Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Институт компьютерных наук и кибербезопасности

Высшая школа компьютерных технологий и информационных систем

**КУРСОВАЯ РАБОТА**

**Информационная модель синхронного генератора**

по дисциплине «Моделирование информационных систем»

**Выполнил**

студент гр. з5130902/20001 \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ Д.Л. Рязанцев

подпись, дата

**Проверил**

доцент, к.ф.-м.н \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_А.А. Ефремов

подпись, дата

Санкт-Петербург 2024

**РЕФЕРАТ**

Отчёт 33 с., 11 рис., 1 таблица, 16 источников

SIMINTECH, СИНХРОННЫЙ ГЕНЕРАТОР, ИНФОРМАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА, УРАВНЕНИЕ ГОРЕВА-ПАРКА, УРАВНЕНИЯ В ФОРМЕ КОШИ.

Объектом исследования выступает синхронный генератор, включая изучение его принципов работы и создание информационной модели с использованием программного обеспечения SimInTech.

Цель работы – провести исследование синхронного генератора, сформулировать и представить уравнения объекта управления, преобразовать их в систему именованных уравнений Горева-Парка, получить безразмерные формы уравнений, привести их к форме Коши, а также создать информационную модель с применением программных инструментов.

В ходе работы были успешно выполнены все поставленные задачи и создана информационная модель синхронного генератора в SimInTech.

СОДЕРЖАНИЕ

[ВВЕДЕНИЕ 4](#_Toc178734684)

[Глава 1. Обзор литературы 5](#_Toc178734685)

[1.1 Описание объекта управления и моделей 5](#_Toc178734686)

[1.2 Вывод именованных уравнения объекта управления 11](#_Toc178734687)

[Глава 2. Синтез математической модели 18](#_Toc178734688)

[2.1. Безразмерная форма уравнений Горева-Парка 18](#_Toc178734689)

[2.2. Уравнения совместной динамики электромагнитных и электромеханических процессов 24](#_Toc178734690)

[2.3. Уравнения объекта управления в форме Коши 25](#_Toc178734691)

[Глава 3. Синтез информационной модели 27](#_Toc178734692)

[ЗАКЛЮЧЕНИЕ 31](#_Toc178734693)

[Список литературы 32](#_Toc178734694)

# ВВЕДЕНИЕ

Создание информационной модели синхронного генератора обусловлено рядом значительных факторов и вызовов в области энергетики. Ряд основных аспектов, подтверждающих важность темы работы, включает в себя:

1. Интеграция возобновляемых источников энергии: С расширением использования таких источников, как солнечная и ветровая энергия, энергетические системы сталкиваются с проблемой колебаний в производстве электроэнергии.
2. Эффективное управление энергосистемами: Информационная модель синхронного генератора способствует более точному моделированию работы виртуальных генераторов и оптимизации их параметров, что помогает поддерживать стабильность и надежность электрических сетей.
3. Развитие интеллектуальных сетей: Современные энергосети требуют инновационных технологий и моделей для повышения эффективности управления.
4. Улучшение возможностей генераторов: Создание таких моделей способствует расширению функционала традиционных синхронных генераторов.

Исследования в области создания информационной модели синхронного генератора актуальны для повышения устойчивости энергосистем и интеграции возобновляемых источников энергии.

В процессе работы планируется изучение принципов работы синхронного генератора, разработка его математической модели, создание информационной модели с использованием программы SimInTech и проведение вычислительных экспериментов.

# Глава 1. Обзор литературы

# 1.1 Описание объекта управления и моделей

Объектом управления в информационной модели является синхронный генератор, преобразующий механическую энергию вращающегося двигателя в электрическую энергию переменного тока. В генераторе статор создает магнитное поле, а ротор, вращаясь в этом поле, генерирует электрический ток.

Информационная модель генератора описывает его ключевые характеристики, параметры и алгоритмы управления, необходимые для точной симуляции и интеграции в систему управления энергетикой. Она описывает физические и электрические характеристики генератора, такие как активное и реактивное сопротивление, индуктивность и емкость обмоток, а также параметры, связанные с энергетической эффективностью и динамикой работы [3, с. 6-7].

Цель информационной модели синхронного генератора заключается в создании удобной и точной абстракции, которая позволяет эффективно управлять генератором и интегрировать его в энергетическую систему. Эта модель является основой для разработки и оптимизации виртуальных синхронных генераторов, способных эмулировать инерцию и обеспечивать стабильность работы электрической сети при использовании возобновляемых источников энергии [6, с. 60].

Описание объекта управления в информационной модели синхронного генератора также включает в себя элементы, связанные с контролем и мониторингом работы генератора. Это включает в себя сенсоры и измерительные устройства, которые собирают данные о текущих параметрах генератора, таких как напряжение, ток, частота и мощность. Полученные данные передаются в систему управления, где на основе них принимаются решения и выполняются необходимые корректировки для обеспечения оптимальной работы генератора и стабильности энергосистемы.

Для моделирования и анализа работы информационной модели синхронного генератора используются различные математические и компьютерные методы. В основе моделей лежат физические принципы работы генератора, такие как законы электромагнетизма, электрические цепи и динамика вращающихся механизмов. Математические модели описывают эти принципы с помощью уравнений и формул, позволяя проводить аналитические расчеты и анализировать характеристики генератора.

Важным аспектом информационной модели синхронного генератора является разработка алгоритмов управления, которые позволяют эмулировать инерцию вращения и демпфировать колебания частоты электрической сети. Эти алгоритмы определяют действия, которые необходимо выполнить для поддержания стабильности работы сети при изменениях в нагрузке или других внешних условиях. Они могут включать в себя регулирование напряжения, регулирование частоты и координацию работы с другими генераторами и устройствами в сети [4, с. 182].

Информационная модель синхронного генератора является инструментом, который позволяет управлять и контролировать работу генератора, а также проводить анализ и оптимизацию его характеристик. Это важный компонент при разработке и внедрении виртуальных синхронных генераторов, которые играют ключевую роль в повышении устойчивости электрической сети и интеграции возобновляемых источников энергии.

Информационная модель синхронного генератора предоставляет ряд преимуществ и выгод, включающих:

1. Улучшенное управление и контроль: Информационная модель позволяет более эффективно управлять и контролировать работу синхронного генератора. Она предоставляет полную информацию о состоянии генератора, его параметрах и характеристиках, что позволяет операторам системы энергетического управления принимать обоснованные решения и осуществлять точную настройку работы генератора [9, с. 33].
2. Стабильность и надежность энергосистемы: Информационная модель способствует повышению стабильности и надежности работы электрической сети. Благодаря возможности эмуляции инерции вращения и демпфирования колебаний частоты, модель позволяет синхронному генератору адекватно реагировать на изменения нагрузки и поддерживать стабильную частоту сети даже при возникновении аварийных ситуаций.
3. Оптимизация работы генератора: Информационная модель позволяет проводить анализ работы генератора и оптимизировать его параметры. С помощью моделирования и симуляции работы генератора можно определить наилучшие настройки и режимы работы, улучшить энергетическую эффективность, снизить износ и повысить долговечность генератора [13, с. 66].
4. Интеграция с возобновляемыми источниками энергии: Информационная модель синхронного генератора является ключевым компонентом при интеграции возобновляемых источников энергии в электрическую сеть. С помощью виртуальных синхронных генераторов, эмулирующих работу синхронного генератора, можно более гибко управлять и интегрировать энергию от солнечных панелей, ветрогенераторов и других возобновляемых источников в энергосистему, обеспечивая стабильность и устойчивость работы сети.
5. Снижение затрат и экологическая эффективность: Оптимальное управление и контроль синхронного генератора, достигаемые с помощью информационной модели, позволяют снизить эксплуатационные затраты на энергосистему. Оптимизация работы генератора позволяет более эффективно использовать ресурсы, снизить потребление топлива и уменьшить выбросы вредных веществ в окружающую среду, что способствует более экологически чистой энергетике.

При работе синхронных генераторов в электроэнергетической системе точная синхронизация их частоты является необходимым условием для эффективной и стабильной работы системы. Синхронизация частоты генераторов позволяет им генерировать электрическую энергию согласованно и синхронно с остальными источниками в сети [5, с. 18].

Частота генератора определяется скоростью его вращения, и она должна точно соответствовать частоте электрической сети. В электроэнергетической системе стандартная частота сети обычно составляет 50 или 60 герц (Гц), в зависимости от региона. Поэтому каждый синхронный генератор должен поддерживать свою частоту синхронизации, соответствующую этой стандартной частоте.

Точная синхронизация частоты генераторов важна по нескольким причинам. Во-первых, синхронизация позволяет генераторам передавать и принимать электроэнергию без возникновения больших перепадов напряжения и частоты. Это важно для обеспечения нормальной работы электрических устройств и оборудования в сети.

Во-вторых, точная синхронизация частоты генераторов обеспечивает баланс между производством и потреблением электроэнергии в системе. Если частота генератора не синхронизирована с частотой сети, возникают нежелательные эффекты, такие как недостаток или избыток активной мощности, изменение напряжения и потери стабильности в работе системы [7, с. 34].

Также, синхронизация частоты позволяет генераторам работать в параллельном режиме, то есть совместно поставлять электроэнергию в сеть. Это важно для обеспечения надежности и резервирования системы, так как генераторы могут взаимодополнять друг друга и компенсировать возможные сбои или перегрузки.

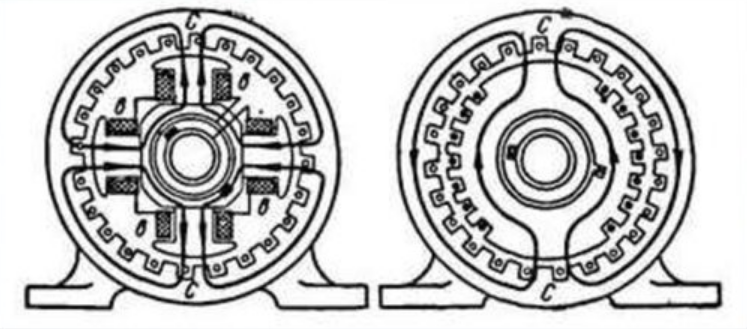


Рисунок 1. Устройство синхронных генераторов с явнополюсным и неявнополюсным роторами

Начальный режим работы синхронного генератора представляет собой важную фазу, когда генератор переходит от состояния покоя к генерации электроэнергии. В этом режиме генератор проходит несколько этапов для достижения своей номинальной рабочей точки.

Первый этап начального режима - это пуск генератора. Обычно используется внешний пусковой механизм, такой как электрический стартер или пусковой двигатель, чтобы привести генератор в движение. Важно контролировать пусковой процесс, чтобы генератор запустился безопасно и эффективно.

После пуска генератора следует этап ускорения. Генератор постепенно увеличивает свою скорость вращения до требуемого значения для номинальной работы. Ускорение может быть осуществлено с помощью механической системы или внешних источников энергии, таких как дизельный двигатель или газовая турбина.

Далее следует важный этап - синхронизация генератора. Синхронизация подразумевает согласование параметров генератора с электрической сетью, к которой он будет подключен. Это включает согласование фазы и частоты генератора с сетью. Корректная синхронизация обеспечивает безопасное и стабильное подключение генератора к сети, предотвращая возможные перегрузки или перепады напряжения.

После успешной синхронизации генератора следует регулирование его параметров. Например, напряжение и частота генератора могут быть отрегулированы с помощью автоматических регуляторов, чтобы обеспечить стабильность работы генератора и электроэнергетической системы.

Наконец, генератор переходит в рабочий режим, где он генерирует электрическую энергию в соответствии с потребностями системы. В этом режиме генератор функционирует согласно своей номинальной мощности и параметрам.

Начальный режим работы синхронного генератора является важным этапом, где генератор запускается, синхронизируется и переходит в рабочий режим. Правильное выполнение всех этапов начального режима обеспечивает стабильность и надежность работы генератора, что в свою очередь способствует безопасной и эффективной работе электроэнергетической системы.

Синхронные генераторы, используемые в электроэнергетических системах, могут быть классифицированы по различным характеристикам и параметрам. Классификация синхронных генераторов позволяет лучше понять их особенности и выбрать наиболее подходящий тип генератора для конкретных потребностей [9, с. 173]. Вот некоторые основные аспекты классификации синхронных генераторов:

1. По типу возбуждения:

- синхронные генераторы с постоянными магнитами. В этих генераторах магнитное поле создается с помощью постоянных магнитов, что обеспечивает более простую конструкцию и высокую эффективность;

- синхронные генераторы с возбуждением от постоянных магнитов. Здесь магнитное поле создается при помощи электрического возбуждения постоянными магнитами;

1. По способу подключения к электрической сети:

- генераторы с независимым возбуждением (автономные). Эти генераторы не зависят от внешней сети и используются для автономных электроэнергетических систем, таких как отдаленные населенные пункты или автономные объекты;

- генераторы с подключением к сети. Эти генераторы подключаются к центральной электрической сети и работают в согласии с ее параметрами;

1. По типу охлаждения:

- воздушное охлаждение. В этом случае генератор охлаждается воздухом, что обеспечивает простоту в обслуживании и установке;

- водяное охлаждение. Здесь генератор охлаждается водой, что позволяет эффективно управлять его тепловыделением и использовать его в более требовательных условиях;

1. По типу привода:

- приводные генераторы. Эти генераторы приводятся в движение с помощью внешнего источника энергии, такого как дизельный двигатель или газовая турбина;

- турбогенераторы. Эти генераторы имеют интегрированный привод, где турбина и генератор объединены в одном устройстве.

Исследование процессов, происходящих в синхронном генераторе с использованием математических моделей, основанных на преобразованиях Парка-Горева, является важным инструментом для анализа и оптимизации работы данного устройства. Преобразования Парка-Горева - это математический метод, используемый для описания поведения синхронных машин в системе координат, связанной с ротором генератора [10, с. 482].

Применение преобразований Парка-Горева позволяет упростить анализ и моделирование работы синхронного генератора, особенно в условиях несимметричных и динамических нагрузок. Преобразование Парка-Горева позволяет перейти от трехфазной системы координат, связанной с статором генератора, к двухосевой системе координат, связанной с ротором. В результате получается математическая модель, в которой процессы вращения ротора и электромагнитные явления становятся более удобными для анализа.

Таким образом, исследование процессов, происходящих в синхронном генераторе с использованием математических моделей, основанных на преобразованиях Парка-Горева, является необходимым инструментом для более глубокого понимания работы генератора и для разработки эффективных стратегий управления и оптимизации его работы.

# 1.2 Вывод именованных уравнения объекта управления

Даны уравнения СГ в фазовых координатах:

Уравнения процессов в статорных обмотках

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.1) |

Уравнения процессов в обмотках ротора

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.2) |

Переходный процесс в электрической машине любого типа может быть описан системой дифференциальных уравнений в той или иной системе координат. Выбор системы координат определяется конкретными условиями решаемой задачи [12].

При расчете переходного процесса может быть использована система координат d, q, 0, где оси d и q жестко связаны с ротором, причем ось d совмещена с продольной осью ротора и опережает ось q. Мгновенные значения можно определить через векторы трехфазной системы (рис. 1.2.1).

|  |
| --- |
|  |
| Рис. 1.2.1. Определение мгновенных значений через векторы трехфазной системы |

Из данного рисунка очевидно:

Если принять для каждой фазы свои оси времени, сдвинутые относительно друг друга на 1200, то трехфазную симметричную систему можно представить одним вектором F, который называется обобщенным вектором. Из рис. 1.2.2 очевидно, что проекция обобщенного вектора F, вращающегося с угловой скоростью ω, на три оси времени даст мгновенные значения трехфазных величин

|  |
| --- |
|  |
| Рис. 1.2.2 Определение мгновенных значений через обобщенный вектор |

Необходимо отметить, что чередование фаз для осей времени обратно чередованию фаз, так как вращение осей времени противоположно вращению векторов. Обобщенный вектор можно разложить на составляющие: продольную Fd, совпадающую с осью полюсов, и поперечную Fq. (рис. 1.2.3).

Тогда мгновенные значения равны:

где γ – угол между магнитной осью фазы А и осью d.

Из полученных уравнений можно выразить в явном виде Fd и Fq

|  |
| --- |
|  |
| Рис 1.2.3 Обобщенный вектор F в системе координиат d-q |

Напряжение на обмотке статора, например, фазы А, равно

Здесь – полное потокосцепление обмотки фазы А

– ток фазы А

– активное сопротивление фазы

Применим для тока и потокосцепления преобразование с разложением на составляющие по осям *d-q*

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.3) |
|  | (1.4) |

Тогда получаем

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.5) |

Преобразуем далее с учётом того, что угол является функцией времени

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.6) |
|  | (1.7) |

Заметим, что в 1.7 составляющие с множителем будут совпадать по направлению с осью "*d*", а с множителем с осью "*q*". Поэтому выделим в 1.7 составляющие по осям "*d*" и "*q*"

Вновь учтём, что является функцией времени как указано в 1.6, а так же то, что в общем случае частота вращения ротора может отличаться от синхронной и быть равной ω + ωs, где ωs – частота скольжения

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.8) |
|  | (1.9) |

Получившиеся уравнения 1.8 и 1.9 называются уравнениями Парка-Горева, а составляющие напряжений в этих уравнениях, порождаемые определенными процессами, и в соответствии с этим называются следующим образом:

– ЭДС трансформации,

– ЭДС синхронного вращения,

– ЭДС скольжения.

Далее будем использовать уравнения в виде

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.10) |
|  | (1.11) |

Дополним уравнения 1.10 и 1.11 дифференциальными уравнениями контуров:

|  |  |
| --- | --- |
| - возбуждения | (1.12) |
| - демпферного контура по продольной оси | (1.13) |
| - демпферного контура по поперечной оси | (1.14) |

Все контуры по продольной оси и все контуры по поперечной оси магнитно связаны между собой. Но между контурами продольной и поперечной осей магнитная связь отсутствует, так плоскости их обмоток расположены под 900

Магнитные потоки обмоток с учетом того, что в реальной электромагнитной системе не весь создаваемый обмотками магнитный поток сцепляется с другими обмотками из-за явления магнитного рассеяния.

|  |
| --- |
|  |
| Рис. 1.2.4 Магнитные потоки контуров по продольной и поперечной осям |

Примем следующие обозначения: и – магнитные потоки взаимной индукции по продольной и поперечной оси, , ,, – магнитные потоки рассеяния.

Изобразим магнитные потоки контуров по продольной и поперечной осям (Рисунок 1.2.4).

Принадлежность потока к обмотке задаётся индексом. Потокам рассеяния обмоток статора по оси d и q () присвоен общий индекс, так как они одинаковы.

Магнитно-связанные контуры представимы в виде схемы замещения, в которой полная (или собственная) индуктивность каждой обмотки состоит из двух составляющих взаимной индуктивности и индуктивности рассеяния. В соответствии с этим для каждого контура:

- по оси «d»:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.15) |
|  | (1.16) |
|  | (1.17) |

- по оси «q»:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.18) |
|  | (1.19) |

где – коэффициенты взаимной индуктивности контуров соответственно по продольной и поперечной осям.

Индуктивность рассеяния имеют индекс «σ» и индекс принадлежности к определенному контуру. Потокосцепления каждого из магнитно-связанных контуров зависит от токов всех контуров и определяются следующим образом:

по оси «d»:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.20) |
|  | (1.21) |
|  | (1.22) |

по оси «q»:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.23) |
|  | (1.24) |

В формулах (1.20) – (1.24) составляющие с токами Id и Iq приняты отрицательными для удобства вывода последующих соотношений.

# Глава 2. Синтез математической модели

# 2.1. Безразмерная форма уравнений Горева-Парка

Имеем данные общие безразмерные уравнения Горева-Парка:

- уравнения процессов в статорных обмотках

- уравнения процессов в обмотках ротора

В первую очередь получим систему уравнений безразмерной формы

Подставим значения коэффициентов, определяющих тип уравнения (Таблица 2.1)

Таблица 2.1. Значения коэффициентов, определяющих тип уравнения

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| *a* | *nf* | *nrd* | *nrq* | *kid* | *kiq* | *kwd* | *kwq* |
| 1 | -1 | -1 | -1 | 1 | 1 | 1 | -1 |

Приведём к виду систем уравнений:

Подставим данные по условию коэффициенты и

|  |
| --- |
|  |

Проведём операцию обезразмеривания. Для этого возьмём ранее выведенные уравнения Парка-Горева (1.20 – 1.24) и уравнение 1.7 с выделенными составляющими по осям "*d*" и "*q*"

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

Чтобы уравнения этой системы можно было записать в относительных единицах будем рассматривать следующие базисные величины [14]:

– базисное напряжение (В), номинальное пиковое фазовое напряжение (В)

– номинальная полная мощность (ВА)

– базисное значение угловой скорости (рад/с)

– базисное значение силы тока (А), номинальная амплитуда фазного тока на статоре

– базисное значение вращающегося момента сил (нМ)

– базисное значение сопротивления (Ом)

– базисное значение индуктивности (Гн)

– базисное значение вращающегося момента сил (нМ)

– базисное значение тока возбуждения (А)

– базисное значение токов демпферных контуров (А)

Здесь Mad, Maq — постоянные взаимные индуктивности

Получим следующую систему уравнений

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2.3) |

В получившихся уравнениях следующие величины не зависят от времени: [14]

1. – синхронные индуктивные сопротивления машины по продольной и поперечной осям.
2. – реактивные сопротивления реакции статора по продольной и поперечной осям.
3. – реактивные сопротивления обмотки возбуждения, продольного и поперечного демпферных контуров;
4. – реактивные сопротивления рассеяния обмотки возбуждения, продольного и поперечного демпферных контуров.
5. – ЭДС, индуктируемые в статоре магнитным полем токов роторных контуров при синхронной частоте вращения ротора (с).
6. – постоянная времени обмотки возбуждения при прочих разомкнутых контурах (с).
7. – постоянные времени демпферных контуров при прочих разомкнутых контурах (с).

Преобразовав уравнения с учетом ЭДС и реактивных сопротивлений с приравниванием относительно напряжений, полученная ранее система уравнений 2.3 принимает следующий вид

С учётом корректировки знаков получаем

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2.4) |

# 2.2. Уравнения совместной динамики электромагнитных и электромеханических процессов

Дано уравнение моментов

Где:

D – Демпферный момент;

Mmx – Механический момент

Подставим коэффициенты из таблицы 2.1 и проведём ряд преобразований для выделения механического момента

Полученное уравнение внесём в общую систему, которая примет следующий вид:

# 2.3. Уравнения объекта управления в форме Коши

Полученную ранее в пункте 2.2 систему уравнений приведём к виду векторно-матричных уравнений в форме Коши

Примем следующие обозначения:

u = , I = , I’ = ,

B = ,

A =

Тогда матричное уравнение можно представить в форме Коши в следующем виде

Из дистрибутивности умножения матриц следует:

# Глава 3. Синтез информационной модели

Будем синтезировать информационную модель ОУ в среде динамического моделирования технических систем SimInTech. Для этого воспользуемся данной нам упрощённой моделью динамической нагрузки

Где – активная мощность

– реактивная мощность

За основу для построения информационной модели возьмём данные нам формулы и выведенное нами в прошлом пункте матричное уравнение в форме Коши и исходные значения уравнений Горева-Парка в соответствии с вариантом.

|  |
| --- |
|  |
| Рисунок 3.1 Скрипт инициации начальных значений |

|  |
| --- |
|  |
| Рисунок 3.2 Общий вид модели |

|  |
| --- |
|  |
| Рисунок 3.3 График напряжений |

|  |
| --- |
|  |
| Рисунок 3.4 График угловой скорости |

|  |
| --- |
|  |
| Рисунок 3.5 График тока i\_d |

|  |
| --- |
|  |
| Рисунок 3.6 График тока i\_q |

# ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение, информационная модель синхронного генератора является эффективным инструментом для изучения и анализа его динамики в различных условиях. Она помогает выявить взаимосвязь между переменными состояния и оценить влияние различных параметров на работу генератора. Используя математические модели и численные методы, можно проводить эксперименты, которые позволяют оптимизировать работу генератора, повысить эффективность и надежность энергосистемы.

Информационная модель также применяется для прогнозирования реакций на изменения внешних условий, что помогает специалистам принимать обоснованные решения в управлении электроэнергетическими системами. Несмотря на то, что модель является упрощенным представлением, она остается ценным инструментом для анализа, оптимизации и обучения, способствуя повышению эффективности и стабильности энергосистем.

# Список литературы

1. Материалы II Национальной научно-практической конференции СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ, Тюмень, ТИУ, 2023.

2. Артюхов И.И., Пыльская Е.К., Гайнуллин Ш.А., Краснов С.В. Система электроснабжения на основе группы автономно работающих синхронных генераторов // Известия ТулГУ. Технические науки. 2022. №7. С. 488.

3. Аскаров А.Б., Суворов А.А., Андреев М.В., Гусев А.С. К вопросу о современных принципах управления возобновляемыми источниками энергии на основе виртуального синхронного генератора // Вестник ПНИПУ. Электротехника, информационные технологии, системы управления. 2022. №41. С.6-7.

4. Байков Д.В. Имитационное моделирование системы автоматизированного управления синхронным электроприводом на базе матричного преобразователя частоты / Д. В. Байков, А. Ю. Суслин, С. Н. Резепов, И. Д. Храмова // Научно-технический вестник Поволжья. – 2023. – № 5. – С. 182-185.

5. Бердиев, Ш. Типы синхронных генераторов и особенности их установки / Ш. Бердиев, Б. Акыев, Ы. Байрамов // Eo ipso. – 2023. – № 5. – С. 18-21.

6. Бурмистров, А. А. Моделирование внутригруппового движения синхронных генераторов / А. А. Бурмистров, В. А. Хлямков, П. В. Соколов // Электротехника. – 2021. – № 3. – С. 60-65.

7. Гринишена, С. А. Система автоматической синхронизации синхронных генераторов с применением микроконтроллерной системы управления / С. А. Гринишена, А. А. Ким, Д. П. Михайлов // Молодежная школа-семинар по проблемам управления в технических системах имени А.А. Вавилова. – 2021. – Т. 1. – С. 34-36.

8. Гришанов, С. А. Численные методы определения параметров математических моделей синхронных генераторов / С. А. Гришанов, А. М. Ларин, С. А. Зори // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2022. – № 1. – С. 33-45.

9. Жумаев Ж.Ж., Моделирование системы управления генератора со свободным поршнем и запасом мощности в однородных искусственных линиях / Ю. Г. Косолап, М. Н. Лютикова, С. Э. Смагулова // Эксплуатация морского транспорта. – 2023. – № 3(108). – С. 173-180.

10. Коржев А.А., Математическое Моделирование электропривода стартера газотурбинного двигателя со скалярной системой управления / В. А. Сериков, И. А. Гуревич, С. Ду // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2021. – № 5. – С. 482-486.

11. Копылов И.П., Горяинов Ф.А., Клоков Б.К. Проектирование электрических машин: Учеб. пособие для вузов, – 2019. – С.11-21.

12. Вайнштейн Р.А., Математические модели элементов электроэнергетических систем в расчетах установившихся режимов и переходных процессов, Вайнштейн Р.А., Коломиец Н.В., Шестакова В.В., издательство Томского политехнического университета, 2010.

13. Соболь А.Н., Андреева А.А. Области применения и возможность использования автономных асинхронных генераторов в электростанциях на основе возобновляемых источников энергии // The Scientific Heritage. 2021. №58-1. С. 66.

14. Кузнецов Н.В., Леонов Г.А., Андриевский Б.Р. ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ УРАВНЕНИЯ И ПРОЦЕССЫ УПРАВЛЕНИЯ // Электронный журнал. 2018. №4. С. 87-88.

15. Математическое моделирование синхронного двигателя в координатах обобщенного вектора / Б. А. Коробейников, А. М. Оппаходжаев, Д. И. Сидоров, В. В. Голова // Электронный сетевой политематический журнал «Научные труды КубГТУ». – 2021. – № 5. – С. 78-87.

16. Semenova, M. N. Mathematical modeling of physical processes in the crystal structures of metals and alloys / M. N. Semenova, Yu. V. Bebikhov // Journal of Advanced Research in Technical Science. – 2021. – No. 27. – P. 21-23.