



**МИНИСТЕРСТВО ТРАНСПОРТА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО МОРСКОГО И РЕЧНОГО ТРАНСПОРТА
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ МОРСКОГО И РЕЧНОГО ФЛОТА
ИМЕНИ АДМИРАЛА С. О. МАКАРОВА**

А. В. Григорьев

**МОДЕЛИРОВАНИЕ СУДОВОГО
ЭЛЕКТРОБОРУДОВАНИЯ И
СРЕДСТВ АВТОМАТИЗАЦИИ**

*Рекомендовано Федеральным учебно-методическим объединением
в системе высшего образования по укрупненной группе специальностей
и направлений подготовки 26.00.00 «Техника и технологии
кораблестроения и водного транспорта» в качестве учебника
для реализации основной профессиональной образовательной
программы высшего образования по специальности 26.05.07
«Эксплуатация судового электрооборудования и средств автоматики»*

**Санкт-Петербург
Издательство ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова
2023**

Оглавление

Введение

Список сокращений

1. Модель и моделирование

1.1. Основные понятия, типы и классификация моделей

1.2. Основные понятия и виды моделирования

1.3. Технические средства моделирования

1.4. Программные средства моделирования. Системы автоматизированного проектирования

1.5. Требования к математическим моделям. Принципы моделирования

1.6. Этапы компьютерного моделирования

2. Математические модели судового электрооборудования и средств автоматизации

2.1. Состав и назначение судового электрооборудования и средств автоматизации

2.2. Основные подходы к математическому моделированию электрических машин переменного тока

2.3. Математическая модель синхронного генератора в неподвижной системе координат

2.4. Математическая модель синхронного генератора во вращающейся системе координат

2.5. Математическая модель синхронного генератора в относительных единицах

2.6. Математическая модель асинхронного электродвигателя в неподвижной системе координат

2.7. Математическая модель асинхронного электродвигателя во вращающейся системе координат

2.8. Математическая модель трансформатора напряжения

2.9. Математическая модель статической нагрузки и соединительных линий электропередач

2.10. Преобразование математической модели из неподвижной системы координат

во вращающуюся систему координат

2.11. Основные подходы к математическому моделированию полупроводниковых вентиляей

и преобразователей

2.12. Математическая модель электродвигателя постоянного тока

2.13. Математическая модель системы автоматического регулирования напряжения

синхронного генератора

2.14. Математическая модель приводного дизеля с системой автоматического регулирования

частоты

3. Компьютерное моделирование судового электрооборудования и средств автоматизации
 - 3.1. Компьютерное моделирование статической нагрузки электрической сети постоянного тока
 - 3.2. Компьютерное моделирование статической нагрузки электрической сети переменного тока
 - 3.3. Компьютерное моделирование электродвигателя постоянного тока
 - 3.4. Компьютерное моделирование асинхронного электродвигателя
 - 3.5. Компьютерное моделирование синхронного генератора
 - 3.6. Компьютерное моделирование полупроводниковых вентилях и приборов
 4. Компьютерное моделирование судовых электроэнергетических систем
 - 4.1. Состав, назначение и классификация судовых генераторных агрегатов
 - 4.2. Судовые электростанции и электроэнергетические системы
 - 4.3. Компьютерное моделирование судовой электростанции с одним генераторным агрегатом
 - 4.4. Компьютерное моделирование судовой электростанции с двумя генераторными агрегатами
 - 4.5. Компьютерное моделирование валогенераторной установки, работающей в генераторном режиме
 - 4.6. Компьютерное моделирование валогенераторной установки, работающей в режиме гребного электродвигателя
 - 4.7. Компьютерное моделирование валогенераторной установки с полупроводниковым преобразователем
 5. Компьютерное моделирование гребных электрических установок
 - 5.1. Состав, назначение, классификация гребных электрических установок
 - 5.2. Структурные схемы гребных электрических установок
 - 5.3. Винтовые характеристики гребного винта
 - 5.4. Компьютерное моделирование гребной электрической установки переменного тока с электродвигателем асинхронного типа
 - 5.5. Компьютерное моделирование гребной электрической установки переменного тока с электродвигателем синхронного типа
 - 5.6. Компьютерное моделирование гребной электрической установки двойного рода тока
- Заключение

ВВЕДЕНИЕ

Учебник соответствует Федеральному государственному образовательному стандарту высшего образования (ФГОС ВО) и предназначен для курсантов (студентов) вузов, обучающихся по специальности 26.05.07 «Эксплуатация судового электрооборудования и средств автоматизации».

Электрооборудование и средства автоматизации находят широкое применение на всех современных судах различного назначения. Для изучения физических свойств и принципа действия судового электропривода, средств автоматизации, при проектировании судовых электроэнергетических систем и гребных электрических установок используется математическое и компьютерное моделирование.

В учебнике приведены общие сведения о моделировании, включая основные понятия, определения и классификацию моделей и видов моделирования. Рассмотрены технические и программные средства моделирования, требования к математическим моделям, принципы и этапы компьютерного моделирования.

Приведены математические и компьютерные модели судового электрооборудования и средств автоматизации, в том числе математические модели синхронных генераторов, асинхронных электродвигателей, трансформаторов напряжения, статической нагрузки и соединительных линий, полупроводниковых приборов, электродвигателей постоянного тока, систем автоматического регулирования напряжения и частоты.

Рассмотрены структурные схемы, компьютерные модели и результаты вычислительных экспериментов судовых генераторных агрегатов, судовой электростанции, валогенераторной установки на судах с винтом регулируемого и фиксированного шага, гребных электрических установок переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты, асинхронными и синхронными электродвигателями, а также гребные электрические установки двойного рода тока с управляемым выпрямителем и электродвигателем постоянного тока.

1. МОДЕЛЬ И МОДЕЛИРОВАНИЕ

1.1. Основные понятия, типы и классификация моделей

Модель объекта — это условный образ (материальный или абстрактный), который отражает существенные характеристики объекта (свойства, взаимосвязь, параметры) и может заменить его в процессе исследования, давая информацию об объекте.

Теория моделирования — это теория замещения объектов (оригиналов) их моделями и исследование объектов на их моделях.

Все типы моделей и виды моделирования делятся на материальные и математические.

К *материальным* относят следующие модели:

- аналоговые;
- физические;
- натурные.

Аналоговая модель непрерывно воспроизводит течение процесса в моделируемом объекте процессом, имеющим другую физическую природу.

Физическая модель — это устройство, установка или система, которая воспроизводит в определенном масштабе моделируемый (исследуемый) объект при сохранении физического подобия процессов в модели процессам в объекте исследования.

Критерии подобия — безразмерные числа, зависящие от физических (в том числе геометрических) параметров, характеризующих явление. Экспериментальные данные, полученные методом физического моделирования, распространяются на реальное явление с учётом критериев подобия.

Инварианты подобия — величины, характеризующие моделируемый процесс, измеренные в относительных единицах (о.е.).

Натурная модель — это реальный исследуемый объект (макет или опытный образец), используемый для проведения экспериментальных исследований.

Математическая модель — формализованное описание объекта с помощью абстрактного языка, в частности, с помощью математических соотношений, отражающих процесс функционирования объекта.

По методу исследования математические модели подразделяют:

- на аналитические,
- численные,
- имитационные модели.

Аналитическая модель — формализованное описание объекта, которое позволяет получить решение уравнения в явном виде, используя известный математический аппарат.

Численная модель — формализованное описание объекта, которое допускает численные методы решения для конкретных начальных условий и количественных параметров модели.

Имитационная модель — формализованное описание, которое представляет собой совокупность алгоритмов функционирования объекта или правил изменения состояния объекта под влиянием внешних и внутренних возмущений.

Комбинированная модель — модель, которая включает в себя несколько разных типов моделей, например, физико-математические модели, математические модели с реальными элементами объекта и др.

По назначению модели могут быть разделены:

- на гносеологические модели,
- информационные модели,
- тренажеры.

Гносеологические модели применяют для установления законов природы и изучения физических законов природы.

Информационные модели применяют для решения изучения свойств объекта и разработке систем управления объектом.

Тренажеры используют для обучения технических специалистов и обслуживающего персонала по вопросам управления и эксплуатации реального объекта.

Информационная модель — модель объекта, представленная в виде информации, описывающей существенные для данного рассмотрения параметры и переменные величины моделируемого объекта, связи между входом и выходом объекта, позволяющая путем подачи на модель информации об изменениях входных величин моделировать возможные состояния объекта.

Компьютерная модель — программная реализация математической модели на ЭВМ.

В состав компьютерной модели входит:

- математическая модель;
- компьютер;
- программное обеспечение.

Компьютер — электронная вычислительная машина, которая выполняет логические операции и обработку данных, может использовать устройства ввода и вывода информации на дисплей и обычно включает в себя центральный процессор для выполнения операций.

Математическая модель, в которой в той или иной форме раскрываются причинно-следственные связи, определяющие процесс перехода системы из одного состояния в другое, называется динамической моделью.

Разбиение динамических систем на элементарные звенья в составе структурной схеме, значительно упрощает их расчет, анализ и конструирование и проектирование объекта.

Концептуальной моделью называют модель, определяющую структуру моделируемого объекта, свойства элементов и причинно-следственные связи.

Концептуальная модель — это абстрактная модель, определяющая структуру моделируемой системы, свойства ее элементов и причинно-следственные связи, присущие объекту (системе) и существенные для достижения цели моделирования.

Структурной моделью называют графическое представление состава и элементов объекта в виде строго иерархической структуры с указанием взаимосвязи элементов.

Структурная схема — совокупность звеньев объекта и связей между ними. Структурная схема является одним из видов графической модели. Под звеном схемы понимается часть объекта или системы управления, которая реализует элементарную функцию.

1.2. Основные понятия и виды моделирования

Моделированием называется процесс замещения объекта (оригинала) другим объектом (моделью) и изучение свойств оригинала путем исследования свойств модели.

Процесс моделирования предполагает наличие:

- объекта исследования (моделируемого объекта);
- исследователя;
- модели.

Виды моделирования определяются типом и используемой модели объекта. Различают следующие виды моделирования:

- 1) материальное;
- 2) математическое;
- 3) комбинированное.

Материальное моделирование можно подразделить:

- на аналоговое,
- физическое,
- натурное.

Аналоговое моделирование основано на замене исходного объекта другим объектом (моделью) с другими физическими процессами, но обладающим аналогичным поведением и свойствами, что и реальный объект.

Физическое моделирование является методом экспериментального изучения физических свойств объектов или явлений, основанное на использовании модели, имеющей ту же физическую природу, что и изучаемый объект.

В натурном моделировании в качестве модели применяют аналог исследуемого объекта (макет или опытный образец).

Комбинированным называется моделирование, в котором сочетаются разные типы моделей, например, материальные и математические.

Математическое моделирование можно подразделить:

- на аналитическое,
- численное,
- имитационное.

Математическое моделирование относится к знаковому моделированию. При аналитическом моделировании изучаются математические (абстрактные) модели реального объекта в виде алгебраических, дифференциальных и других уравнений, предусматривающих наличие однозначной вычислительной процедуры, приводящей к их очному решению.

Аналитическое моделирование использует аналитические методы решения математических выражений, входящих в математическую модель.

В численном моделировании применяются численные методы решения дифференциальных уравнений или систем уравнений.

Имитационное моделирование — метод исследования, при котором изучаемая система заменяется моделью, с достаточной точностью описывающей реальную систему. При имитационном моделировании проводятся эксперименты с целью получения информации о моделируемой системе или объекте, при этом результаты моделирования определяются случайным характером процессов.

Структурное моделирование. Создать систему уравнений, составляющих математическую модель объекта, бывает достаточно сложно. В связи с этим часто используется структурное моделирование, когда модель создается в виде структурной схемы.

Компьютерное моделирование предполагает реализацию математической модели исследуемого объекта на ЭВМ с целью проведения вычислительных экспериментов.

Для анализа и моделирования сложных систем используются системный и структурный (блочный или агрегатный) подходы.

Структурный подход. При структурном подходе определяется состав выделенных элементов системы и связи между ними. Совокупность этих элементов и связей между ними позволяет судить о структуре системы в целом.

При функциональном подходе рассматриваются отдельные функции (алгоритмы поведения) системы, при этом под функцией понимается ее свойство, приводящее к цели.

1.3. Технические средства моделирования

Компьютерная модель имеет две основные составляющие: программную и аппаратную. По типу функционирования вычислительная машина делится на:

- аналоговые вычислительные машины (АВМ);
- цифровые вычислительные машины (ЦВМ);
- аналого-цифровые (комбинированные) вычислительные машины (АЦВМ).

Аналоговый компьютер, или аналоговая вычислительная машина — вычислительная машина, которая представляет числовые данные при помощи аналоговых физических параметров, в чем и состоит его главное отличие от цифровой ЭВМ..

Основными достоинствами АВМ являются:

- высокое быстродействие;
- наглядность моделирования объектов;
- возможно параллельного выполнения расчетов;
- отсутствие языков программирования;
- отсутствие вирусов.

Цифровой компьютер работает с дискретными численными или символьными переменными. Цифровой компьютер способен обрабатывать информацию по определенному алгоритму.

К достоинствам цифровых ЭВМ следует отнести:

- высокую точность расчетов и обработки данных;
- возможность использования программных средств в виде стандартных, типовых, апробированных пакетов научного моделирования и сервисных программ обработки информации;
- наличие носителей информации;
- возможность передачи программ с помощью электронных средств связи.

Аналого-цифровые (комбинированные) вычислительные машины. сочетать высокую скорость и наглядность функционирования аналоговых средств и высокую точность расчетов на базе цифровых средств вычислительной техники.

1.4. Программные средства моделирования. Системы автоматизированного проектирования

Программное обеспечение (ПО) — программа или множество программ, используемых для управления компьютером.

Прикладное программное обеспечение — программа, предназначенная для выполнения определенных пользовательских задач и рассчитанная на непосредственное взаимодействие с пользователем.

Язык программирования — формальный язык, предназначенный для записи компьютерных программ.

В настоящее время для компьютерного моделирования используются следующие языки программирования:

- универсальные и процедурно-ориентированные языки общего назначения;
- специализированные языки имитационного моделирования.

Широкое применение моделирование нашло в системах автоматизированного проектирования (САПР).

Основными частями САПР являются:

- 1) технические средства (техническое обеспечение),
- 2) прикладное программное обеспечение,
- 3) информационное и математическое обеспечение,

Техническое обеспечение САПР — совокупность связанных и взаимодействующих технических средств .

Программное обеспечение САПР включает комплекс математических моделей проектируемых объектов, алгоритмов и программ, используемых для определения проектных параметров объекта и его режимов эксплуатации, а также при реализации самого процесса проектирования.

Основной целью создания САПР является повышение эффективности труда инженеров и проектантов.

1.5. Требования к математическим моделям. Принципы моделирования

К математическим моделям при их создании предъявляют ряд требований.

1. Полнота модели — получение требуемой точностью и достоверности результата.
2. Гибкость модели — возможность воспроизведения различных ситуаций при варьировании структуры, алгоритмов и параметров моделируемого объекта или системы.
3. Структура модели должна допускать возможность замены, добавления и исключения некоторых ее частей без изменения всей модели в целом.
4. Модель должна предусматривать возможность ее уточнения с учетом новой полученной информации о моделируемом объекте или системе.
5. Технические и программные средства, используемые для компьютерной реализации модели, должны обеспечивать ее эффективную работу по скорости и памяти, удобство общения посредством интерфейса с пользователем.

К основным принципам моделирования следует отнести:

1. Принцип информационной достаточности.
2. Принцип осуществимости.
3. Принцип множественности.
4. Принцип агрегирования.
5. Принцип параметризации.

Принцип информационной достаточности -: при отсутствии достаточной информации об исследуемом объекте построение математической модели невозможно, при наличии полной информации о моделируемом объекте моделирование лишено смысла.

Принцип осуществимости заключается в том, что создаваемая модель должна обеспечивать достижение поставленных целей исследования.

Принцип множественности заключается в том, что создаваемая модель должна отражать в первую очередь те свойства моделируемого объекта, которые подлежат исследованию.

Принцип агрегирования заключается в том, что создаваемую модель можно представить из агрегатов (подсистем).

Принцип параметризации подразумевает возможность исследования модели с разными параметрами моделируемого объекта

1.6. Этапы компьютерного моделирования

Процесс построения и исследования компьютерных моделей принято называть вычислительным экспериментом.

Эксперимент — процедура, выполняемая для поддержки, опровержения или подтверждения гипотезы или теории. Эксперименты могут значительно различаться по целям и задачам, и, как правило, полагаются на повторяемую процедуру и логический анализ результатов.

Компьютерный (численный) эксперимент — это эксперимент над математической моделью объекта исследования на ЭВМ, который состоит в том что, по одним параметрам модели вычисляются другие её параметры и на этой основе делаются выводы о свойствах объекта, описываемого математической моделью.

Одной из задач компьютерного эксперимента является верификация. Под верификацией в технической области знаний следует понимать проверку теоретических положений на соответствие реальности при помощи эксперимента.

К основным этапам компьютерного моделирования объекта или системы следует отнести:

1. Формирование цели моделирования.
2. Определение задач, решаемых в процессе моделирования.
3. Построение концептуальной (информационной) модели системы
4. Формализация и описание модели. Построение структурной и математической модели.

Алгоритмизация модели.

5. Программная или компьютерная реализация модели.
6. Планирование и разработка плана компьютерного (вычислительного) эксперимента.
7. Разработка компьютерного виртуального экспериментального стенда.
8. Отладка компьютерной модели и экспериментального стенда.
9. Проверка адекватности компьютерной модели.
10. Проведение вычислительного эксперимента.
11. Анализ полученных результатов компьютерного эксперимента и исследование модели.

На первом этапе создания модели необходимо: выяснить, с какой целью создается модель; уточнить, какие исходные результаты и в каком виде следует получить; определить, какие исходные данные нужны для создания модели. На основании сформированной цели определяются задачи, которые необходимо решить при создании модели.

При построении модели сложной системы первоначально строят концептуальную модель.

На этапе построения структурной модели необходимо: определить параметры модели и выявить взаимосвязь между ними; оценить, какие из параметров имеют влияние для решения данной задачи, а какими можно пренебрегать.

На этапе программной или компьютерной реализации модели необходимо выбрать программные и технические средства реализации компьютерной модели.

Необходимо разработать план экспериментальных исследований. Под планированием эксперимента понимается процедура выбора начальных условий проведения экспериментальных исследований, обоснование числа опытов, условий их проведения, необходимых для решения поставленной задачи с требуемой точностью.

Для проверки адекватности модели используют следующие методы:

1. Сравнение полученных в результате компьютерного эксперимента с известными зависимостями и эмпирическими данными, полученными ранее на реальном объекте.
2. Сравнение полученных результатов с результатами, полученными другими исследователями на других моделях, прошедших проверку на адекватность.
3. Сравнение полученных результатов с результатами полученными другим способами, в частности с использованием аналитических расчетов или физического моделирования.

Заключительный этап моделирования сводится к расчетам на ЭВМ с использованием выбранных программно-технических средств, получению и интерпретации результатов моделирования системы с учетом воздействия внешней среды.

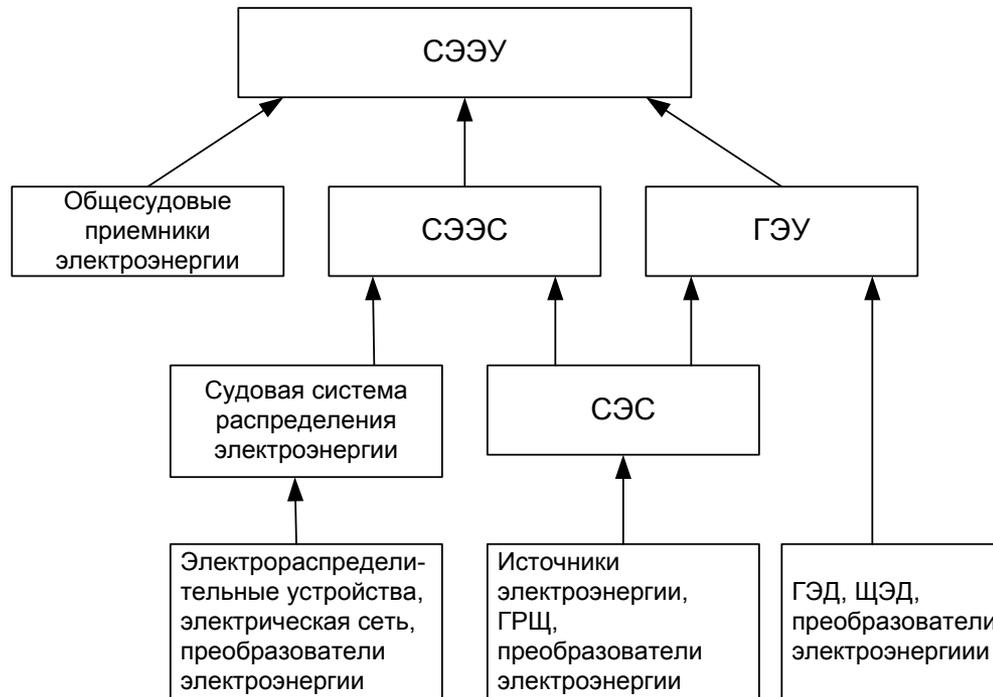
Вычислительные эксперименты на базе созданной компьютерной модели проводятся после проверки модели на адекватность по ранее разработанному плану.

Окончанием процесса моделирования является анализ полученных результатов компьютерного эксперимента и формирования выводов.

2. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ СУДОВОГО ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ И СРЕДСТВ АВТОМАТИЗАЦИИ

2.1. Состав и назначение судового электрооборудования и средств автоматизации

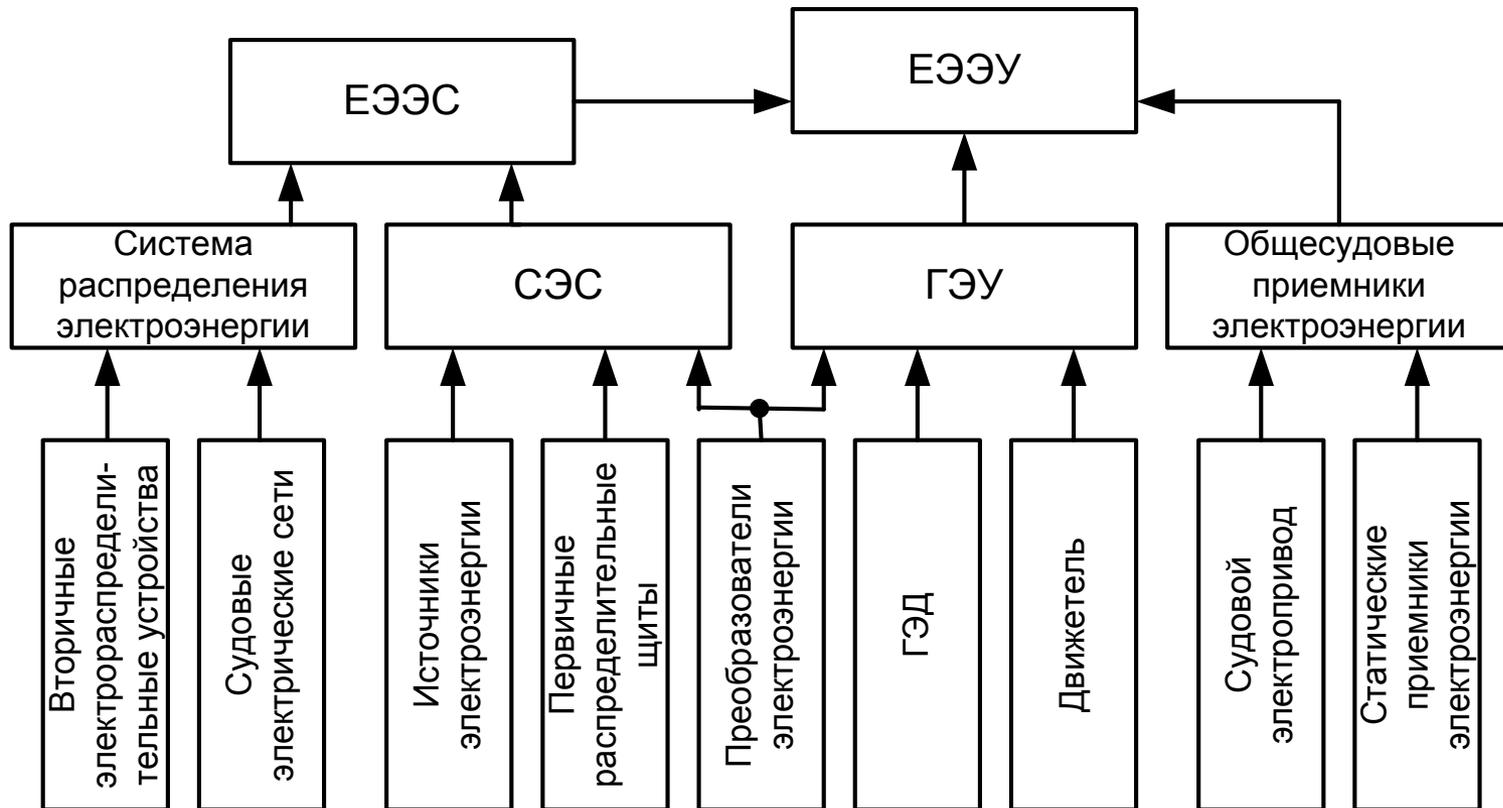
Судовая электроэнергетическая установка (СЭЭУ) — совокупность судового электротехнического оборудования, объединенного процессом производства, распределения и преобразования электрической энергии в другие виды энергии (механическую, тепловую, световую, химическую и т. п.).



Структура СЭЭУ

В состав СЭЭУ в общем случае входят:

- судовая электроэнергетическая система (СЭЭС);
- гребная электрическая установка (ГЭУ);
- общесудовые приемники электроэнергии.



Состав СЭЭУ

2.2. Основные подходы к математическому моделированию электрических машин переменного тока

Математическое моделирование заключается в выборе методов расчета и способов записи уравнений, влияющих на протекание переходных процессов, позволяющих обеспечить наибольшую точность и простоту выполнения поставленной задачи, и пренебрежением второстепенных фактов, которые усложняют расчет и в незначительной степени влияют на точность результатов.

Назначением математического моделирования является математическое описание объекта моделирования.

Электрические машины переменного и постоянного тока являются электромеханическими системами с сосредоточенными параметрами, процессы в которых описываются нелинейными дифференциальными уравнениями.

При математическом моделировании ЭМ используют различные приближения, что позволяет сократить время расчетов переходных процессов.

Приближением называют пренебрежение второстепенными факторами, в меньшей степени влияющими на точность расчета переходных процессов, или применение специальных преобразований математических уравнений, упрощающих и сокращающих расчеты.

Основными отличиями идеализированной ЭМ от реальной являются:

- отсутствие учета насыщения магнитных цепей;
- отсутствие потерь в стали и вытеснения тока в обмотках;
- синусоидальное распределение в пространстве кривых намагничивающих сил и магнитных индукций;
- независимость индуктивных сопротивлений рассеяния от положения ротора и тока в обмотках.

Математическое описание электрических машин может производиться в физических или относительных единицах. Часто применяется матричная форма записи математических моделей.

Синхронные машины (СМ), как правило, выполняют с явно выраженными полюсами. Синхронная машина с явно выраженными полюсами имеет следующие обмотки:

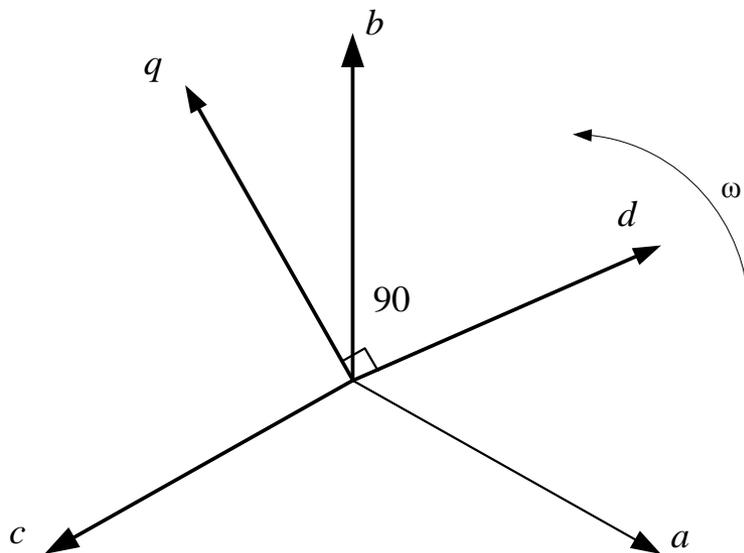
- 1) симметричную трехфазную обмотку, расположенную, как правило, на статоре;
- 2) обмотку возбуждения, расположенную на роторе;
- 3) демпферную обмотку, расположенную на роторе.

Трехфазную обмотку, расположенную на статоре, часто называют якорной обмоткой.

Асинхронная машина (АМ) с короткозамкнутым ротором имеет следующие обмотки:

- 1) симметричную трехфазную обмотку, расположенную на статоре;
- 2) короткозамкнутую обмотку, расположенную на роторе.

При моделировании электрических машин используют неподвижную или вращающуюся систему координат. В неподвижной трехлинейной системе координат каждая фазная ось повернута относительно соседних на 120° .

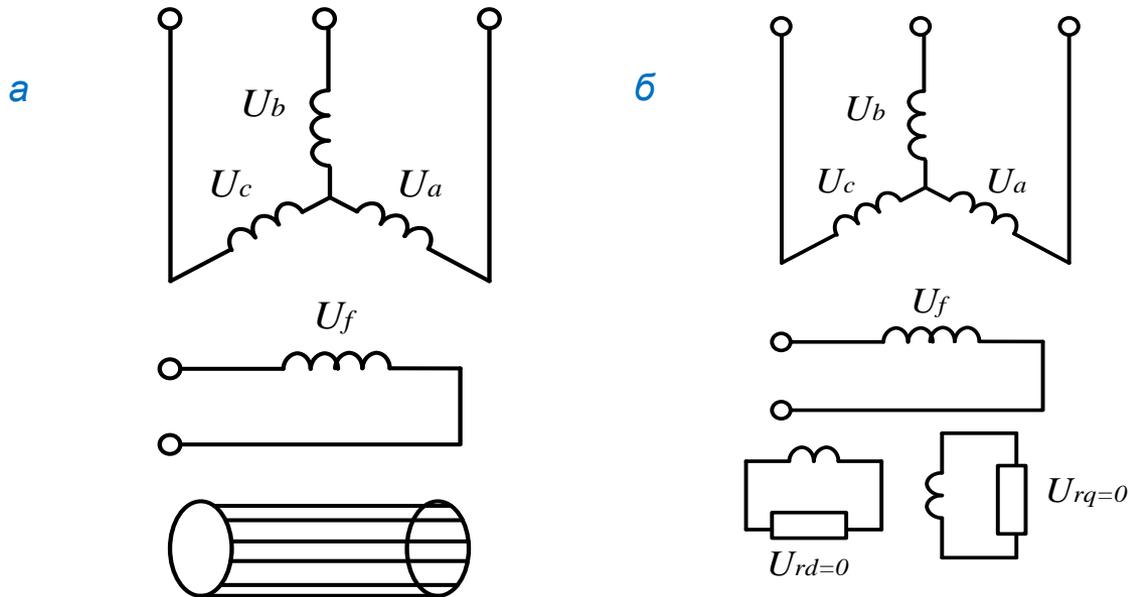


Неподвижная (a, b, c) и вращающаяся (d, q) система координат

2.3. Математическая модель синхронного генератора в неподвижной системе координат

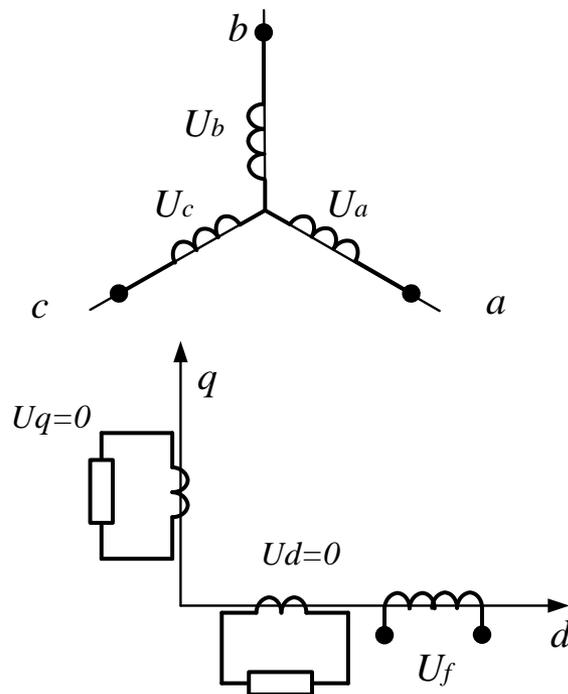
Синхронная машина состоит из трехфазной обмотки, расположенной на статоре, обмотки возбуждения и демпферной обмотки, расположенной на роторе.

При моделировании СМ для упрощения демпферную короткозамкнутую обмотку заменяют двумя короткозамкнутыми обмотками, ортогональными друг другу



Электрическая схема синхронной машины: а — традиционная схема; б — схема, используемая при моделировании в неподвижных координатах

Описание трехфазной якорной обмотки, расположенной на статоре, производится в неподвижной фазной системе координат a, b, c , описание обмотки возбуждения и двух демпферных обмоток — во вращающейся системе координат d, q .



Расположение неподвижных (a, b, c) и вращающихся (d, q) систем координат относительно обмоток синхронной машины

Система дифференциальных уравнений синхронной ЭМ состоит из шести уравнений. Три уравнения описывают электромагнитные процессы в трехфазной якорной обмотке, одно — в обмотке возбуждения, два — в демпферных обмотках:

$$\left\{ \begin{array}{l} U_a = R_a \cdot I_a + \frac{d\psi_a}{dt}; \\ U_b = R_b \cdot I_b + \frac{d\psi_b}{dt}; \\ U_c = R_c \cdot I_c + \frac{d\psi_c}{dt}; \\ U_f = R_f \cdot I_f + \frac{d\psi_f}{dt}; \\ 0 = R_{rd} \cdot I_{rd} + \frac{d\psi_{rd}}{dt}; \\ 0 = R_{rq} \cdot I_{rq} + \frac{d\psi_{rq}}{dt}, \end{array} \right.$$

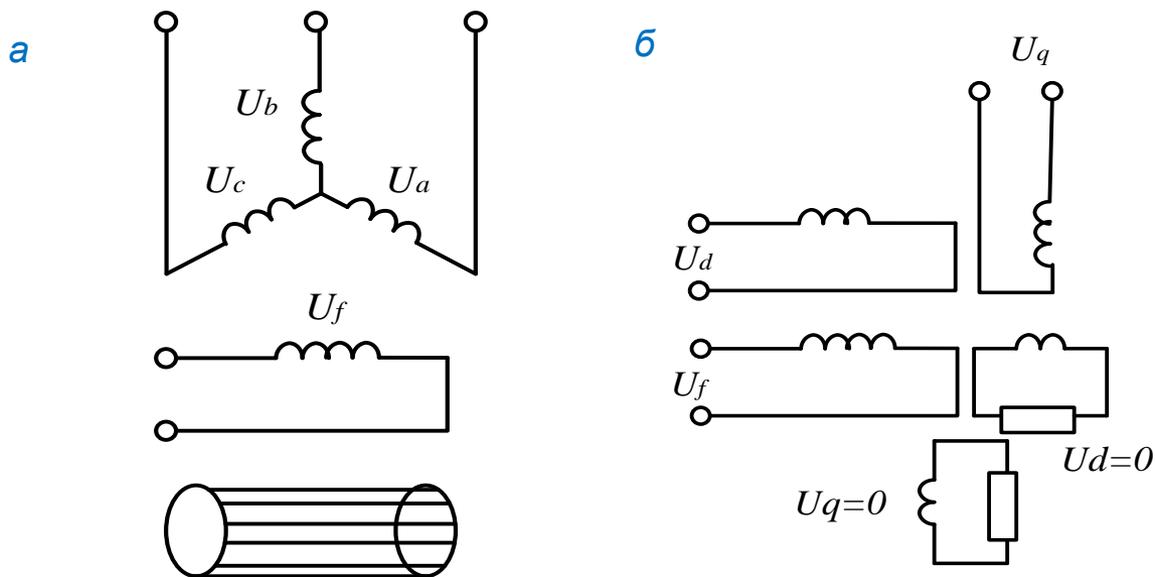
Система алгебраических уравнений для потокосцеплений также состоит из шести уравнений. Три уравнения описывают потокосцепления в трехфазной якорной обмотке, одно — в обмотке возбуждения, два — в демпферных обмотках:

$$\left\{ \begin{array}{l} \psi_a = L_a I_a + M_{ab} I_b + M_{ac} I_c + M_{af} I_f + M_{ard} I_{rd} + M_{arq} I_{rq}; \\ \psi_b = M_{ba} I_a + L_b I_b + M_{bc} I_c + M_{bf} I_f + M_{brd} I_{rd} + M_{brq} I_{rq}; \\ \psi_c = M_{ca} I_a + M_{cb} I_b + L_c I_c + M_{cf} I_f + M_{crd} I_{rd} + M_{crq} I_{rq}; \\ \psi_f = M_{fa} I_a + M_{fb} I_b + M_{fc} I_c + L_f I_f + M_{frd} I_{rd} + 0; \\ \psi_{rd} = M_{rda} I_a + M_{rdb} I_b + M_{rdc} I_c + M_{rdf} I_f + L_{rd} I_{rd} + 0; \\ \psi_{rq} = M_{rqa} I_a + M_{rqb} I_b + M_{rqc} I_c + 0 + 0 + L_{rq} I_{rq}, \end{array} \right.$$

2.4. Математическая модель синхронного генератора во вращающейся системе координат

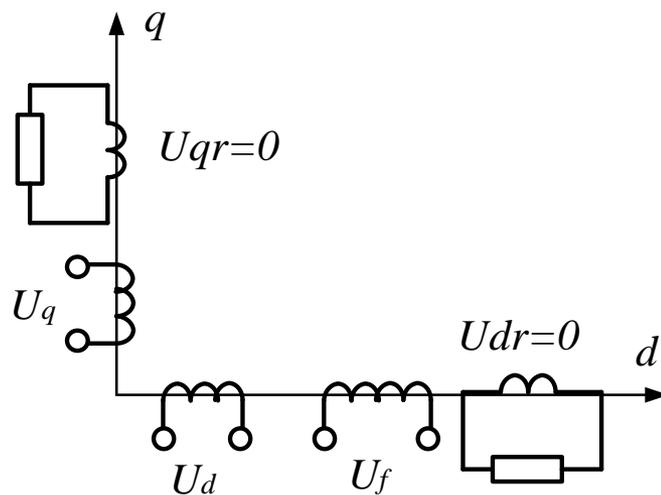
Для сокращения количества уравнений и коэффициентов в математической модели синхронного генератора, в том числе сокращению коэффициентов, которые являются периодическими величинами, применяют запись математической модели во вращающейся системе координат.

В этом случае трехфазные обмотки синхронной машины заменяют двумя обмотками, которые расположены во вращающейся системе координат d, q .



Электрическая схема синхронной машины: а — традиционная схема; б — схема, используемая при моделировании во вращающихся координатах

Трёхфазные обмотки синхронной машины заменяют двумя обмотками, которые расположены во вращающейся системе координат d, q



Расположение вращающейся системы координат (d, q) относительно обмоток синхронной машины

Математическая модель синхронного генератора во вращающейся системе координат состоит из системы дифференциальных уравнений для потокосцеплений и алгебраических уравнений для потокосцеплений. Система дифференциальных уравнений состоит из 5 уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} U_d = -R \cdot I_d + \frac{d\psi_d}{dt} + \omega \cdot \psi_q; \\ U_q = -R \cdot I_q - \frac{d\psi_q}{dt} + \omega \cdot \psi_d; \\ U_f = R_f \cdot I_f + \frac{d\psi_f}{dt}; \\ 0 = R_{rd} \cdot I_{rd} + \frac{d\psi_{rd}}{dt}; \\ 0 = R_{rq} \cdot I_{rq} + \frac{d\psi_{rq}}{dt}, \end{array} \right.$$

Система алгебраических уравнений, записанная с использованием коэффициентов самоиндукции и взаимной индукции, состоит из 5 уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} \psi_d = -L_d I_d + M_{df} I_f + M_{drd} I_{rd}; \\ \psi_q = L_q I_q + M_{qrq} I_{rq}; \\ \psi_f = L_f I_f - M_{fd} I_d + X_{frd} I_{rd}; \\ \psi_{rd} = L_{rd} I_{rd} - M_{rdd} I_d + M_{rdf} I_f); \\ \psi_{rq} = L_{rq} I_{rq} + M_{rqq} I_q). \end{array} \right.$$

2.5. Математическая модель синхронного генератора в относительных единицах

На практике для электротехнических расчетов часто применяют математическую модель СМ записанную в относительных единицах. Для перевода физических величин в относительную форму записи применяют базисные единицы. При моделировании используют разные базисные величины.

Широкое применение нашла система базисных единиц для статорных физических величин:

$$\left\{ \begin{array}{l} U_{\bar{\sigma}} = \sqrt{2}U_{\phi H}, \\ I_{\bar{\sigma}} = \sqrt{2}I_{\phi H}, \\ Z_{\bar{\sigma}} = \frac{U_{\bar{\sigma}}}{I_{\bar{\sigma}}}, \\ S_{\bar{\sigma}} = \frac{3}{2}U_{\bar{\sigma}}I_{\bar{\sigma}}, \\ \omega_{\bar{\sigma}} = \omega_s = 2\pi f_{\bar{\sigma}}, \\ t_{\bar{\sigma}} = \frac{1}{\omega_{\bar{\sigma}}}, \\ P_{\bar{\sigma}} = I_{\bar{\sigma}}, \\ \Psi_{\bar{\sigma}} = \frac{U_{\bar{\sigma}}}{I_{\bar{\sigma}}}, \\ M_{\bar{\sigma}} = \frac{P_{\bar{\sigma}}}{\omega_{\bar{\sigma}}}. \end{array} \right.$$

Уравнения для базисных значений тока, напряжения, потокосцепления обмотки возбуждения и демпферных обмоток

$$\left\{ \begin{array}{l} I_{f\bar{\sigma}} = \frac{U_{\bar{\sigma}}}{X_{af}}; \\ I_{rd\bar{\sigma}} = \frac{U_{\bar{\sigma}}}{X_{ard}}; \\ I_{rq\bar{\sigma}} = \frac{U_{\bar{\sigma}}}{X_{arq}}. \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} U_{f\bar{\sigma}} = I_{f\bar{\sigma}}R_f; \\ U_{rd\bar{\sigma}} = I_{rd\bar{\sigma}}R_{rd}; \\ U_{rq\bar{\sigma}} = I_{rq\bar{\sigma}}R_{rq}. \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} \Psi_{f\bar{\sigma}} = L_f I_{f\bar{\sigma}}; \\ \Psi_{rd\bar{\sigma}} = L_{rd} I_{rd\bar{\sigma}}; \\ \Psi_{rq\bar{\sigma}} = L_{rq} I_{rq\bar{\sigma}}. \end{array} \right.$$

Математическая модель синхронного генератора во вращающейся системе координат в относительных единицах имеет вид:

$$\begin{cases} u_d = -r \cdot i_d + \frac{d\psi_d}{dt} + \omega \cdot \psi_q; \\ u_q = -r \cdot i_q - \frac{d\psi_q}{dt} + \omega \cdot \psi_d; \\ u_f = r_f \cdot i_f + \frac{d\psi_f}{dt}; \\ 0 = r_{rd} \cdot i_{rd} + \frac{d\psi_{rd}}{dt}; \\ 0 = r_{rq} \cdot i_{rq} + \frac{d\psi_{rq}}{dt}, \end{cases}$$

$$\begin{cases} \psi_d = \psi_{ad} + \psi_{ds}; \\ \psi_q = \psi_{aq} + \psi_{qs}; \\ \psi_f = \psi_{af} + \psi_{fs}; \\ \psi_{rd} = \psi_{ard} + \psi_{rds}; \\ \psi_{rq} = \psi_{arq} + \psi_{rqs}. \end{cases}$$

Система уравнений для расчета индуктивных сопротивлений статорных и роторных обмоток СМ:

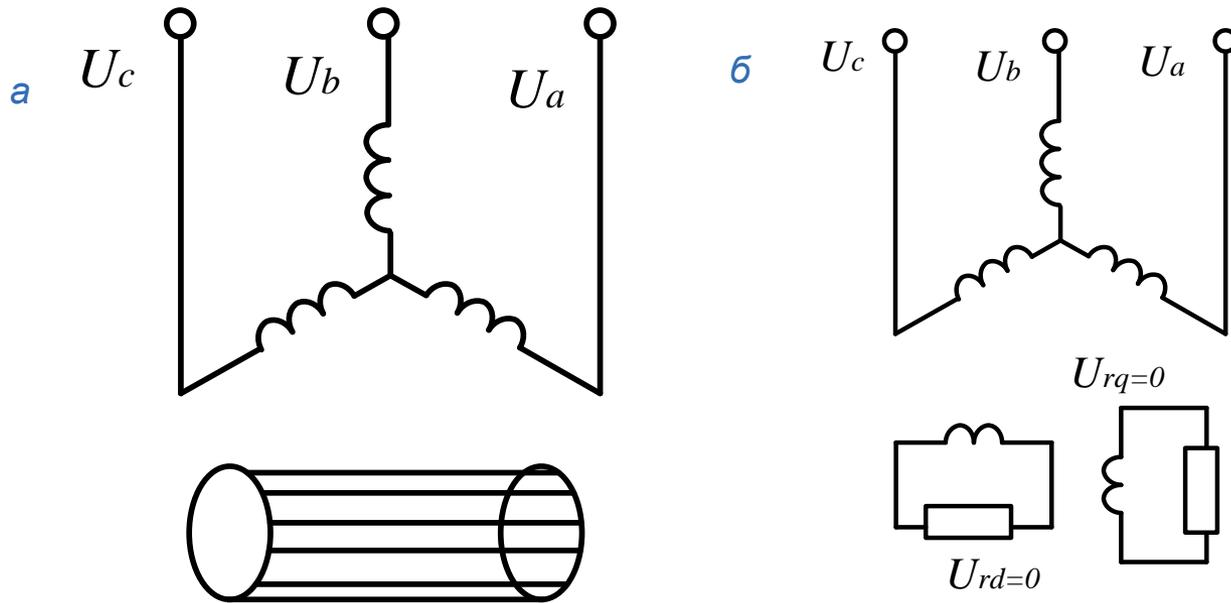
$$\begin{cases} x_d = x_{ad} + x_s; \\ x_q = x_{aq} + x_s; \\ x_f = x_{af} + x_{fs}; \\ x_{rd} = x_{ard} + x_{rds}; \\ x_{rq} = x_{arq} + x_{rqs}, \end{cases}$$

В математическую модель синхронного генератора во вращающейся системе координат в относительных единицах входят 5 дифференциальных уравнений для напряжений и 5 алгебраических уравнений для расчета потокосцеплений.

2.6 Математическая модель асинхронного электродвигателя в неподвижной системе координат

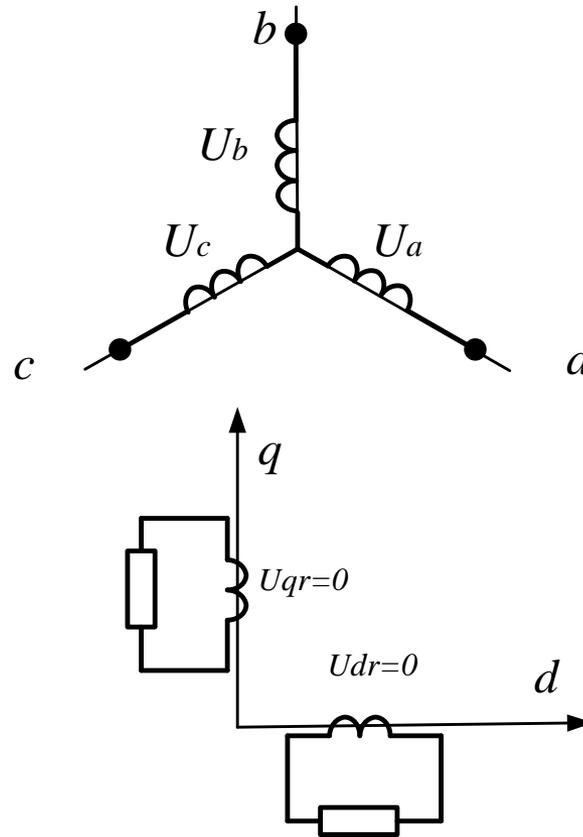
Математическая модель асинхронной машины может быть получена из модели синхронной машины. Отличие АМ от СМ заключается в отсутствии обмотки возбуждения.

Асинхронная машина с короткозамкнутым ротором включает в себя трехфазную обмотку, расположенную на статоре, и короткозамкнутую обмотку, расположенную на роторе.



Электрическая схема асинхронной машины:
а — традиционная схема; б — схема, используемая при моделировании в неподвижных координатах

Короткозамкнутую обмотку АМ, как и демпферную обмотку СМ при моделировании заменяют двумя короткозамкнутыми обмотками, ортогональными друг другу.



Расположение неподвижной (а, b, с) и вращающейся (d, q) систем координат относительно обмоток асинхронной машины

Математическая модель асинхронной машины, как и модель синхронного генератора, состоит из двух систем уравнений:

- системы дифференциальных уравнений для напряжений;
- системы алгебраических уравнений для потокосцеплений.

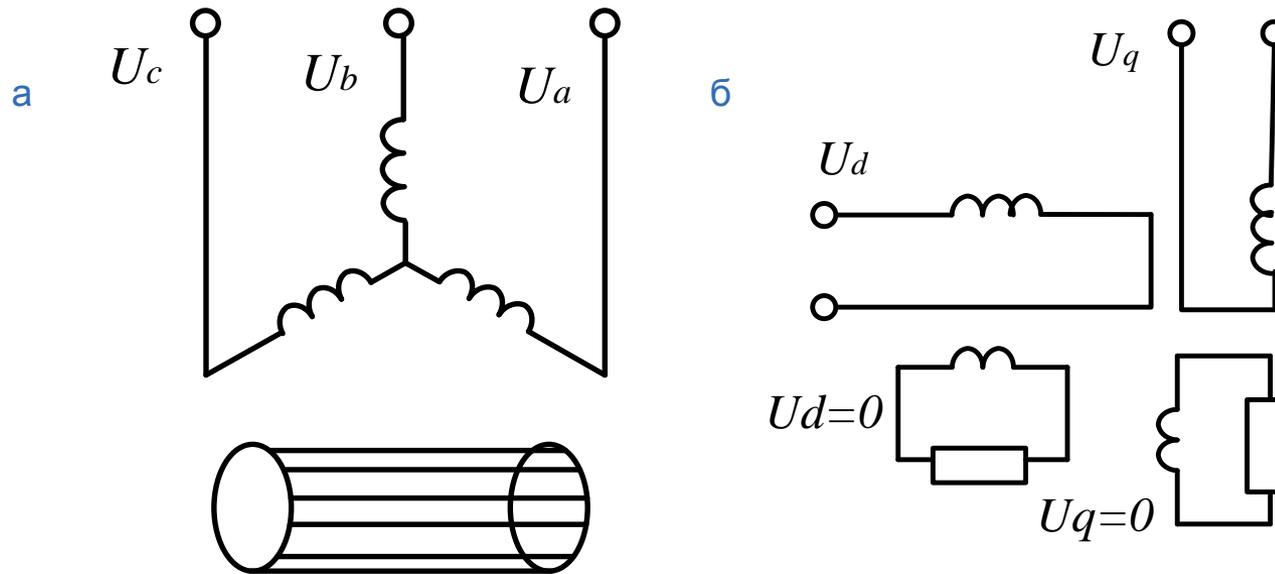
$$\left\{ \begin{array}{l} U_a = R_a \cdot I_a + \frac{d\psi_a}{dt}; \\ U_b = R_b \cdot I_b + \frac{d\psi_b}{dt}; \\ U_c = R_c \cdot I_c + \frac{d\psi_c}{dt}; \\ 0 = R_r \cdot I_{rd} + \frac{d\psi_{rd}}{dt}; \\ 0 = R_r \cdot I_{rq} + \frac{d\psi_{rq}}{dt}. \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} \psi_a = L_a I_a + M_{ab} I_b + M_{ac} I_c + M_{ard} I_{rd} + M_{arq} I_{rq}; \\ \psi_b = M_{ba} I_a + L_b I_b + M_{bc} I_c + M_{brd} I_{rd} + M_{brq} I_{rq}; \\ \psi_c = M_{ca} I_a + M_{cb} I_b + L_c I_c + M_{crd} I_{rd} + M_{crq} I_{rq}; \\ \psi_{rd} = M_{rda} I_a + M_{rdb} I_b + M_{rdc} I_c + L_{rd} I_{rd} + 0; \\ \psi_{rq} = M_{rqa} I_a + M_{rqb} I_b + M_{rqc} I_c + L_{rq} I_{rq}, \end{array} \right.$$

Система уравнений в матричном виде для расчета напряжений и потокосцеплений статорных и роторных обмоток

$$\left\{ \begin{array}{l} [U] = R[I] + \frac{d}{dt}[\psi]; \\ [U_r] = R[I_r] + \frac{d}{dt}[\psi_r]. \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} [\psi] = [L_{ss}][I] + [M_{sr}][I_r]; \\ [\psi_r] = [M_{rs}][I] + [L_{rr}][I_r]. \end{array} \right.$$

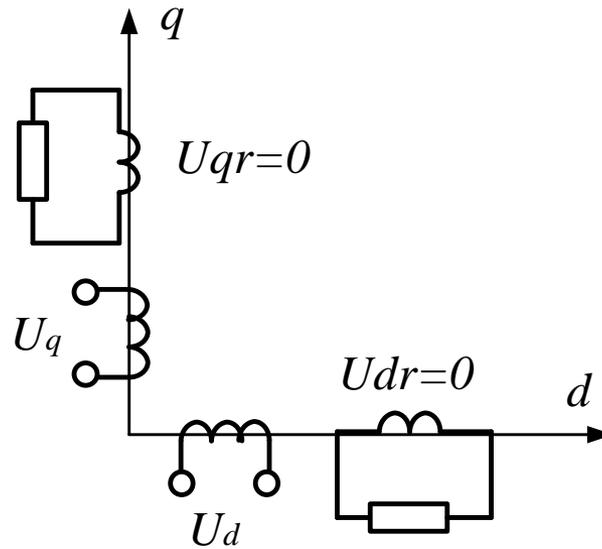
2.7 Математическая модель асинхронного электродвигателя во вращающейся системе координат

Для сокращения количества уравнений и исключения из математической модели периодических коэффициентов угла поворота ротора асинхронную машину, как и синхронную, часто записывают во вращающейся системе координат.



Электрическая схема асинхронной машины:
а — традиционная схема; б — схема, используемая при моделировании во вращающихся координатах

Трехфазные обмотки асинхронной машины заменяют двумя обмотками, которые расположены во вращающейся системе координат перпендикулярно друг другу



Классическая схема
эквивалентной асинхронной машины
во вращающейся системе координат d, q

Система дифференциальных уравнений для напряжений состоит из 4 уравнений: двух уравнений для расчета напряжений фазных обмоток и двух уравнений для расчета напряжений короткозамкнутых обмоток:

Система алгебраических уравнение для расчета потокосцеплений асинхронной машины состоит из 4 уравнений. Два уравнения используются для расчета потокосцеплений фазных обмоток и два уравнения для расчета потокосцеплений короткозамкнутых обмоток.

Уравнения для потокосцеплений могут быть представлены с применением коэффициентов самоиндукции и взаимной индукции фазных обмоток статора и короткозамкнутых обмоток ротора:

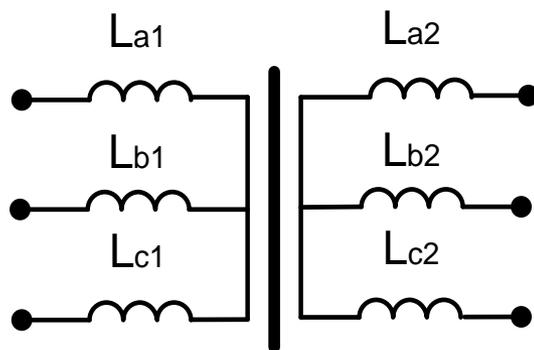
$$\left\{ \begin{array}{l} U_d = RI_d + \frac{d\Psi_d}{dt} - \omega\Psi_q; \\ U_q = RI_q + \frac{d\Psi_q}{dt} + \omega\Psi_d; \\ 0 = R_r I_{rd} + \frac{d\Psi_{rd}}{dt} - (\omega - \omega_r)\Psi_{rq}; \\ 0 = R_r I_{rq} + \frac{d\Psi_{rq}}{dt} + (\omega - \omega_r)\Psi_{rd}, \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} \Psi_d = LI_d + M_{ar}I_{rd}; \\ \Psi_q = LI_q + M_{ar}I_{rq}; \\ \Psi_{rd} = M_{ra}I_d + L_{r1}I_{rd}; \\ \Psi_{rq} = M_{ra}I_q + L_{r1}I_{rq}. \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} \Psi_d = \frac{1}{\omega_s}(XI_d + X_{ar}I_{rd}); \\ \Psi_q = \frac{1}{\omega_s}(XI_q + X_{ar}I_{rq}); \\ \Psi_{rd} = \frac{1}{\omega_s}(X_{ra}I_d + X_r I_{rd}); \\ \Psi_{rq} = \frac{1}{\omega_s}(X_{ra}I_q + X_r I_{rq}), \end{array} \right.$$

2.8 Математическая модель трансформатора напряжения

Силовой трансформатор напряжения представляет собой электрическую машину с двумя трехфазными обмотками, намотанными на сердечник. Силовой трансформатор напряжения состоит из двух трехфазных обмоток — первичной и вторичной.

К первично обмотке подводится трёхфазное напряжение первичной величины, со вторичной обмотки снимается вторичное напряжение другой величины. Как правило, судовые силовые трансформаторы преобразуют линейное напряжение 690 В и 380 В в напряжение 380 В и 220 В.

Математическая модель трансформатора может быть получена из математической модели синхронной машины путем замены обмотки возбуждения на трехфазную неподвижную обмотку.



Принципиальная схема
силового трансформатора напряжения

Математическая модель силового трансформатора напряжения в неподвижной системе координат состоит из 6 дифференциальных уравнений для расчета напряжений и 6 алгебраических уравнений для расчета потокосцеплений.

Система дифференциальных уравнений для расчета напряжений трехфазного двухобмоточного трансформатора в неподвижной системе координат: и система алгебраических уравнений для расчета потокосцеплений.

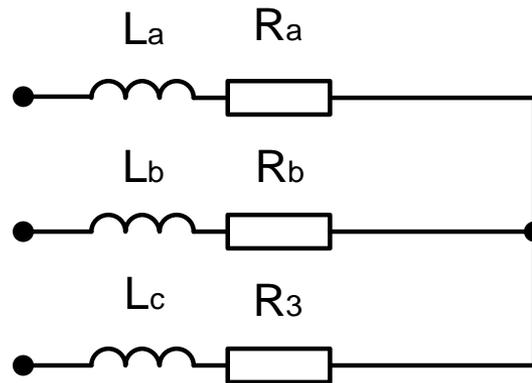
$$\left\{ \begin{array}{l} U_{a1} = R_{a1} \cdot I_{a1} + \frac{d\psi_{a1}}{dt}; \\ U_{b1} = R_{b1} \cdot I_{b1} + \frac{d\psi_{b1}}{dt}; \\ U_{c1} = R_{c1} \cdot I_{c1} + \frac{d\psi_{c1}}{dt}; \\ U_{a2} = R_{a2} \cdot I_{a2} + \frac{d\psi_{a2}}{dt}; \\ U_{\epsilon 2} = R_{\epsilon 2} \cdot I_{u2} + \frac{d\psi_{\epsilon 2}}{dt}; \\ U_{c2} = R_{c2} \cdot I_{c2} + \frac{d\psi_{c2}}{dt}, \end{array} \right. \left\{ \begin{array}{l} \psi_{a1} = L_{a1}I_{a1} + M_{ab1}I_{b1} + M_{ac1}I_{c1} + M_{a1a2}I_{a2} + M_{a1b2}I_{b2} + M_{a1c2}I_{c2}; \\ \psi_{b1} = M_{b1a1}I_{a1} + L_{b1}I_{b1} + M_{b1c1}I_{c1} + M_{b1a2}I_{a2} + M_{b1b2}I_{b2} + M_{b1c2}I_{c2}; \\ \psi_{c1} = M_{c1a1}I_{a1} + M_{c1b1}I_{b1} + L_{c1}I_{c1} + M_{c1a2}I_{a2} + M_{c1b2}I_{b2} + M_{c1c2}I_{c2}; \\ \psi_{a2} = M_{a2a1}I_{a1} + M_{a2b1}I_{b1} + M_{a2c1}I_{c1} + L_{a2}I_{a2} + M_{a2b2}I_{b2} + M_{a2c2}I_{c2}; \\ \psi_{b2} = M_{b2a1}I_{a1} + M_{b2b1}I_{b1} + M_{b2c1}I_{c1} + M_{b2a2}I_{a2} + L_{b2}I_{b2} + M_{b2c2}I_{c2}; \\ \psi_{c2} = M_{c2a1}I_{a1} + M_{c2b1}I_{b1} + M_{c2c1}I_{c1} + M_{c2a2}I_{a2} + M_{c2b2}I_{b2} + L_{c2}I_{c2}; \end{array} \right.$$

Математическая модель трансформатора напряжения, как и модели электрических вращающихся машин, может быть представлена во вращающейся системе координат d, q .

В этом случае трехфазные первичные и вторичные обмотки заменяются двумя обмотками, расположенными вдоль оси d и оси q вращающейся системы координат.

2.9 Математическая модель статической нагрузки и соединительных линий электропередач

Математическая модель статической трехфазной нагрузки может быть получена из модели трансформатора напряжения, в которой отсутствует вторичная обмотка.



Электрическая схема
статической активно-индуктивной
нагрузки

Математическая модель трехфазной статической активно-индуктивной нагрузки в неподвижной системе координат состоит из системы дифференциальных и алгебраических уравнений.

Система дифференциальных уравнений для расчета напряжений:

$$\begin{cases} U_A = R_A I_A + \frac{d\psi_A}{dt}; \\ U_B = R_B I_B + \frac{d\psi_B}{dt}; \\ U_C = R_C I_C + \frac{d\psi_C}{dt}. \end{cases}$$

Система алгебраических уравнений для потокосцеплений:

$$\begin{cases} \psi_a = L_a I_a + M_{ab} I_b + M_{ac} I_c; \\ \psi_b = M_{ba} I_a + L_b I_b + M_{bc} I_c; \\ \psi_c = M_{ca} I_a + M_{cb} I_b + L_c I_c. \end{cases}$$

Математическая модель статической нагрузки в матричном виде в неподвижных координатах a, b, c в физических единицах может быть представлена в следующем виде:

$$[U] = [R][I] + \frac{d[\psi]}{dt} = R[I] + [L] \frac{d[I]}{dt}$$
$$[U] = \begin{bmatrix} U_A \\ U_B \\ U_C \end{bmatrix} \quad [I] = \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} \quad [\psi] = \begin{bmatrix} \psi_A \\ \psi_B \\ \psi_C \end{bmatrix}$$
$$[L] = \begin{bmatrix} LMM \\ MLM \\ MML \end{bmatrix} \quad [R] = \begin{bmatrix} R_A 00 \\ 0R_B 0 \\ 00R_C \end{bmatrix}$$

Математическая модель соединительных линий может быть получена из модели трехфазной статической активно-индуктивной нагрузки.

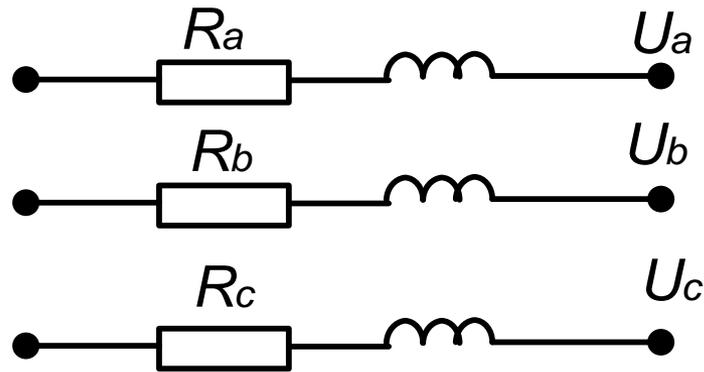


Схема электрических линий передач

Математическая модель соединительных линий во вращающихся координатах d , q в относительных единицах состоит из дифференциальных уравнений для расчета падения напряжений и алгебраических уравнений для расчета потокосцеплений.

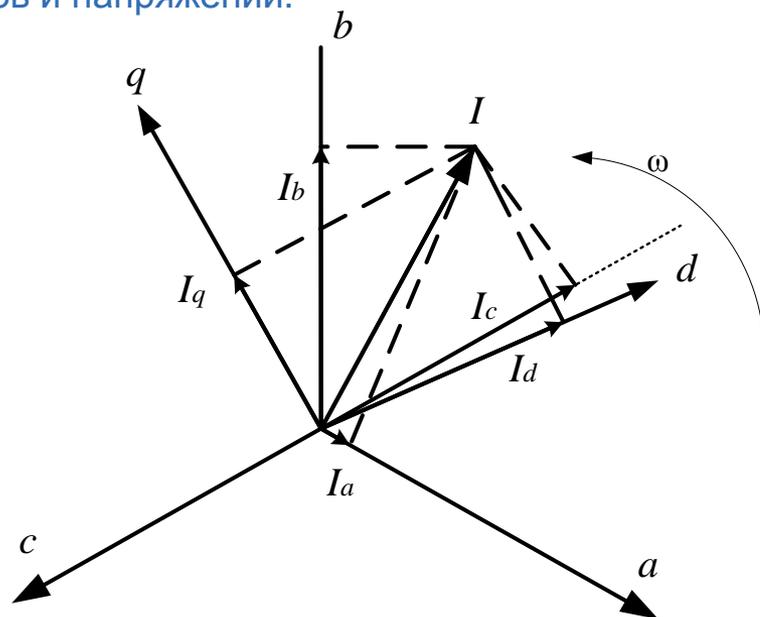
Дифференциальные уравнения падения напряжения на участке соединительных линий в относительных единицах:

$$\begin{cases} \Delta u_d = r i_d + x p i_d - (1 + s) x i_q; \\ \Delta u_q = r i_q + x p i_q + (1 + s) x i_d. \end{cases}$$

2.10 Преобразование математической модели из неподвижной системы координат во вращающуюся систему координат

Преобразование системы уравнений математических моделей из неподвижной системы координат во вращающуюся производят с целью упрощения модели и сокращения времени расчетов на компьютере.

Обратное преобразование делают после проведения расчетов с целью получения фазных (мгновенных) величин токов и напряжений.



Преобразование систем координат

Проекция изображающего вектора тока, напряжения, потокосцепления на неподвижные оси фаз дают значение фазных токов, напряжений и потокосцеплений.

Изображающие вектора тока, напряжения и потокосцепления могут быть найдены из составляющих токов, напряжений и потокосцеплений во вращающейся системе координат

$$\begin{cases} I = \sqrt{I_d^2 + I_q^2}; \\ U = \sqrt{U_d^2 + U_q^2}; \\ \Psi = \sqrt{\Psi_d^2 + \Psi_q^2}. \end{cases}$$

Система уравнений для расчета мгновенных значений токов, напряжений: и потокосцеплений:

$$\begin{cases} I_a = I \cos \gamma; \\ I_b = I \cos(\gamma - 2\pi/3); \\ I_c = I \cos(\gamma + 2\pi/3). \end{cases} \quad \begin{cases} U_a = U \cos \gamma; \\ U_b = U \cos(\gamma - 2\pi/3); \\ U_c = U \cos(\gamma + 2\pi/3). \end{cases} \quad \begin{cases} \Psi_a = \Psi \cos \gamma; \\ \Psi_b = \Psi \cos(\gamma - 2\pi/3); \\ \Psi_c = \Psi \cos(\gamma + 2\pi/3). \end{cases}$$

Для преобразования мгновенных значений величин используется матрица, которая носит название матрицы или системы уравнений Горева – Парка:

$$[A_{II}] = \begin{bmatrix} \cos \gamma & \cos(\gamma - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\gamma + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin \gamma & -\sin(\gamma - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\gamma + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix}$$

Преобразование из вращающихся уравнений в неподвижные производится в обратном порядке.

В матричном виде преобразования токов, напряжений и потокосцеплений из соответствующих векторов имеют следующий вид

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = I \begin{bmatrix} \cos \gamma \\ \cos(\gamma - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\gamma + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} = U \begin{bmatrix} \cos \gamma \\ \cos(\gamma - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\gamma + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} \Psi_a \\ \Psi_b \\ \Psi_c \end{bmatrix} = \Psi \begin{bmatrix} \cos \gamma \\ \cos(\gamma - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\gamma + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix}.$$

Преобразование фазных токов, напряжений, потокосцеплений из неподвижных координат во вращающиеся координаты производят с помощью следующей системы уравнений:

$$\begin{cases} I_d = \frac{2}{3} \left[I_a \cos \gamma + I_b \cos(\gamma - \frac{2\pi}{3}) + I_c \cos(\gamma + \frac{2\pi}{3}) \right]; \\ I_q = -\frac{2}{3} \left[I_a \sin \gamma + I_b \sin(\gamma - \frac{2\pi}{3}) + I_c \sin(\gamma + \frac{2\pi}{3}) \right]. \end{cases}$$

$$\begin{cases} U_d = \frac{2}{3} \left[U_a \cos \gamma + U_b \cos(\gamma - \frac{2\pi}{3}) + U_c \cos(\gamma + \frac{2\pi}{3}) \right]; \\ U_q = -\frac{2}{3} \left[U_a \sin \gamma + U_b \sin(\gamma - \frac{2\pi}{3}) + U_c \sin(\gamma + \frac{2\pi}{3}) \right]. \end{cases}$$

$$\begin{cases} -\Psi_d = \frac{2}{3} \left[\Psi_a \cos \gamma + \Psi_b \cos(\gamma - \frac{2\pi}{3}) + \Psi_c \cos(\gamma + \frac{2\pi}{3}) \right]; \\ \Psi_{\dot{u}} = -\frac{2}{3} \left[\Psi_a \sin \gamma + \Psi_b \sin(\gamma - \frac{2\pi}{3}) + \Psi_c \sin(\gamma + \frac{2\pi}{3}) \right]. \end{cases}$$

Преобразование из вращающихся уравнений в неподвижные производится в обратном порядке.

Преобразование токов, напряжений, потокосцеплений из вращающихся координат в неподвижные оси координат имеет вид:

$$\begin{cases} I_a = I_d \cos \gamma - I_q \sin \gamma; \\ I_b = I_d \cos(\gamma - \frac{2\pi}{3}) - I_q \sin(\gamma - \frac{2\pi}{3}); \\ I_c = I_d \cos(\gamma + \frac{2\pi}{3}) - I_q \sin(\gamma + \frac{2\pi}{3}). \end{cases}$$

$$\begin{cases} U_a = U_d \cos \gamma - U_q \sin \gamma; \\ U_b = U_d \cos(\gamma - \frac{2\pi}{3}) - U_q \sin(\gamma - \frac{2\pi}{3}); \\ U_c = U_d \cos(\gamma + \frac{2\pi}{3}) - U_q \sin(\gamma + \frac{2\pi}{3}). \end{cases}$$

$$\begin{cases} \Psi_a = -\Psi_d \cos \gamma - \Psi_q \sin \gamma; \\ \Psi_b = -\Psi_d \cos(\gamma - \frac{2\pi}{3}) - \Psi_q \sin(\gamma - \frac{2\pi}{3}); \\ \Psi_c = -\Psi_d \cos(\gamma + \frac{2\pi}{3}) - \Psi_q \sin(\gamma + \frac{2\pi}{3}). \end{cases}$$

2.11. Основные подходы к математическому моделированию полупроводниковых вентиляей и преобразователей

В последние годы наметилась тенденция внедрения полупроводниковых преобразователей электроэнергии в различные области народного хозяйства, включая морской транспорт и судостроение.

Основным назначением преобразователей является преобразование параметров электроэнергии. Преобразователи электроэнергии, выполненные на силовых полупроводниковых ключах (вентиллях) называют полупроводниковыми преобразователями электроэнергии или полупроводниковыми преобразователями.

ПП можно подразделит на:

- выпрямители,
- инверторы,
- преобразователи частоты.

Выпрямители — полупроводниковые преобразователи, которые преобразовывают электроэнергию переменного тока в электроэнергию постоянного тока.

Инверторы — полупроводниковые преобразователи, которые преобразовывают электроэнергию постоянного тока в электроэнергию переменного тока.

Преобразователи частоты — полупроводниковые преобразователи, которые преобразовывают электроэнергию переменного тока одной частоты в электроэнергию переменного тока другой частоты.

При построении математической модели ПП необходимо выбрать силовую схему преобразователя, определить тип полупроводникового вентиля (ключа) и принцип действия системы управления.

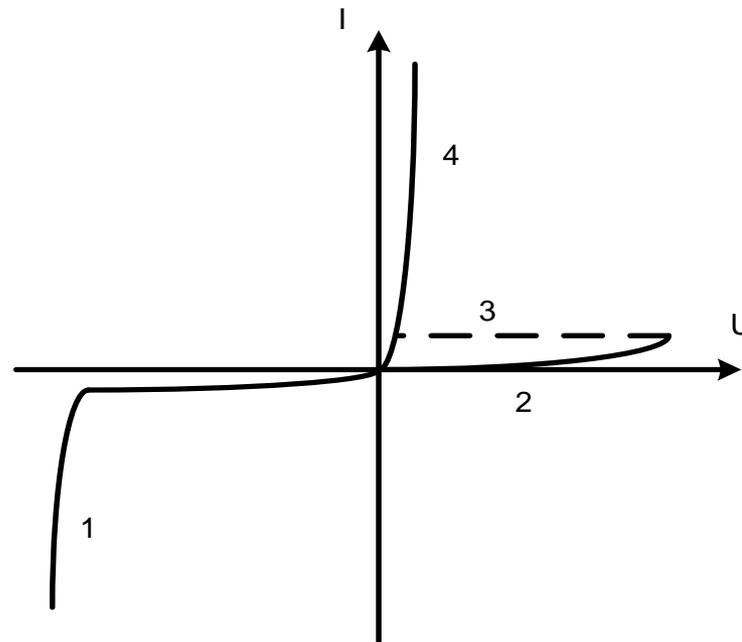
В качестве полупроводниковых ключей в составе силовых ПП применяют диоды, транзисторы и тиристоры.

Состояние полупроводникового прибора (вентиля) обусловлено его вольтамперной характеристикой (ВАХ).

Состояние полупроводникового вентиля может быть следующим:

- проводящее,
- непроводящее,
- включение или запираение (коммутация).

В проводящем состоянии полупроводниковый прибор открыт, в непроводящем — закрыт. В процессе коммутации полупроводниковый прибор переходит из одного состояния в другое.



Вольтамперная характеристика однооперационного тиристора:
1 — прибор закрыт; 2 — прямая ветвь в закрытом состоянии; 3 — переключение из закрытого в открытое состояние; 4 — открытое состояние

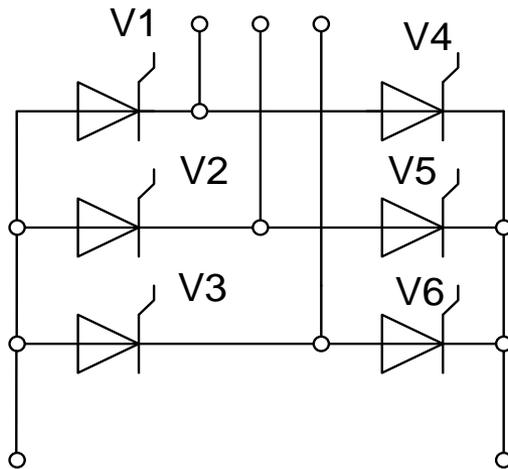
Реальный полупроводниковый прибор (вентиль) характеризуется следующими параметрами:

- во включенном состоянии — падением напряжения;
- в выключенном состоянии — током утечки;
- при коммутации — скоростью переключения.

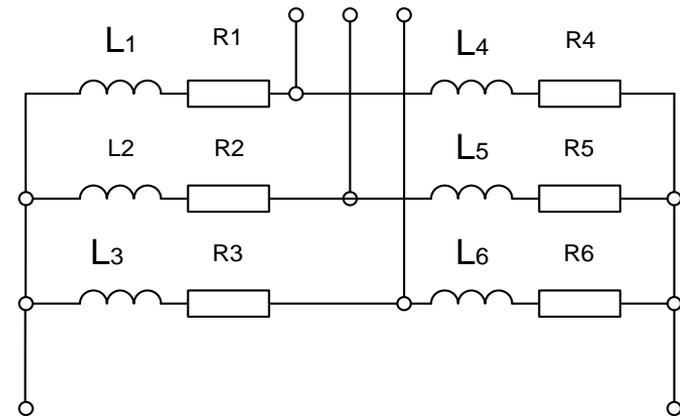
При моделировании полупроводниковых вентилях в ряде случаев допустимо пренебрежение рядом показателей реального вентиля и использованием вместо него идеального вентиля.

Идеальный вентиль имеет следующие параметры:

- сопротивление во включенном состоянии равно нулю;
- сопротивление в выключенном состоянии равно бесконечности;
- мгновенное переключение из одного состояния в другое;
- минимальная энергия для переключения.



Электрическая схема трехфазного мостового преобразователя



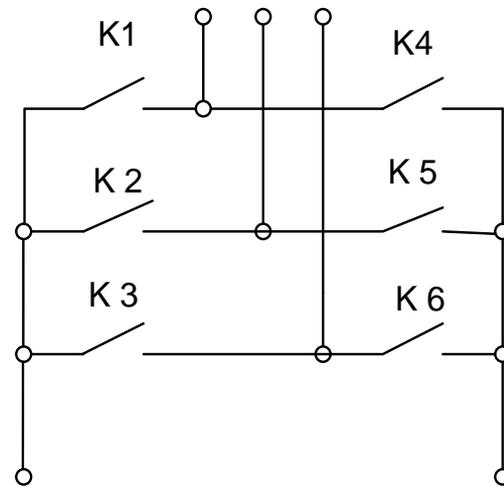
Структурная модель мостового преобразователя на базе активно-индуктивных двухполюсников

При параметрическом моделировании математическая модель ПП представляет собой систему уравнений с коэффициентами, скачкообразно изменяющимися в моменты коммутации. Полупроводниковые ключи в этом случае замещаются пассивными двухполюсниками.

При структурном моделировании применяют схемы ПП на базе идеальных полупроводниковых ключей, у которых в открытом состоянии отсутствует падение напряжения, а в закрытом — ток утечки.

В идеальном полупроводниковом ключе ток и напряжение взаимно исключают друг друга. В данном случае получается математическая модель ПП с переменной структурой. Такой подход получил название структурного метода моделирования ПП.

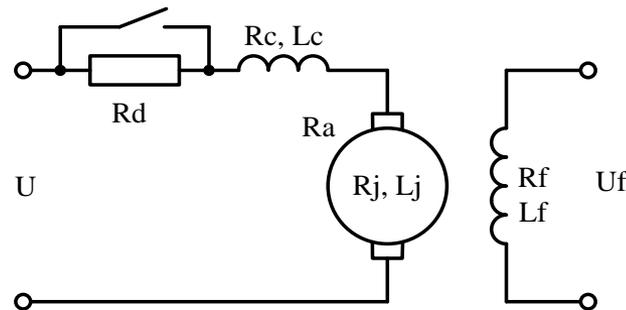
Падение напряжения на вентиле обычно принимают независимым от тока преобразователя. В приближенных моделях силовых ПП падение напряжения, как правило, не учитывают.



Структурная модель
мостового преобразователя на базе идеальных
полупроводниковых ключей

2.12. Математическая модель электродвигателя постоянного тока

Электрические машины постоянного тока находят применение на современных судах в составе сервопривода, общесудового электропривода, гребных электрических установках. Электродвигатели постоянного тока используются в составе электромашинных преобразователей, а также в системах автоматического управления в качестве исполнительных элементов.



Принципиальная схема электродвигателя постоянного тока с независимым возбуждением

Упрощенная математическая модель электрической машины постоянного тока с независимым возбуждением, работающей в режиме электродвигателя состоит из системы с тремя дифференциальными уравнениями: уравнением напряжения для якорной цепи, уравнением напряжения для цепи возбуждения и электромеханическим уравнением движения:

$$\begin{cases} U = R_s I_j + L_s \frac{dI_j}{dt} + C\omega\Phi; \\ U_f = I_f R_f + L_f \frac{di_f}{dt}; \\ J \frac{d\omega}{dt} = CI_j\Phi - M_c, \end{cases}$$

2.13. Математическая модель системы автоматического регулирования напряжения синхронного генератора

Система автоматического регулирования напряжения (САРН) применяется в составе синхронных генераторов для поддержания постоянства напряжения.

При изменении величины и характера тока нагрузки генератора в результате падения напряжения на трехфазной якорной обмотке и размагничивания якоря происходит снижение напряжения в судовой сети.

САРН работает следующим образом: при снижении напряжения увеличивается ток возбуждения в обмотке возбуждения, возрастает магнитный поток машины, увеличивается ЭДС и восстанавливается величина напряжения в сети до номинального значения.

При пренебрежении апериодическими составляющими и активным сопротивлением якорной обмотки СГ упрощенная модель САРН с амплитудно-фазовым компаундированием и корректором напряжения имеет вид:

$$u_f = k_u u_q + k_i x_d i_d - i_y$$

Корректор напряжения в состав САРН используют для повышения точности регулирования напряжения. Амплитудно-фазовая система компаундирования работает по принципу компенсации возмущающих воздействий, которые приводят к отклонению напряжения от номинальной величины. Корректор напряжения работает по отклонению регулируемой величины с отрицательной обратной связью по напряжению.

Математическая модель корректора напряжения, работающего по принципу отклонения напряжения от заданной величины, имеет вид:

$$\begin{cases} i_y + T_k p i_y = k_k \Delta u_y; \\ \Delta u_y = u_q - u_{qn}, \end{cases}$$

При математическом описании КН вводятся следующие ограничения:

$$\begin{cases} i_y < 0 \Rightarrow i_y = 0; \\ i_y > i_{y\max} \Rightarrow i_y = i_{y\max}. \end{cases}$$

При пренебрежении апериодическим током математическая модель КН примет вид:

$$\begin{cases} i_y = k_k \Delta u_y; \\ \Delta u_y = u_q - u_{qn}. \end{cases}$$

Амплитудно-фазовые системы компаундирования с корректором напряжения реализуют комбинированный принцип регулирования напряжения. В данных системах реализован принцип компенсации возмущающих воздействий, что повышает быстродействие системы автоматического регулирования напряжения, и принцип работы по отклонению, что повышает точность.

Амплитудно-фазовые системы компаундирования с корректором напряжения находят широкое применение в составе САРН генераторных агрегатов на судах отечественной и зарубежной постройки.

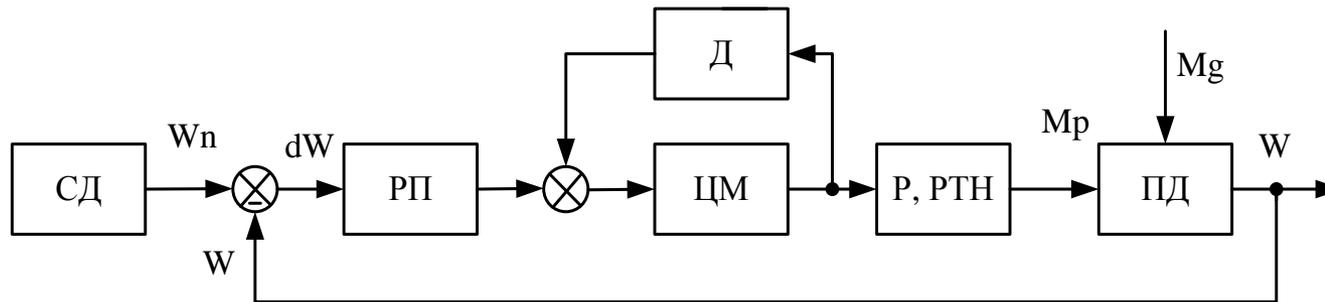
2.14. Математическая модель приводного дизеля с системой автоматического регулирования частоты

Дизельный двигатель приводит в движение синхронный генератор, который вырабатывает электроэнергию с постоянными параметрами напряжения и частоты. Частота тока в электрической сети зависит от частоты вращения приводного дизельного двигателя.

Для стабилизации частоты судовой сети в состав генераторного агрегата применяют системы автоматического регулирования частоты вращения (САРЧ) приводного двигателя.

При моделировании приводного дизеля (ПД) с достаточной точностью можно считать, что преобразование тепловой энергии в механическую происходит безынерционно и вращающий момент полностью определяется положением регулирующего органа (топливной рейки), изменяющего количество энергоносителя (топлива), поступающего в тепловой дизельный двигатель.

Математическая модель дизель-генераторного агрегата (ДГА) состоит из модели синхронного генератора, вспомогательного дизеля, САРН и САРЧ.



Структурная схема одноимпульсной САРЧ прямого действия:

ПД — приводной дизель; Р — рычаг; РТН — рейка топливного насоса;
ЦМ — центробежный механизм; Д — демпфер; РП — редуктор и пружина;
СД — серводвигатель

Статизм (неравномерность) скоростной характеристики у судовых ПД составляет около 3 %. Уставку по частоте вращения можно изменять с помощью серводвигателя, изменяющего затыг пружины.

При моделировании ДГ для электротехнических расчетов можно использовать упрощенное уравнение регулятора частоты, которое имеет вид:

$$T_p p m_p + m_p = -k_p (\omega - \omega_n)$$

Где m_p — положение рейки топливного насоса,
 T_p — постоянная времени регулятора.

При моделировании электромеханических процессов в ДГА можно принять, что положение топливной рейки полностью определяет величину вращающего момента ПД, то есть:

$$m_p = m_e$$

Основной нелинейностью САРЧ является ограничение хода рейки топливного насоса, которое ограничивает подачу топлива при увеличении момента свыше 110 %. При моделировании данное ограничение имеет вид:

$$\text{если } m_p > 1,1 m_{pn}, \text{ то } m_p = 1,1 m_{pn},$$

где m_{pn} — номинальный момент приводного дизеля.

Нагрузкой ПД является СГ, который создает тормозной электромагнитный момент.

Электромагнитный момент СГ может быть найден по выражению:

$$m_q = \Psi_d i_q + \Psi_q i_d.$$

В общем виде электромеханическое уравнение моментов ГА (уравнение движения) имеет вид:

$$m_e = m_g + T_j p (\omega - \omega_n)$$

3. КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СУДОВОГО ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ И СРЕДСТВ АВТОМАТИЗАЦИИ

3.1. Компьютерное моделирование статической нагрузки электрической сети постоянного тока

В судовых электрических сетях во всех режимах эксплуатации происходят переходные процессы, которые возникают в результате изменения параметров электрической цепи или величины нагрузки.

Под переходным процессом понимается процесс перехода системы из одного установившегося состояния в другое. С математической точки зрения переходные процессы могут быть описаны линейными и нелинейными дифференциальными уравнениями или системой уравнений.

Решить дифференциальные уравнения аналитическим путем довольно сложно и не всегда представляется возможным. Современная вычислительная техника и прежде всего персональные ЭВМ позволяют широко использовать при решении дифференциальных уравнений и систем численные методы.

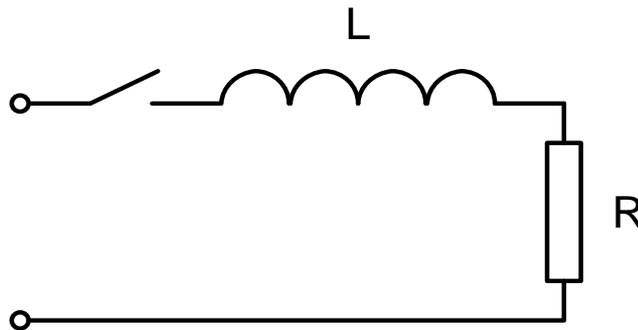
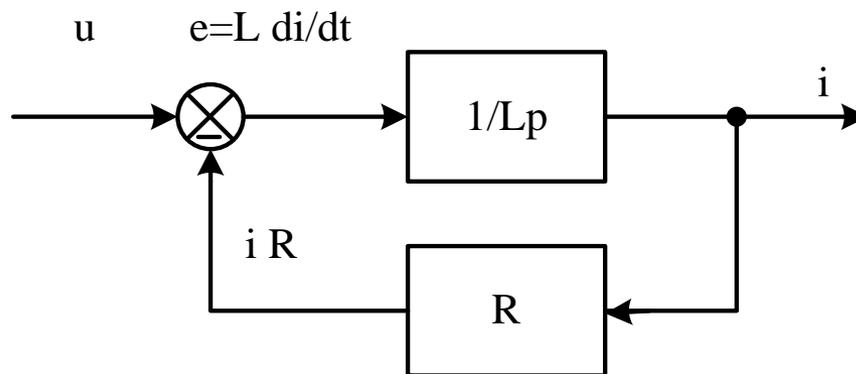


Схема электрической цепи постоянного тока с RL -нагрузкой

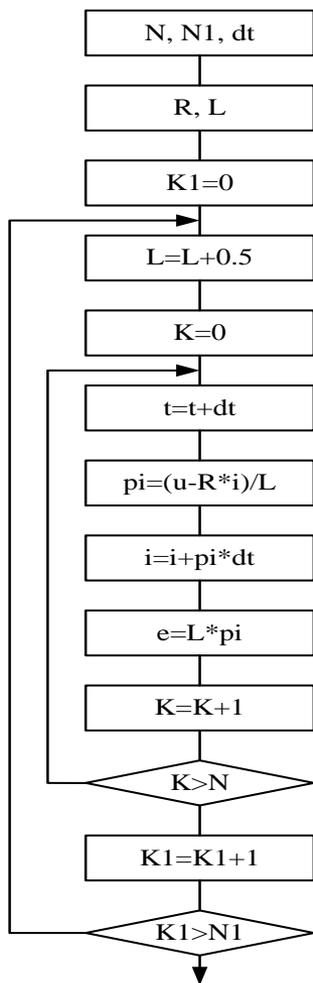
При моделировании наряду с математическими моделями в виде дифференциальных уравнений удобно пользоваться моделями в виде структурных схем. Структурные схемы (структурные модели) позволяют наглядно анализировать преобразование сигналов в динамической системе.



Структурная модель электрической цепи со статической RL -нагрузкой

Блок-схема — распространенный тип схем (графических моделей), описывающих алгоритмы или процессы, в которых отдельные шаги изображаются в виде блоков различной формы, соединенных между собой линиями, указывающими направление последовательности.

Решателем называют специально разработанную программу для решения определенных уравнений, которые входят в пакет прикладного обеспечения пакетов моделирования высокого уровня, к которым, в частности, относится MatLab.



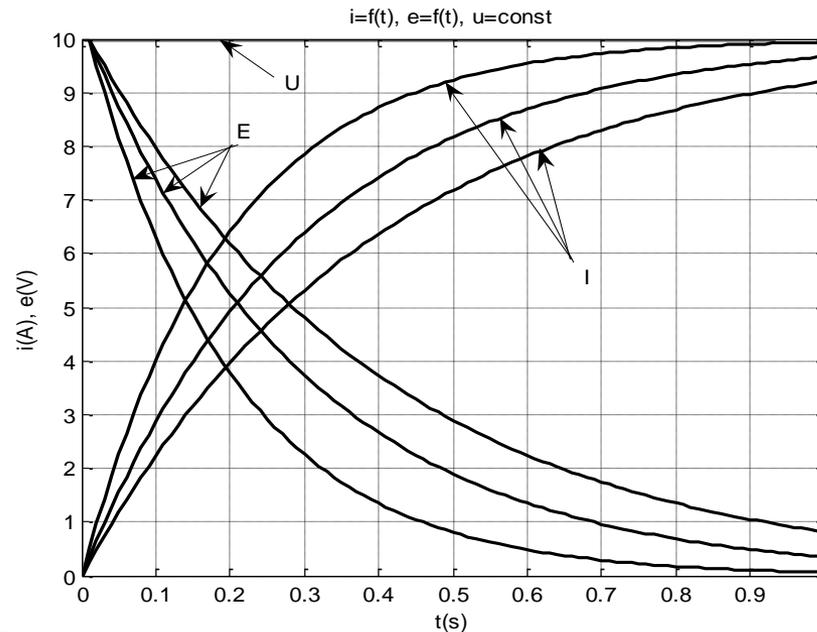
Блок-схема алгоритма расчета переходных процессов в электрической цепи постоянного тока со статической *RL*-нагрузкой

```

% Включение напряжение постоянного тока на RL-нагрузку
% Ввод начальных значений R, L, i0, u
R = 1; L = 0.1; i0 = 0; u = 10;
% Ввод времени расчета и шага интегрирования
T = 1; dt = 0.01;
% Create figure
% Create axes (построение осей координат)
% Задание начальных условий
i(1) = i0; e(1) = u;
N = T/dt; k = 3;
t = 0:dt:T;
% Задание внешнего цикла изменения L
for n = 1:k,
    L = L + 0.1;
    % Внутренний цикл расчета переходного процесса
    for J = 1:N,
        di = (-R/L*i(J) + 1/L*u)*dt;
        i(J+1) = i(J) + di; % ток
        e(J+1) = L*di/dt; % ЭДС
    end
end
% ВЫВОД ДАННЫХ
  
```

Фрагмент программы расчета переходных процессов в электрической цепи постоянного тока со статической *RL*-нагрузкой

Графики переходных процессов в электрической цепи со статической RL -нагрузкой при включении постоянного напряжения, полученные расчетным путем с использованием компьютерной модели:

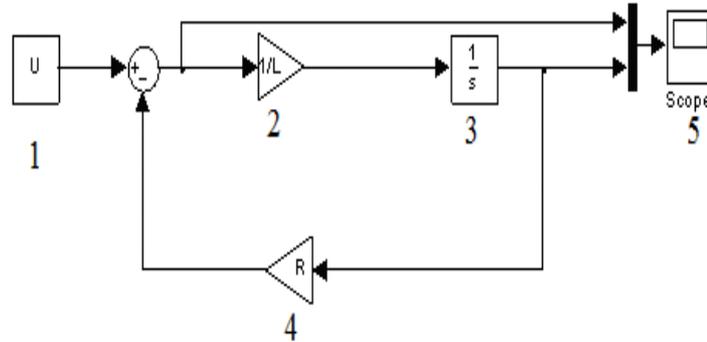


Переходные процессы в электрической цепи постоянного тока со статической RL -нагрузкой при включении напряжения

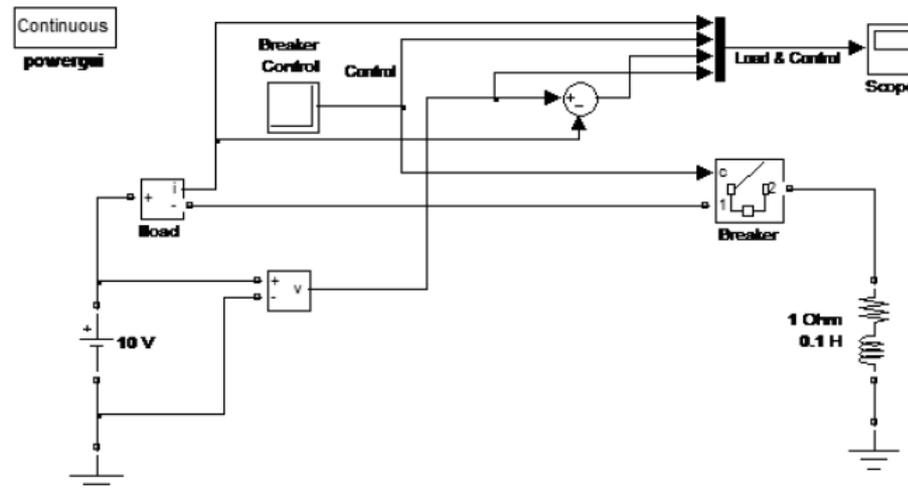
Язык MATLAB является высокоуровневым языком программирования, включающим основанные на матрицах структуры данных, широкий спектр функций, интегрированную среду разработки, объектно-ориентированные возможности и интерфейсы к программам, написанным на других языках программирования.

Программы, написанные на MATLAB, бывают в виде функций или скриптов. Программы, реализованные в виде функций, имеют входные и выходные аргументы, а также собственное рабочее пространство для хранения промежуточных результатов вычислений и переменных.

Приложение Simulink пакета моделирования MatLab позволяет создать компьютерную модель на основании структурной схемы — структурную модель.



Компьютерная модель электрической цепи в среде Simulink



Компьютерная модель электрической цепи с RL -нагрузкой, построенная с применением стандартных блоков библиотеки SimPowerSystem

Переходный процесс в электрической цепи постоянного тока, рассчитанные на компьютерной модели, собранной с применением стандартных блоков библиотеки SimPowerSystem, аналогичен переходному процессу, рассчитанному по программе, представленной на языке MatLab.



Переходные процессы в электрической цепи постоянного тока, при включении напряжения, полученные на компьютерной модели в среде SimPowerSystem:

1 — противозЭДС; 2 — ток; 3 — напряжение

Статическая активно-индуктивная нагрузка применяется на судах в качестве нагревательных элементов, а также в составе ГЭУ в качестве тормозных сопротивлений.

Тормозные сопротивления в составе ГЭУ подключаются к звену постоянного тока полупроводникового преобразователя и используются для торможения ГЭД, работающего в режиме гидрогенератора. Тормозные сопротивления ГЭУ преобразуют электрическую энергию в тепловую.

3.2. Компьютерное моделирование статической нагрузки электрической сети переменного тока

Электрическая схема трехфазной цепи переменного тока с последовательно включенной статической активно-индуктивной RL -нагрузкой

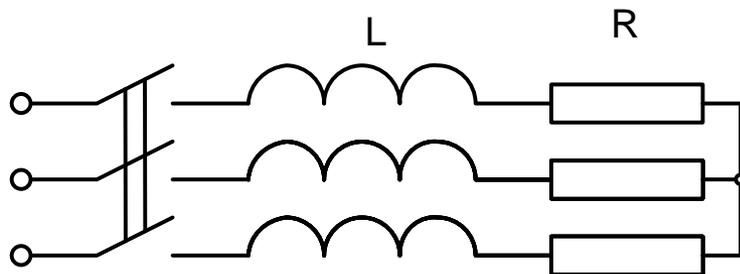


Схема электрической цепи трехфазного переменного тока со статической RL -нагрузкой

При расчете переходного процесса в электрической цепи со статической RL -нагрузкой при подключении к синусоидальному напряжению переменного тока напряжение в неподвижных осях (неподвижной системе координат) записывается в следующем виде:

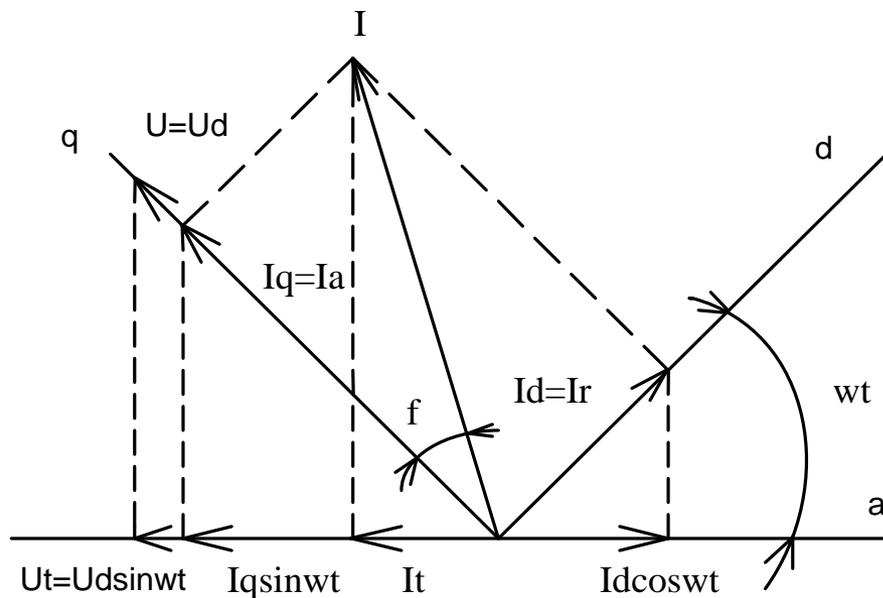
$$u = U_m \sin(\omega \cdot t)$$

Уравнения, описывающие однофазную или трехфазную активно-индуктивную нагрузку, во вращающейся системе координат имеют вид:

$$\begin{cases} u_d = r i_d + x p i_d - (1+s) x i_q; \\ u_q = r i_q + x p i_q - (1+s) x i_d. \end{cases}$$

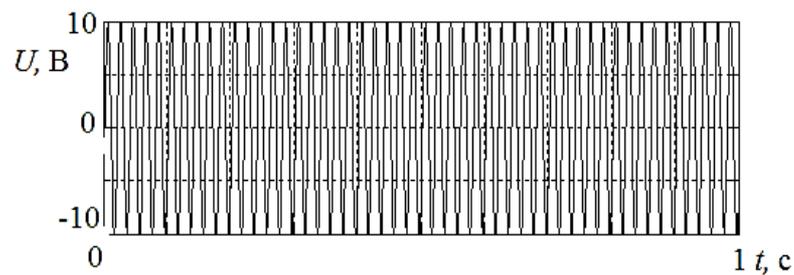
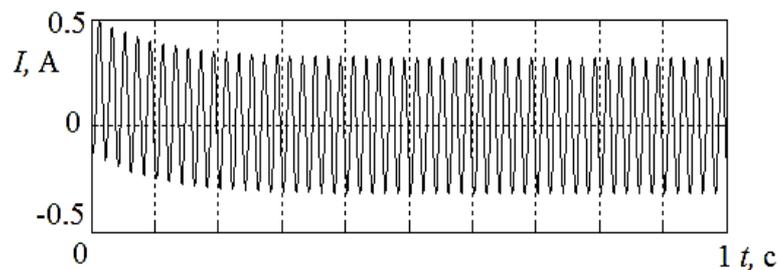
При допущении, что частота сети постоянна ($s = 0$) система уравнений примет вид:

$$\begin{cases} u_d = r \cdot i_d + x \cdot p i_d - x \cdot i_q; \\ u_q = r \cdot i_q + x \cdot p i_d + x \cdot i_d. \end{cases}$$

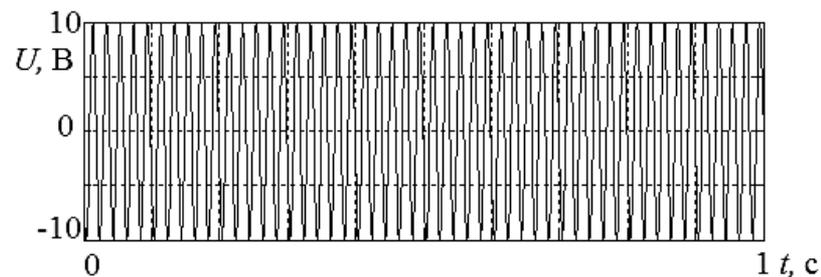
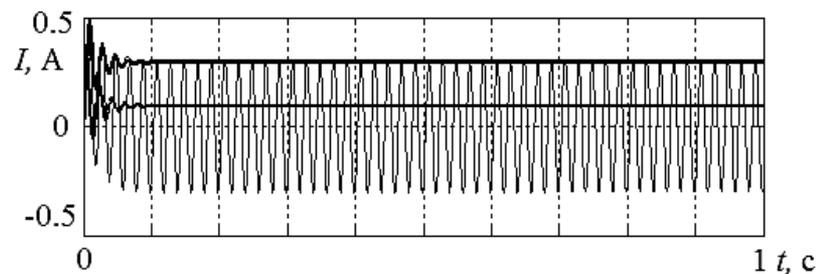


Векторная диаграмма токов и напряжений в электрической цепи со статической RL-нагрузкой во вращающейся системе координат

Переходные процессы в электрической цепи со статической RL -нагрузкой при подключении к синусоидальному напряжению переменного тока, записанные во вращающихся осях dq ,

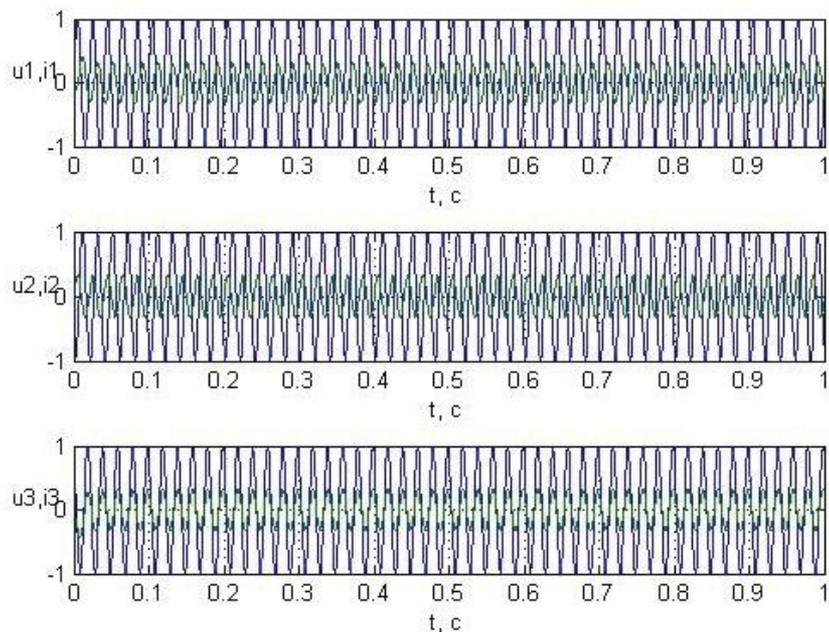


Переходные процессы в электрической цепи переменного тока со статической RL -нагрузкой, рассчитанные в неподвижной системе координат

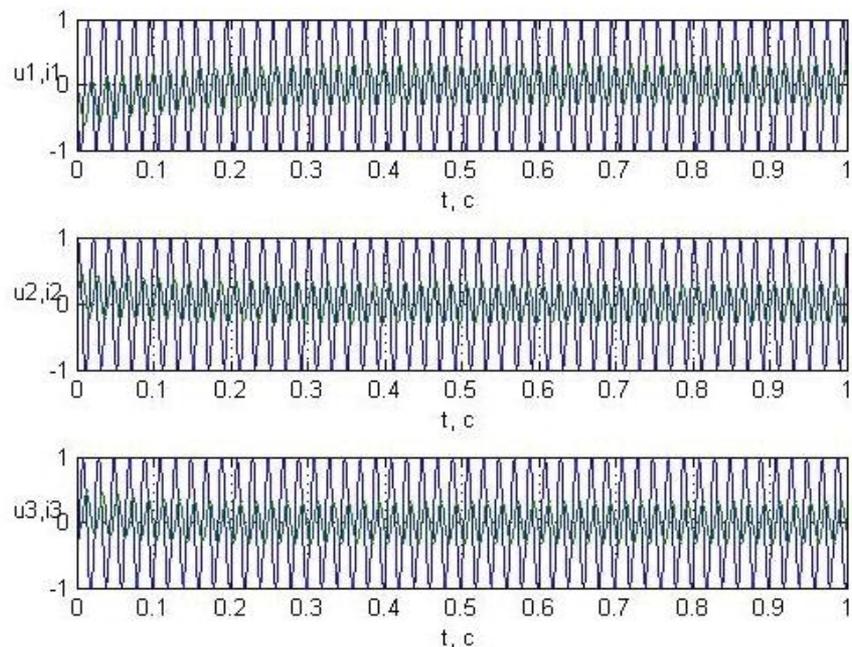


Переходные процессы в электрической цепи переменного тока со статической RL -нагрузкой, рассчитанные во вращающейся системе координат

Из переходных процессов, приведенных ниже, видно, что независимо от формы записи математической модели статической нагрузки во вращающихся или неподвижных координатных осях результаты расчетов (переходный процесс) совпадают.



Переходные процессы в трехфазной электрической цепи со статической RL -нагрузкой, рассчитанные в неподвижной системе координат

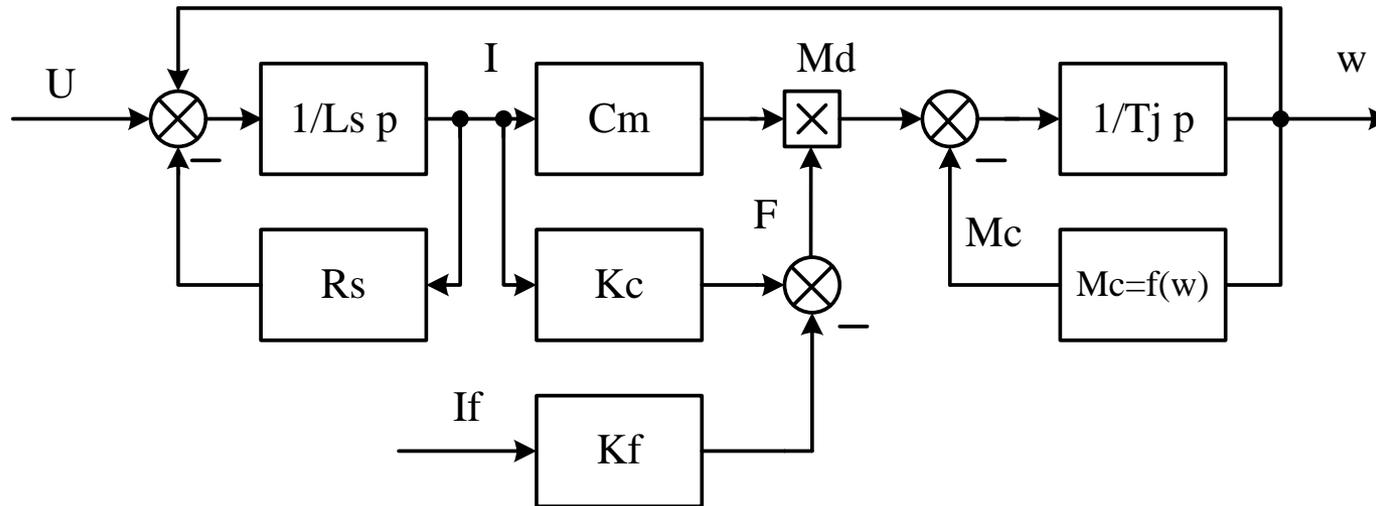


Переходные процессы в трехфазной электрической цепи со статической RL -нагрузкой, рассчитанные во вращающейся системе координат

3.3. Компьютерное моделирование электродвигателя постоянного тока

Электрические машины постоянного тока находят широкое применение на судах в составе регулируемого электропривода, включая ГЭУ, и исполнительных механизмов автоматических систем.

Структурная модель ЭД постоянного тока с независимым возбуждением:

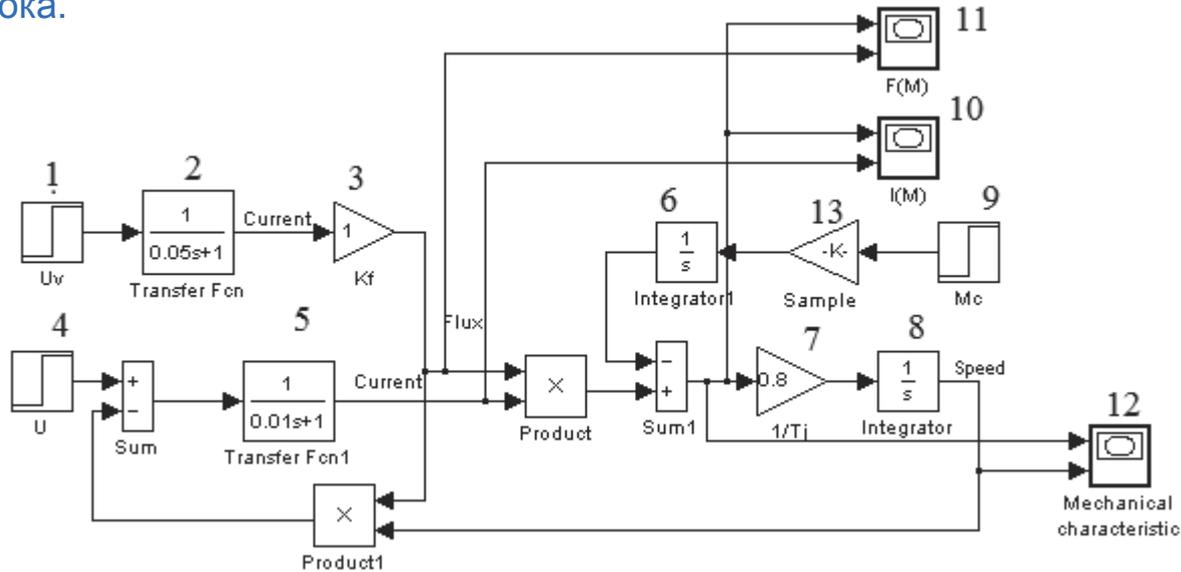


Структурная модель ЭД постоянного тока с независимым возбуждением:

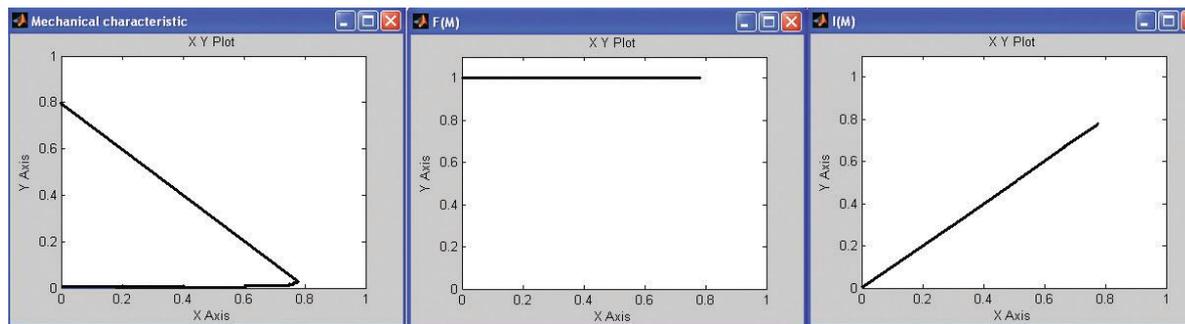
Структурная модель полностью повторяет математическую модель электродвигателя постоянного тока и может использоваться для моделирования на АВМ или ЦВМ.

Компьютерная модель ЭД собрана на основе стандартных блоков пакета Simulink, к которым подключены виртуальные электроизмерительные приборы представлена ниже.

Компьютерная модель может применяться для расчета статических характеристик ЭД постоянного тока.



Компьютерная модель электродвигателя постоянного тока

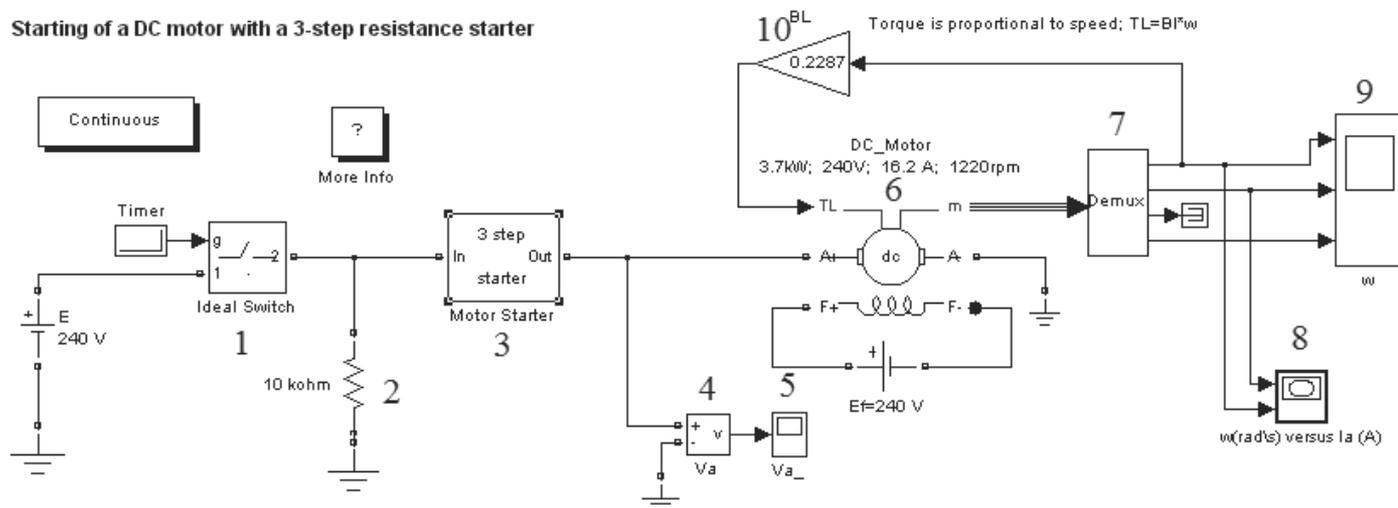


Статические характеристики ЭД постоянного тока:
зависимости частоты вращения,
магнитного потока и тока якоря от момента

Компьютерная модель ЭД постоянного тока с независимым возбуждением, собранная в среде Simulink с применением стандартных блоков приложения SimPowerSystem, представлена ниже.

Модель может использоваться для расчета переходных характеристик ЭД постоянного тока с независимым возбуждением при прямом и многоступенчатом пусках с помощью пусковых сопротивлений.

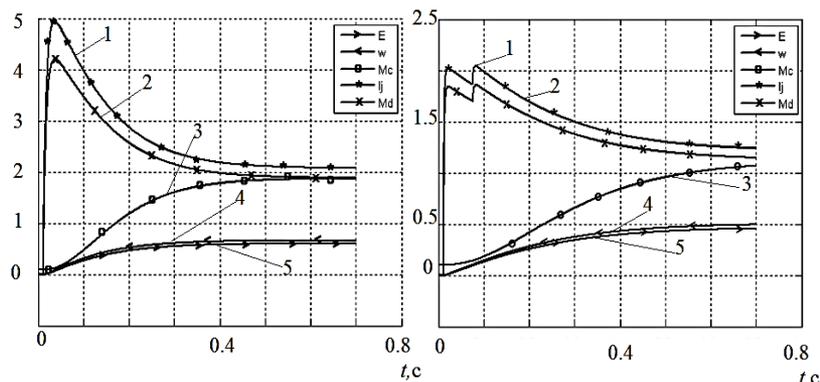
Starting of a DC motor with a 3-step resistance starter



Компьютерная модель ЭД постоянного тока, собранная с применением стандартных блоков приложения SimPowerSystem

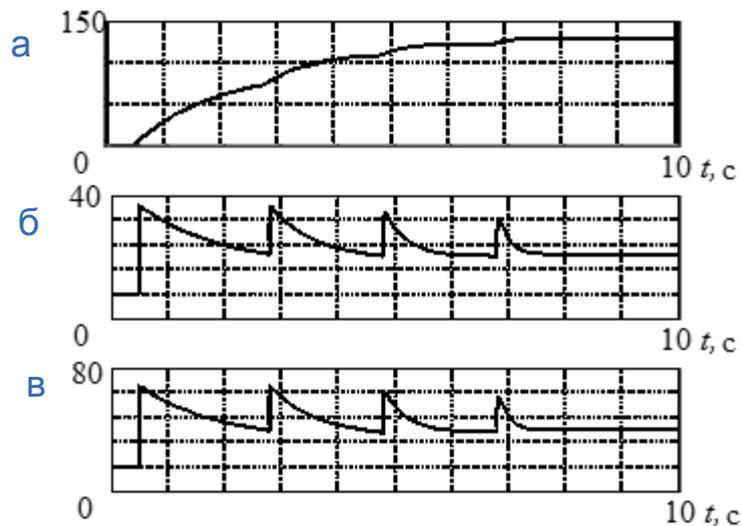
Компьютерная модель состоит из источников постоянного тока, которые предназначены для питания якорной обмотки и обмотки возбуждения ЭД 6, резистора 2, блока пусковых сопротивлений 3 (состоят из трех последовательно включенных сопротивлений, которые шунтируются по мере разгона ЭД 6), виртуальных электроизмерительных приборов 4, 5, 7, 8, 9, блока задания тормозного момента 10.

Рассчитанная на компьютерной модели переходная характеристика прямого и двухступенчатого пуска ЭД постоянного тока представлена на рисунке



Переходная характеристика прямого и двухступенчатого

Переходные характеристики трехступенчатого пуска ЭД постоянного тока, рассчитанные на компьютерной модели:



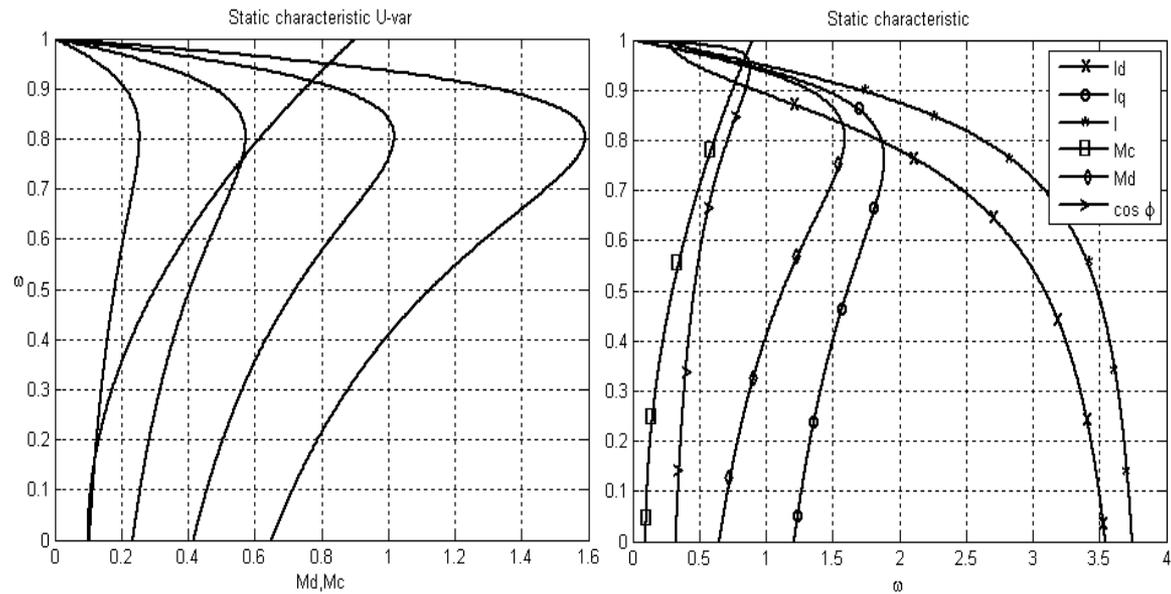
Переходная характеристика трехступенчатого пуска ЭД постоянного тока:

а — частота вращения; б — ток; в — момент

3.4. Компьютерное моделирование асинхронного электродвигателя

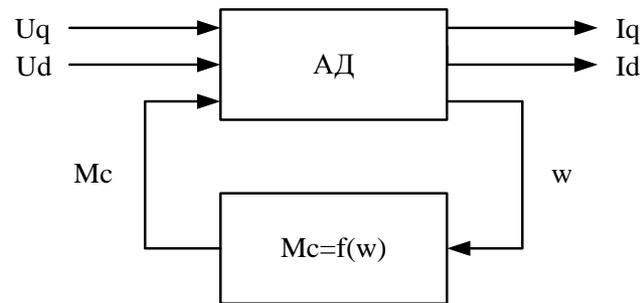
Асинхронный электродвигатель переменного тока (АД) является одним из основных приемников электроэнергии на судах. В настоящее время АД находят широкое применение в составе общесудового электропривода, а также в составе ГЭУ в качестве гребного электродвигателя.

Статические характеристики АД, полученные расчетным путем на компьютерной модели, представлены ниже. Семейство статических характеристик АД построено при различных значениях напряжения в сети.

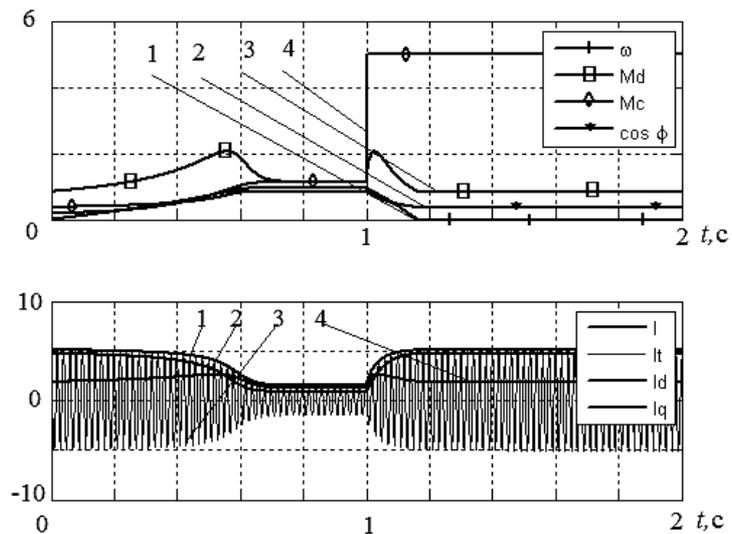


Статические характеристики АД: I , I_d , I_q — ток и проекции тока АД в осях dq ;
 M_c , M_d — момент АД и нагрузки; $\cos \phi$ — коэффициент мощности;
 ω — частота вращения

В состав структурной модели электропривода входит непосредственно АД и блок, имитирующий нагрузку.



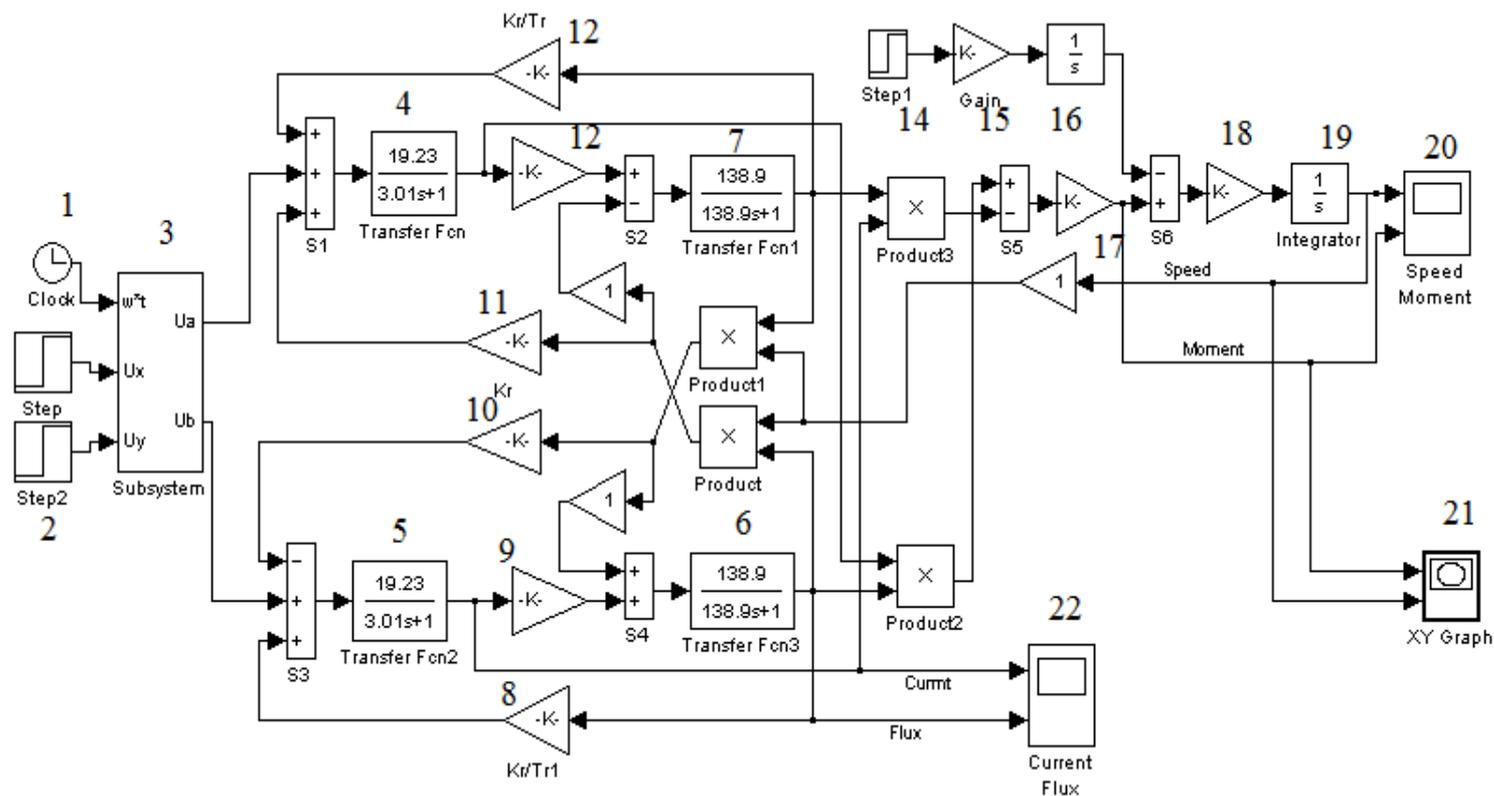
Структурная модель асинхронного электропривода



Переходные характеристики пуска и заклинивания АД:

- 1 — частота вращения; 2 — вращающий момент; 3 — тормозной момент;
- 4 — коэффициент мощности; 1 — суммарный ток; 2 — мгновенный ток;
- 3 — активный ток; 4 — реактивный ток

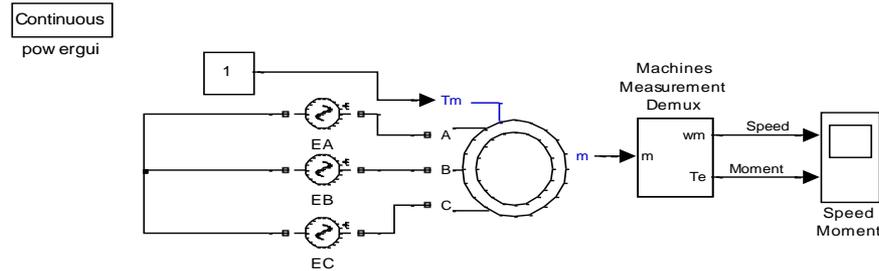
Компьютерная модель АД, составленная на основе структурной модели, реализованная в среде Simulink с использованием стандартных блоков:



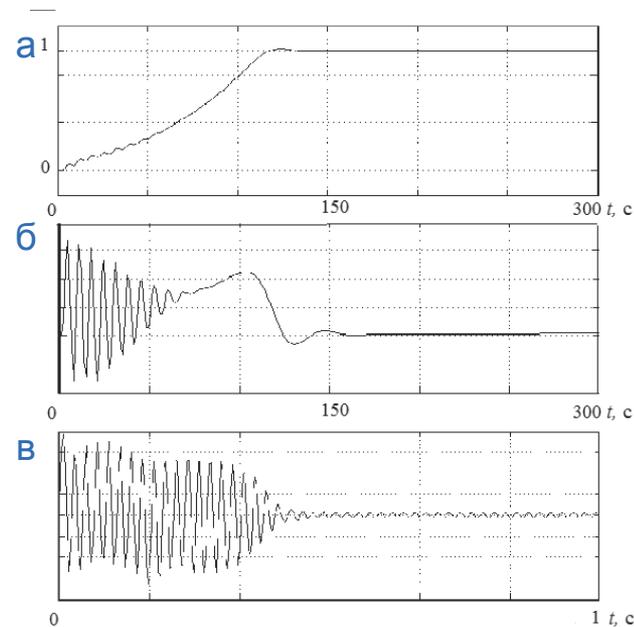
Компьютерная модель асинхронного электропривода, собранная в среде Simulink с использованием стандартных блоков

Компьютерная модель АД с короткозамкнутым ротором, созданная с использованием библиотеки SimPowerSystem представлена ниже.

Компьютерная модель состоит из визуальной модели источника электроэнергии, АД, блока измерений, виртуального осциллографа.

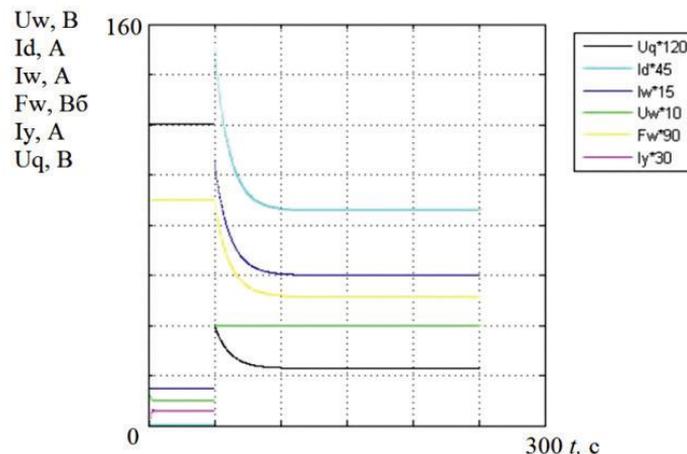
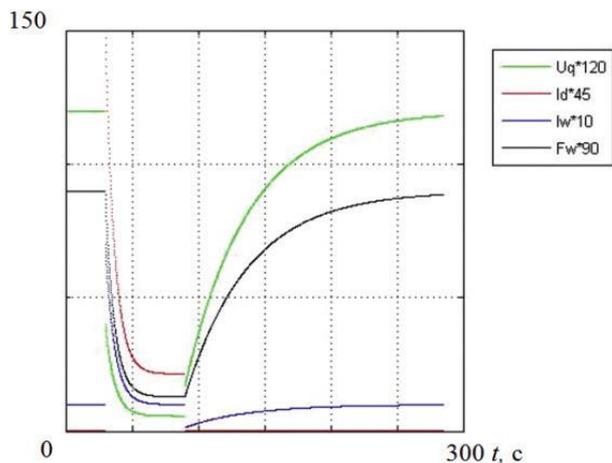


Компьютерная модель АД, созданная с использованием библиотеки SimPowerSystem



Переходные процессы пуска асинхронного электропривода:
а — частота вращения, б — электромагнитный момент, в — ток

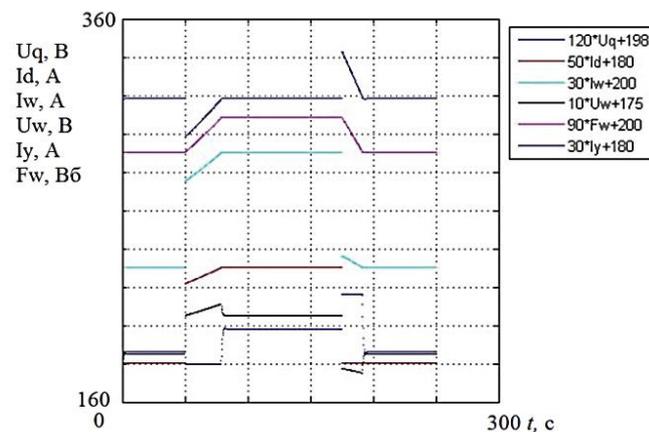
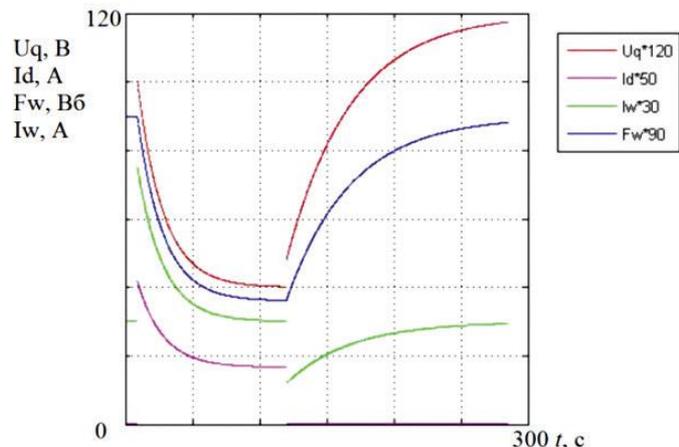
Переходные характеристики СГ при возникновении КЗ:



Переходные характеристики СГ без САРН при возникновении КЗ

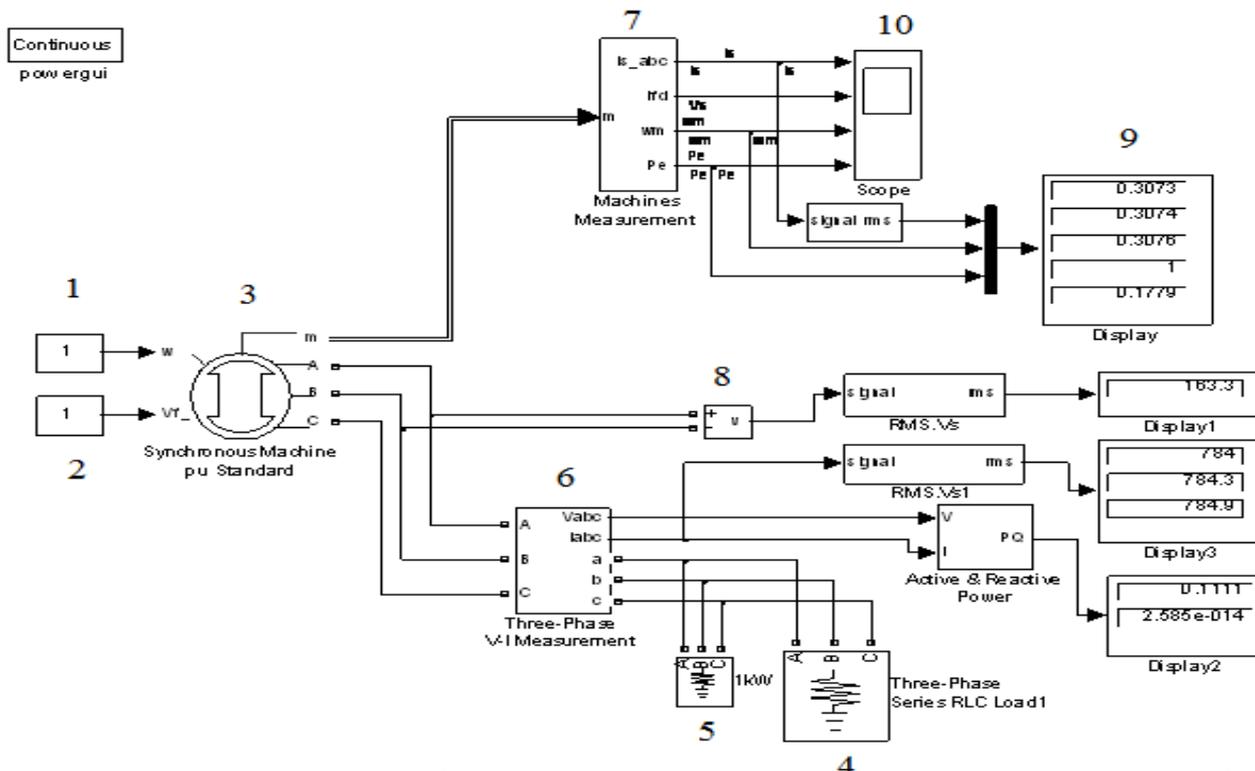
Переходные характеристики СГ с САРН при возникновении короткого замыкания

Переходные характеристики СГ с САРН и без САРН при включении и отключении статической нагрузки:



Переходная характеристика СГ без САРН при включении и отключении статической нагрузки

Переходная характеристика СГ с САРН при включении и отключении статической нагрузки

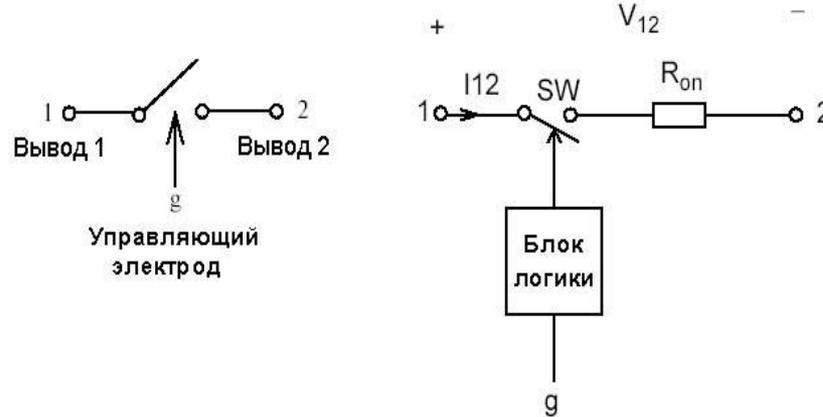


Виртуальный лабораторный стенд с компьютерной моделью СГ

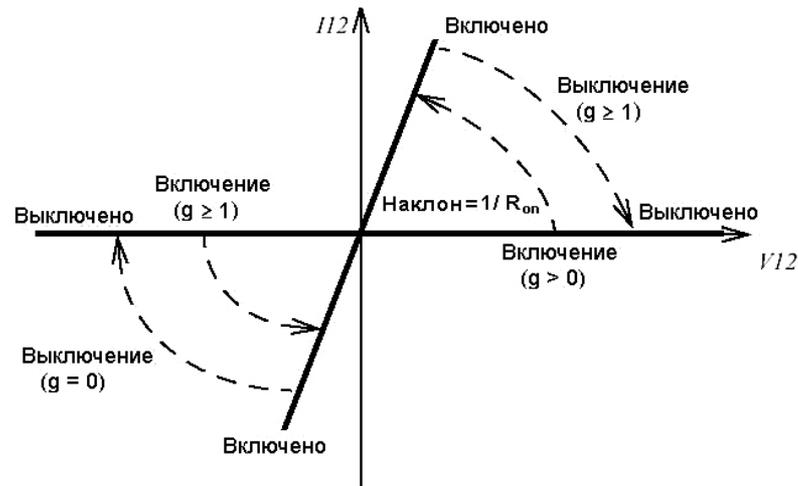
- 1 — блок задания частоты вращения (о.е.);
- 2 — блок задания тока возбуждения (о.е.);
- 3 — синхронный генератор ($P = 1\ 000\ \text{kВт}$, $U = 400\ \text{В}$, $f = 50\ \text{Гц}$);
- 4 — блок статической нагрузки (RLC);
- 5 — блок нагрузки стабилизирующий расчетный процесс (выбирается $\approx 0,1\ \%$ мощности генератора);
- 6 — измеритель трехфазного напряжения и тока;
- 7 — блок вывода информации синхронного генератора (l_{abc} , w , I_f , P_e и др.);
- 8 — блок измерения напряжения;
- 9, 10 — дисплеи для отображения результатов измерений.

3.6. Компьютерное моделирование полупроводниковых вентилях и приборов

Для моделирования полупроводниковых приборов (выпрямитель, инвертор, преобразователь частоты) необходимо использовать математические и компьютерные модели полупроводниковых вентилях (диод, тиристор, транзистор).

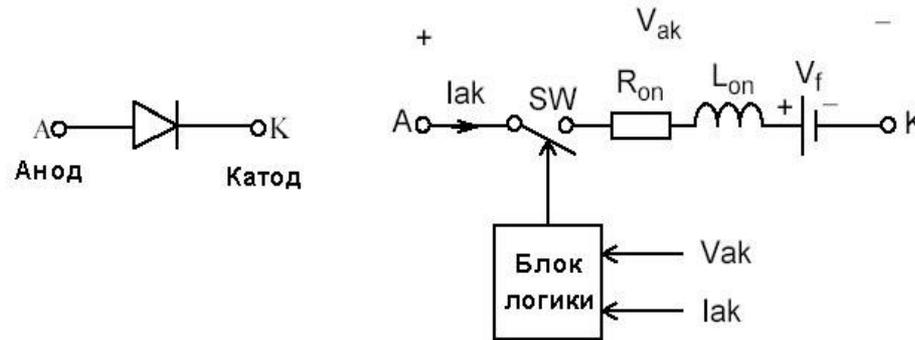


Условное обозначение и компьютерная модель полупроводникового ключа

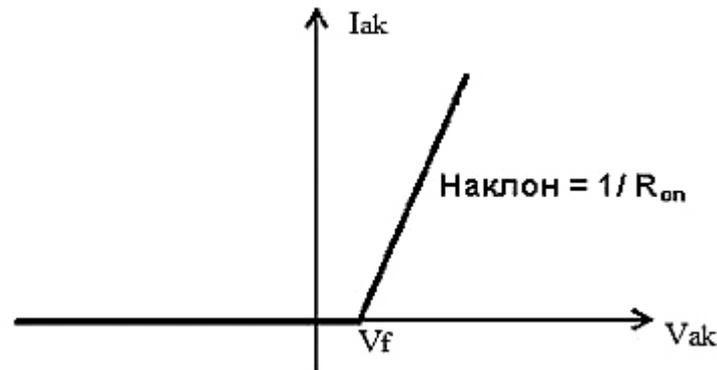


Вольт-амперная характеристика идеального полупроводникового ключа

Модель полупроводникового диода представляет собой последовательное соединение идеального ключа (SW), источника напряжения V_f , необходимого для смещения ВАХ в прямом направлении, резистора R_{on} (сопротивление диода в прямом направлении) и индуктивности L_{on} . Работой диода управляет блок логики.

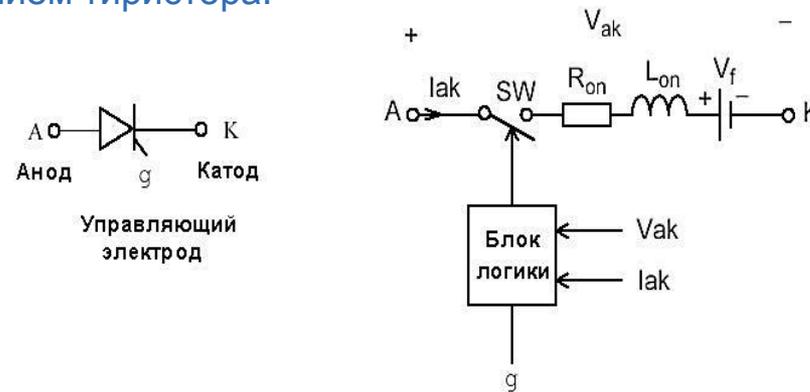


Условное обозначение и компьютерная модель полупроводникового диода

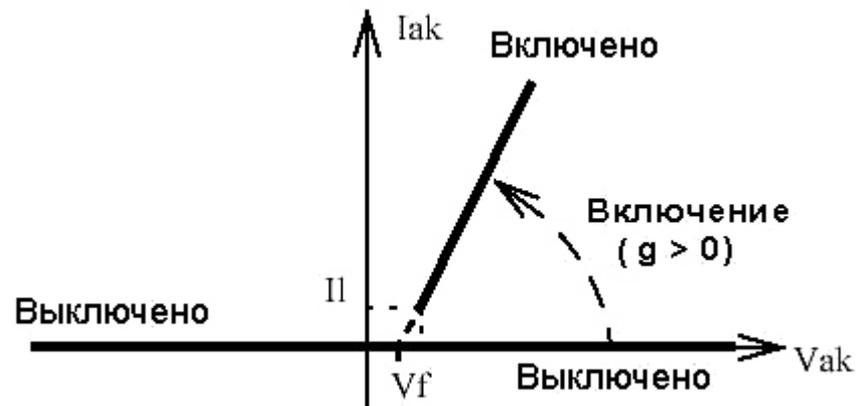


Вольтамперная характеристика диода

Упрощенная модель тиристора состоит из последовательно включенных: резистора R_{on} , индуктивности L_{on} , источника постоянного напряжения V_f , ключа SW . Блока логики управляет включением и отключением тиристора.



Условное обозначение и компьютерная модель однооперационного тиристора



Вольт-амперная характеристика однооперационного тиристора

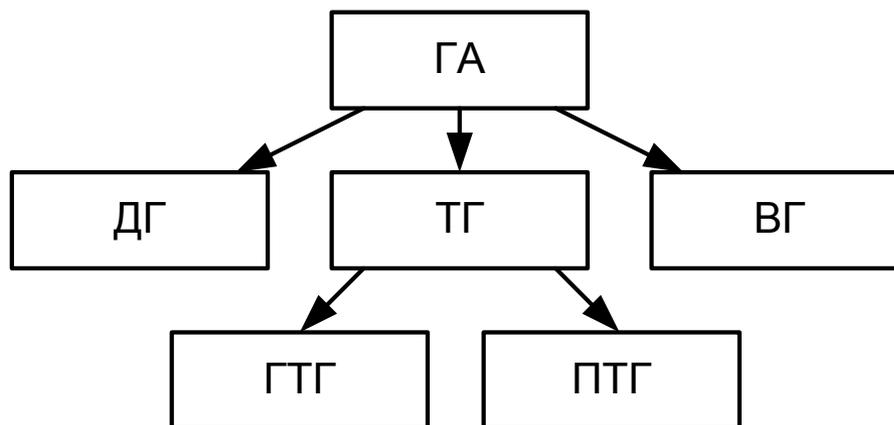
4. КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СУДОВЫХ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

4.1. Состав, назначение и классификация судовых генераторных агрегатов

Основным элементом судовых электроэнергетических систем является источник электроэнергии. Наиболее широкое применение в качестве источников электроэнергии на судах нашли генераторные агрегаты.

Генераторный агрегат (ГА) состоит из приводного двигателя, электрического генератора, систем автоматического управления и регулирования. По типу приводного двигателя ГА подразделяют на дизель-генераторы (ДГ), турбогенераторы (ТГ) и валогенераторы (ВГ).

В ДГ приводным двигателем являются вспомогательные дизели, в ТГ — паровые или газовые турбины. ТГ с газовой и паровой турбиной называются соответственно *газотурбогенератором* (ГТГ) и *паротурбогенератором* (ПТГ).



Классификация ГА по типу приводного двигателя

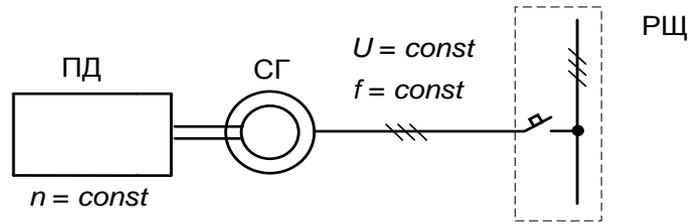


Схема традиционного ДГ:

ПД — приводной двигатель; СГ — синхронный генератор; РЩ — распределительный щит

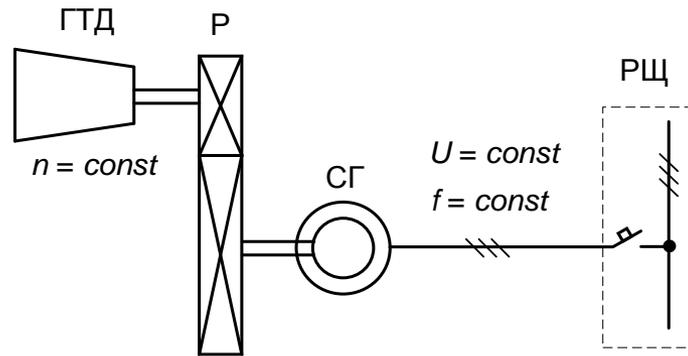


Схема газотурбогенератора:

ГТД – газотурбодвигатель; СГ – синхронный генератор; Р – редуктор; РЩ – распределительный щит

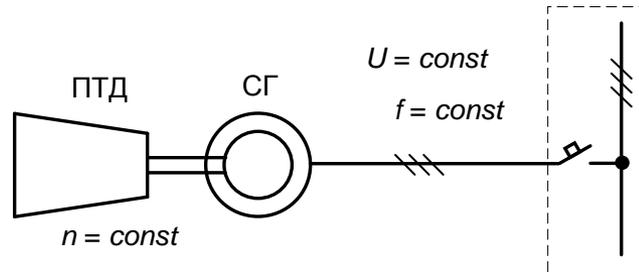


Схема паротурбогенератора:

ПТД – паротурбодвигатель; СГ – синхронный генератор;
Р – редуктор; РЩ – распределительный щит

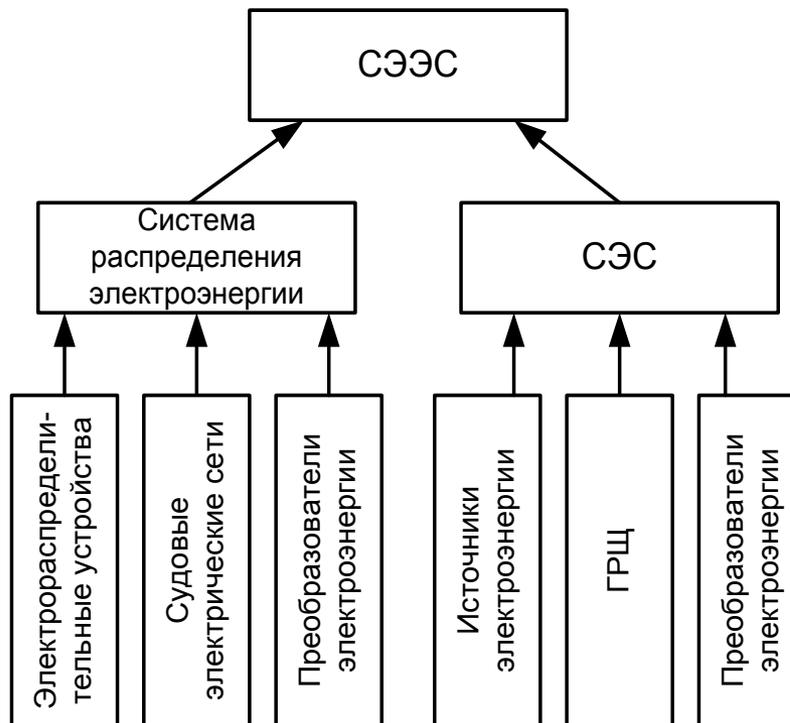
4.2. Судовые электростанции и электроэнергетические системы

Судовые электростанции (СЭС) представляет собой электротехнический комплекс, состоящий из источников электроэнергии, главного распределительного щита (ГРЩ) и преобразователей электроэнергии.

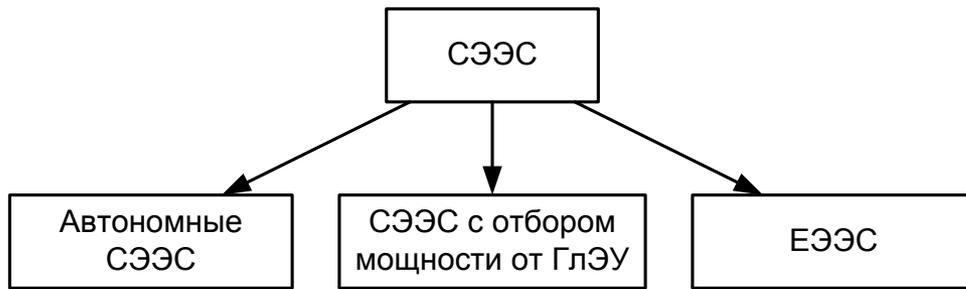
В состав СЭС входят:

- источники электроэнергии;
- первичные распределительные щиты;
- преобразователи электроэнергии.

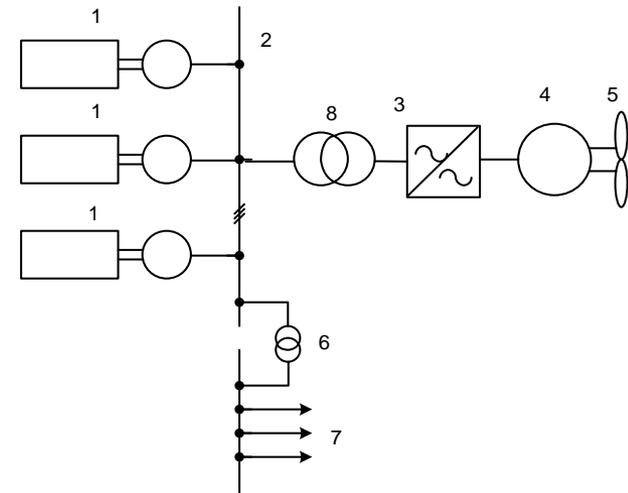
В состав судовых электроэнергетических систем (СЭЭС) входят одна или несколько судовых электростанций и система распределения электроэнергии. Назначением СЭЭС является производство, преобразование и распределение электроэнергии по судну.



Структура и состав СЭЭС



Классификация СЭЭС по типу связи с ГлЭУ



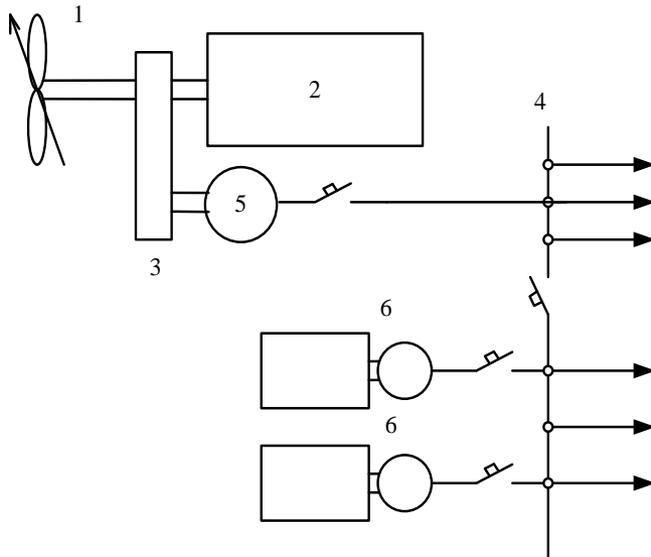
Структурная схема ЕЭЭС с ГЭУ переменного тока:

1 – ГДГ; 2 – ГРЦ; 3 – ПП; 4 – ГЭД;

5 – ВФШ; 6 – трансформатор собственных нужд;

7 – судовые приемники электроэнергии;

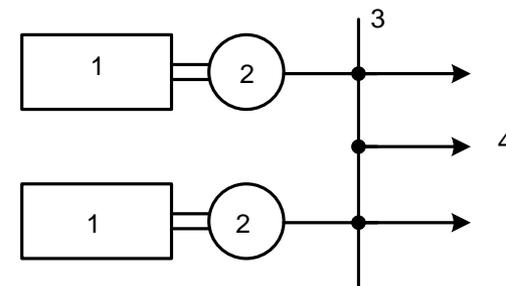
8 – трансформатор ГЭУ



Структурная схема СЭС с ВГ на судах с ВРШ:

1 – ВРШ; 2 – ГД; 3 – редуктор; 4 – ГРЦ;

5 – ВГ; 6 – ДГ



Структурная схема автономной СЭС:

1 – приводной дизель; 2 – синхронный генератор; 3 – ГРЦ; 4 – общесудовые

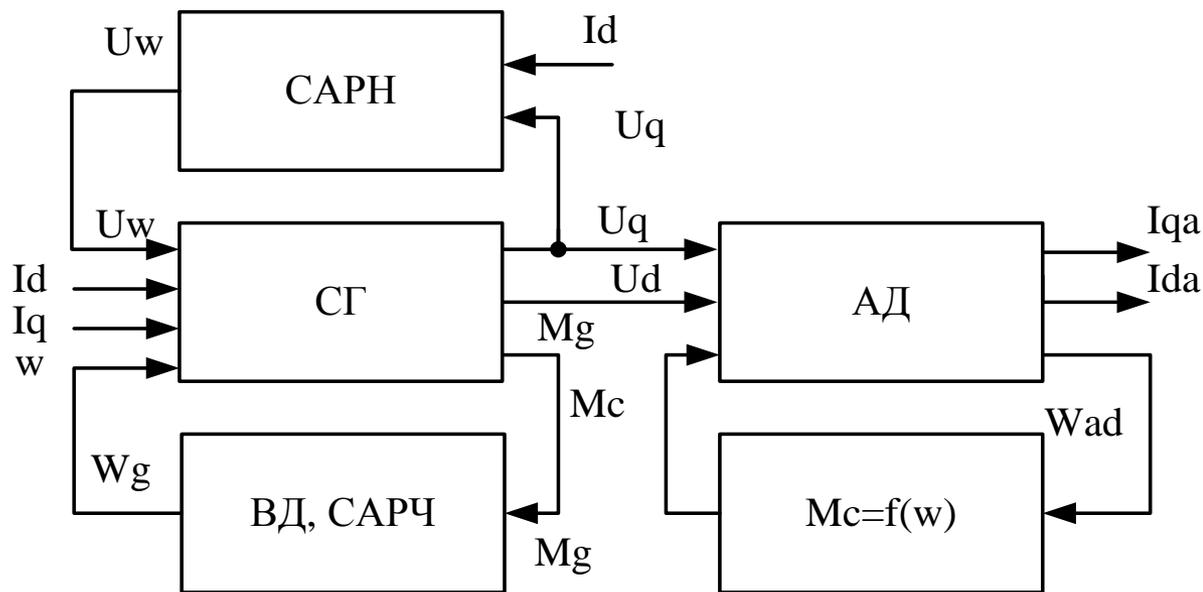
приемники электроэнергии

4.3. Компьютерное моделирование судовой электростанции с одним генераторным агрегатом

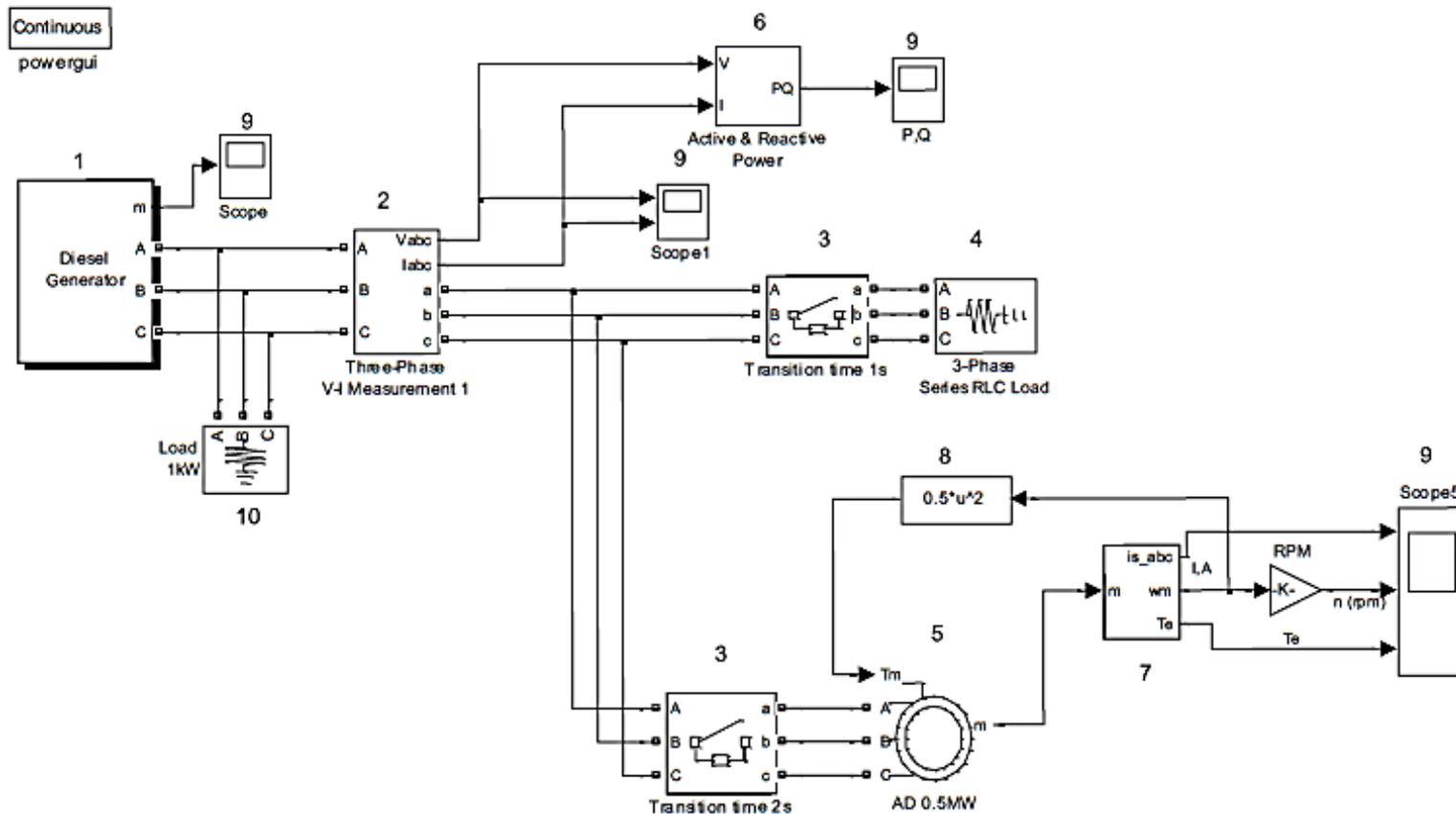
На морских судах в состав СЭС входит не менее двух ГА, каждый из которых может обеспечить потребности судна в электроэнергии для обеспечения ходового режима.

Одним из основных режимов работы СЭС является режим автономной (одиночной) работы одного ГА.

ГА состоят из генератора, как правило, синхронного с явно выраженными полюсами, и приводного вспомогательного двигателя. Для стабилизации параметров напряжения и частоты в состав ГА входят системы автоматического регулирования напряжения и частоты.



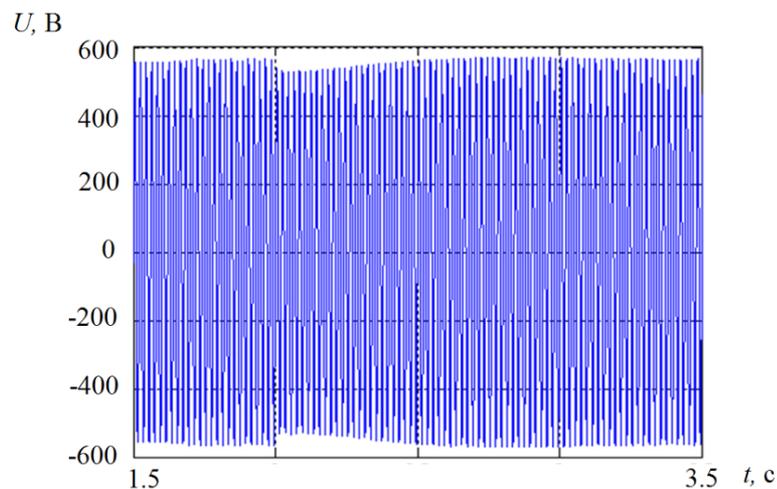
Структурная схема модели генераторного агрегата



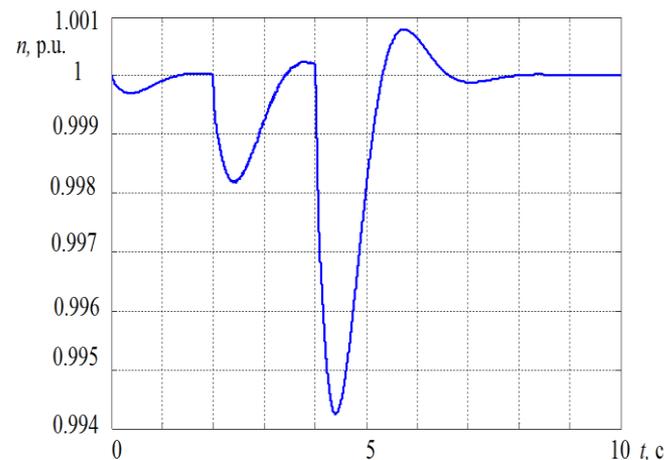
Компьютерный стенд СЭС с одним ДГА

- 1 — компьютерная модель дизель-генератора; 2 — блок измерения фазных (линейных) напряжений и фазных токов на выходе генератора; 3 — автоматические выключатели; 4 — статическая активно-индуктивная нагрузка; 5 — асинхронный электродвигатель; 6 — блок измерения активной и реактивной мощности; 7 — блок измерения параметров АД; 8 — блок имитации нагрузки электропривода; 9 — виртуальный осциллограф; 10 — статическая нагрузка

Переходные электромагнитные и электромеханические процессы при прямом пуске асинхронного электропривода в виде изменения мгновенного значения напряжения и частоты вращения ДГА.



Изменение напряжения ДГА при прямом пуске АД



Изменение частоты вращения ДГА при прямом пуске АД

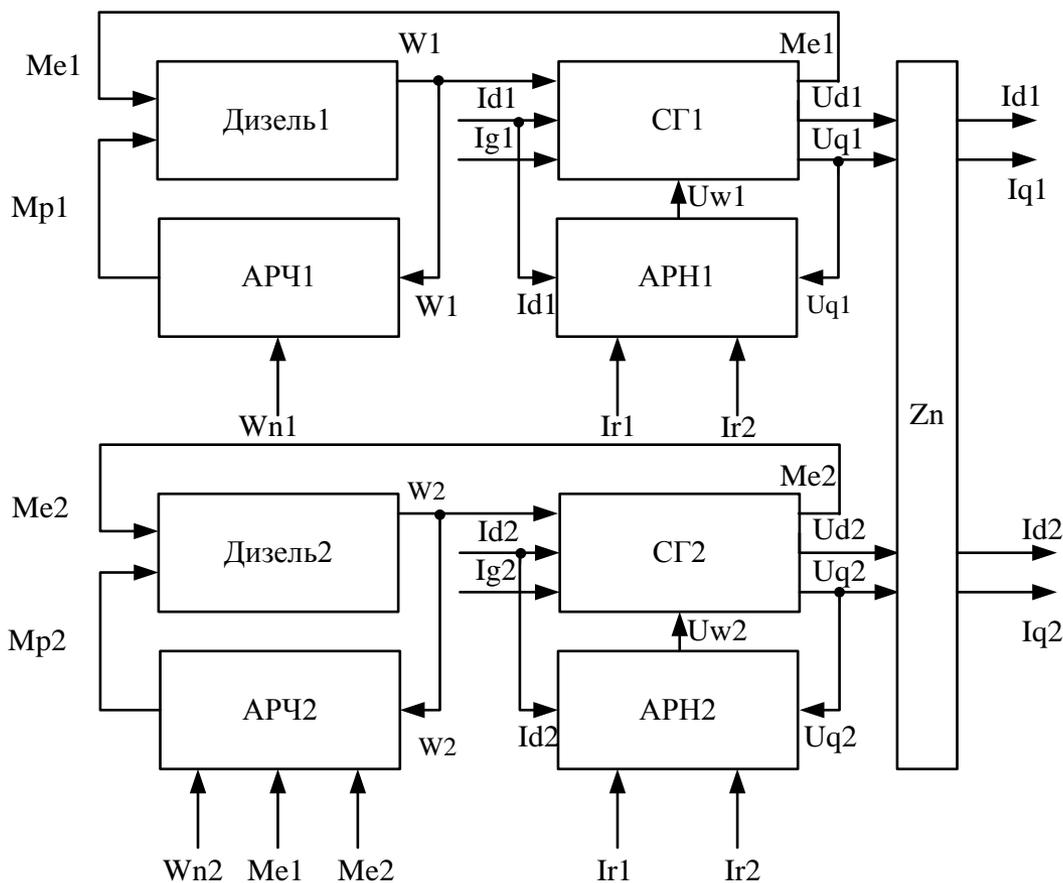
При пуске асинхронного двигателя в первый момент времени происходит провал напряжения, который зависит только от параметров СГ и не зависит от типа САРН. Провал напряжения связан с большими пусковыми токами АД, которые носят реактивный характер и размагничивают генератор. При провале напряжения САРН увеличивает ток в обмотке возбуждения, и напряжение в судовой сети восстанавливается до номинального значения.

Время протекания электромеханических процессов при пуске АД отличается от электромагнитных. Большой пусковой ток АД носит реактивный характер, в связи с чем у СГ не увеличивается тормозной электромагнитный момент, и он не нагружает приводной двигатель.

4.4. Компьютерное моделирование судовой электростанции с двумя генераторными агрегатами

В состав судовой электростанции входят несколько источников электроэнергии — генераторных агрегатов. В процессе эксплуатации СЭС используется как автономный режим работы ГА, так и режим параллельной работы двух или более генераторов.

Ниже представлена структурная схема модели СЭС с двумя ГА:



Структурная схема модели СЭС с двумя ГА

Активная нагрузка при параллельной работе ГА должна распределяться пропорционально мощностям приводного дизеля. Для этой цели ГА снабжаются устройствами автоматического распределения мощностей, которые воздействуют на изменение подачи топлива ПД.

Математическая модель АРЧ дополнена моделью устройства распределения активной мощности между параллельно работающими ГА.

Устройство распределения активной мощности состоит из датчика активного тока или мощности, усилителя и серводвигателя, который как исполнительный механизм изменяет уставку (задание) по частоте вращения ПД. Математическая модель ГА с устройством распределения активной мощности имеет вид:

$$\begin{cases} T_p p m_p + m_p = -k_p (\omega - \omega_n) + k_n m_n; \\ T_n p^2 m_n + p m_n = k_e \Delta P; \\ \Delta P = P_1 - P_2, \end{cases}$$

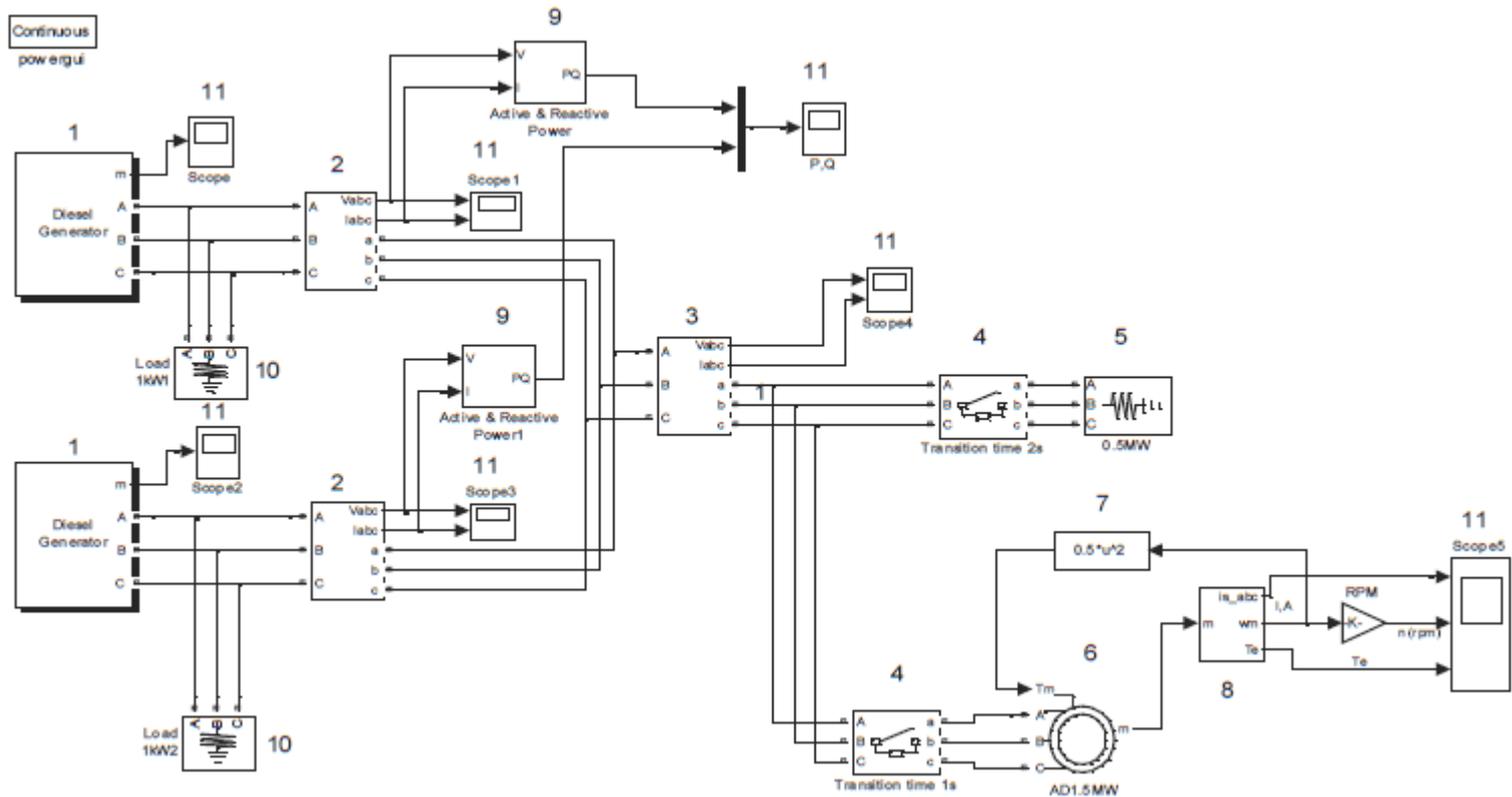
где P_1, P_2 – активные мощности ГА, m_n – уставка частоты вращения, T_n – постоянная времени устройства распределения активных мощностей.

Математическая модель АРН дополнена моделью корректора напряжения (КН). В КН введен сигнал от устройства распределения реактивной мощности параллельно работающих СГ.

Математическая модель САРН с КН имеет вид:

$$\begin{cases} i_y + T_k p i_y = k_k (\Delta u + k_e \Delta i_p) \\ \Delta u_y = u_q - u_{qn} \\ \Delta i_p = i_{r1} - i_{p2} \end{cases}$$

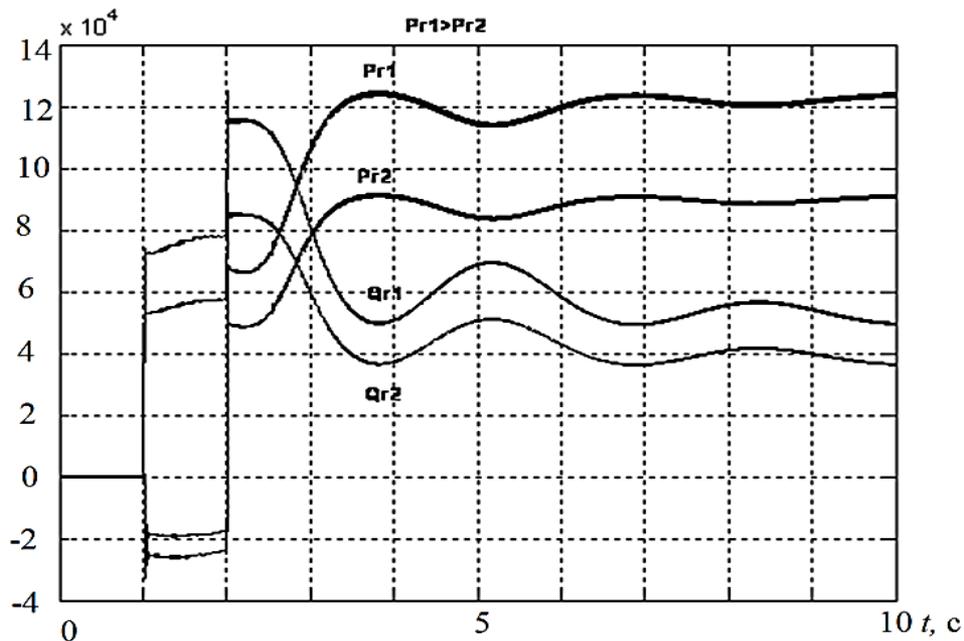
где i_{p1}, i_{p2} – реактивные токи СГ, k_e – коэффициент усиления в цепи выравнивания реактивных токов



Виртуальный лабораторный стенд для исследования компьютерной модели СЭС с двумя ДГА

- :1 – дизель-генератор, 2 – блок измерения напряжений и токов на выходе генератора,
- 3 – блок измерения линейных напряжений и токов сети, 4 – автоматический выключатель,
- 5 – статическая активно-индуктивная нагрузка, 6 – асинхронный двигатель,
- 7 – нагрузка электропривода, 8 – блок измерения АД,
- 9 – блок измерения активной и реактивной мощности, 10 – статическая нагрузка, для стабилизации процесса вычислений, 11 – осциллограф

Переходные процессы в СЭС при параллельной работе ГА и включении статической нагрузки, полученные на компьютерной модели СЭС:



Переходные процессы в СЭС при параллельной работе двух ДГА и включении статической нагрузки

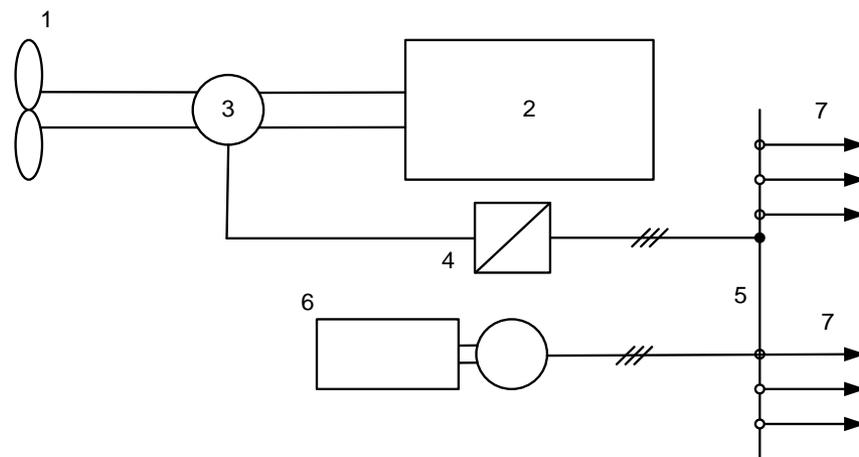
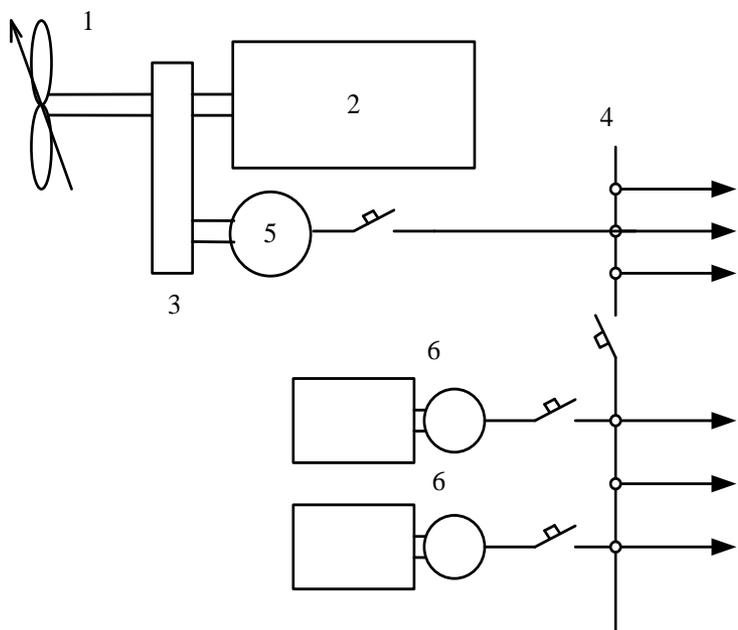
В первый момент вычислительного эксперимента ГА работали на холостом ходу при номинальном напряжении и частоте. Через промежуток времени к ГРЩ подключается статическая нагрузка, что сопровождается снижением напряжения и частоты в сети и увеличением активной и реактивной нагрузки на ГА.

Устройства автоматического распределения активных и реактивных нагрузок производят перераспределение мощностей между ГА. При правильной настройке систем распределения нагрузок, после окончания переходных процессов активные и реактивные мощности распределены между ГА поровну.

4.5. Компьютерное моделирование валогенераторной установки, работающей в генераторном режиме

Валогенераторные установки применяют для производства электроэнергии в ходовых режимах эксплуатации судна. На судах с винтом регулируемого шага (ВРШ) валогенератор работает с постоянной частотой вращения. Данным ВГУ присущ ряд недостатков, в том числе сложность реализации параллельной работы ВГ с ДГ и сложность реализации двигательного режима работы ВГ.

Для стабилизации параметров электроэнергии в судовой сети при переменной частоте вращения ВГ используется полупроводниковый преобразователь.

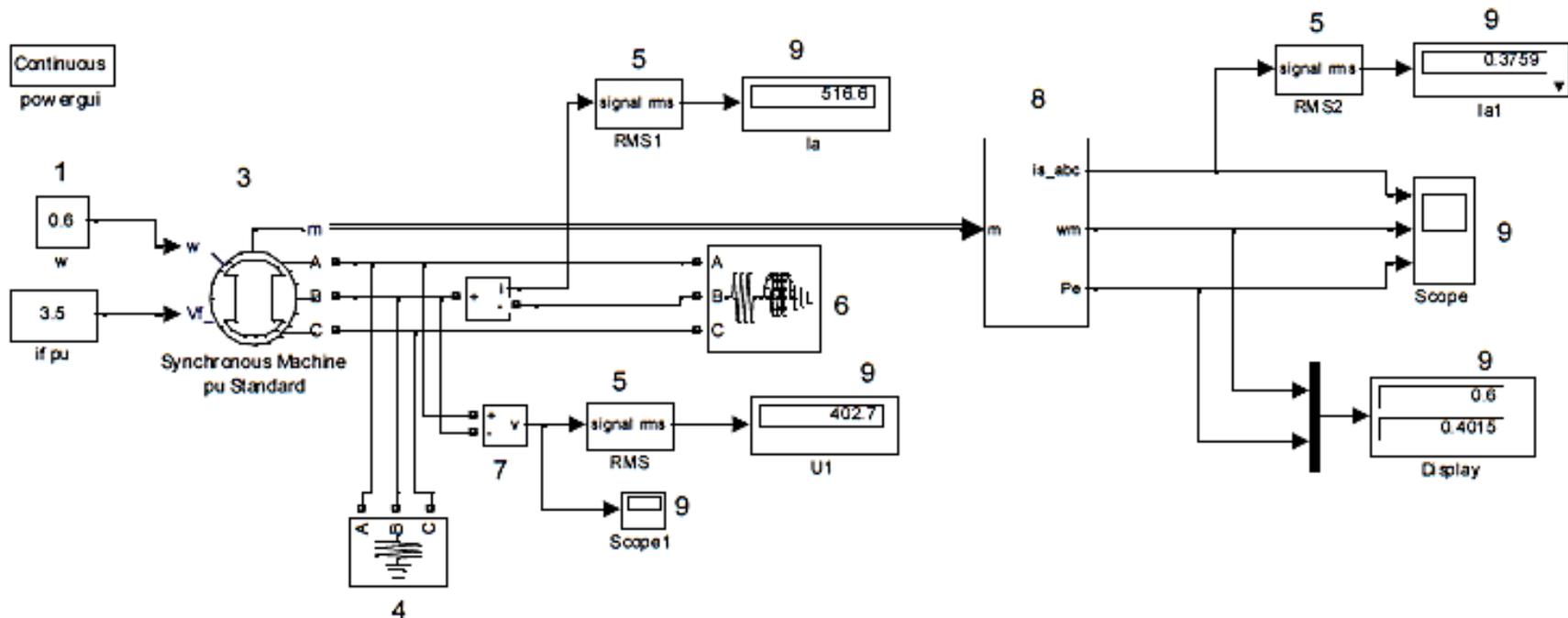


Структурная схема СЭС с ВГ на судах с ВРШ:
1 – ВРШ; 2 – ГД; 3 – редуктор; 4 – ГРЩ; 5 – ВГ;
6 – ДГ

Структурная схема СЭС с ВГ на судах с ВФШ:
1 – ВФШ; 2 – ГД; 3 – ВГ; 4 – ПП; 5 – ГРЩ; 6 – ДГ

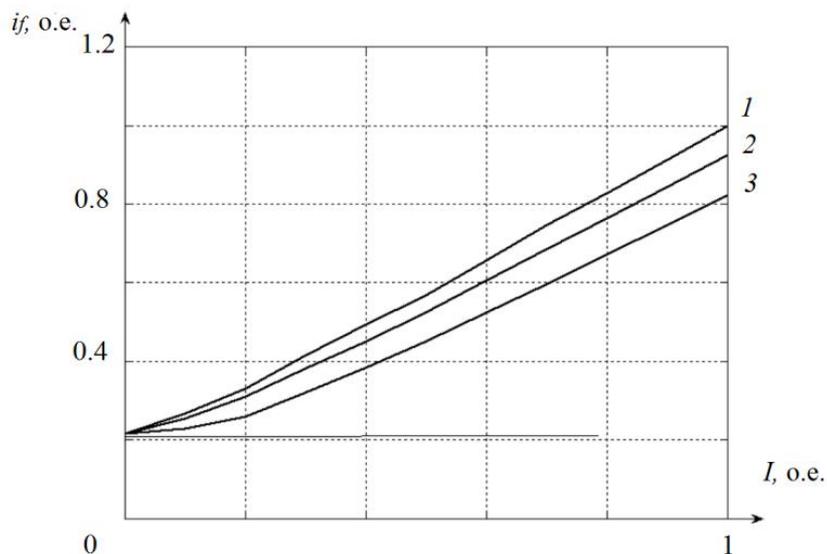
В состав компьютерного стенда с ВГ входит компьютерная модель СГ, статическая активно-индуктивная нагрузка, виртуальные электроизмерительные приборы.

Стенд позволяет рассчитать регулировочные характеристики ВГ, работающего с разной частотой вращения на нагрузку с разными параметрами ($I = \text{var}$, $\cos \phi = \text{var}$).



Компьютерный стенд с валогенератором:

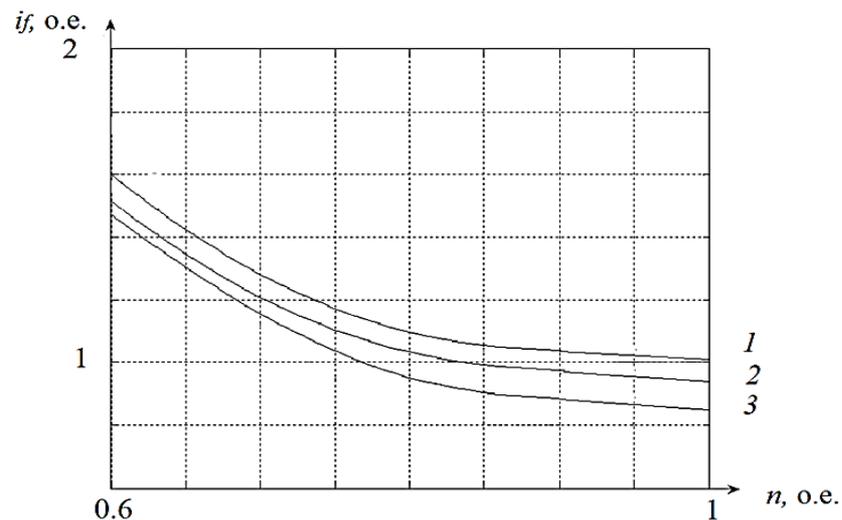
- 1 — блок задания частоты вращения;
- 2 — блок задания напряжения возбуждения;
- 3 — синхронный генератор;
- 4, 6 — активно-индуктивная нагрузка;
- 5 — блок вычисления действующих значений измеряемых величин;
- 7 — вспомогательный блок;
- 8 — блок вычисления параметров СГ;
- 9 — электроизмерительные приборы.



Регулировочная характеристика ВГ

($n = \text{const}$, $\cos \varphi = \text{var}$):

1 — $\cos \varphi = 0,8$; 2 — $\cos \varphi = 0,9$; 3 — $\cos \varphi = 1$



Регулировочная характеристика ВГ

($I = \text{var}$, $\cos \varphi = 0,8$):

1 — $I = 100\%$; 2 — $I = 80\%$; 3 — $I = 60\%$

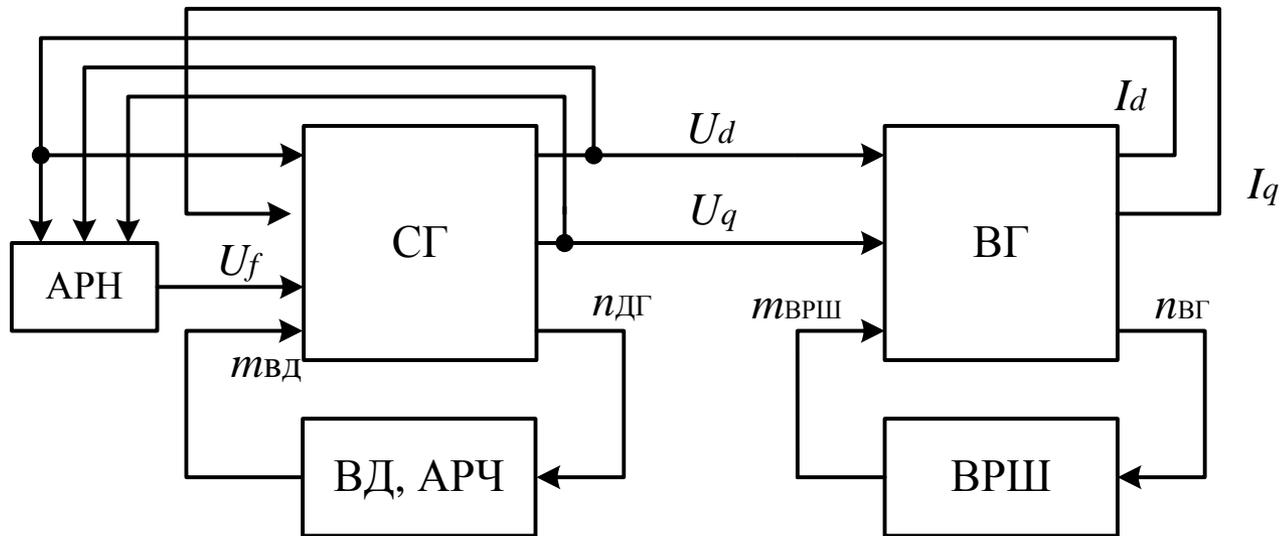
При увеличении нагрузки ток возбуждения ВГ увеличивается

При снижении частоты вращения валогенератора ток возбуждения увеличивается.

При работе ВГ с номинальной нагрузкой и коэффициенте мощности более 0,9 ток возбуждения не превышает номинального значения при снижении частоты вращения до 70–75 % от номинальной величины.

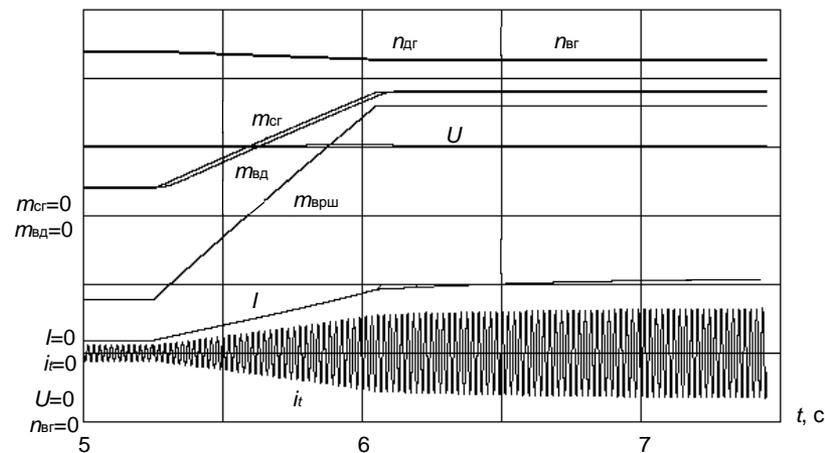
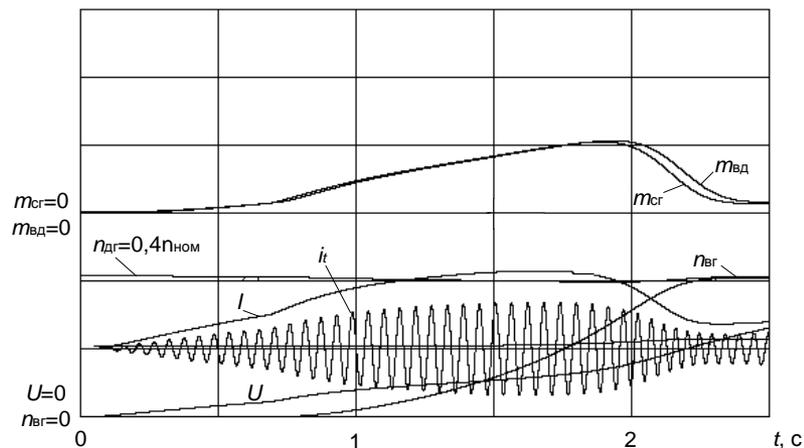
4.6. Компьютерное моделирование валогенераторной установки, работающей в режиме гребного электродвигателя

Применение ВГ в составе СЭЭС позволяет снизить расход горюче-смазочных материалов и экономить моторесурс вспомогательных ДГ. Помимо традиционной функции источника электроэнергии ВГ, может выполнять роль ГЭД, обеспечивая аварийный ход судна, или работать совместно с ГД на гребной винт.



Структурная схема модели ВГУ:

U_d, U_q, I_d, I_q — напряжение и ток СГ в осях dq соответственно;
 U_f — напряжение возбуждения СГ; $n_{ДГ}, n_{ВГ}$ — частота вращения ДГ и ВГ;
 $m_{ВД}, m_{ВРШ}$ — вращающий момент ВД и момент сопротивления ВРШ



Переходные процессы пуска ВГ на судах с ВРШ в двигательном режиме:

I, U – изображающий вектор тока и напряжения;

i_t – фазный ток;

$n_{ВГ}, n_{ДГ}$ – частота вращения ВГ и ДГ соответственно;

$m_{ВГ}, m_{ДГ}$ – электромагнитный момент ВГ, СГ;

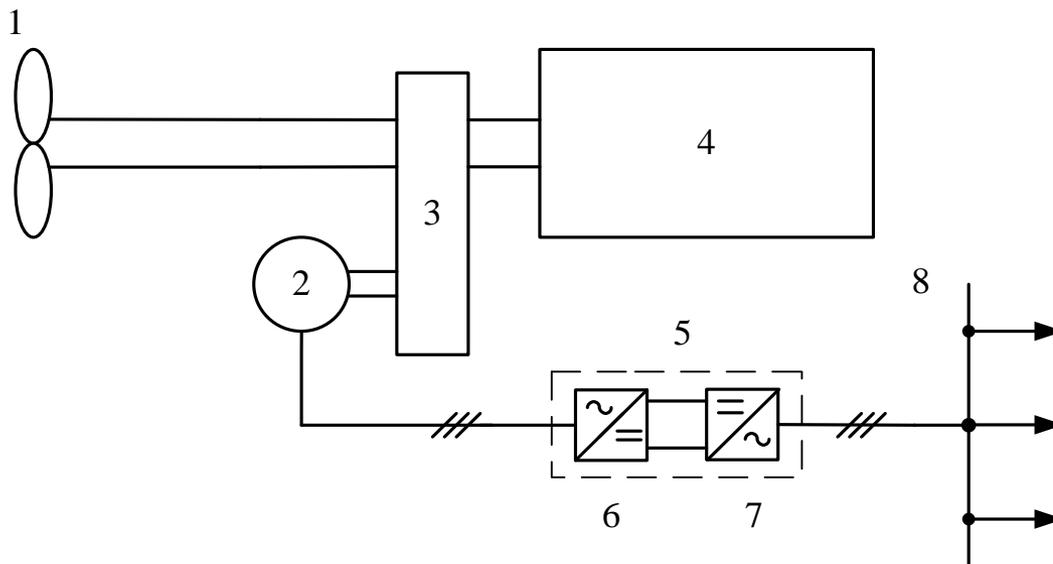
$m_{ВРШ}$ – момент сопротивления ВРШ

4.7. Компьютерное моделирование валогенераторной установки с полупроводниковым преобразователем

В последние годы в составе СЭС применяются полупроводниковые преобразователи различного назначения. Применение ПП в составе ВГУ позволяет эксплуатировать установку в широком диапазоне изменения частоты вращения главного дизеля, реализовать режим параллельной работы с ДГА, реализовывать двигательный режим работы ВГ.

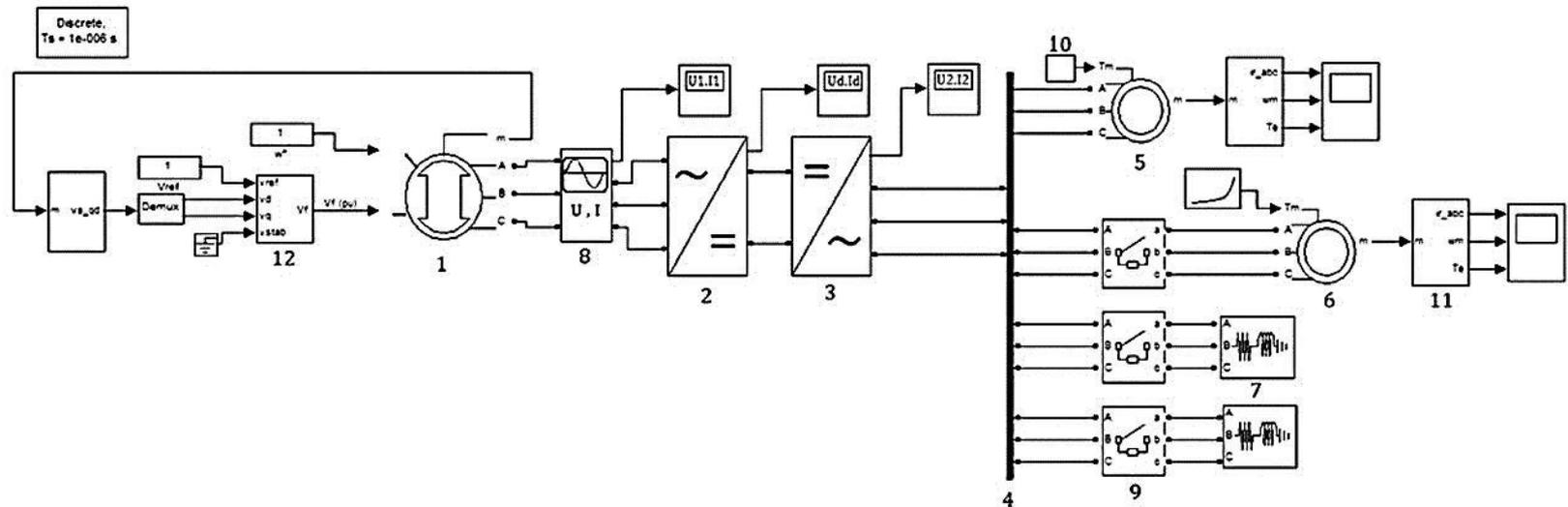
В современных ВГУ используют ПП со звеном постоянного тока на базе ВИ и значительно реже преобразователи с непосредственной связью.

Структурная схема ВГУ с ПП представлена ниже.



ВГУ с синхронным ВГ и ПП:
1– ВФШ; 2 – ВГ; 3 – редуктор; 4– ГД; 5 – ПП;
6 – АВ; 7 – АИ; 8 – ГРЩ

Использование в составе ВГУ ПП на базе АИ с полностью управляемыми (закрываемыми) вентилями позволяет избавиться от необходимости применения в составе ВГУ синхронных компенсаторов.



Компьютерный стенд ВГУ с ПП:

1 - ВГ; 2 - НВ; 3 - АИ; 4 - ГРЩ; 5,6 - асинхронный электропривод;

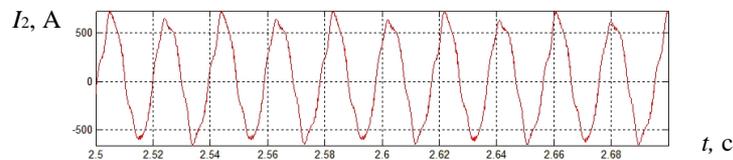
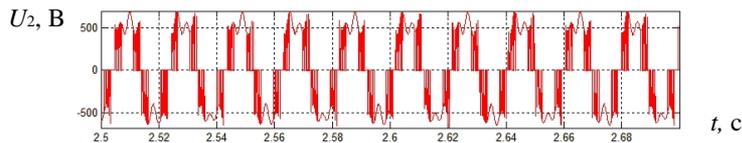
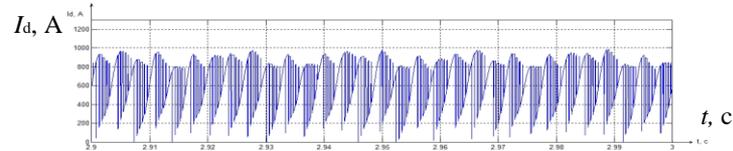
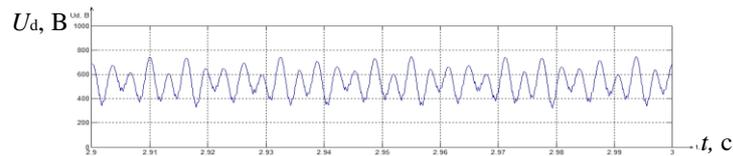
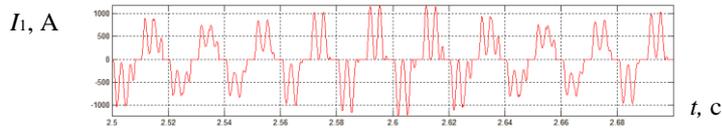
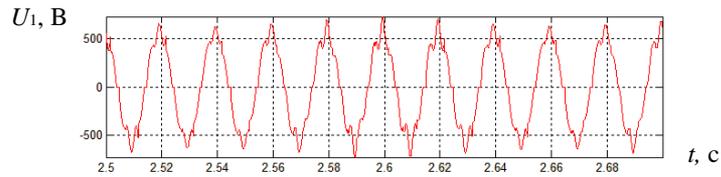
7 - активно-индуктивная нагрузка;

8,11 - блок измерения электрических величин;

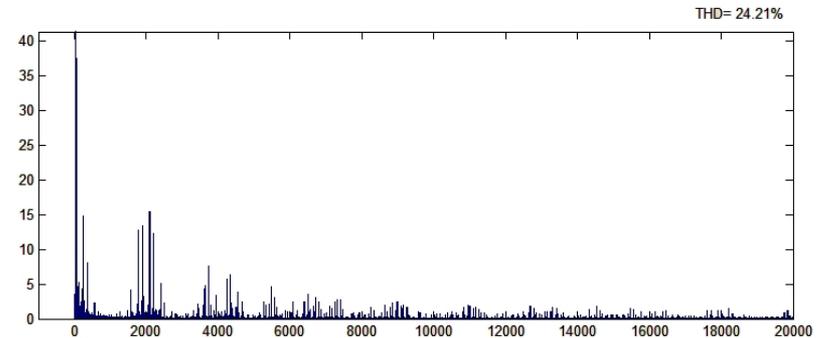
9 - автоматический выключатель;

10 - блок задания нагрузки; 12 - система возбуждения ВГ;

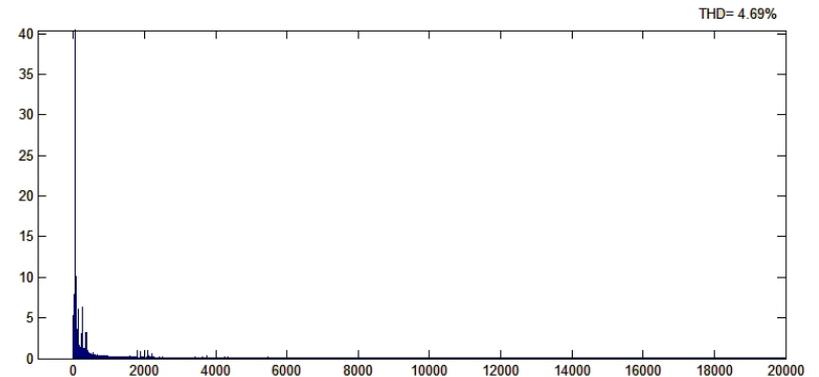
13 - электроизмерительные приборы



a



б



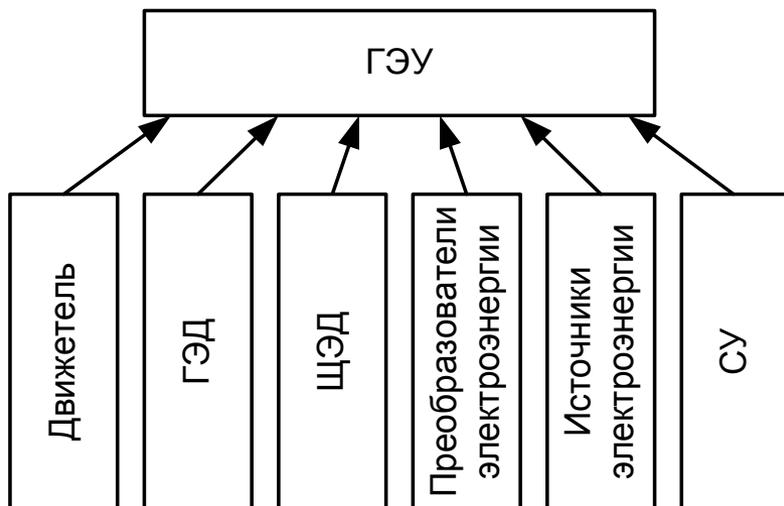
Спектральный анализ напряжения (а) и тока (б) в судовой сети при работе ВГ с номинальной нагрузкой и частотой 30 Гц

Мгновенные значения напряжения и тока ВГ (I_1 , U_1), звена постоянного тока ПП (I_d , U_d) и судовой сети (I_2 , U_2) при работе ВГ частотой тока 30 Гц и частотой тока в судовой сети 50 Гц

5. КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГРЕБНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

5.1. Состав, назначение, классификация гребных электрических установок

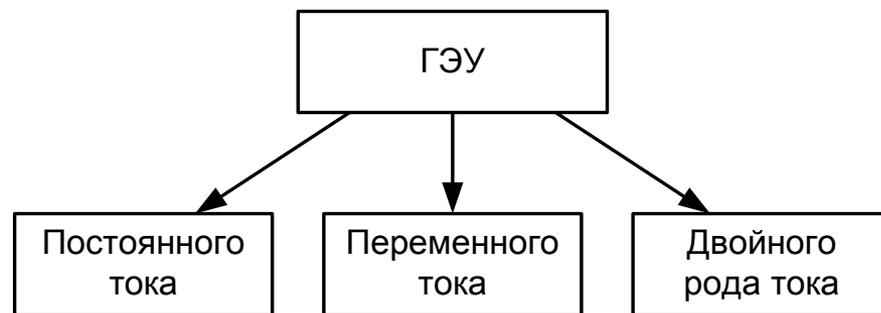
Основным назначением ГЭУ является преобразование электрической энергии в механическую с целью обеспечения движения судна.



Состав ГЭУ

В состав ГЭУ входит различное по назначению, принципу действия и конструкции электротехническое оборудование, в том числе: гребной двигатель, ГЭД, щит электродвижения (ЩЭД), преобразователи электроэнергии, источники электроэнергии, система управления.

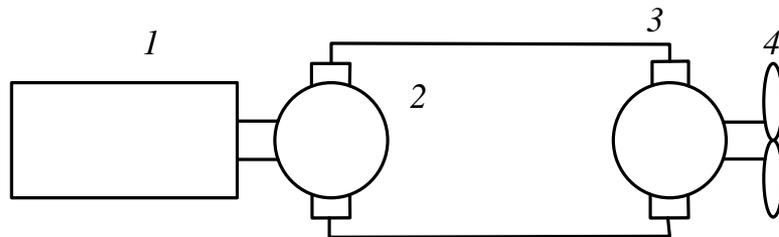
ГЭУ можно классифицировать по разным признакам. Наибольшее распространение получила классификация ГЭУ по роду тока силовой цепи.



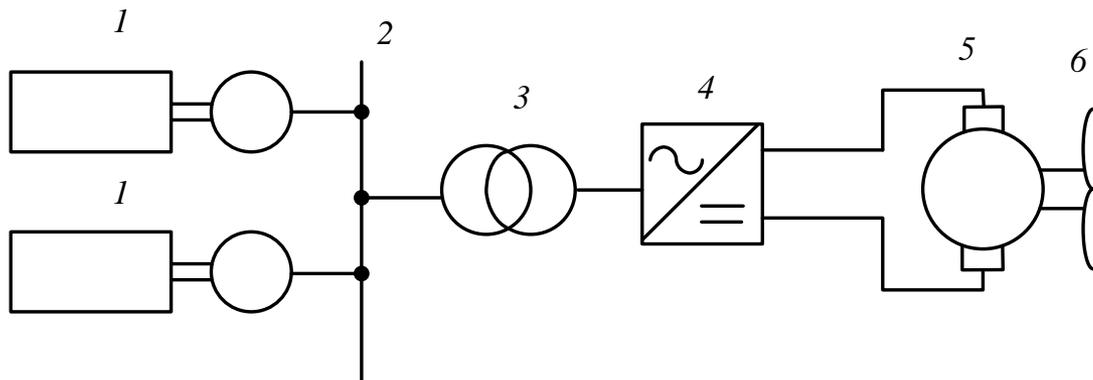
Классификация ГЭУ по роду тока

5.2. Структурные схемы гребных электрических установок

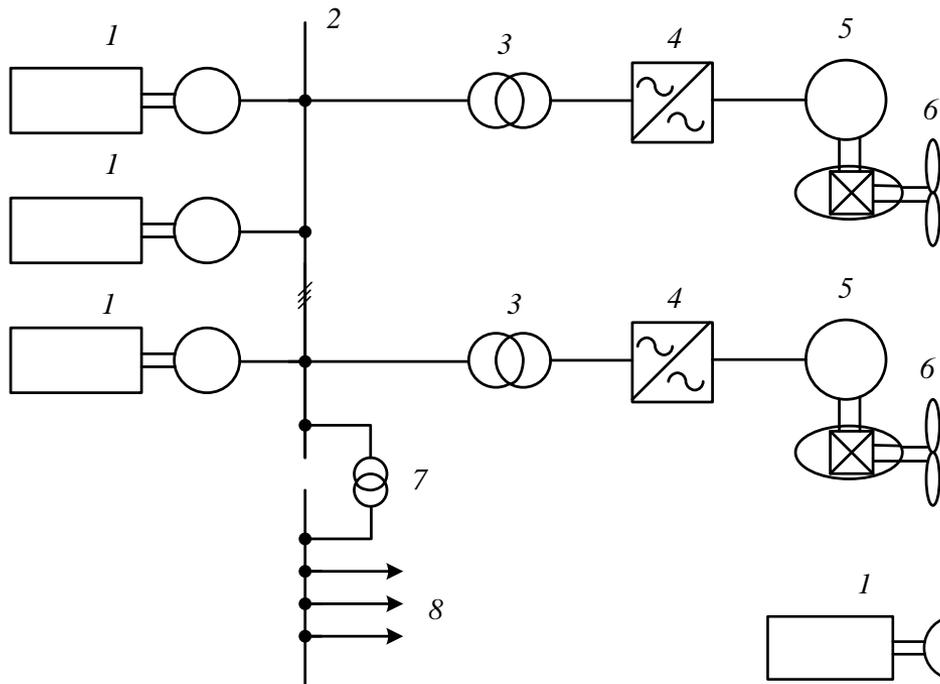
В ГЭУ постоянного рода тока в качестве главных генераторов и ГЭД применяют электрические машины постоянного тока. Частота вращения ГЭД регулируется за счет изменения напряжения, подводимого к якорной обмотке электродвигателя и изменения тока возбуждения.



Структурная схема ГЭУ постоянного тока с одним главным ДГ и одним ГЭД:
1 – главный дизель; 2 – главный генератор; 3 – ГЭД; 4 – ВФШ



ГЭУ двойного рода тока с НВ:
1 – главный ДГ; 2 – ГРЩ; 3 – трансформатор; 4 – НВ; 5 – ГЭД; 6 – ВФШ

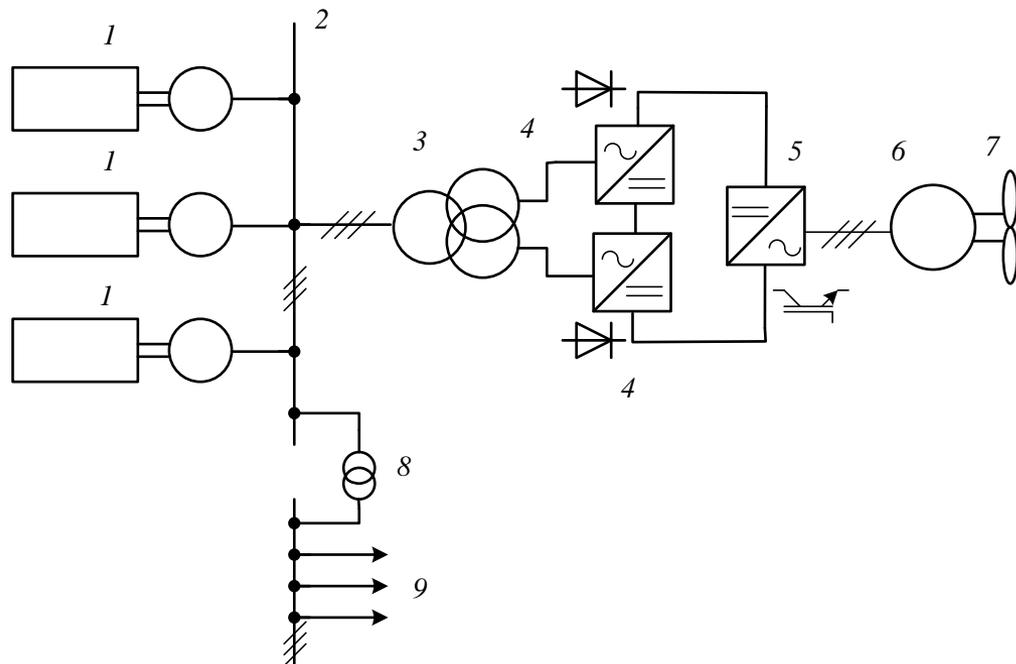


ЕЭЭС и ГЭУ с механическим ВРК:

- 1 – ГДГ; 2 – ГРЦ;
- 3 – трансформатор; 4 – ПП;
- 5 – ГЭД; 6 – ВРК;
- 7 – вспомогательный трансформатор; 8 – судовые приемники электроэнергии

. ЕЭЭС и ГЭУ переменного рода тока с ПП со звеном постоянного тока:

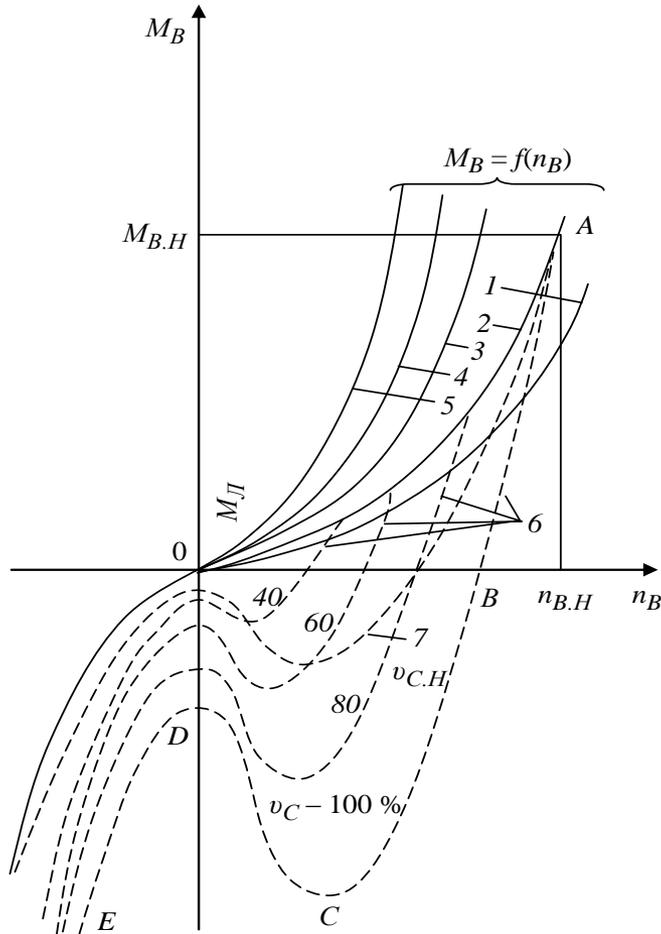
- 1 – ГДГ; 2 – ГРЦ; 3 – трехобмоточный трансформатор; 4 – НВ; 5 – автономный инвертор; 6 – ГЭД; 7 – ВФШ;
- 8 – вспомогательный трансформатор; 9 – судовые приемники электроэнергии



5.3. Винтовые характеристики гребного винта

Нагрузкой для ГЭД в составе ГЭУ является гребной винт. При моделировании ГЭУ необходимо иметь винтовую характеристику гребного винта.

Винтовой характеристикой гребного винта называют изменения момента сопротивления гребного винта от частоты вращения. Винтовые характеристики получают экспериментальным или расчетом путем для каждого конкретного гребного винта.



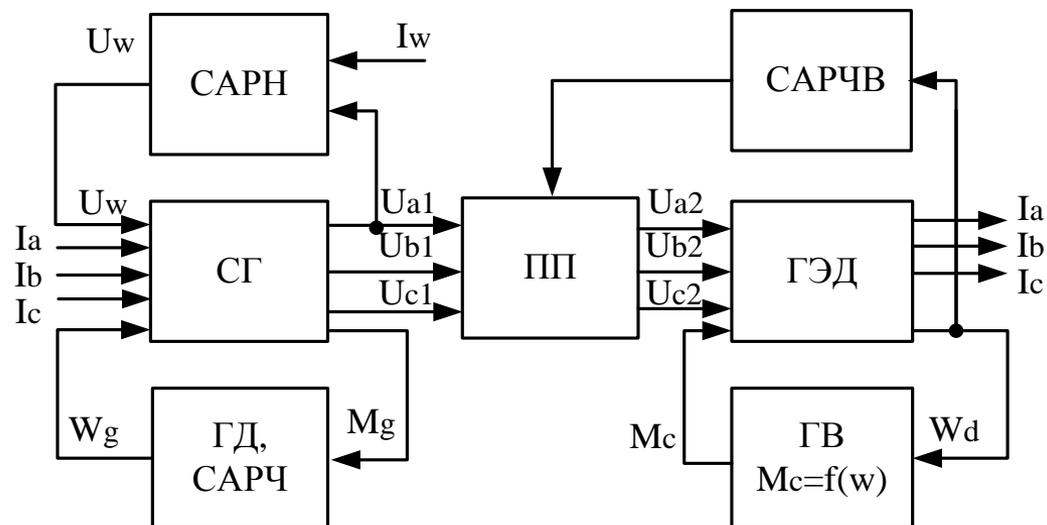
Механические характеристики гребного винта:

- 1 – ход в свободной воде без груза;
- 2 – ход в свободной воде с грузом;
- 3 – буксировочная характеристика;
- 4 – швартовая характеристика;
- 5 – ледовая характеристика;
- 6 – реверсивная характеристика.

Реверсивная характеристика винта — зависимость момента сопротивления от частоты вращения гребного винта при изменении направления его вращения на противоположное. Расчетная реверсивная характеристика строится при неизменной скорости движения судна, поскольку время реверса гребного винта на порядок меньше времени реверса судна.

5.4. Компьютерное моделирование гребной электрической установки переменного тока с электродвигателем асинхронного типа

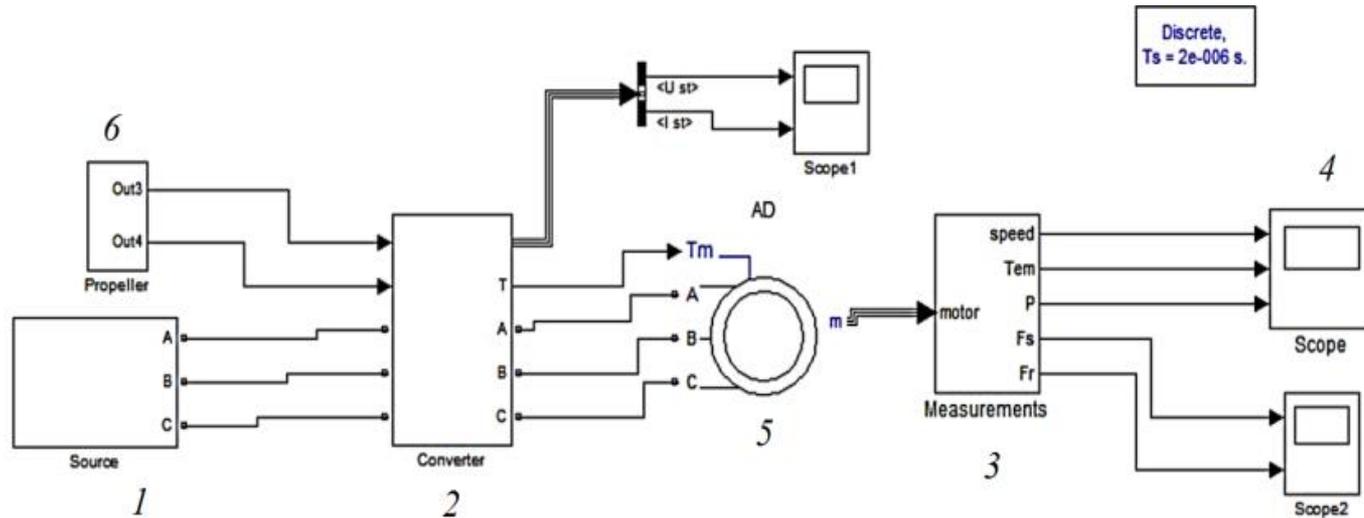
ГЭУ с прямой передачей вращающего момента на гребной винт состоит из асинхронного ГЭД, полупроводникового преобразователя частоты, система автоматического управления и регулирования.



Структурная схема модели ГЭУ переменного тока с асинхронным ГЭД

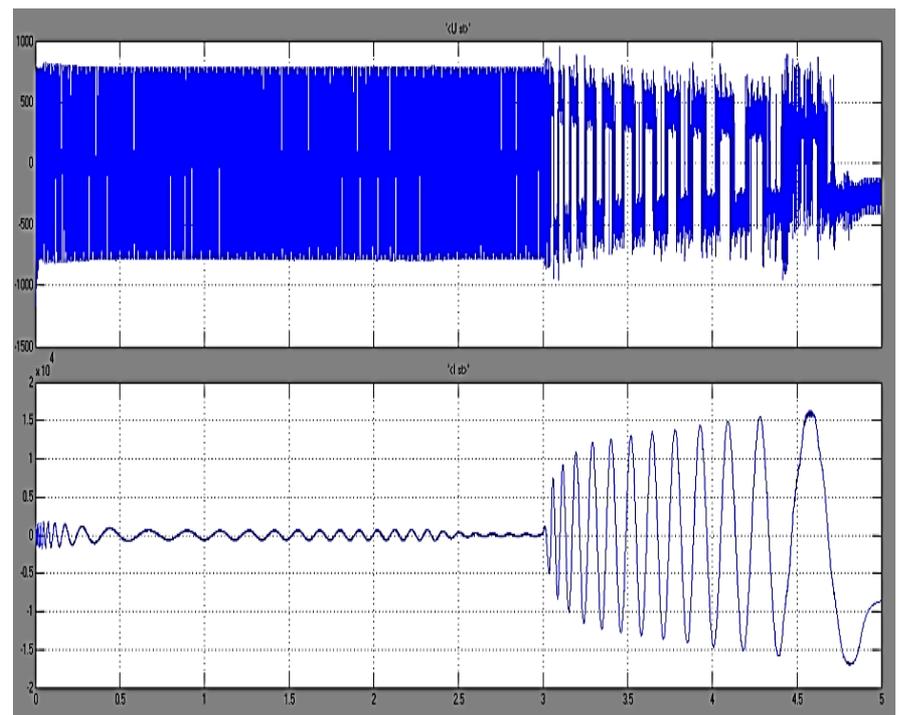
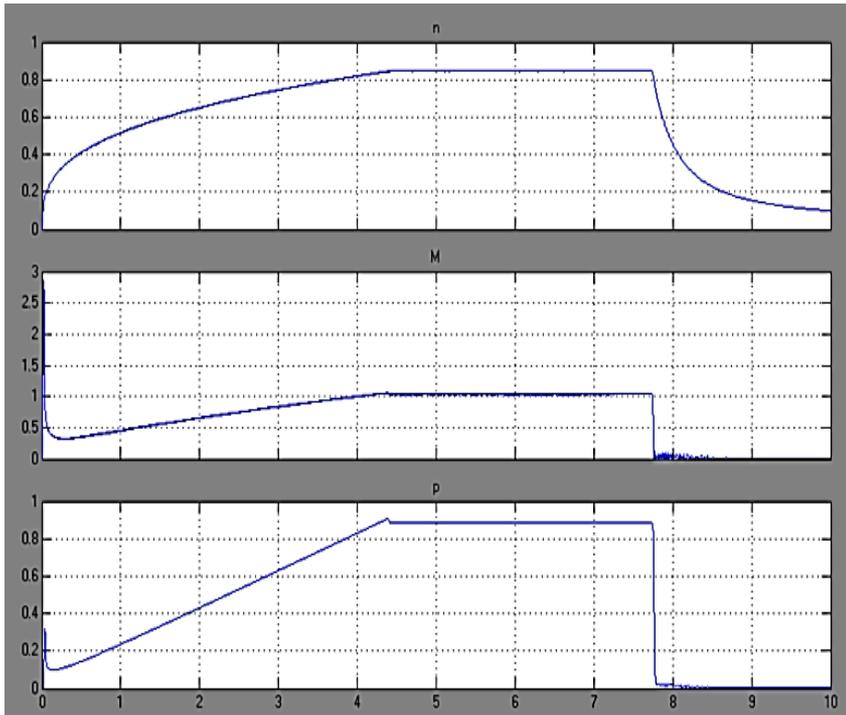
Структурная схема модели ГЭУ переменного тока состоит из главного ДГ, полупроводникового преобразователя, асинхронного ГЭД с системой автоматического регулирования частоты вращения (САРЧВ) и гребной винт. В состав главного ДГ входит СГ, САРН, главный дизель (ГД), САРЧ.

Компьютерная модель ГЭУ с асинхронным ГЭД создана в среде Simulink научного пакета моделирования MatLab с применением стандартных моделей электронной библиотеки и предназначена для расчета и исследования установившихся и переходных (динамических) процессов.



Компьютерная модель ГЭУ переменного тока с асинхронным ГЭД

1. Двигатель-генератор (блок трёх-фазного источника напряжения Source);
2. Полупроводниковый преобразователь частоты (блок Converter);
3. Блок измерения переменных значений электрической машины (Measurements);
4. Виртуальный осциллограф (блок Scope);
5. Модель асинхронного ГЭД (AD);
6. Блок задания винтовой характеристики гребного винта (Propeller).



Переходный процесс разгона асинхронного ГЭД:
 а – частоты вращения; б – электромагнитной
 момента; в – мощности на валу

Мгновенные значения напряжения (а) и тока (б)
 при заклинивании асинхронного ГЭД

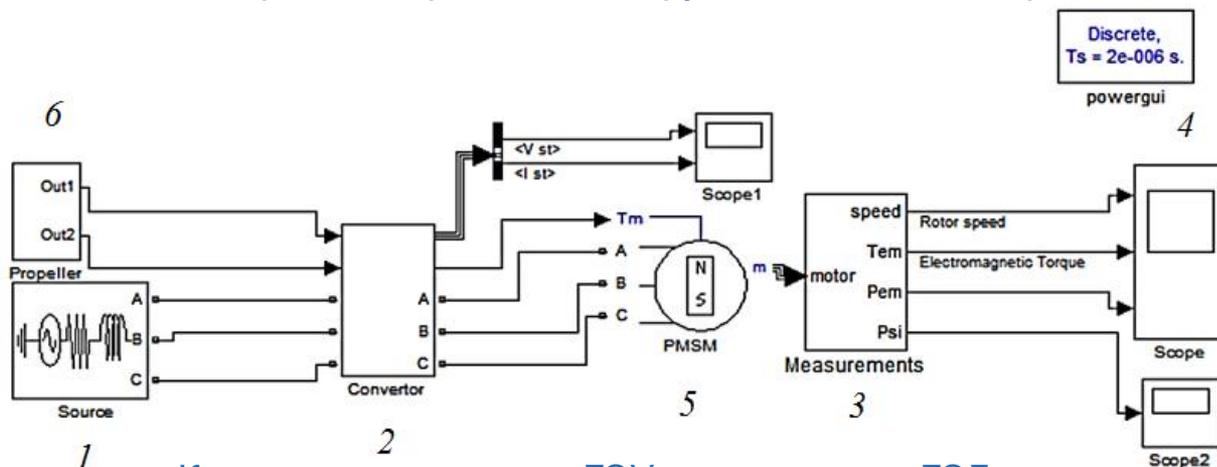
Разгон асинхронного ГЭД происходит плавно с увеличением вращающего момента и потребляемой мощности. При увеличении частоты вращения ГЭД увеличивается момент сопротивления гребного винта и потребляемая мощность на валу ГЭД, а соответственно, и мощность, потребляемая от СЭС.

При взаимодействии гребного винта со льдом происходит резкое увеличение момента сопротивления, который может превысить вращающий момент ГЭД. В результате резко возрастает ток ГЭД, падает его частота вращения вплоть до полной остановки.

5.5. Компьютерное моделирование гребной электрической установки переменного тока с электродвигателем синхронного типа

В современных ГЭУ в качестве ГЭД находят применение синхронные ГЭД с возбуждением на постоянных магнитах.

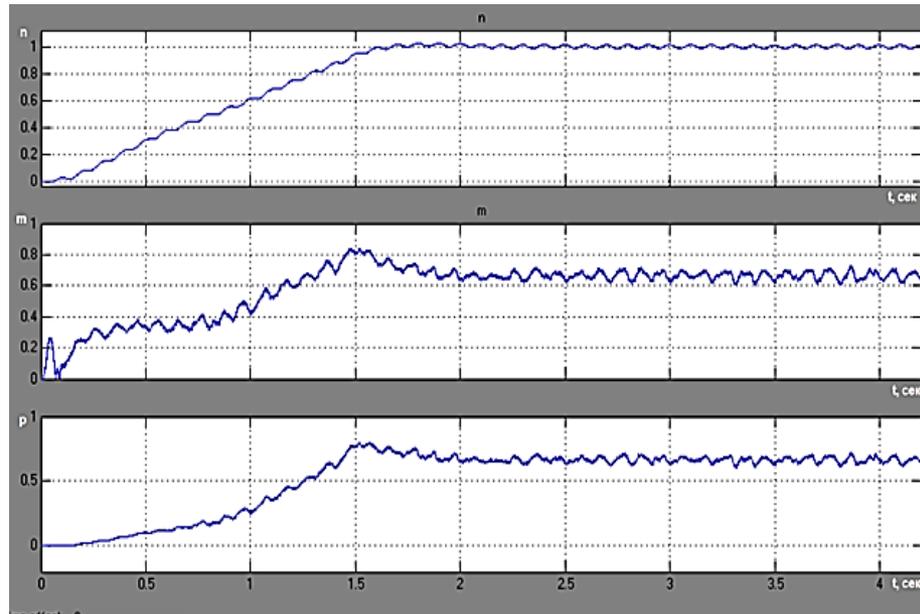
Данному типу ГЭД присущ ряд достоинств, среди которых следует выделить: высокое КПД, незначительные тепловыделения, высокая надежность, значительно меньшие масса и габариты по сравнению с другими типами электродвигателей.



Компьютерная модель ГЭУ с синхронным ГЭД на постоянных магнитах

Компьютерная модель ГЭУ переменного тока с синхронным ГЭД с возбуждением на постоянных магнитах состоит из следующих элементов:

1. Дизель-генератор (блок трёх-фазного источника напряжения Source);
2. Полупроводниковый преобразователь частоты (блок Converter);
3. Блок измерения переменных значений электрической машины (Measurements);
4. Виртуальный осциллограф (блок Scope);
5. Модель синхронного ГЭД на постоянных магнитах (PMSM);
6. Блок задания винтовой характеристики гребного винта (Propeller).



Переходные процессы разгона синхронного ГЭД с постоянными магнитами: а – частоты вращения; б – электромагнитной момента; в – мощности на валу

При разгоне в первый момент времени происходит возрастание вращающегося электромагнитного момента ГЭД, который неподвижен. После начала вращения ГЭД, электромагнитный момент снижается и в дальнейшем происходит его плавное увеличение.

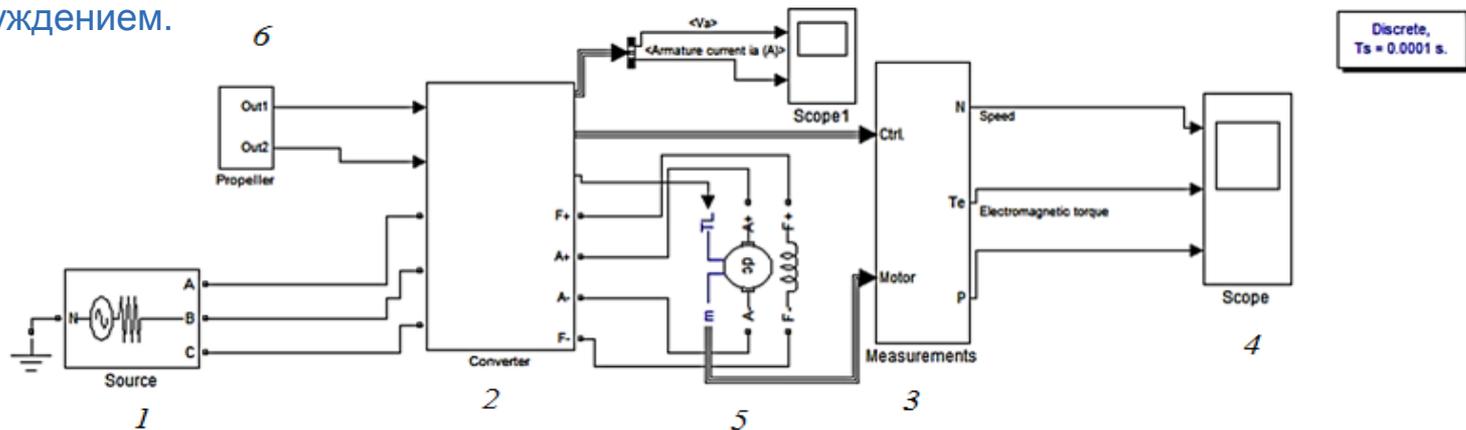
Пульсации вращающегося момента ГЭД связаны с ходом судна на волнении и периодическими изменениями тормозного момента гребного винта.

Из представленных переходных процессов видно, что разгон синхронного ГЭД происходит плавно. При увеличении частоты вращения ГЭД увеличивается момент сопротивления гребного винта и потребляемая мощность на валу ГЭД, а соответственно мощность, потребляемая от СЭС.

5.6. Компьютерное моделирование гребной электрической установки двойного рода тока

В состав ГЭУ двойного рода тока входят: ГЭД постоянного тока, управляемый выпрямитель (УВ), трансформаторы, система автоматического управления и регулирования.

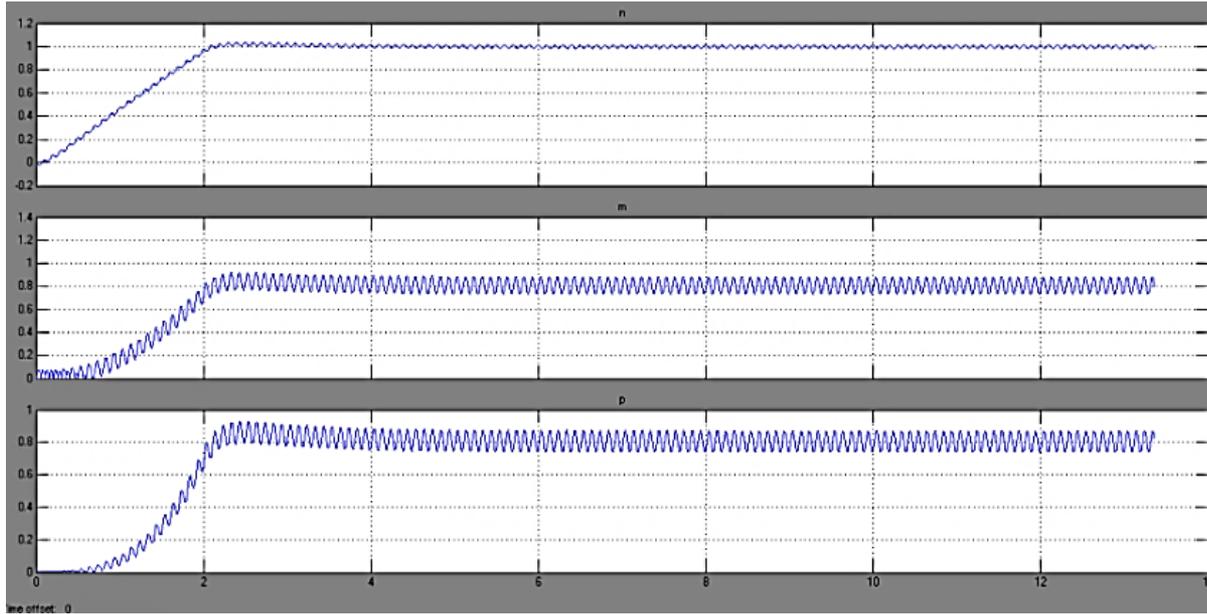
В качестве ГЭД в составе ГЭУ двойного рода тока используются электродвигатель постоянного тока, в качестве генератора – трехфазный генератор с электромагнитным возбуждением.



Компьютерная модель ГЭУ двойного рода тока

Компьютерная модель ГЭУ двойного рода тока состоит из следующих блоков:

1. Двигатель-генератор (блок трехфазного источника напряжения Source);
2. Управляемый выпрямитель (блок Converter);
3. Блок измерения переменных значений электрической машины постоянного тока (Measurements);
4. Виртуальный осциллограф (Scope);
6. Блок задания винтовой характеристики гребного винта (Propeller).



Переходный процесс разгона ГЭД постоянного тока:
частоты вращения; электромагнитной момента; мощности на валу

Разгон ГЭД постоянного тока происходит плавно, без перерегулирования. При увеличении частоты вращения ГЭД увеличивается момент сопротивления гребного винта, а соответственно увеличивается и вращающий электромагнитный момент ГЭД, возрастает механическая мощность на валу гребного винта, что приводит к увеличению потребляемой мощности от дизель-генераторов судовой электростанции.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате изучения основ моделирования по дисциплине «Моделирование судового электрооборудования и средств автоматизации» курсанты и студенты должны получить новые знания в области математического и компьютерного моделирования судового электрооборудования и средств автоматизации, включая моделирование судового электропривода, генераторных агрегатов, судовых электростанций, валогенераторных установок, гребных электрических установок.

Полученные знания позволят создавать компьютерные модели объекта исследования, разрабатывать план и проводить вычислительный эксперимент, использовать результаты экспериментальных исследований как для изучения и понимания физических свойств технического объекта, так и для принятия инженерных решений в практической деятельности при эксплуатации судового электрооборудования и средств автоматизации.

Теоретические знания и практические навыки, приобретенные в результате изучения дисциплины «Моделирование судового электрооборудования и средств автоматизации», помогут обучающимся в их будущей профессиональной деятельности в качестве инженеров по эксплуатации судового электрооборудования и средств автоматизации.

*Автор выражает благодарность ПАО «Совкомфлот»
за помощь и содействие в издании учебника*