоспособность ударного генератора в лаборатории большой мощности испытательного центра;

4. Используются при анализе требований к ударным генераторам различной мощности, необходимых для различных режимов испытаний;

5. Явились основой для разработки основных технических требований к разрабатываемому ударному генератору повышенной мощности для обеспечения требуемых режимов работы с целью испытаний электротехнического и электроэнергетического оборудования;

6. Планируется к использованию в АО «Силовые машины» при проектировании и производстве ударного генератора повышенной мощности;

7. Планируется к использованию при разработке исходных данных и технических требований для проектирования и создания лаборатории большой мощности испытательного центра.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Анализ опыта проектирования, испытаний и эксплуатации для верификации методики электромагнитного расчета ударного генератора повышенной мощности;

2. Определение и оптимизация основных параметров ударного генератора, влияющих на мощность короткого замыкания;

3. Расчетный анализ режимов работы ударного генератора повышенной мощности с целью испытаний электротехнического и электроэнергетического оборудования в лаборатории большой мощности испытательного центра и оценка влияния этих режимов на ударный генератор и комплекс оборудования;

4. Перечень, функции и требования к оборудованию, обеспечивающему работоспособность ударного генератора в лаборатории большой мощности испытательного центра;

5. Формулировка тенденций дальнейшего перспективного развития в направлении повышения мощности ударных генераторов.

Внедрение результатов. Теоретические и практические результаты диссертационной работы, выработанные рекомендации и расчетные методики использованы при выполнении научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ АО «Силовые машины».

В отделе расчетов специального конструкторского бюро по проектированию турбогенераторов завода «Электросила» были внедрены следующие результаты работы:

- верифицирована по результатам опыта испытаний и эксплуатации ударного генератора мощностью короткого замыкания 2500 МВА аналитическая методика электромагнитного расчета с целью применения для ударного генератора повышенной мощности;

- определены диапазоны рекомендованных величин основных электромагнитных нагрузок и геометрических характеристик магнитной цепи и обмоток статора и ротора, определяющих основные результирующие параметры ударного генератора;

- параметры ударного генератора, определяющие мощность короткого замыкания и возможность ее повышения, представлены общие критерии оптимизации основных параметров ударного генератора;

- применение для разработки технических требований к ударному генератору повышенной мощности и оборудованию, обеспечивающему его работоспособность в лаборатории большой мощности испытательного центра;

- применение расчетных программ для определения эквивалентной теплопроводности изоляции обмотки статора для оценки охлаждения ударного генератора и определения напряженности электрического поля в изоляции для оценки длительной диэлектрической прочности при повышенных напряжениях с применением внедренной базы данных электроизоляционных материалов корпусной изоляции обмотки статора;

- рекомендации для конструктивных решений ударного генератора повышенной мощности и возможности применения унифицированного подхода к проектированию узлов ударных генераторов различных мощностей;

- исходные данные для проектирования лаборатории большой мощности испытательного центра и требования к оборудованию.

Апробация работы. Основные положения и научные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на международной конференции POWER-GEN Russia 2016, конференции молодых исследователей в области электротехники и электроники (ElConRus 2022, 2023, 2024), 24^{ой} конференции молодых профессионалов по электронным приборам и материалам (EDM-2023), I Всероссийской конференции по электрическим машинам (ВКЭМ 2022).

Публикации. Основные научные результаты диссертации опубликованы в 7 работах, из которых 3 в рецензируемых изданиях, определяемых в соответствии с рекомендацией ВАК, 4 работы проиндексированы международными базами цитирования Scopus и Web of Science, получено 2 свидетельства о регистрации программы для ЭВМ, получено 1 свидетельство о регистрации базы данных.

Структура и объем диссертационной работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав с выводами, заключения, списка литературы, включающего 91 наименование и шесть приложений. Работа изложена на 202 листах машинописного текста, содержит 67 рисунков и 31 таблицу.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы работы, сформулированы цели и задачи работы, представлена научная новизна и практическая значимость работы.

Первая глава посвящена истории и предпосылкам создания ударных турбогенераторов как специализированного и значимого для электроэнергетики страны оборудования. С повышением единичной мощности энергетического оборудования, повышения величины токовых нагрузок и уровней напряжения электротехнического оборудования потребовалось соответственно повышать мощности короткого замыкания ударных генераторов для обеспечения испытаний вновь разрабатываемого оборудования с учетом перспективы на будущее. Представлена эволюция развития ударных генераторов в отечественной энергетике, мощностной ряд и перспективы их развития.

Следует отметить, что с развитием электроэнергетики страны и эволюционным ростом требуемых мощностей короткого замыкания, необходимых для проведения испытаний электротехнического оборудования, определилась потребность в создании специализированных испытательных центров, включающих в себя лаборатории большой мощности. Лаборатории большой мощности способны разместить несколько агрегатов, работающих параллельно для создания максимального импульса тока короткого замыкания, а также консолидировать в себе единую функцию управления, контроля и регистрации результатов испытаний (рисунок 1).



Рисунок 1 – Ударные генераторы типа ТИ-100-2 в лаборатории большой мощности испытательного центра

В главе представлена общая доступная из открытых источников информация по составу лабораторий большой мощности различных испытательных центров мира.

Несмотря на то, что ударный генератор получил свое происхождение от энергетических машин, а именно, турбогенераторов, ударные генераторы несомненно содержат особые требования к конструкции и характеристикам, которые должны их отличать друг от друга. Данные особенности и различия приведены в завершающей части первой главы.

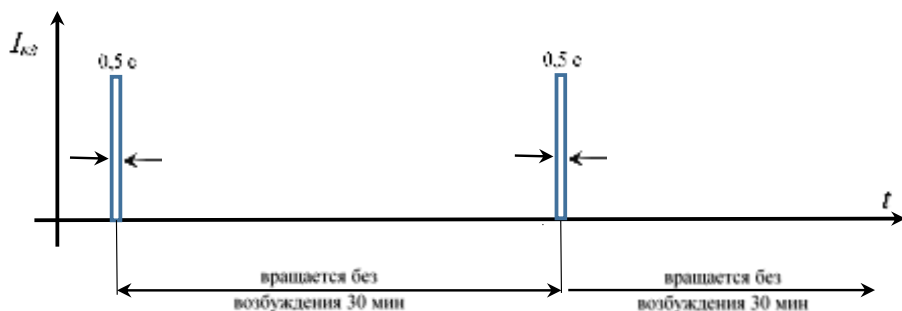
Вторая глава описывает задачи, которые необходимо поставить и решить для проектирования ударных генераторов повышенной мощности. Задачи для проектирования новых типов ударных генераторов вытекают из анализа опыта испытаний и эксплуатации референтных, наиболее распространенных ударных генераторов типа ТИ-100-2 мощностью

короткого замыкания 2500 МВА. Несомненно, необходимость разработки новых типов ударных генераторов преследуют собой цель не только обеспечения надежности существующего оборудования и повторения его по актуализированной документации, но, в первую очередь, нацелены на повышение мощности ударных генераторов до величин 4000 – 5000 МВА.

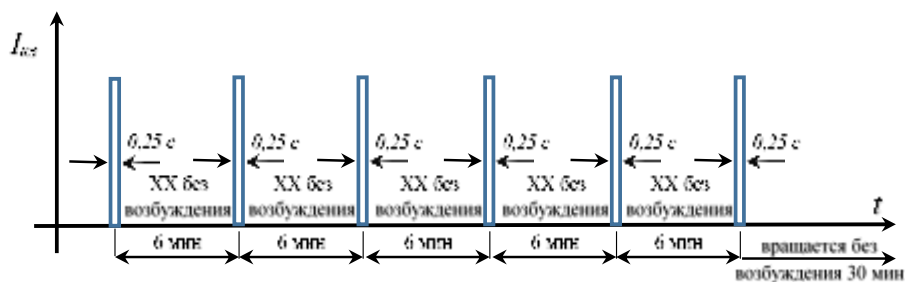
Необходимую мощность короткого замыкания определяют стратегические цели создания нового, мощного отечественного электротехнического и электроэнергетического оборудования, разработка которого завершается проведением испытаний в лабораториях большой мощности испытательных центров в определенных режимах. Режимы испытаний определяются типом электротехнического и электроэнергетического оборудования и требованиями стандартов на данные типы оборудования. Приведены основные виды испытаний определенных типов оборудования:

1. Испытание на стойкость к токам короткого замыкания - испытания электрического аппарата на устойчивость к электродинамическим и термическим воздействиям при протекании по нему токов КЗ.
2. Испытание на коммутационную способность - испытания электрического аппарата на способность включать и отключать токи КЗ.
3. Испытания на локализационную способность - испытания на стойкость ячейки КРУ (комплектного распределительного устройства) к воздействию внутренней дуги.
4. Испытание на отключение асимметричных токов короткого замыкания – испытания на отключение 130% асимметричного тока КЗ, с затуханием периодической составляющей тока. Выполняется для автоматических выключателей.

Графическое изображение режимов испытаний, которые должен обеспечить ударный генератор, приведено на рисунке 2.



а)



б)

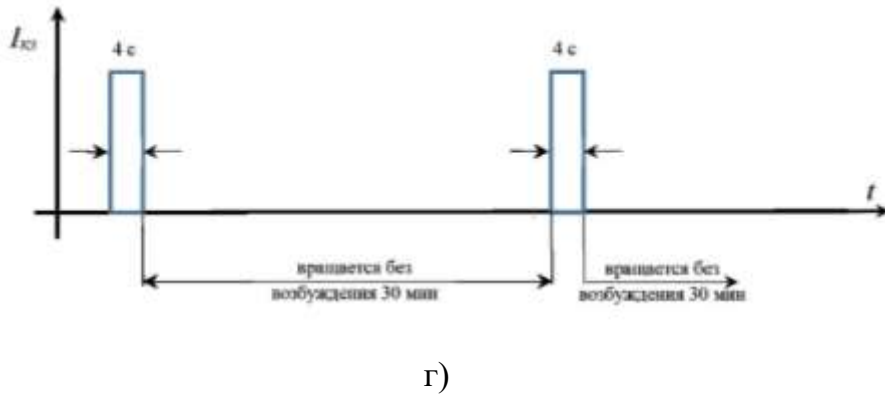
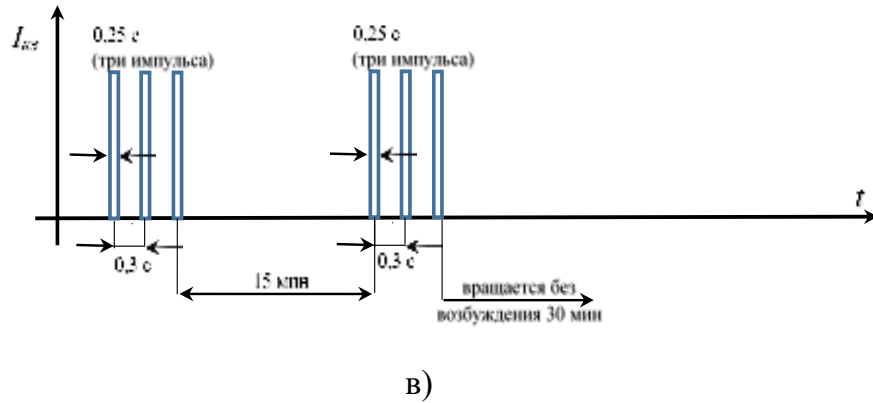


Рисунок 2 – Режимы работы ударного генератора

Принимая во внимание необходимость обеспечивать приведенные на рисунке 2 режимы работы, при которых ток короткого замыкания зависит от длительности испытательного режима, т.е. максимальный ток (ударный ток короткого замыкания, например, 155 кА) при минимальной длительности 0,3-0,5 с и «минимальный» ток короткого замыкания длительностью несколько секунд (величина тока и длительность определяются исходя из интегральной характеристики, не превышающей номинальной $0,5I_{кз}^2$), очевидно, что существующие ударные генераторы наибольшей мощности короткого замыкания, которые на сегодня применяются при испытаниях в России, типа ТИ-100-2, не могут обеспечить необходимую единичную мощность, а также максимальную суммарную мощность короткого замыкания для испытаний современных выключателей, токопроводов и другого оборудования. Так для выключателей номинальным током отключения 190 кА и 300 кА необходимы испытания на отключение асимметричных токов КЗ с пиковым значением тока КЗ 618 кА и 976 кА соответственно.

По одному примеру видно, что необходимо значительное повышение единичной мощности короткого замыкания ударных генераторов относительно генератора типа ТИ-100-2 с уровня 2500 МВА до 5000 МВА. Ударная мощность короткого замыкания на зажимах генератора определяется как

$$P_y = \sqrt{3} \cdot U \cdot I = \sqrt{3} \cdot U \frac{U}{\sqrt{3} \cdot x''_d} = \frac{U^2}{x''_d} \quad (1)$$

где P_y – ударная мощность короткого замыкания, МВА;

U – номинальное напряжение ударного генератора, В;

x''_d – сверхпереходное индуктивное сопротивление в Ом, приведенное к модельной мощности. Или

$$P_y = P_M \frac{1}{x''_d} \quad (2)$$

P_m – модельная мощность генератора, МВА;

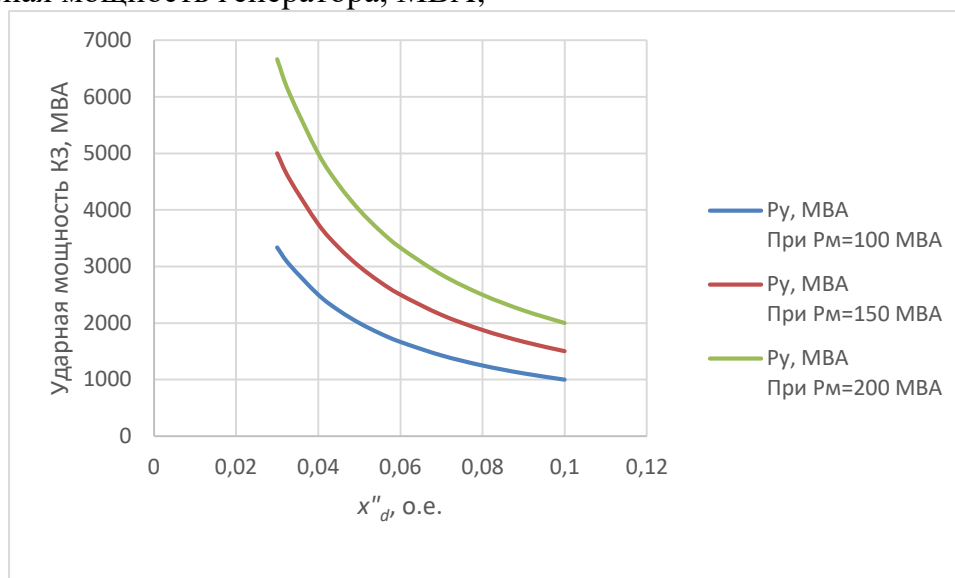


Рисунок 3 – Зависимость ударной мощности P_u от сверхпереходного индуктивного сопротивления x''_d

Как видно из зависимостей (1) и (2), мощность короткого замыкания зависит от номинального напряжения ударного генератора и сверхпереходного индуктивного сопротивления по продольной оси или от величины модельной мощности, определяющей массогабаритные показатели и основные электромагнитные параметры ударного генератора в режиме холостого хода с номинальным напряжением. Режим холостого хода с номинальным напряжением ударного генератора является исходным режимом работы, из которого проводятся испытательные режимы. Таким образом для повышения мощности ударного генератора требуется увеличить модельную мощность и снизить сверхпереходное индуктивное сопротивление по продольной оси. Типовой диапазон величины сверхпереходного индуктивного сопротивления по продольной оси для ударных генераторов находится в пределах 0,02-0,04 о.е. Дальнейшее уменьшение данного параметра затруднительно с технической точки зрения, т.к. он определяется индуктивностью рассеяния обмотки статора: выбором обмоточных данных обмотки статора и конфигурацией паза статора с необходимостью сохранения удовлетворительного гармонического состава кривой напряжения в режиме холостого хода, т.е. коэффициент искажения синусоидальности не должен превышать 5 %. Таким образом, для повышения мощности ударного генератора требуется повышать его модельную мощность, т.е. увеличивать массогабаритные показатели ударного генератора.

Проблема повышения мощности короткого замыкания ударных генераторов аналогична повышению мощности традиционных энергетических машин большой мощности при сохранении системы охлаждения, а именно, увеличение длины и диаметра активного ядра генератора. Причем увеличение длины как статора, так и ротора возможно в достаточно большом диапазоне, то увеличение диаметра ограничивается механической прочностью применяемых на роторе материалов: поковка вала и поковка бандажного кольца при вращении на номинальной частоте вращения 3000 об/мин при 50 Гц и 3600 об/мин при 60 Гц, причем ротор генератора должен быть рассчитан и испытан на механическую прочность при повышенной частоте вращения 120% от номинальной, что составляет 3600 об/мин для 50 Гц и 4320 об/мин для 60 Гц.

Практически, максимальный диаметр вала ротора двухполюсного турбогенератора ограничен величиной 1250 мм, а для четырехполюсных генераторов диаметр ротора может составлять 1800 – 1900 мм с запасом по механической прочности в том числе при работе с

частотой 60 Гц. Данный подход давно реализован всеми мировыми производителями для энергетических турбогенераторов большой и предельной мощности: для мощностей более 1200 МВт целесообразно применять четырехполюсные машины. Следовательно, разработка ударных генераторов повышенной мощности короткого замыкания, т.е. более 3000 МВА, должна выполняться в виде генератора в четырехполюсном исполнении.

Третья глава описывает применение методик электромагнитного, теплового расчета ударных генераторов для определения основных параметров, определяющих мощность короткого замыкания и возможность обеспечения испытательных режимов.

Методика электромагнитного расчета ударного генератора как синхронной неявнополюсной машины верифицирована на базе результатов проектирования, испытаний и эксплуатации ударного генератора типа ТИ-100-2. В таблице 1 приведено сравнение экспериментальных и расчетных характеристик ударного генератора типа ТИ-100-2, работающего в испытательном центре НИЦ «Бескудниково».

Таблица 1 Основные расчетные и экспериментальные характеристики двух ударных генераторов НИЦ «Бескудниково»

Наименование параметра	Расчет	Опыт	Отклонение, %
Переходное индуктивное сопротивление по продольной оси (x'_d), Ом	0,133	0,101/0,103	24/22,5
Сверхпереходное индуктивное сопротивление по продольной оси (x''_d), Ом	0,045	0,066/0,065	32/33

Приведенное сравнение позволяет сделать вывод о том, что методика электромагнитного расчета обеспечивает с достаточной точностью совпадение основных параметров ударных генераторов с опытными данными. Выявленные отклонения по x'_d можно объяснить, что при испытаниях использовалась более точная схема замещения, учитывающая наличие двух успокоительных контуров по продольной оси генератора, а x''_d – в процессе испытаний определено ненасыщенное значение ввиду невозможности проведения испытаний на номинальном напряжении, а в расчете определяется насыщенное значение. Влияние насыщения можно приближенно учитывать в инженерных расчетах, как снижение сверхпереходного индуктивного сопротивления относительно ненасыщенной машины на 30-35 % для двухполюсных генераторов, что подтверждается опытом проектирования традиционных энергетических турбогенераторов и неоднократно описывалось в научных статьях и монографиях по проектированию турбогенераторов.

Современный уровень развития компьютерной техники, современных математических алгоритмов позволяют выполнять автоматизированные оптимизационные расчеты основных параметров ударных генераторов с применением верифицированной методики. Оптимизационные расчеты можно реализовать путем рационального выбора функций цели, критериев оптимизации. Для ударных генераторов очевидно это ток короткого замыкания и тепловое состояние активных частей генератора.

$$\left| \bar{I}_{кз}(\mathbf{P}) - \alpha_i I_{кз} \right| \xrightarrow{\mathbf{P} \in G} \min \quad (3)$$

при ограничении $\bar{I}_{кз}(\mathbf{P}) \geq I_{кз}$, где $I_{кз}$ – требуемый (заданный в техническом задании) ток короткого замыкания, $\bar{I}_{кз}(\mathbf{P})$ – ток короткого замыкания ударного генератора, полученный с помощью расчета, для вектора геометрических и электротехнических параметров \mathbf{P} , G –

область изменения параметров, $\alpha_i \geq 1$ - коэффициент запаса по току. И критерий, определяющий возможность работы ударного генератора в режимах с определенными токами и длительностями, математическую формулировку которого мы дадим ниже.

Функции $I_{st,k}(t), I_{rot,k}(t) \quad k=\overline{1,4}$ и вектор варьируемых параметров \mathbf{P} , определяющий конструкцию и характеристики применяемых материалов, позволяют выполнить расчет температуры обмоток и стали ударного генератора в каждом испытании. Результат этого теплового расчета – максимальную температуру, достигнутую при испытаниях, полученную расчетным путем в той или иной обмотке обозначаем Θ_{\max} . Формально эта величина определяется следующим образом:

$$\Theta_{\max}(\mathbf{P}) = \max_{k=\overline{1,4}} \max_{t \in [0, T_k]} \Theta(\mathbf{P}, I_{st,k}, I_{rot,k}, t) \quad (4)$$

Максимальное значение температуры, которую может кратковременно выдерживать ударный генератор ограничено некоторой величиной $\Theta_{\text{крит}}$, значение которой определяется допустимым нагревом обмоток статора и ротора, соответствующим классу нагревостойкости В (130 °С) при классе нагревостойкости изоляционных материалов статора и ротора F (155 °С) [11]. Причем, исходя из описанных выше режимов работы ударного генератора, интенсивность нагрева активных частей разная. Испытательные режимы вследствие малых длительностей при тепловом расчете рассматриваются как адиабатические.

При выполнении расчетов и выборе объема меди обмоток, стали статора необходимо учитывать максимально неблагоприятный режим работы ударного генератора, включая режим холостого хода с номинальным напряжением, из которого генератор входит в эксперимент. Таким образом, ударный генератор перед опытами имеет превышение температуры 60 °С, а эксперимент должен добавить подогрев не более 30 °С для обеспечения надежности работы и сохранения срока службы в установленных пределах по нагреву не более 130 °С (соответствует превышению температуры $\Theta_{\text{крит}} = 90$ °С).

Введем далее, основываясь на функции $\Theta_{\max}(\mathbf{P})$ и величине $\Theta_{\text{крит}}$ еще один критерий оптимальности.

$$|\Theta_{\max}(\mathbf{P}) - \alpha_0 \Theta_{\text{крит}}| \xrightarrow{\mathbf{P} \in G} \min \quad (5)$$

при ограничении $\Theta_{\max}(\mathbf{P}) \leq \Theta_{\text{крит}}$, где $\alpha_0 \leq 1$ - коэффициент запаса по температуре. Коэффициенты α_0 и α_i задаются априорно с характерными значениями: $\alpha_0 \in [0,7; 0,95]$, $\alpha_i \in [1,05; 1,3]$.

Введение двух функций цели сводит задачу оптимального проектирования ударного генератора к многоцелевой постановке:

$$\begin{cases} K_{K3} = |\bar{I}_{K3}(\mathbf{P}) - \alpha_i I_{K3}| \rightarrow \min, \\ K_{\Theta} = |\Theta_{\max}(\mathbf{P}) - \alpha_0 \Theta_{\text{крит}}| \rightarrow \min, \\ \Theta_{\max}(\mathbf{P}) \leq \Theta_{\text{крит}}, \quad \bar{I}_{K3}(\mathbf{P}) \geq I_{K3}, \\ \mathbf{P} \in G, \quad \alpha_0 \leq 1, \quad \alpha_i \geq 1, \end{cases} \quad (6)$$

где ограничения $\mathbf{P} \in G$ определяют необходимость выполнять поиск решения только в заданной области G изменения параметров оптимизации. Отметим здесь, что использование более простой постановки задачи оптимизации:

$$\begin{cases} K_{кз} = |\bar{I}_{кз}(\mathbf{P}) - \alpha_i I_{кз}| \rightarrow \min, \\ \Theta_{\max}(\mathbf{P}) \leq \Theta_{крит}, \quad \bar{I}_{кз}(\mathbf{P}) \geq I_{кз}, \\ \mathbf{P} \in G, \end{cases} \quad (7)$$

неприемлемо. Действительно, пусть найдено решение (6), тогда более тяжелые по весу (и неоправданно более дорогие) машины будут удовлетворять (7), так как температура их обмоток и(или) стали будет ниже за счет: большей общей теплоемкости, большей площади теплоотдачи, большего сечения меди обмоток и т.д. Совершенствование вида (7):

$$\begin{cases} K_{кз} = |\bar{I}_{кз}(\mathbf{P}) - \alpha_i I_{кз}| \rightarrow \min, \\ \alpha \Theta_{крит} \leq \Theta_{\max}(\mathbf{P}) \leq \Theta_{крит}, \quad \bar{I}_{кз}(\mathbf{P}) \geq I_{кз}, \\ \mathbf{P} \in G, \end{cases} \quad (8)$$

где $\alpha \leq 1$ - некоторый априорно задаваемый коэффициент, улучшит, но не изменит ситуацию принципиально, так как и в этом случае в разряд оптимальных попадут более тяжелые, в сравнении с полученными из (6), и, соответственно, более дорогие машины.

Результатом оптимизации является множество Парето. На рисунке 4 представлено множество Парето при оптимизации ударного генератора в четырехполюсном исполнении повышенной мощности короткого замыкания, составляющей 5000 МВА, по трем критериям: ток короткого замыкания $I''_{кз}$, масса сердечника статора G_{a1} и величина сверхпереходного индуктивного сопротивления по продольной оси x''_d .

Значения функций цели для прототипа (референсная точка) примем: $G_{a1} = 1.74 \cdot 10^5$ кг; $x''_d = 5.23$ %; $I''_{кз} = 23.64$ о.е.

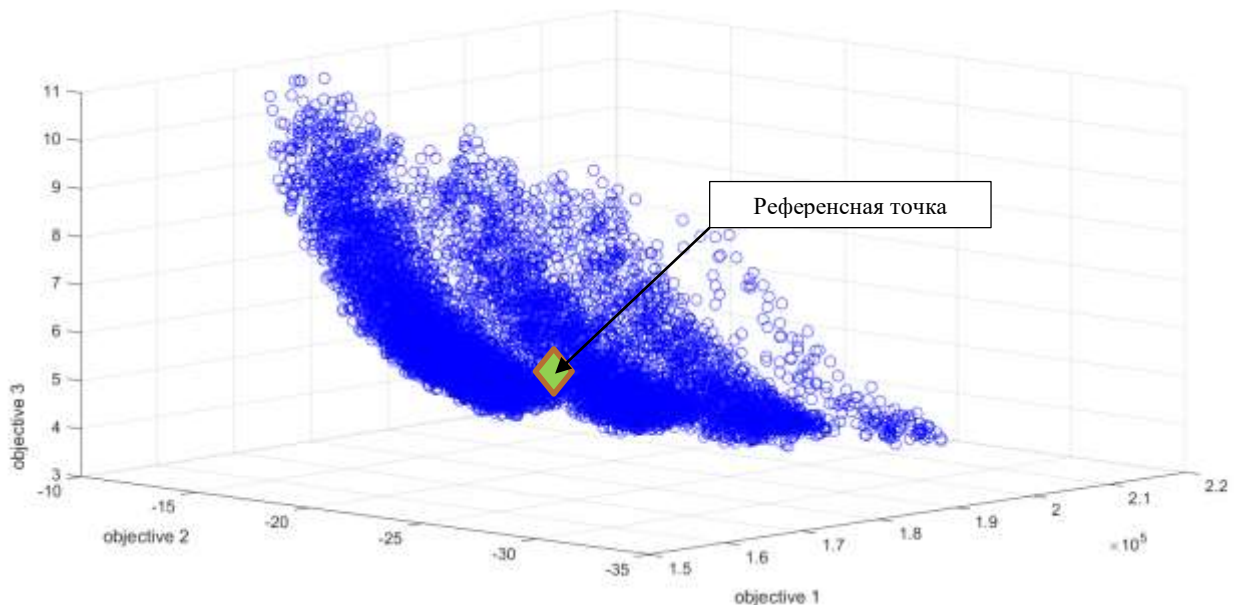


Рисунок 4 - множество Парето оптимизации ударного генератора

Парето-множества удобно выполнять с помощью рассмотрения его сечений, параллельных координатным плоскостям.

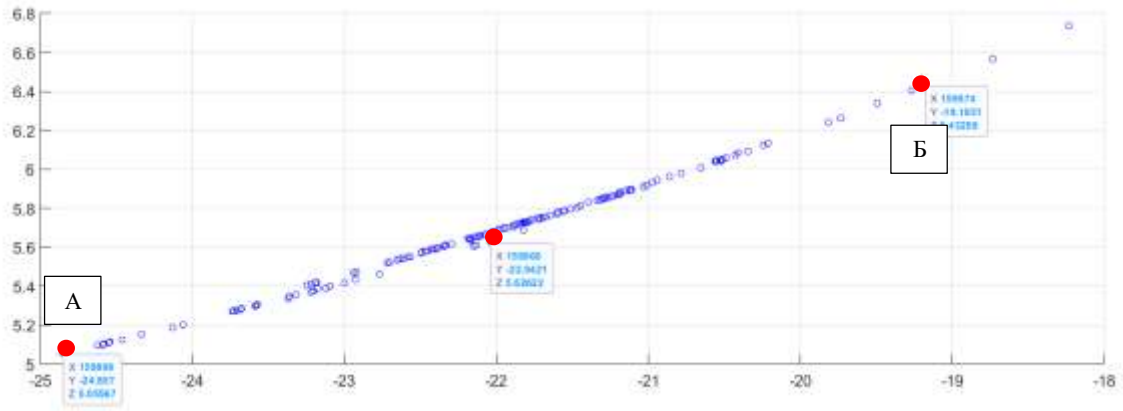


Рисунок 5 - Парето-фронт при фиксированных значениях G_{al} от $15,6$ до $1,6 \cdot 10^5$ кг

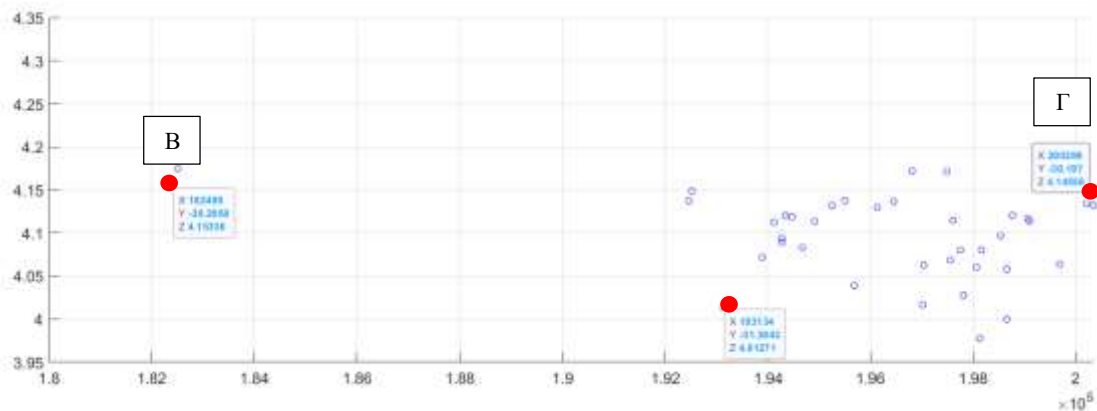


Рисунок 6 - Парето-фронт при фиксированных значениях $I''_{кз}$ от 30 до $31,7$ о.е.

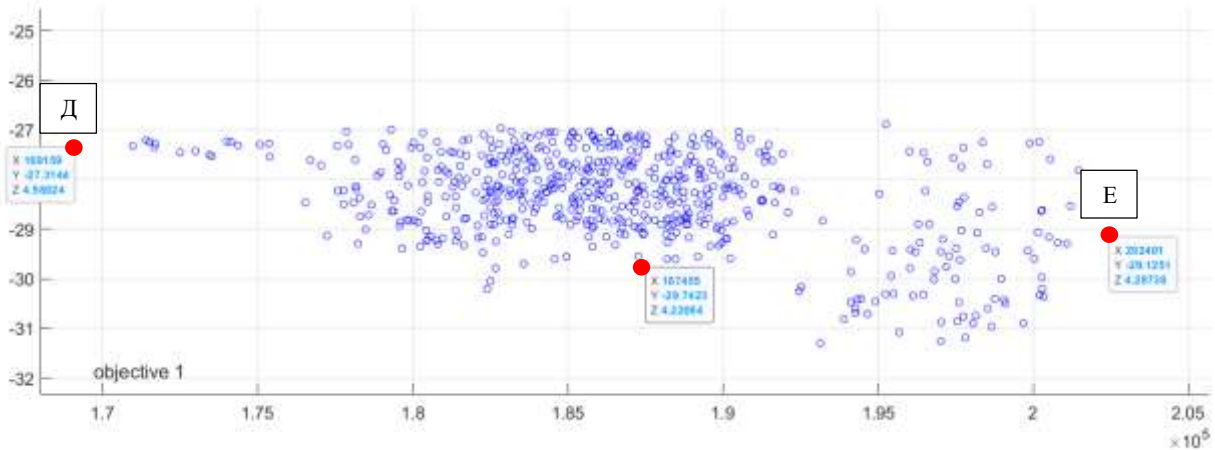


Рисунок 7 - Парето-фронт при фиксированных значениях x''_d от 4 до 6 %

На рисунках 5 - 7 показаны сечения Парето-множества при неизменных значениях одного из критериев, которые могут интерпретироваться как Парето-множества для двух критериев (целевых функций).

В результате применения данного метода были достигнуты цели оптимизации, сведенные в таблицу 2.

Таблица 2 Сравнение полученных данных оптимизации с референсным объектом

Критерии	Референсная точка	Значения критериев при наименьшем G_{a1}	Значения критериев при наибольшем $I''_{кз}$	Значения критериев при наименьшем x''_d
G_{a1} , кг	174 020	159 574	193 134	202 401
$I''_{кз}$, о.е.	23,64	19,84	31,30	29,12
x''_d , %	5,23	6,43	4,01	4,29

Таким образом, применяя данный алгоритм оптимизации – метод векторного критерия качества, удалось снизить величину сверхпереходного индуктивного сопротивления на 30 %, повысить ток короткого замыкания и, следовательно, повысить мощность ударного генератора. Тем не менее, повышение токов короткого замыкания приводит к некоторому, на 10,9 %, увеличению массы исследуемого генератора.

Отметим, что для более широкого поиска оптимального варианта в задании критериев потребуется расширить число функций и допустимый диапазон их изменения.

Дополнительно был применен другой метод оптимизации – метод последовательного квадратичного программирования, встроенный в известный коммерческий программный продукт для выполнения инженерных расчетов. Также выполнена оптимизация параметров четырехполюсного ударного генератора повышенной мощности. На рисунках 8 – 10 приведены характерные расчетные области поиска определенного параметра в пределах заданного диапазона изменения.



Рисунок 8 - Функция внешнего диаметра ротора от шага эволюции

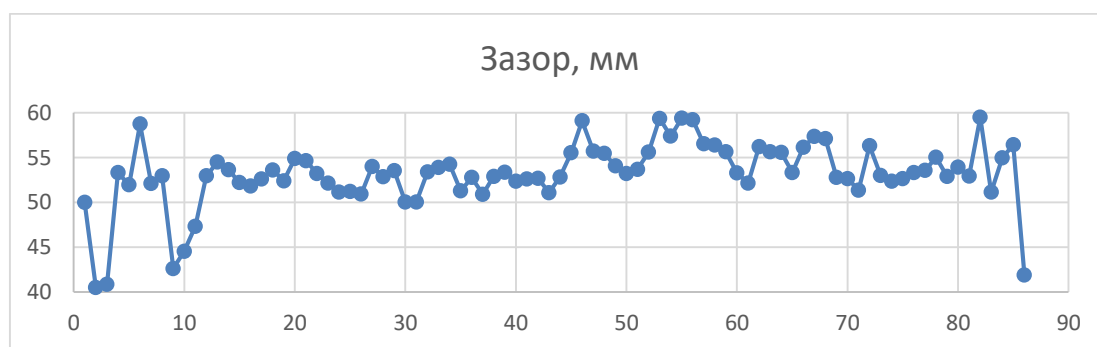


Рисунок 9 - Величина зазора от шага эволюции



Рисунок 10 - Сверхпереходное индуктивное сопротивление от шага эволюции

В результате выполненной оптимизации, не изменяя габаритные размеры активной части ударного генератора, удалось:

- уменьшить сверхпереходное сопротивление на 12,6 %, что способствовало увеличению кратности сверхпереходного тока короткого замыкания на 12,6 % и соответственно повысить мощность короткого замыкания ударного генератора;
- уменьшить ток, плотность тока и напряжение обмотки возбуждения на 2,5, 8 и 8 % соответственно;
- при этом потери при холостом ходе остались практически на неизменном уровне;
- уменьшить потери на возбуждение на 10 %;
- уменьшить массу обмотки статора на 5,7 %, при увеличении плотности тока обмотки статора на 5,1 %.

Решение тепловой задачи для оценки теплового состояния обмотки статора, а также определение длительной диэлектрической прочности корпусной изоляции обмотки статора потребовало внедрения и применения базы данных физико-механических свойств материалов корпусной изоляции. Определенные по результатам испытаний физико-механические свойства материалов корпусной изоляции закладывались в расчет эквивалентной теплопроводности корпусной изоляции, являющейся наиболее нагруженной тепловыми и электрическим воздействиями от протекания электрического тока короткого замыкания различной длительности и напряженности электрического поля в изоляции. Следует особо отметить, что при коротких замыканиях в статоре генератора могут возникать перенапряжения, величиной до 27 кВ, что было учтено в конструкции изоляции обмотки статора путем применения проверенных изоляционных материалов и полупроводящих покрытий, а также заложен запас по диэлектрической прочности. Допустимые температуры нагрева основных узлов турбогенератора, приведенные в таблице 3, определяются классом нагревостойкости применяемых изоляционных материалов: изоляция обмотки статора должна иметь класс нагревостойкости «F», а изоляция обмотки ротора – класс нагревостойкости «H».

Таблица 3 Допустимые температуры активных частей ударного генератора

Наименование узла	Наибольшая допустимая температура, °С	Средства/способ измерения
Изоляция обмотки статора	125	Термометром сопротивления, установленным в пазу статора между верхним и нижним стержнями обмотки статора
Обмотка ротора	150	Согласно зависимости изменения удельного электрического сопротивления меди обмотки ротора от температуры посредством замера сопротивления обмотки ротора
Активная сталь сердечника статора	120	Термопарами, установленными в пакетах между листов электротехнической стали сердечника

С точки зрения анализа теплового состояния ударного генератора режимы короткого замыкания, проиллюстрированные на рисунке 2, определяют тепловые нагрузки в активных частях машины и характеризуются значительными тепловыделениями в сердечнике и обмотке статора, в обмотке ротора и на его поверхности. При работе в режиме холостого хода общий уровень тепловыделений снижается, что позволяет отвести часть накопленного в основных узлах генератора тепла за пределы активной зоны машины. Тепловой расчёт такого нестационарного процесса является важнейшей частью проектирования ударного генератора.

Расчет произведен при помощи трехмерного моделирования в пакете ANSYS с учетом распределения подогрева охлаждающего воздуха по длине канала посредством элементов FLUID 116. В модели созданы элементы типа «beam», к которым далее присвоена модель элемента Fluid 116. Данный элемент представляет из себя трехмерное тело, способное переносить жидкости (или газы) и проводить тепло между двух узлов, по направлению, заданному при создании.

Таблица 4 Температуры элементов ударного генератора в различных режимах работы

Параметр, ед. измерения	Режим №1 (Рис. 2 а)	Режим №2 (Рис. 2 б)	Режим №3 (Рис. 2 в)	Режим №4 (Рис. 2 г)
Максимальная температура в холодном отсеке статора, °С	86	123	131	117
Максимальная температура по ТС в холодном отсеке статора, °С	59	85	77	69
Максимальная температура обмотке ротора, °С	81	146	140	82
Максимальная температура в холодном отсеке статора, °С	92	128	136	123
Максимальная температура по ТС в горячем отсеке статора, °С	65	90	82	75

По результатам расчетов можно сделать вывод, что наиболее нагруженными режимами в тепловом отношении являются режимы №2 и №3. Температуры активных частей по результатам моделирования не превышают класса нагревостойкости изоляции обмоток статора F (155) и ротора H (180). Таким образом, подтверждается тепловая надежность и длительная термическая надежность изоляции и ударного генератора в целом, а также подтверждена возможность работы ударного генератора в заданных режимах работы.

Для возможности обеспечения надежной работоспособности системы изоляции статорных обмоток необходимо выполнить расчет и оценку ее работоспособности. Данный расчет выполнен в численной модели реальной конструкции изоляции на базе данных по техническим характеристикам применяемых материалов, конструктивных и технологических решений, включая их изменение в процессе эксплуатации. В процессе расчетов применены разработанные программные продукты и использована база данных изоляционных материалов, внедренные в отделе расчетов СКБ по проектированию турбогенераторов завода «Электросила». Выполнено моделирование изоляции обмотки статора для подтверждения ее длительной диэлектрической прочности, т.е. отсутствие возникновения частичных разрядов в системе изоляции под воздействием электрического поля, создаваемого номинальным напряжением 15 кВ и повышенным напряжением (кратковременным перенапряжением), возникающим при коротких замыканиях 27 кВ. Для обеспечения длительной диэлектрической надежности изоляции потребовалось увеличить толщину изоляции относительно номинального напряжения на 50 %.

С учетом утолщенной изоляции для выполнения тепловых расчетов по разработанной на заводе «Электросила» программе ЭВМ вычислена эквивалентная теплопроводность системы изоляции обмотки статора. Свойства материалов системы изоляции, включая корпусную изоляцию, коронозащитные покрытия, принятые в расчете эквивалентной теплопроводности взяты из разработанной базы данных материалов, принятой на заводе «Электросила». В результате эквивалентная теплопроводность составляет от 0,309 до 0,336 Вт/(мК) в зависимости от выкладки паза.

Ограничение длительности работы ударного генератора на холостом ходу с номинальным напряжением необходимо, в том числе, для снижения потребления электроэнергии от сети собственных нужд, требуемой для возбуждения ударного генератора, для питания приводного двигателя и оборудования вспомогательных систем: насосов маслоснабжения и водоснабжения ударного генератора и приводного двигателя.

Четвертая глава описывает необходимый для работы ударного генератора объем оборудования и систем, составляющие комплекс ударного генератора, а также особенности эксплуатации данного оборудования и требования к определению основных технических характеристик.

Систематизация и анализ опыта проектирования, эксплуатации и технического обслуживания оборудования ударного генератора типа ТИ-100-2, выполненные в диссертационной работе, позволяет определить состав необходимого для качественной и надежной эксплуатации ударного генератора повышенной мощности с применением современных технических решений. Комплекс ударного генератора должен включать в себя:

1. Непосредственно ударный генератор, мощность короткого замыкания которого определяется режимами испытаний инновационного электротехнического оборудования и достигает 5000 МВА. Назначение ударного генератора описано выше.

2. Электропривод, состоящий из электродвигателя и пускового устройства для плавного разворота ротора агрегата ударный генератор-двигатель. Характеристики электродвигателя и пускового устройства напрямую зависят от типа ударного генератора: частоты вращения, момента инерции ротора генератора и потерь мощности, которые должен покрыть электродвигатель для быстрого набора скорости. Наиболее простым решением является применение электропривода на базе асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором. Для привода ударного генератора мощностью порядка 5000 МВА и частотой вращения 1500 об/мин при 50 Гц и 1800 об/мин при 60 Гц необходим двигатель порядка 3000 кВт. В начальный момент проведения эксперимента электропривод «отключается» от сети и включается по окончании эксперимента для восстановления

номинальной частоты вращения агрегата. В процессе останова электропривод участие не принимает. Электропривод также может применяться в качестве валоповоротного устройства.

3. Система возбуждения ударного генератора, питающая обмотку ротора выпрямленным током для создания необходимого магнитного потока и выхода на номинальное напряжение в режиме холостого хода. Система возбуждения - статическая тиристорная независимая с питанием от сети собственных нужд испытательного центра. Мощность возбуждения в режиме холостого хода с номинальным напряжением для ударного генератора мощностью короткого замыкания 5000 МВА составляет порядка 550 - 600 кВт. Однако в некоторых испытательных режимах короткого замыкания ударного генератора система возбуждения переходит в режим форсировки для подпитки короткого замыкания в генераторе в течение необходимого времени. Потолок по току и напряжению может кратковременно достигать 10 раз относительных номинальных параметров возбуждения генератора до момента перехода в режим испытания. Таким образом, оборудование системы возбуждения должно быть выбрано на основе расчетов данных режимов, а сеть собственных нужд должна обеспечивать необходимую мощность. На рисунках 11, 12 приведены результаты моделирования режима работы ударного генератора и системы возбуждения в режиме короткого замыкания.

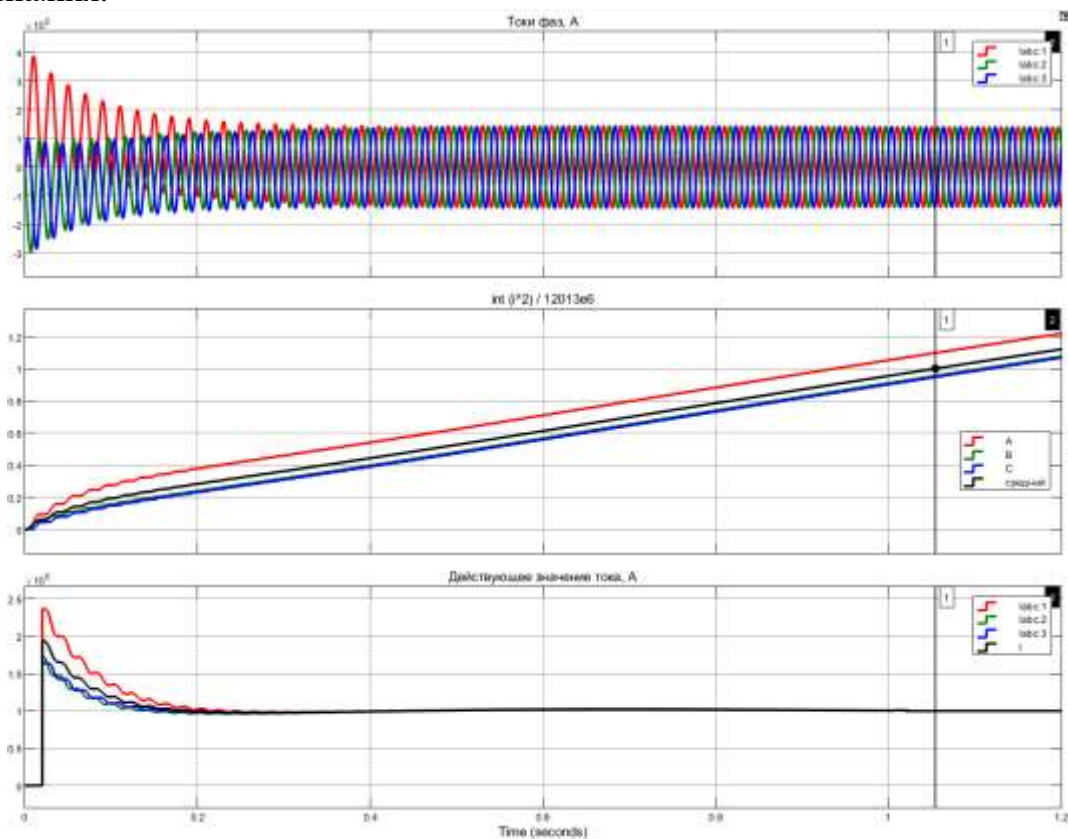


Рисунок 11 – Внезапное трехфазное КЗ при поддержании регулятором тока статора 100 кА (начальное напряжение 0,7 о.е., кратность начальной форсировки напряжения 9,0 о.е.). Момент КЗ обеспечивает максимальную апериодическую составляющую тока в фазе А.

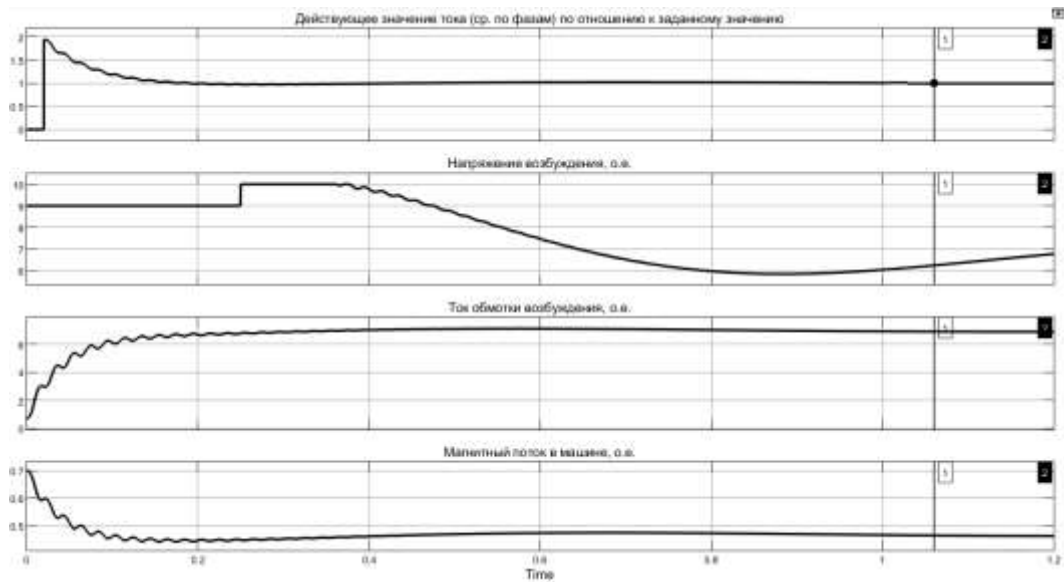


Рисунок 12 – Работа регулятора в режиме внезапного трехфазного КЗ при поддержании регулятором тока статора 100 кА (начальное напряжение 0,7 о.е., кратность начальной форсировки напряжения 9,0 о.е.). Момент КЗ обеспечивает максимальную аperiodическую составляющую тока в фазе А.

На рисунке 13 представлена функциональная схема электропривода и системы возбуждения ударного генератора.

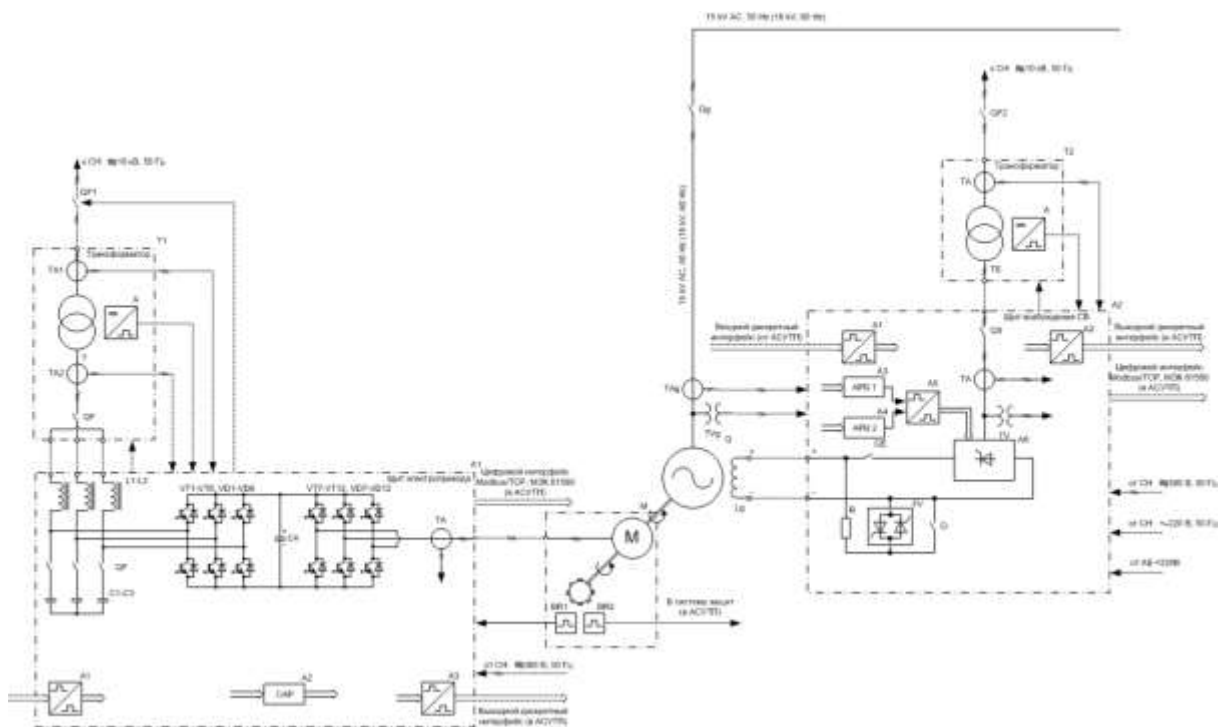


Рисунок 13 - Электропривод частотно-регулируемый и система возбуждения ударного генератора. Функциональная схема

4. Для подачи масла в подшипники скольжения ударного генератора и приводного двигателя, применятся система маслоснабжения опор агрегата. Основными элементами системы являются электронасосные агрегаты (основной и резервный), маслобак, маслоохладитель для охлаждения подогретого масла и фильтры. В системе смазки допускается

применение как минерального турбинного масла, например, ТП-22, или негорючей смазочной жидкости. Для облегчения разгона агрегата в системе маслоснабжения применяется маслонасос высокого давления для обеспечения гидроподъема ротора агрегата. Гидроподъем также может применяться в период планово-предупредительных ремонтов для поворота ротора для целей осмотра и технического обслуживания.

5. Все единицы оборудования, система маслоснабжения оснащаются контрольно-измерительными приборами, датчиками и измерительными преобразователями для контроля за тепловым и вибрационным состоянием оборудования в процессе эксплуатации, измерением электрических параметров входящего в комплекс оборудования (КИП). Сигналы с установленных КИП направляются в систему технологического контроля, которая выполняет визуализацию теплового состояния оборудования, сигнализацию о выходе контролируемых параметров за допускаемые величины. В системе технологического контроля кроме того реализуются алгоритмы вычисляемых параметров режимов работы оборудования для целей диагностирования. Отдельные физические сигналы направляются в терминалы технологических и электрических защит, необходимых для защиты оборудования при нарушении нормальной эксплуатации либо в случае аварийных ситуаций как в оборудовании и системах комплекса ударного генератора, так и во внешних системах. Следует обратить внимание, что для системы электрических защит комплекса режим трехфазного короткого замыкания ударного генератора после получения сигнала о готовности к опыту и до окончания опыта, не является аварийным режимом и должна вводиться автоматическая блокировка срабатывания защитных реле. В остальных случаях, электрические защиты должны быть введены в работу.

В диссертационной работе предложен один из возможных алгоритмов параллельной работы и синхронизации нескольких ударных генераторов, установленных в лаборатории большой мощности одного испытательного центра для получения максимальной мощности короткого замыкания для испытаний, например, выключателей на отключение ассиметричного тока короткого замыкания. При этом должно быть задействовано все оборудование комплекса ударного генератора и его вспомогательные системы:

1) Исходное состояние.

Генераторы не вращаются, системы возбуждения, электропривод готовы. Генераторные выключатели отключены.

2) Разгон генераторов до номинальной частоты вращения

После включения необходимого числа выключателей автоматически назначается одна из систем автоматического регулирования (САР) ведущей, а остальные ведомыми. По команде оператора начинается частотно регулируемый плавный разгон с заданной интенсивностью до номинальной частоты вращения. При этом, ведущая САР контролирует не только собственную частоту вращения, но и контролирует частоты вращения остальных генераторов. По окончанию переходных процессов, когда все ударные генераторы вращаются с одной частотой вращения, в АСУТП формируется релейный сигнал о готовности электрооборудования к процессу возбуждения группы генераторов на холостом ходу.

3) Синхронизация группы генераторов.

По команде оператора ведущая САР продолжает работать в режиме поддержания частоты вращения собственного генератора, в то время как остальные САР (ведомые) других генераторов работают в режиме поддержания электромагнитного момента двигателя, величина которого задается или корректируется ведущей САР. Далее каждая система возбуждения осуществляет одновременное программное возбуждение генераторов, ограничивая (при необходимости) ток статора, который возникает в процессе втягивания в синхронизм. По окончанию переходных процессов все ударные генераторы вращаются

синхронно с заданными величинами напряжения, частоты и фазы статора. Группа ударных генераторов готова к опыту внезапного короткого замыкания.

Наиболее важным для непрерывного обеспечения испытаний в испытательных центрах является обеспечение надежности, в первую очередь, ударных генераторов как наиболее сложного, габаритного и дорогого оборудования лаборатории большой мощности. Для примера, в таблице 5 приведено число опытов коротких замыканий ударных генераторов ТИ-100-2 в НИЦ Бескудниково с 1964 по 1970гг, т.е. после разработки и ввода в эксплуатацию ударных генераторов.

Таблица 5 Количество коротких замыканий ударных генераторов типа ТИ-100-2 с 1964 по 1970 гг

Генератор	Годы	Количество коротких замыканий с токами								
		до 10 кА		до 30 кА		до 60 кА		свыше 60 кА		Итого:
		Число опытов	%	Число опытов	%	Число опытов	%	Число опытов	%	Число опытов
Генератор 1	1964	206	26	123	15	256	32	211	27	796
	1965	814	40	322	16	717	35	174	9	2027
	1966	1066	63	345	20	221	13	74	4	1706
	1967	907	50	423	23	432	24	41	3	1803
	1968	1404	57	682	27	328	13	72	3	2486
	1969	989	45	583	27	539	25	59	3	2170
	1970	1492	54	710	26	502	18	45	2	2749
	Итого: 1964÷1970	6878	50	3188	23	2995	22	676	5	13737
Генератор 3	1964	176	51	40	12	120	35	9	2	345
	1965	923	39	373	16	856	36	247	9	2399
	1966	917	63	283	16	213	15	36	6	1449
	1967	1217	55	511	23	446	20	50	2	2224
	1968	1933	66	610	21	333	11	59	2	2935
	1969	1553	54	725	25	552	19	55	2	2885
	1970	1282	54	624	26	432	18	37	2	2325
	Итого: 1964÷1970	8001	55	3166	22	2952	20	493	3	14612

Из таблицы 5 видно, что число опытов короткого замыкания составляло от двух до восьми в сутки и заявленный в технических условиях на ударные генераторы типа ТИ-100-2 ресурс в 10000 опытов короткого замыкания был исчерпан за шесть лет после ввода в эксплуатацию.

Для обеспечения надежности ударного генератора и его долговечности в работе необходимо уделять особое внимание следующим узлам:

1. Корпусной изоляции обмотки статора в части диэлектрической прочности и нагревостойкости.
2. Изоляции обмотки ротора в части нагревостойкости
3. Выбору материалов вращающейся части генератора, ротора, для обеспечения достаточного запаса прочности его деталей.

4. Элементом крепления лобовых частей обмотки статора и крепления обмотки статора в пазах.

5. Подшипникам ударного генератора, воспринимающим механический толчок ротора при внезапном коротком замыкании.

В диссертационной работе отражены принципы и критерии обеспечения надежности узлов и деталей ударного генератора.

Дополнительным условием обеспечения надежности является разработка ударного генератора максимально простой конструкции с применением унифицированных узлов, показавших свою надежную работу при эксплуатации как ударных генераторов, так и энергетических турбогенераторов сопоставимой мощности и массогабаритных показателей.

В дополнение к прямым конструктивным решениям, обеспечивающим надежность ударных генераторов, описаны основные и достаточные системы мониторинга и диагностики, которые косвенно влияют на надежность работы и помогают устранять и предотвращать развитие нештатных ситуаций и дефектов. Для контроля и диагностики ударных генераторов рекомендованы следующие системы:

- теплоконтроль и диагностика теплового состояния ударного генератора;
- виброконтроль и вибродиагностика подшипников и вала агрегата;
- мониторинг уровня частичных разрядов в обмотке статора;
- контроль наличия витковых замыканий в обмотке ротора;
- контроль сопротивления изоляции обмотки ротора;
- контроль сопротивления изоляции подшипников и масляной пленки;
- контроль влажности и утечек внутри корпуса генератора;
- контроль токораспределения по щеткам щеточно-контактного аппарата;
- контроль крутильных колебаний валопровода агрегата «ударный генератор – двигатель»;
- виброакустический контроль элементов статора.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Выполнена систематизация и анализ информации по ударным генераторам, установленным и эксплуатируемым в различных мировых испытательных центрах. Определен подход к выбору характеристик и основных параметров ударных генераторов для обеспечения различных режимов испытаний электротехнического и электроэнергетического оборудования различных мощностей и различных типов. Выполнен анализ опыта испытаний и эксплуатации ударного генератора ТИ-100-2, являющегося действующим прототипом, работающим в России.

2. Определены основные параметры ударного генератора, определяющие массогабаритные характеристики, мощность ударного генератора. Получена зависимость влияния сверхпереходного индуктивного сопротивления генератора, как наиболее сильного параметра, на мощность короткого замыкания, рассмотрено влияние обмоточных данных статора, уровня насыщения, геометрии активной зоны ударного генератора на мощность короткого замыкания. Выполнено сравнение параметров ударного генератора с параметрами традиционных энергетических турбогенераторов.

3. На основе анализа испытаний ударного генератора ТИ-100-2 и полученных параметров сделано заключение о валидации типовой методики электромагнитного расчета турбогенератора применительно к расчетной оценке ударного генератора. На основе применения типовой методики электромагнитного расчета предложены функции цели, критерии оптимизации параметров ударного генератора и подтверждена возможность применения алгоритмов оптимизации.

4. Для многовариантного расчета ударного генератора с применением базового электромагнитного расчета по заводской методике предложены функции цели и критерии оптимизации параметров ударного генератора с применением известных оптимизационных алгоритмов. Применение оптимизационных алгоритмов для определения параметров и характеристик ударных генераторов также, как и традиционных турбогенераторов, показало свою применимость и эффективность. Рассмотрено и применено два различных алгоритма для оптимизации прототипов ударных генераторов повышенной мощности. Так, для варианта четырехполюсного ударного генератора повышенной мощности, удалось:

- по одному алгоритму уменьшить сверхпереходное сопротивление на 12,6 %, что способствовало увеличению кратности сверхпереходного тока короткого замыкания на 12,6 % и соответственно повысить мощность короткого замыкания ударного генератора, по другому алгоритму оптимизации – до 30%;

- уменьшить ток, плотность тока и напряжение обмотки возбуждения на 2,5, 8 и 8 % соответственно;

- при этом потери при холостом ходе остались практически на неизменном уровне;

- уменьшить потери на возбуждение на 10 %;

- уменьшить массу обмотки статора на 5,7 %, при увеличении плотности тока обмотки статора на 5,1 %.

5. Проанализированы режимы работы ударного генератора. Выполнены электромагнитные, тепловые расчеты ударного генератора повышенной мощности короткого замыкания. На основании расчетной оценки теплового состояния ударного генератора определены дополнительные требования к режимам работы генератора до короткого замыкания и между короткими замыканиями. Результаты теплового моделирования режимом работы ударного генератора повышенной мощности при заданных тепловых воздействиях, вызванных протеканием токов и нагревом под действием магнитного поля показали возможность разработки ударного генератора с заданными размерами активной зоны ударного генератора. Температуры активных частей по результатам моделирования не превышают класса нагревостойкости изоляции обмоток статора F (155) и ротора H (180) и имеют термический запас. Таким образом, подтверждается тепловая надежность и длительная термическая надежность изоляции и ударного генератора в целом. В процессе расчетов применены разработанные программные продукты и использована база данных изоляционных материалов, внедренные в отделе расчетов СКБ по проектированию турбогенераторов завода «Электросила».

6. Рассмотрены особенности конструкции ударного генератора по отношению к традиционным энергетическим турбогенераторам. Очевидно, что существенные различия в конструкции отмечены в подходе к выбору обмотки статора, крепления лобовых частей обмотки статора, которые должны обеспечить испытательные режимы.

7. Определен состав и функциональные особенности оборудования, необходимого для обеспечения работоспособности ударного генератора и обеспечения режимов испытаний, включая вспомогательное оборудование. Численное моделирование режимов работы, выполненное для режимов работы ударного генератора, позволило определить требования к проектированию и выбору вспомогательного оборудования.

8. Выполнен анализ надежности эксплуатации ударных генераторов прототипов типа ТИ-100-2, эксплуатируемых в НИЦ «Бескудниково». При разработке ударных генераторов повышенной мощности необходимо учитывать опыт эксплуатации, а в конструкцию закладывать не только достаточные запасы по материалам, но и применять специальные, характерные для ударных генераторов конструктивные решения, а также рекомендовать к оснащению ударного генератора системами мониторинга и диагностики.

9. Результаты выполненного анализа параметров, влияющих на мощность короткого замыкания, анализ и систематизации опыта проектирования и эксплуатации ударного генератора ТИ-100-2 позволили определить возможность и пути повышения мощности короткого замыкания ударного генератора до уровня 5000 МВА и выше для обеспечения испытательных режимов современного электротехнического и электроэнергетического оборудования. Результаты выполненной работы применены для разработки проекта ударного генератора мощностью не менее 5000 МВА с последующим изготовлением на заводе «Электросила», который будет размещен в лаборатории большой мощности современного испытательного центра, проектируемого в России.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК России:

1. **Железняк В.Н.**, Коровкин Н.В. Повышение мощности ударных генераторов для обеспечения эксплуатационных режимов, «Электричество», 2022, №11, с. 46-55. DOI: 10.24160

2. Маннанов Э.Р., Костельов А.М., Филин А.Г., **Железняк В.Н.** Повышение эксплуатационной надёжности турбогенераторов с воздушным охлаждением для газотурбинной установки // Глобальная энергия. 2023. Т. 29, №3. С. 74-89. DOI: 10.18721/JEST.29305.

3. Гришин Н.В., Антонюк О.В., Варламов А.Ю., Карташова Т.Н., **Железняк В.Н.** Результаты разработки и испытаний турбогенератора мощностью 1255 МВт на частоту вращения 1500 об/мин для Курской АЭС-2, «Электрические станции», 2022, 11, с. 39-45. DOI: 10.34831/EP.2022.1096.11.005.

Другие статьи и материалы международных и всероссийских конференций:

4. Short-circuit turbogenerators: ways of short-circuit power increase for modern testing facilities operation / **Zheleznyak V.N.**, Korovkin N.V. // Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (EIconRusNW), 2022 IEEE NW Russia, 2022, pp. 1307-1310. DOI: 10.1109/EIconRus54750.2022.9755726 (*индексируется в Scopus и Web of Science*)

5. **В.Н. Железняк**, Бурмистров А.А., Коровкин Н.В. / Комплекс ударного турбогенератора: функциональные и эксплуатационные особенности / Электротехнические комплексы и системы: материалы I Всероссийской конференции по электрическим машинам в рамках Международной научно-практической конференции: в 2 томах. Т.2, С. 329-344, 2022, г. Уфа, УУНиТ. ISBN 978-5-74775645-8.

6. Analysis of Operating Conditions of Short-Circuit Turbogenerators / **V.N. Zheleznyak** and N.V Korovkin // 2023 Seminar on Industrial Electronic Devices and Systems (IEDS), Saint Petersburg, Russian Federation, 2023, pp. 275-278. DOI: 10.1109/IEDS60447.2023.10426503 (*индексируется в Scopus и Web of Science*).

7. Short-Circuit Turbine Generator Package: Functional and Operational Features / **V.N. Zheleznyak**, A.A. Burmistrov, N.V Korovkin // 24th International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM), EDM-2023, 2023, pp. 990-994. DOI: 10.1109/EDM58354.2023.10225068 (*индексируется в Scopus и Web of Science*)

8. Simulation of Operating Condition of the Equipment of the Short-Circuit Generator Package / **V.N. Zheleznyak**, A.A. Burmistrov, N.V Korovkin, A.S. Adalev // 2024 Conference of Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIcon), 2024 IEEE, 2024, pp. 865–868. DOI: 10.1109/EIcon61730.2024.10468512 (*индексируется в Scopus и Web of Science*).

Зарегистрированные охраноспособные документы:

9. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020663525 PDinsulation / Костельов А.М., **Железняк В.Н.**, Белько В.О., Ильин А.О., Маннанов Э.Р./ правообладатель АО “Силовые машины”, заявка № 2022665901 заявл. 29.08.2022; зарегистр.05.09.2022.

10. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022666650 GeometryCreator/ Костельов А.М., Филин А.Г., **Железняк В.Н.**, Маннанов Э.Р./ правообладатель АО “Силовые машины”, заявка № 2022665862 заявл. 29.08.2022; зарегистр.06.09.2022.

11. Свидетельство о государственной регистрации Базы Данных № 2022622302 Физико-механические свойства материалов системы изоляции/ Андреев А.А., Степанов А.А., Костельов А.М., **Железняк В.Н.**, Маннанов Э.Р. / правообладатель АО “Силовые машины”, заявка № 2022622253 заявл. 19.09.2022; зарегистр.21.09.2022.