

Г.А. Мелешкин, Г.В. Меркурьев

Устойчивость энергосистем
книга 1

Санкт-Петербург
2006

УДК 53
ББК 22.3
П 37

Мелешкин Г.А., Меркурьев Г.В.

Устойчивость энергосистем. Монография. Книга 1: СПб.: НОУ «Центр подготовки кадров энергетики», 2006. – 369 с.

Рассмотрены основные переходные процессы в энергетических системах, отражающие устойчивость работы генераторов и мощных электродвигателей.

Оценка статической и динамической устойчивости генераторов и электродвигателей дана в рамках классической теории устойчивости; колебания роторов синхронных генераторов и электродвигателей рассмотрены с позиции аналитической динамики Лагранжа.

Изложены режимы параллельной работы генераторов, методы их синхронизации, устойчивость параллельной работы и особенности асинхронного режима в энергосистемах. Отдельно рассмотрены режимы пуска, самозапуска электродвигателей от шин трансформаторной подстанции и от генераторов автономной электростанции с учетом влияния напряжения и частоты на переходные процессы.

Большинство рассматриваемых процессов и режимов сопровождаются иллюстрациями, практическими рекомендациями и числовыми примерами расчетов.

Книга предназначена для слушателей учебных центров повышения квалификации, инженеров энергосистем, студентов старших курсов электроэнергетических специальностей, специализирующихся в области устойчивости и переходных процессов в мощных и автономных энергосистемах. При написании книги авторы учитывали требования Госстандарта Высшего профессионального образования по направлению подготовки «электроэнергетика».

УДК 53
ББК 22.3
П 37

Редактор О.В. Колесникова

Утверждено Научно-методическим Советом НОУ «Центр подготовки кадров энергетики» 10.02.2006 г.

ISBN 5-98408-052-4

© Г.А. Мелешкин, Г.В. Меркурьев, 2006
© НОУ «Центр подготовки кадров
энергетики», 2006

**Мелешкин
Георгий Александрович**

Кандидат технических наук,
профессор.

Почетный работник высшего
образования России.

Профессор НОУ «Центр
подготовки кадров энергетики».

Работает в области электромаг-
нитных и электромеханических
переходных процессов
в энергосистемах.

**Меркурьев
Геннадий Васильевич**

Доктор технических наук,
профессор.

Член - корреспондент
Международной энергетической
академии.

Директор НОУ «Центр
подготовки кадров энергетики».

Работает в области оперативно-
диспетчерского управления
энергосистемами.

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ

ЧАСТЬ I. ДВИЖЕНИЕ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

Глава 1. Параметры и характеристики синхронного генератора

- § 1.1. Статические характеристики синхронного генератора; параметры и векторные диаграммы 7
- § 1.2. Динамические свойства синхронного генератора 19

Глава 2. Движение синхронной машины с позиции аналитической динамики

- § 2.1. Основные положения аналитической динамики 28
- § 2.2. Уравнения Парка–Горева 37
- § 2.3. Уравнения движения Лагранжа для синхронной машины, ее кинетическая, потенциальная энергия и диссипативная функция 45

Глава 3. Переходный процесс энергетических двигателей синхронных генераторов

- § 3.1. Переходный процесс паровой турбины 69
- § 3.2. Переходный процесс гидравлической турбины 72
- § 3.3. Переходный процесс газовой турбины 75
- § 3.4. Переходный процесс двигателя внутреннего сгорания – дизеля 84
- § 3.5. Уравнения движения одно- и двухимпульсного автоматического регулятора скорости вращения энергетических двигателей генераторов 93
- § 3.6. Общее уравнение переходного процесса энергетического двигателя генератора с автоматическим регулированием скорости вращения 100

ЧАСТЬ II. УСТОЙЧИВОСТЬ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

Глава 4. Оценка устойчивости – критерии устойчивости

- § 4.1. Общая оценка устойчивости 108
- § 4.2. Критерий устойчивости Рауса 111
- § 4.3. Критерий устойчивости Гурвица 112

§ 4.4. Устойчивость по Ляпунову 114

Глава 5. Колебания ротора синхронного генератора

§ 5.1. Свободные колебания ротора генератора 121

§ 5.2. Вынужденные колебания ротора синхронного генератора 135

§ 5.3. Влияние автоматических регуляторов возбуждения и скорости вращения на колебания ротора синхронного генератора 140

§ 5.4. Оценка колебаний ротора синхронного генератора по теореме устойчивости Рауса 157

Глава 6. Параллельная работа синхронных генераторов

§ 6.1. Способы включения генераторов на параллельную работу 165

§ 6.2. Распределение нагрузки по генераторам при параллельной работе 172

§ 6.3. Синхронизм генераторов 181

§ 6.4. Синхронизация генераторов 191

§ 6.5. Устойчивость движения генераторов при параллельной работе 201

§ 6.6. Синхронизация энергосистем 210

ЧАСТЬ III. СТАТИЧЕСКАЯ И ДИНАМИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ ЭНЕРГОСИСТЕМ

Глава 7. Статическая устойчивость энергосистем

§ 7.1. Статическая устойчивость генератора 216

§ 7.2. Статическая устойчивость синхронного электродвигателя 222

§ 7.3. Статическая устойчивость асинхронного электродвигателя 226

Глава 8. Динамическая устойчивость энергосистем

§ 8.1. Динамическая устойчивость синхронного генератора при отключении линии электропередачи 232

§ 8.2. Динамическая устойчивость генератора при коротком замыкании на линии 241

§ 8.3. Средства улучшения динамической устойчивости генератора 253

Глава 9. Асинхронный режим в энергосистеме

§ 9.1. Характеристика асинхронного режима 269

§ 9.2. Причины возникновения асинхронного хода возбужденного генератора	273
§ 9.3. Асинхронный ход возбужденного генератора	276
§ 9.4. Асинхронный режим невозбужденного генератора	281
§ 9.5. Способы выявления асинхронного режима	285
§ 9.6. Автоматика прекращения асинхронного хода в энергосистеме	288

Глава 10. Динамическая устойчивость мощных электродвигателей

§ 10.1. Динамическая устойчивость синхронного электродвигателя	290
§ 10.2. Динамическая устойчивость асинхронного электродвигателя	298
§ 10.3. Устойчивость синхронного и асинхронного электродвигателя при работе с поршневым компрессором	303

ЧАСТЬ IV. РЕЖИМЫ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ В АВТОНОМНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

Глава 11. Режимы работы синхронного генератора

§ 11.1. Характеристика режимов синхронного генератора при пуске от него асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором	313
§ 11.2. Параметры асинхронного электродвигателя, определяющие переходный процесс синхронного генератора	317
§ 11.3. Переходный процесс синхронного генератора при пуске асинхронного электродвигателя	322
§ 11.4. Оценка предельных отклонений напряжений и частоты синхронного генератора при пуске асинхронного электродвигателя	328

Глава 12. Устойчивость электропривода при провале напряжения и снижении частоты

§ 12.1. Разбег, затормаживания и самозапуск асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором	336
§ 12.2. Критерии устойчивости асинхронных электроприводов при провале напряжения и частоты	353

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	361
--------------------------	-----

ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящая монография посвящена вопросам устойчивости энергосистем.

В монографии основной для рассмотрения и исследования вопросов устойчивости и переходных процессов в главных элементах энергосистем – синхронных генераторах – принято основное уравнение движения аналитической динамики – уравнение J.L. Lagrange'a*. Известно, что впервые это уравнение применил С. Maxwell в своем трактате об электричестве и магнетизме к исследованию системы индуктивно – или кондуктивно связанных контуров с током**.

Уравнение движения J.L. Lagrange'a, примененное для электрической части синхронной машины, будет адекватно уравнениям равновесия электродвижущих сил в пяти контурах машины: в трех обмотках статора, в обмотке ротора и в демпферной обмотке.

Эти уравнения на основе теории двух реакций синхронной машины А. Blondel'a преобразуются в известные уравнения R.H. Park'a – А.А. Горева [1, 2].

В этой монографии уравнение движения J.L. Lagrange'a применяется ко всему синхронному агрегату с отражением его кинетической, потенциальной энергии и диссипативной функции в виде механического аналога, что позволяет наиболее просто представить физическую картину движения агрегата при различных условиях его работы. Однако применение уравнения J.L. Lagrange'a для описания движения генераторного агрегата ограничивается здесь размерами электромеханической системы, отвечающей условию голономности.

* J.L. Lagrange. *Mecanique Analytique*, 1788.

** С. Maxwell. *A. Treatise on electricity and magnetism*, 1873.

Авторы, объясняя сложные переходные процессы, происходящие в синхронной машине, опираются главным образом на физическое представление процессов, не перегружая изложение математическими выкладками, давая их лишь в той мере, в какой они необходимы для количественного анализа явлений и проведения практических расчетов.

В монографии применяется такой математический аппарат, который является средством для решения практических задач по устойчивости и переходным процессам в энергетических системах и в их элементах. Авторы разделяют точку зрения академика А.Н. Крылова.

«В математике для инженеров важно отсутствие той излишней щепетильности и строгости, которые не поясняют решения задачи, а затемняют ее, и которые необходимы лишь для математиков, изучающих математику как безукоризненную область логики, а не как орудие для практических приложений ... вычисление должно производиться с той степенью точности, которая необходима для практики»*.

При описании переходных процессов в синхронном генераторе авторы опирались на первые опубликованные научные работы, Р.Н. Park'a [1], А.А. Горева [2], Р.А. Лютера [5].

В книге рассмотрены режимы работы энергетического двигателя генератора с учетом регулирования скорости вращения. Единой монографии, в которой было бы обобщение режимов работы различных типов двигателей: паровой и газовой турбин, гидравлической турбины и двигателя внутреннего сгорания – отыскать не удалось. Поэтому в книге, на основе опубликованных результатов исследований режимов указанных двигателей И.И. Кириллова [17], Н.К. Баркова [22], А.М. Каца [23], производится обобщение механических переходных процессов в них с учетом действия автоматических регуляторов скорости; вопросы внутренних явлениях в двигателях, связанных с термодинамическими процессами, не рассматриваются.

Статическая и динамическая устойчивость движения синхронных генераторов в энергосистемах изложена в классической форме, опубликованной в работах С.А. Лебедева [3], И.Н. Щедрина [4], П.С. Жданова [28]. Также рассмотрены вопросы статической и динамической устойчивости мощных синхронных и асинхронных электродвигателей на основе результатов И.А. Сыромятникова [31].

Авторы считают, что наиболее эффективными критериями для анализа устойчивости в энергосистемах являются критерии Routh'a [6], А.М. Ляпунова [7] и Hurwitz'a [8], основы которых изложены в этой книге.

* Крылов А.Н. «Воспоминания и очерки». АН СССР М. 1956.

В последней части книги рассматриваются режимы и вопросы устойчивости синхронных генераторных агрегатов и асинхронных электроприводов в автономных электростанциях.

Причем, под автономными электростанциями авторы понимают не только электростанции типа судовых энергетических установок, но и отделившиеся в результате возникновения аварийных ситуаций электростанции энергосистем со своими потребителями.

Книга содержит иллюстрации и числовые примеры, облегчающие читателю понять теоретическую сущность описываемых процессов и особенности практических методов расчета.

При написании монографии авторы опирались на свой многолетний опыт по исследованию режимов и переходных процессов в энергетических системах.

Монография обращена к читателю-энергетику, который должен получить физическое представление о поведении синхронного агрегата и электрических машин в энергосистеме; для него не имеют значения, ни вопросы расчета машин, ни вопросы их изготовления – он не работает за конструкторским столом, а обеспечивает эксплуатационные режимы машин в энергосистеме.

Современные методы расчета установившихся режимов и статической и динамической устойчивости энергосистем изложены во второй части монографии: Меркурьев Г.В., Шаргин Ю.М. Устойчивость энергосистем, ч.2, 2006.

Все замечания и пожелания по книге просим направлять по адресу: 194223, Санкт-Петербург, а/я 44.