

6. Федоренко, В. А. Использование пакета Simulink для изучения и исследования переходных процессов в судовых электроэнергетических системах / В. А. Федоренко // Научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и курсантов ГМА им. адм. С. О. Макарова: сб. докл./ - СПб., 2007.- С. 93.
7. Федоренко, В. А. Моделирование судовой электроэнергетической системы в режимах металлических и дуговых коротких замыканий в среде Simulink / В. А. Федоренко // Научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и курсантов ГМА им. адм. С. О. Макарова: сб. докл./ - СПб., 2007. - С. 93.
8. Федоренко, В. А. Применение принципа логической селективности при построении современных судовых электроэнергетических систем/ В. А. Федоренко // Международная научно-практическая Интернет-конференция «Актуальные проблемы развития транспорта и энергетики 2008»: сб. докл./ - СПб., 2008.
9. Федоренко, В. А. Учет электрической дуги в аналитической и машинной оценке чувствительности защиты/ В. А. Федоренко // Сборник научных трудов/ НГМА.-Новороссийск: Изд-во НГМА, 2006.- №11.
10. Федоренко, В. А. Опасность возникновения дуговых коротких замыканий на судне и защита от них/ В. А. Федоренко // Сборник научных трудов/ НГМА.-Новороссийск: Изд-во НГМА, 2006.-№11.
11. Федоренко, В. А. Анализ гребных электрических установок с винторулевым комплексом Azipod/ В. А. Федоренко, О. П. Хайдуков // Сборник научных трудов/ НГМА.-Новороссийск: Изд-во НГМА, 2001.- №6.- С.126-129.

ФЕДОРЕНКО ВЯЧЕСЛАВ АЛЕКСАНДРОВИЧ

**КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СУДОВОЙ
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ В РЕЖИМАХ
МЕТАЛЛИЧЕСКОГО И ДУГОВОГО КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ И
СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ЕЕ ЗАЩИТЫ**

Специальность: 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург

2009

Работа выполнена в ФГОУ ВПО «Государственная морская академия им. адмирала С.О. Макарова» на кафедре «Судовые автоматизированные электроэнергетические системы»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор,
Баранов Александр Потапович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Сеньков Алексей Петрович
кандидат технических наук, доцент
Новиков Эдуард Павлович

Ведущая организация: ФГУП «Центральный научно-исследовательский институт судовой электротехники и технологии (ЦНИИ СЭТ)».

Защита диссертации состоится 28 мая 2009 года в 14 ч. 30 мин. на заседании Совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д223.002.02 при ФГОУ ВПО «Государственная морская академия им. адмирала С. О. Макарова» по адресу: 199026, Санкт-Петербург, 21 линия В.О., д. 14а, СМФ, ауд. 21. Факс (812)321 36 81

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Государственной морской академии им. адмирала С. О. Макарова

Автореферат разослан «___» апреля 2009 г.

Ученый секретарь Совета по защите докторских и кандидатских диссертаций
Д223.002.02

доктор технических наук, профессор

В. А. Петухов

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях из списка ВАК:

1. Федоренко, В. А. Общий подход к построению компьютерной модели электроэнергетической системы танкеров типа Suezmax для режимов металлического и дугового коротких замыканий/ В. А. Федоренко // Журнал научных публикаций аспирантов и докторантов.-2008.- №8.
2. Федоренко, В. А. Моделирование режима дугового короткого замыкания в цепях низкого напряжения силовых трансформаторов в мощных судовых электроэнергетических систем /В. А. Федоренко // Журнал научных публикаций аспирантов и докторантов.-2008.-№9.

В остальных источниках:

3. Баранов, А. П. Использование пакета Simulink для изучения и исследования переходных процессов в судовых электроэнергетических системах / А. П. Баранов, В. А. Федоренко // Эксплуатация морского транспорта.-2007.- № 48. – С.46-47.
4. Федоренко, В. А. Анализ быстродействия существующей защиты СЭЭС от коротких замыканий / В. А. Федоренко // Научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и курсантов ГМА им. адм. С. О. Макарова: сб. докл./ - СПб., 2005.- С. 86-87.
5. Федоренко, В. А. Применение микропроцессорных устройств в системах защиты СЭЭС от коротких замыканий/ В. А. Федоренко // Научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и курсантов ГМА им. адм. С. О. Макарова: сб. докл./ - СПб., 2005. - С. 86.

- составлена математическая модель ГА для режимов дугового и металлического КЗ, включающая в себя модели приводного двигателя, автоматического регулятора напряжения и частоты вращения;
- разработана математическая модель СЭЭС для исследования режимов дугового и металлического КЗ;
- в пакете прикладного моделирования Simulink созданы лично автором, без использования блоков готовых электротехнических устройств, блоки: электрической дуги, синхронного генератора, автоматических регуляторов напряжения и частоты вращения, статической и двигательной нагрузки;
- произведено обобщение и систематизация результатов расчетно-теоретической и экспериментальной части исследования;
- по результатам моделирования и их статистической обработки определен минимальный токоограничивающий коэффициент, который может использоваться при аналитической оценке чувствительности защиты;
- даны рекомендации по аналитическому определению уставок защит для соответствия требованиям действующих нормативных документов;
- даны рекомендации по применению моделей при решении таких инженерных задач как: исследование СЭЭС в режимах дугового и металлического КЗ, определение минимальных токов в режиме дугового КЗ, определение ударных и установившихся токов в режиме КЗ, проверка бесперебойности электроснабжения потребителей, находящихся в неповрежденных участках цепи в режиме дугового и металлического КЗ.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Вопросы и задачи, рассматриваемые в данной работе, относятся к области проектирования и эксплуатации судовых электроэнергетических систем (СЭЭС). Современная СЭЭС представляет собой сложный и высоко ответственный комплекс, от правильного функционирования которого зависят человеческие жизни, экологическая безопасность и безопасность судна с грузом.

Опыт эксплуатации СЭЭС свидетельствует о периодически возникающих случаях несрабатывания защитных аппаратов при коротких замыканиях (КЗ). Одной из причин несрабатывания защитных аппаратов при КЗ, не нашедшей отражения в действующих нормативных документах, является действие токоограничивающего действия электрической дуги, возникающей при дуговом КЗ. Кроме того, остаточное напряжение в месте дугового КЗ накладывает некоторые особенности на функционирование элементов СЭЭС, которые чрезвычайно сложно учитывать расчетным путем. Статистика показывает, что большинство КЗ на судне – это замыкания через электрическую дугу.

Данная работа посвящена созданию модели СЭЭС в режиме дугового КЗ, разработке методики учета электрической дуги, выработке рекомендаций по повышению надежности срабатывания устройств защиты в режиме дугового КЗ. Ввиду отсутствия модели электрической дуги и рекомендаций по учету электрической дуги при моделировании СЭЭС, данная работа является актуальной.

Цели и задачи исследований. Целью диссертационной работы является разработка математической модели судовой электроэнергетической системы для исследования режимов дугового и металлического КЗ с целью совершенствования ее защиты.

Методы исследования. Результаты работы основываются на теоретических основах электротехники, теории математического

моделирования, теории электрических машин и релейной защиты электроэнергетических систем.

Научная новизна. На защиту представляются следующие основные результаты:

- составлена математическая модель ГА, включающая в себя модели приводного двигателя, автоматического регулятора напряжения и частоты вращения для режимов дугового и металлического КЗ;
- разработана математическая модель СЭЭС для исследования режима дугового КЗ;
- получена математическая модель электрической дуги;
- в пакете прикладного моделирования Simulink создан блок электрической дуги;
- произведено обобщение и систематизация результатов расчетно-теоретической и экспериментальной части исследования;
- даны рекомендации по применению моделей при решении инженерных задач и использованию в учебном процессе;
- даны рекомендации по совершенствованию электрической защиты СЭЭС от токов дугового и металлического КЗ.

Степень достоверности результатов подтверждается малым (до 7%) расхождением полученных с помощью компьютерного моделирования результатов и величин, полученных расчетным путем по ОСТ5. 6181-81 и данных типовых заводских испытаний.

Практическая ценность. Разработанные модели СЭЭС для режимов дугового и металлического КЗ позволили:

- провести моделирование режимов дугового КЗ в СЭЭС с дизельными и турбинными ГА;
- разработать практические рекомендации по применению моделей при проектировании и проверке электрической защиты СЭЭС, а также выбору электрооборудования;

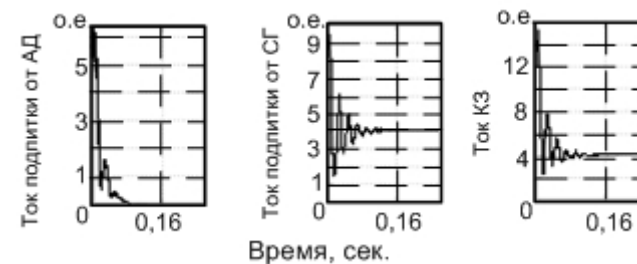


Рис. 9. Моделирование режима КЗ в эквивалентной СЭЭС

Показано, что полученные компьютерные модели СЭЭС могут успешно использоваться при решении следующих инженерных задач:

- определение значений токов дугового и металлического КЗ;
- выбор электрооборудования по условию термической и электродинамической стойкости распределительных устройств;
- определение чувствительности защиты;
- наблюдение переходных процессов, происходящих при КЗ.

Также модели могут быть с успехом применены для:

- закрепления знаний обучающихся по дисциплине «Моделирования судового электрооборудования и средств автоматизации»;
- создания компьютерных тренажеров СЭЭС;
- знакомства с программами компьютерного моделирования.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

Научные и практические результаты диссертационной работы, посвященной компьютерному моделированию судовой электроэнергетической системы в режимах металлического и дугового коротких замыканий и совершенствование ее защиты, состоят в следующем:

Предлагается устранить данный недостаток путем применения принципа логической селективности при построении СЭЭС.

Путем выполненного расчета для типовой СЭЭС, показано значительное сокращение выдержек времени у аппаратов защиты, что говорит о лучшей безопасности СЭЭС с логической селективностью для персонала и пожаробезопасности. Кроме того, меньшее время протекания токов КЗ позволяет удешевить установочную стоимость системы выработки и распределения электроэнергии.

В пятом разделе приведены рекомендации по использованию компьютерных моделей судовых генераторных агрегатов и электроэнергетических систем.

Представлено решение одной из самых распространенных задач проектирования – определение токов короткого замыкания. Результаты моделирования (рис. 9) сопоставлены с результатами расчета по ОСТ 5.6181-81. Разница в определении токов короткого замыкания не превысила 7% (Таблица 2).

Таблица 2.

Сопоставление результатов расчета и моделирования.

Параметр	Расчет		Моделирование		Отклонение результатов моделирования от расчетных величин %
	о.е.	кА	о.е.	кА	
Ударный ток КЗ	14,45	39,188	15,4	41,765	6,57
Установившийся ток КЗ	4,28	11,603	4,22	11,445	1,4

- разработать практические рекомендации по использованию моделей в учебном процессе;
- разработать комплекс моделей для типовых СЭЭС, позволяющих проводить моделирование режимов дуговых и металлических КЗ;
- выполнять определение уставок защиты и проверку чувствительности защитных аппаратов.

Кроме того, разработан и внедрен в учебный процесс ряд лабораторных работ по дисциплине «Моделирование судового электрооборудования и средств автоматизации».

Внедрение результатов работы. Результаты работы внедрены на кафедре «Судовые автоматизированные электроэнергетические системы» ФГОУ ВПО ГМА имени адмирала С.О. Макарова в качестве лабораторных работ (компьютерного практикума), используемых в учебном процессе. Кроме того, компьютерные модели, разработанные автором, в ходе работы над диссертацией внедрены в производство компании «Сахалин Энерджи».

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на научно-технических конференциях Государственной Морской Академии им. адмирала С.О. Макарова, Новороссийской Государственной Морской Академии, Военно-Морской Академии.

Публикации. Перечисленные научные результаты были освещены в 11 печатных публикациях, в том числе 2 статьи в издании из перечня ВАК.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 5 разделов с выводами, заключения, списка литературы, включающего 87 источников, и восьми приложений. Основная часть работы изложена на 140 страницах машинописного текста и содержит 55 рисунков.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность компьютерного моделирования СЭЭС в режимах дугового и металлического КЗ. Сформулирована цель работы и перечислены мероприятия, направленные на ее достижение. Кратко изложено содержание диссертации, перечислены научные и практические результаты, выделены научные положения, выносимые на защиту.

Первый раздел посвящен анализу известных работ по теме диссертации и поставке задач исследования. Целью анализа являются:

- оценка теоретической разработки вопросов компьютерного моделирования СЭЭС в режимах КЗ, в частности дугового КЗ, как наиболее опасного аварийного режима;
- использование современного программного обеспечения для построения компьютерных моделей СЭЭС для перечисленных режимов.

Современные суда являются комплексом источников и потребителей электрической энергии. В зависимости от назначения судна и его технических характеристик установленная мощность электрооборудования может составлять единицы, а то и десятки мегаватт. Аварийные режимы в подобных СЭЭС, в частности, металлическое и наиболее опасное дуговое КЗ, могут привести к нарушению электроснабжения ответственных потребителей, загрязнению окружающей среды, гибели людей и судна, потере груза. Поэтому особое место при проектировании СЭЭС занимает ее моделирование в режимах КЗ.

В нормативных документах, относящихся к судовым электроэнергетическим установкам рекомендации по моделированию режимов дугового КЗ, являющегося наиболее опасным видом КЗ в СЭЭС.

может использоваться при моделировании синхронных компенсаторов и синхронных двигателей.

Далее приводятся результаты моделирования СЭЭС (рис. 8) с эквивалентным генератором и эквивалентным асинхронным двигателем, типовой для большинства торговых судов.

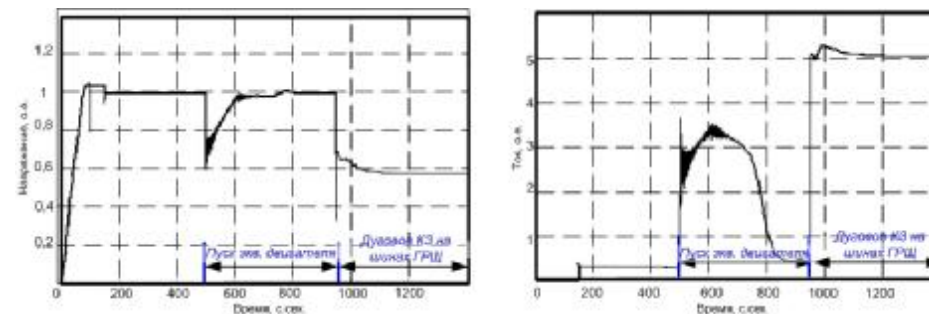


Рис. 8. Моделирование дугового КЗ в эквивалентной СЭЭС

Четвертый раздел содержит рекомендации по совершенствованию защиты судовых электроэнергетических систем от токов КЗ.

Особенности СЭЭС обуславливают применение принципа временной селективности для выбора аппаратов защиты. Указанный принцип имеет очень серьезный недостаток: наличие принудительных выдержек времени, увеличивающихся по направлению от потребителей к источнику. В разветвленных СЭЭС, принудительная выдержка времени у аппаратов, установленных на ГРЩ, может достигать одной секунды. В случае дугового КЗ на шинах таких СЭЭС, время срабатывания защиты может быть более одной секунды, что может вызвать гибель обслуживающего персонала, разрушение распределительного устройства, которое может повлечь за собой пожар.

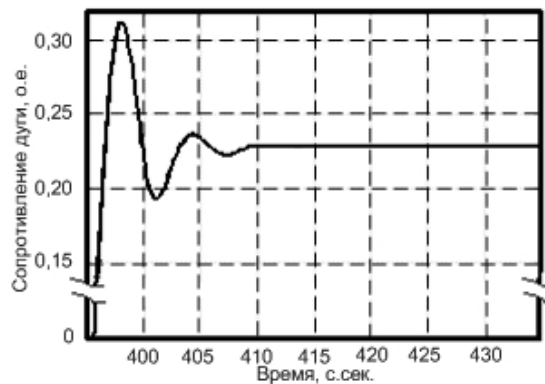


Рис. 7. Изменение сопротивления дуги в режиме КЗ

В третьем разделе разрабатывается структура компьютерной модели судовой электроэнергетической системы с дизель и валогенераторами в режимах металлического и дугового КЗ.

Показано, что универсальной модели СЭЭС создать невозможно, ввиду большого числа типов и конфигураций СЭЭС, которые определяются, главным образом, типом и назначением судов. Практика использования программных пакетов по моделированию электроэнергетических систем показала удобство работы в программах структурного моделирования. Поэтому предлагается иметь библиотеку блоков стандартных элементов электроэнергетической системы с возможностью задания и изменения параметров необходимых блоков. При этом, целесообразно иметь набор моделей типовых СЭЭС, например танкеров, газовозов, сухогрузов, контейнеровозов, вспомогательных судов.

Составлена модель СЭЭС для режимов металлического и дугового коротких замыканий с электростанцией, содержащей дизель-генераторы либо турбо-генераторы. Приведена модель синхронного двигателя, которая

При этом в технической литературе давно поднимается вопрос об опасности дуговых КЗ и сложности определения параметров этого режима.

Параметры дуговых КЗ необходимо знать для выбора уставок защитной аппаратуры и средств защиты обслуживающего персонала (комплекты защиты от действия электрической дуги). Исследования по определению параметров электрической дуги давно проводятся как в береговых, так и в морских электроэнергетических системах. Результаты исследования дуговых КЗ в береговых электроустановках привели к созданию методик аналитического учета сопротивления электрической дуги в месте КЗ. Данные методики включены в нормативные документы, распространяющиеся на береговое электрооборудование. В нормативной базе, относящейся к морским электроэнергетическим системам, отсутствуют рекомендации по учету электрической дуги в месте КЗ.

Делается вывод о том, что ввиду высокой потребности страны в морских транспортных средствах, технических комплексов освоения континентального шельфа, необходимо создание моделей и средств моделирования СЭЭС в режимах дугового и металлического КЗ. Так как существующая нормативная база устарела и нуждается в доработке, необходимо выработать рекомендации по учету электрической дуги в месте короткого замыкания и моделированию СЭЭС в режиме КЗ через дугу.

Выполненный анализ литературы, отражающей процессы в СЭЭС и особенности их моделирования в режимах металлического и дугового замыканий, показал, что современный набор математических программ для персональных компьютеров обеспечивает проектанта возможностью моделирования СЭЭС в аварийных режимах, в частности режимах металлического и дугового КЗ. Для моделирования СЭЭС необходим набор моделей источников, приемников и устройств распределения электроэнергии. Состав, элементная база и характеристики электротехнических устройств значительно изменились за последние годы, что определяет необходимость

разработки моделей современных электротехнических устройств. Пакет Simulink программы MATLAB представляет пользователю возможность реализовать структурный подход к моделированию режимов КЗ, что очень удобно для исследования процессов в СЭС различных по своему назначению судов.

Второй раздел связан с разработкой компьютерной модели и исследованием генераторного агрегата в режимах дугового и металлического КЗ.

Модель ГА состоит из моделей синхронного генератора, приводного двигателя, автоматических регуляторов частоты вращения и напряжения, причем приводной двигатель может быть как дизелем, так и турбиной.

Для создания математической модели ГА выбрана система ортогональных координат dq жестко связанная с ротором электрической машины.

Математическая модель синхронного генератора имеет вид:

$$\left. \begin{aligned} u_d &= -r i_d + p \psi_d + (1+s) \psi_q; \\ u_q &= -r i_q - p \psi_q + (1+s) \psi_d; \\ u_f &= i_f + T_{d0} p \psi_f; \\ 0 &= i_D + T_D p \psi_D; \\ 0 &= i_Q + T_Q p \psi_Q; \\ m_e &= m_s + T_J p s; \\ \\ \psi_d &= -x_d i_d + i_f + i_D; \\ \psi_q &= x_q i_q + i_Q; \\ \psi_f &= -\frac{x_{ad}^2}{x_f} i_d + i_f + \frac{x_{ad}}{x_f} i_D; \\ \psi_D &= -\frac{x_{ad}^2}{x_{rd}} i_d + \frac{x_{ad}}{x_{rd}} i_f + i_D; \\ \psi_Q &= \frac{x_{aq}^2}{x_{rq}} i_q + i_Q, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

статистической обработки, найдено значение ($U_d=0,6$), при котором обеспечивается наименьшее отклонение от результатов натурального эксперимента. Построена зависимость коэффициента токоограничения от сопротивления цепи КЗ. Результаты моделирования и результаты натурального эксперимента приведены на рис.6.

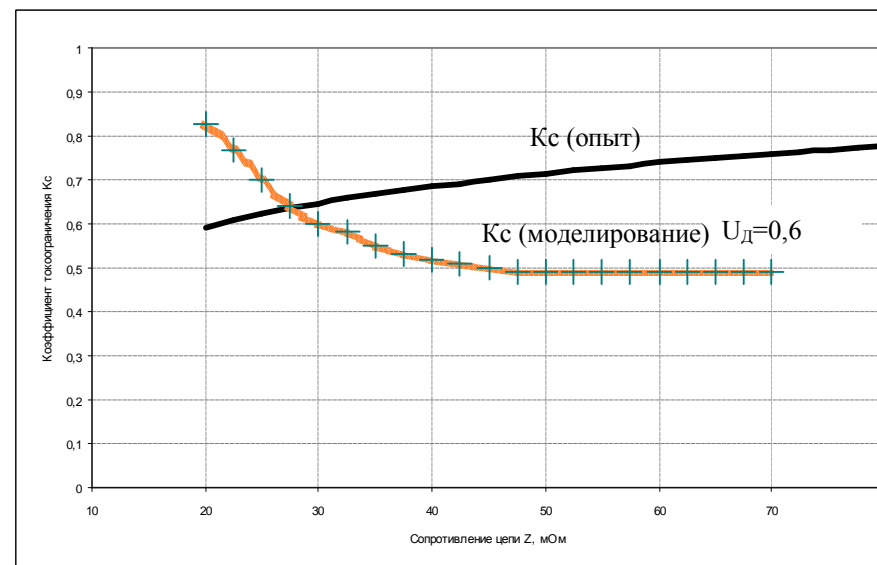


Рис. 6. Зависимость токоограничивающего коэффициента от сопротивления цепи КЗ

На рис. 7 представлен один из результатов моделирования, изображающий изменение сопротивления дуги во времени, что соответствует современным представлениям о сложности аналитического учета сопротивления дуги в виду изменения ее сопротивления в режиме КЗ.

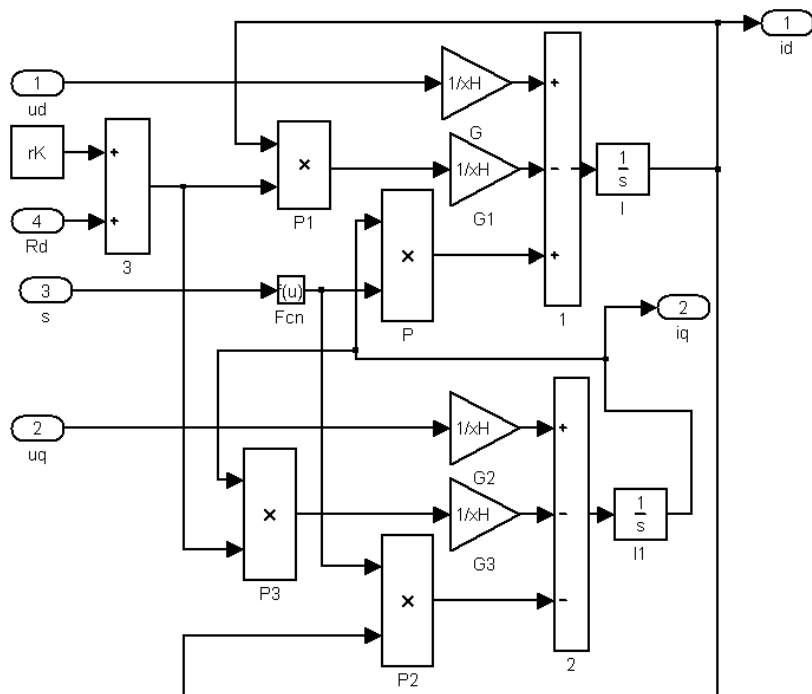


Рис. 5. Структурная схема модели участка кабельной линии в режиме дугового КЗ, построенной в пакете Simulink:

Fcn, –функциональные блоки; **G-G3, P-P3**-блоки произведения; блоки **I, II**- блоки интегрирования; **1,2, 3**- блоки суммирования

Сопротивление дуги R_d определяется в соответствии со следующим выражением:

$$R_d = \frac{k}{\sqrt{i_{ad}^2 + i_{qd}^2}},$$

где $k=U_d$ – напряжение на дуге.

В пакете Simulink выполнено моделирование режима дугового КЗ при различных значениях напряжения на дуге и, в результате

где ψ_d, ψ_q – потокосцепления обмоток статора по продольной и поперечной осям; ψ_f – потокосцепление обмотки возбуждения; ψ_D, ψ_Q – потокосцепления демпферной обмотки по продольной и поперечной оси; u_d, u_q – составляющие напряжения статора по продольной и поперечным осям; i_d, i_q – составляющие тока статора по продольной и поперечным осям; i_f – ток обмотки возбуждения; i_D, i_Q – мгновенные значения токов демпферных обмоток; r – активное сопротивление обмотки статора; s – скольжение ротора СГ относительно синхронной скорости; $m_s = \psi_d i_q + \psi_q i_d$ – электромагнитный момент; $p = \frac{d}{dt}$ – символ дифференцирования при аргументе t_σ ; t_σ – базисное

время; r – активное сопротивление обмотки статора; T_{d0}, T_D, T_Q – постоянные времени цепи возбуждения и демпферных обмоток по продольной и поперечной осям, выраженные в радианах; T_j – инерционная постоянная агрегата в радианах; x_d, x_q – синхронные реактивности статора по продольной и поперечной осям; x_{ad}, x_{aq} – реактивности самоиндукции статора по продольной и поперечной осям; x_{rd}, x_{rq} – полные реактивности демпферных обмоток по продольной и поперечной осям.

По математической модели (1) построен блок в пакете Simulink (рис. 1).

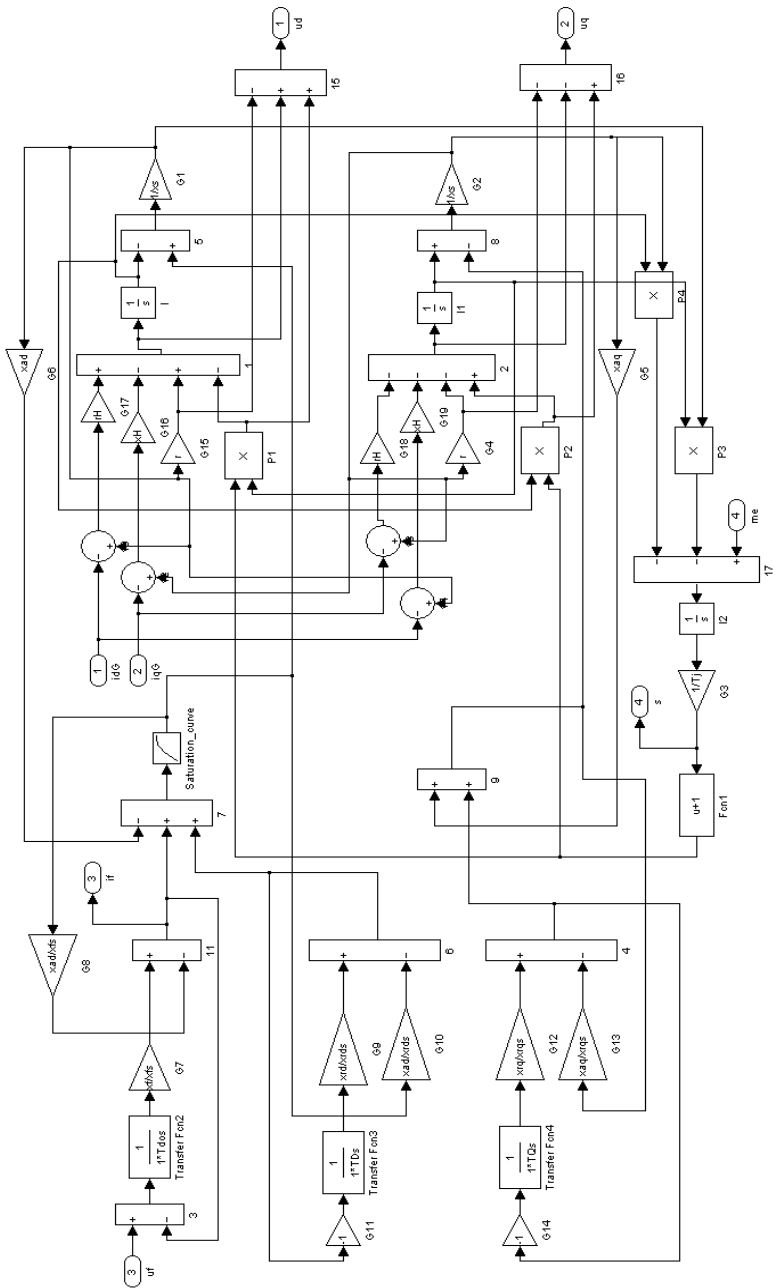


Рис. 1. Структурная схема модели СТ в пакете Simulink.

1-17- блоки суммирования; G1-G19 и P1-P3 - блоки умножения; TransferFcn2-4 – блоки передаточных функций; Saturation_Curve – блок задания кривой насыщения графическим способом; I-I2-блоки интегрирования; Fcn1 – блок задания функции

Таблица 1.

Сопоставление результатов КЗ и моделирования режима КЗ

Параметр	Результаты типовых испытаний		Моделирование		Отклонение результатов моделирования от расчетных величин
	о.е.	кА	о.е.	кА	
Ударный ток КЗ	5,3	4966,1	5,2	4872,4	-2
Установившийся ток КЗ с учетом АРН	2,9	2717,3	3	2811	3
Установившийся ток КЗ без учета АРН	0,42	393,54	0,45	421,65	7

Для моделирования дугового КЗ необходимо иметь математическую модель дуги КЗ. Последняя представлена моделью участка кабельной линии в режиме дугового КЗ следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} p i_d &= \frac{1}{x_L + x_{K3}} u_d + \frac{r_L + r_{K3} + R_D}{x_L + x_{K3}} i_d - (1+s) i_q; \\ p i_q &= \frac{1}{x_L + x_{K3}} u_q + \frac{r_L + r_{K3} + R_D}{x_L + x_{K3}} i_q + (1+s) i_d, \end{aligned} \right\} (5)$$

где x_L , r_L – индуктивное и активное сопротивления кабельной линии, питающей точку КЗ; x_{K3} , r_{K3} – сопротивление системы, к которой подключен кабель, питающий точку КЗ; R_D – сопротивление дуги.

По уравнениям (5) построена модель в пакете Simulink (Рис. 5):

$$\left. \begin{aligned} pM &= -\frac{1}{T_c}\sigma; \\ p\sigma &= \frac{k_s}{T_i}s - \frac{1}{T_i}\sigma + \frac{1}{T_i}M, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где σ – координаты золотника; T_c -постоянная времени сервомотора, M - механический момент турбины.

Соответствующий уравнениям (4) блок, созданный в Simulink, приведен на рис. 4.

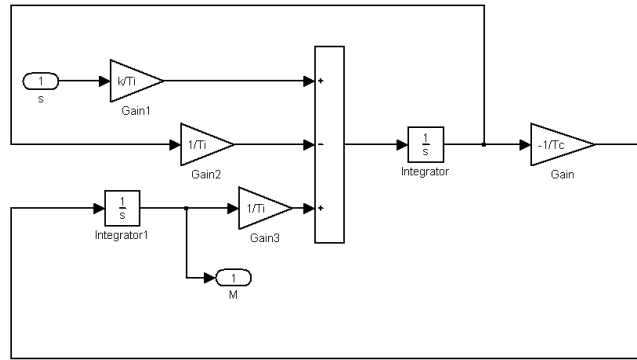


Рис. 4. Структурная схема блока РЧВ турбины в Simulink:

Gain-Gain3 – блоки усиления; **Integrator-Integrator1** – блоки интегрирования

Для верификации полученных моделей было выполнено моделирование в пакете Simulink и сопоставлено с осциллограммой реального СГ. Результаты приведены в Таблице 1. Отклонение от натуральных данных не превысило 7%.

Математическая модель регулятора напряжения:

$$\begin{cases} u_f = \sqrt{(k_1 u_d - k_2 i_q)^2 + (k_1 u_q + k_2 i_d)^2 - k_3^2 i_f^2} - i_y; \\ T_K p i_y = -i_y + k_K ((u - u_0) + k_e \Delta i_p); \\ u_f > u_{f_{\text{норм}}} \text{, то } u_f = u_{f_{\text{норм}}} \text{,} \end{cases} \quad (2)$$

где $k_1 = \frac{\beta_u}{\sqrt{2}} k_H \frac{x_{af}}{r_f}$; $k_2 = \frac{\beta_i}{\sqrt{2}} k_T x_H \frac{x_{af}}{r_f}$; $k_3 = \frac{\beta_u}{\beta_i} \frac{x_H}{x_f}$; β_u, β_i – коэффициенты выпрямления

по напряжению и силе тока; x_{af} – реактивность взаимоиндукции обмотки возбуждения и обмотки статора; k_H, k_T – коэффициенты трансформации соответственно трансформаторов напряжения и тока; k_e – коэффициент усиления в цепи выравнивания реактивных нагрузок; T_K – постоянная времени обмотки электромагнитного усилителя; k_K – коэффициент усиления электромагнитного усилителя; u_0 – уставка по напряжению регулятора; i_y – текущее значение напряжения СГ, $u_{f_{\text{норм}}}$ – потолочное напряжение возбуждения; Δi_p – разность реактивных токов при параллельной работе машин.

По математической модели (2) построен блок в пакете Simulink (рис. 2).

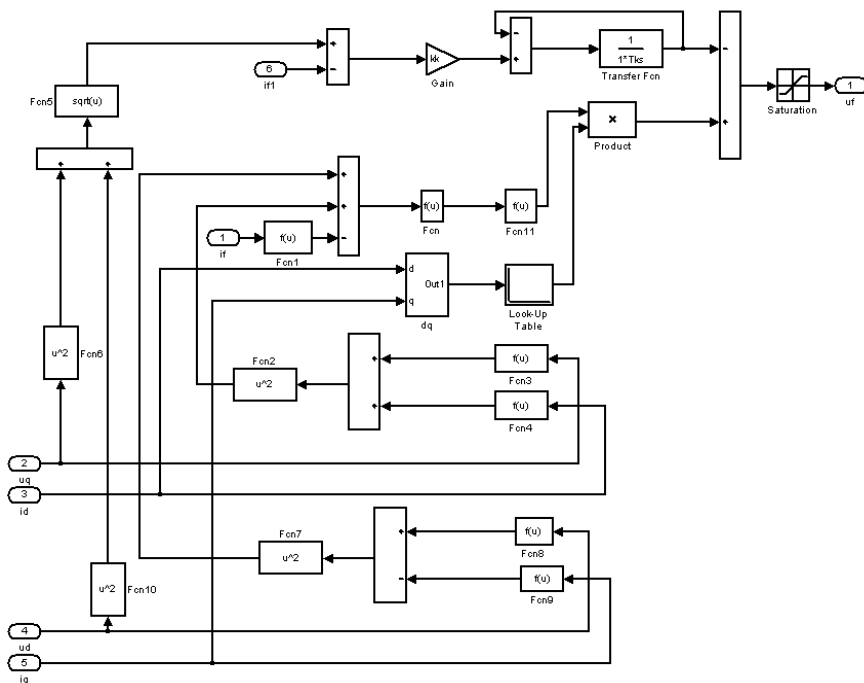


Рис. 2. Структурная схема блока в пакете APN в пакете Simulink:

На схеме показано: **1-17**- блоки суммирования; **G1-G19** и **P1-P3** - блоки умножения; **Transfer Fcn2-4** – блоки задания передаточной функции; **Saturation_Curve** – блок задания кривой насыщения графическим способом; **I-12**-блоки интегрирования; **Fcn-Fcn10** – блоки задания функции

Во втором разделе также доказано, что моделирование ГА в режиме КЗ необходимо выполнять с учетом действия РЧВ и изменения скорости вращения, т.к. вначале режима КЗ наблюдается скачок электромагнитного момента на валу машины, достигающего 3-8 кратной величины номинального момента машины.

Регулятор частоты вращения описывается следующими уравнениями:

$$\left. \begin{aligned} p s &= \frac{1}{T_i} \mu_p - \frac{1}{T_i} M_\omega; \\ p \mu_p &= \eta; \\ p \eta &= -\frac{\delta + \delta_i}{T_r^2} \mu_p - \frac{T_k}{T_r^2} \eta + \frac{\delta_i}{T_r^2} \xi - \frac{1}{T_r^2} s; \\ p \xi &= -\frac{1}{T_i} \xi + \frac{1}{T_i} \mu_p. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где η - ход муфты измерителя скорости; δ -статизм регулятора; δ_i – временная степень неравномерности; ξ - ход поршня демпфера (катаракта); T_k – постоянная времени вязкого трения; T_r – постоянная времени, связанная с механической инерцией движущихся частей; T_i – постоянная времени катаракта.

Соответствующий блок построен в пакете Simulink (рис. 3).

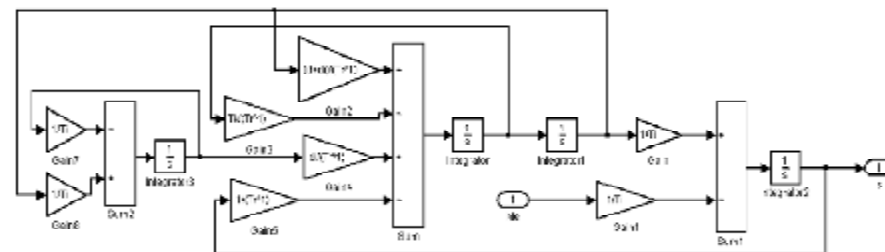


Рис. 3. Структурная схема блока РЧВ дизеля в Simulink:

Gain-Gain8 – блоки усиления; **Sum-Sum2**- блоки суммирования; **Integrator-Integrator3** – блоки интегрирования

РЧВ турбины описывается несколько иными уравнениями: