

Федеральное агентство по образованию  
Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования  
«Тюменский государственный нефтегазовый университет»

С. И. Кицис

# **РАСЧЕТЫ ХАРАКТЕРИСТИК АСИНХРОННЫХ САМОВОЗБУЖДАЮЩИХСЯ ГЕНЕРАТОРОВ**

*Допущено УМО по образованию в области энергетики и электротехники  
в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений,  
обучающихся по специальности 140211 «Электроснабжение»,  
направления подготовки 140200 «Электроэнергетика»*

Тюмень  
ТюмГНГУ  
2009

УДК 621.313.332-021.57(075.8)  
ББК 31.261.1  
К 38

Рецензенты:

профессор, доктор технических наук О. В. Смирнов  
доцент, кандидат технических наук Д. М. Червяков

**Кицис, С. И.**

К 38      Расчеты характеристик асинхронных самовозбуждающихся генераторов [Текст] : учебное пособие / С. И. Кицис. – Тюмень : ТюмГНГУ, 2009. – 276 с.  
ISBN 978-5-9961-0167-2

В учебном пособии освещаются методы расчета стационарных и нестационарных электромагнитных процессов в асинхронных самовозбуждающихся генераторах (АСГ). Рассмотрены вопросы синтеза АСГ по потребной величине генерируемого напряжения при использовании серийных машин. Приведены примеры расчета различных характеристик АСГ. Отмечены особенности конструирования. Указаны многочисленные области возможного применения АСГ, в т.ч. в нефтяной, лесной и сельскохозяйственной отраслях.

Пособие предназначено для студентов, специализирующихся в области автономных источников питания, электропривода, автоматизации и датчиков, будет полезно для инженеров, работающих в указанных областях техники.

УДК 621.313.332-021.57(075.8)  
ББК 31.261.1

ISBN 978-5-9961-0167-2

© Государственное образовательное  
учреждение высшего  
профессионального образования  
«Тюменский государственный  
нефтегазовый университет», 2009

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>Предисловие</b> .....	7
<b>Введение</b> .....	8
<b>Глава первая. Области применения асинхронных самовозбуждающихся генераторов</b> .....	10
1.1. Традиционные области практического применения АСГ....	10
1.2. Перспективные области новых технических применений АСГ.....	11
1.3. Новые области использования АСГ.....	12
1.3.1. Датчики первичной технологической информации на основе асинхронных самовозбуждающихся микрогенераторов.....	12
1.3.2. Скважинные генераторы электрической энергии на основе АСГ.....	14
1.4. Новые технические комплексы с АСГ.....	17
1.5. Устройства и схемы автоматического регулирования и стабилизации напряжения и частоты АСГ.....	26
<i>Выводы</i> .....	29
<b>Глава вторая. Расчет магнитной цепи асинхронного самовозбуждающегося генератора</b> .....	30
2.1. Общие замечания .....	30
2.2. Аналитический расчет зубцовых МДС.....	32
2.3. Аналитический расчет магнитной характеристики машины	43
2.4. Комплексное сопротивление магнитопровода асинхронной машины с конденсаторным возбуждением.....	48
2.5. Расчет сопротивления взаимной индукции асинхронного генератора по простейшим экспериментальным данным....	50
<i>Выводы</i> .....	54
<b>Глава третья. Расчет стационарных электромагнитных процессов в асинхронном самовозбуждающемся генераторе</b> .....	56
3.1. Общие замечания .....	56
3.2. Аналитический расчет характеристик АСГ в режиме установившегося торможения без нагрузочных сопротивлений	58
3.3. Расчет стационарных режимов асинхронной машины при самовозбуждении с учетом потерь в стали.....	69
3.4. Влияние схемы соединения фаз АСГ на его выходное напряжение .....	83
3.5. Расчет стационарных электромагнитных процессов в АСГ с учетом влияния нагрузки.....	90

3.6. Расчет режима конденсаторного торможения асинхронной машины с нагрузочным сопротивлением, включенным через выпрямительный блок.....	97
3.7. Расчет стационарных режимов АСГ со стабилизирующей подмагничивающей обмоткой.....	106
<i>Выводы</i> .....	125
<b>Глава четвертая. Расчет регулировочных свойств асинхронного самовозбуждающегося генератора .....</b>	<b>127</b>
4.1. Общие замечания.....	127
4.2. Расчет емкости возбуждения асинхронного генератора по требуемой величине генерируемого напряжения.....	129
4.3. Исследование регулировочных свойств АСГ. Расчет емкости при заданной нагрузке АСГ.....	134
4.4. О возможности расчета электрической емкости возбуждения асинхронной машины по требуемой величине тормозного момента .....	144
4.5. Скольжение в асинхронной машине при самовозбуждении. Геометрическое место режимов установившегося самовозбуждения насыщенной асинхронной машины на плоскости $x_c — r_I$ .....	148
<i>Выводы</i> .....	151
<b>Глава пятая. Расчет переходных процессов емкостного самовозбуждения асинхронного генератора.....</b>	<b>153</b>
5.1. Общие замечания.....	153
5.2. Характеристика переходных процессов установления колебаний при самовозбуждении асинхронной машины, их математическое описание.....	154
5.3. Эквивалентная схема асинхронной машины в переходном процессе самовозбуждения на холостом ходу и ее связь с известной статической схемой. Полные переходные сопротивления цепей машины при самовозбуждении.....	156
5.4. Расчет показателя нарастания, угловой частоты и амплитуды свободных колебаний в переходном процессе установления.....	162
5.5. Расчет времени самовозбуждения машины.....	168
5.6. Расчет огибающей колебаний. Метод подкасательной.....	168
5.7. Метод обобщенной оценки качества переходных процессов самовозбуждения.....	172
5.8. Уравнения процессов емкостного самовозбуждения асинхронного генератора под нагрузкой.....	173

5.9. Построение динамических эквивалентных схем нагруженного асинхронного генератора в переходном про- цессе самовозбуждения. Переходные сопротивления цепей нагрузки при самовозбуждении асинхронной машины .....	176
5.10. Методика решения нелинейной системы уравнений само- возбуждения нагруженного асинхронного генератора.....	178
5.11. Расчет показателя нарастания и угловой частоты свободных колебаний с учетом влияния нагрузки.....	183
5.12. Сопротивление взаимной индукции асинхронной машины в переходном процессе самовозбуждения под нагрузкой.....	186
5.13. Аналитические последовательности расчета переходного процесса в статоре.....	188
5.14. Динамическая векторная диаграмма. Интегральная динамическая векторная характеристика асинхронной машины в переходном процессе самовозбуждения.....	189
5.15. Детерминированные соотношения между переходными токами в цепях нагруженного асинхронного генератора при самовозбуждении.....	191
5.16. Расчет переходных токов в цепях ротора намагничивания, возбуждения и нагрузки.....	193
5.17. Расчет влияния возбуждающей емкости и скорости вращения ротора на качество процессов самовозбуждения	198
5.18. Расчет влияния активных сопротивлений на качество процессов самовозбуждения.....	206
<i>Выводы</i> .....	213
<b>Глава шестая. Расчет переходных процессов в асинхронном самовозбуждающемся генераторе при внезап- ном трехфазном коротком замыкании.....</b>	<b>215</b>
6.1. Общие замечания.....	215
6.2. Уравнения переходных процессов и их решение.....	216
6.3. Законы коммутации в комплексной форме.....	220
6.4. Аналитическое установление связи между амплитудой электрических колебаний в машине и ее магнитным состоянием .....	222
6.5. Показатели затухания и угловые частоты составляющих токов короткого замыкания.....	223
6.6. Расчет комплексных постоянных интегрирования.....	224
6.7. Определение физических начальных условий при внезап- ном трехфазном коротком замыкании.....	228

6.8. Расчет реальных токов в фазах обмоток, углового положения изображающих векторов (амплитуд) линейных нагрузок электромагнитного момента в переходном процессе....	232
6.9. Алгоритм расчета переходного процесса.....	236
<i>Выводы</i> .....	240

<b>Глава седьмая. Расчет переходных процессов сброса нагрузки и самовозбуждения асинхронного генератора при незатухшем магнитном поле.....</b>	<b>242</b>
7.1. Общие замечания.....	242
7.2. Математическое описание и исследование режима.....	242
7.3. Расчет комплексных постоянных интегрирования.....	247
7.4. Расчет физических начальных условий.....	252
7.4.1. Расчет начальных значений первых и вторых производных комплексов токов статора и ротора.....	252
7.4.2. Расчет начальных значений сопротивления взаимной индукции машины, изображающих комплексов токов статора, ротора, намагничивания, возбуждения и напряжения на емкости.....	254
7.5. Показатели нарастания (затухания) и угловые частоты составляющих переходного процесса.....	257
7.6. Переходные токи и электромагнитный момент.....	261
7.7. Алгоритм расчета переходного процесса.....	264
7.8. Общий метод расчетно-теоретического исследования переходных процессов в АСГ.....	271
<i>Выводы</i> .....	271
<b>Список литературы</b> .....	<b>273</b>

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Асинхронные самовозбуждающиеся генераторы (АСГ) находят широкое применение в промышленности, в основном как автономные источники электропитания. Основные области использования АСГ: электроагрегаты и системы электроснабжения передвижных объектов, ветро- и гидроэнергетика малой мощности, автономные источники электропитания передвижных маломощных потребителей повышенной частоты (ручной инструмент и др.), высокоскоростные источники электропитания, асинхронные стартер-генераторы с газотурбинным приводом и др.

Круг пользователей АСГ непрерывно расширяется. С одной стороны это объясняется тем, что АСГ легко реализуется на основе наиболее массовой асинхронной машины, обладающей известными достоинствами, а с другой — широкими и, главное, разнообразными возможностями эффективного практического применения АСГ на основе использования особых свойств этих машин. Возможности эти все еще недостаточно известны широкому кругу специалистов.

В ранее опубликованных книгах по данной теме переходные процессы в АСГ не анализируются, между тем некоторые из них, например процессы самовозбуждения, могут быть рабочими режимами (в импульсных системах электроснабжения и т. д.). Теория же и методы расчета установившихся режимов АСГ излагаются на основе использования круговой диаграммы проводимостей. Последняя может быть построена только в предположении постоянства частоты тока. Между тем АСГ, именуемый иногда асинхронным генератором с конденсаторным возбуждением, представляет собой резонансную систему, которая генерирует свободные электрические колебания. Частота этих колебаний зависит от нагрузки и может изменяться относительно электрической частоты генератора на холостом ходу, даже при условии постоянства частоты вращения ротора, на 10—14 %, не говоря уже о тех случаях, когда данный генераторный режим используется для торможения асинхронного электропривода.

Предлагаемая книга, написанная, за исключением § 1.5, по материалам работ автора, представляет собой первое систематическое изложение методов расчета характеристик АСГ.

С учетом перспектив существенного расширения практического применения АСГ, а также использования новых принципов и идей расчета всевозможных характеристик электрической машины переменного тока посо-

бие должно представить значительный интерес для студентов, аспирантов и инженеров, специализирующихся в области автономных электромашинных генераторов, электропривода, автоматизации и датчиков.

## ВВЕДЕНИЕ

Создание высококачественных малогабаритных металлобумажных, и особенно пленочных, конденсаторов, высокое развитие техники регулирования на основе использования микропроцессорных, микроэлектронных и оптронных элементов предоставляют широкие возможности для практического использования простых, высоконадежных и технологичных асинхронных машин при емкостном самовозбуждении (которое, как известно, возможно только в генераторном режиме). Этому способствует также развитие теории АСГ, особенно в аналитической форме, так как именно описание машины в виде последовательности математических формул требуется для программирования микропроцессора и наиболее удобно для обеспечения автоматизации регулирования и стабилизации выходных параметров генератора и оптимизации его проектирования с помощью ЭВМ. Способствует этому также повышение интенсивности изобретательской работы в направлении поиска эффективных технических применений этих машин при решении крупных практических задач. АСГ обладают рядом особых свойств, которые отличают их от других типов машин, используемых в генераторном режиме: простота конструкции, высокая надежность, прочность и устойчивость к центробежным нагрузкам, отсутствие электрических контактов, наилучшие удельные массогабаритные и стоимостные показатели, возможность получения минимальных соотношений между радиальными и аксиальными габаритными размерами, наличие верхней и нижней критических скоростей возбуждения, а также минимальной и максимальной емкости возбуждения и т. д. На основе использования этих свойств могут быть решены важные народнохозяйственные задачи совершенствования и автоматизации многих технологических процессов в промышленности.

В книге рассмотрены следующие вопросы:

- расчет магнитной цепи АСГ в целях установления детальных аналитических зависимостей между конструктивными и обмоточными параметрами машины и ее магнитными и электрическими характеристиками;
- общая аналитическая теория стационарных электромагнитных процессов и реализация ее в виде общих решений, алгоритмов и формул, позволяющих рассчитывать всевозможные показатели и характеристики установившихся режимов с учетом влияния всех основных факторов и параметров исследуемой нелинейной системы (схемы соединения фаз машины,



конденсаторов и элементов нагрузки, потерь в стали, насыщения, изменения частоты свободных колебаний и параметров машины);

- расчеты конкретных схем АСГ, в частности под разнотипной симметричной нагрузкой, с дополнительной стабилизирующей тороидальной обмоткой на спинке статора, включенной в обратную связь по выходному напряжению с учетом выпрямительного преобразователя и т. п.;

- расчеты регулировочных свойств машины при самовозбуждении и получение исчерпывающей информации об этих свойствах путем реализации аналитических последовательностей расчета регулировочных поверхностей (профилей) при условиях как постоянной частоты колебаний и переменной скорости ротора, так и постоянной скорости и переменной частоты;

- общий расчетно-теоретический метод исследования, позволяющий осуществлять всесторонний анализ всех основных показателей качества любого электромагнитного процесса в функции параметров и схемы соединения элементов генератора, конденсаторов, нагрузки;

- расчеты переходных процессов в генераторе и получение конкретных формул для расчета изменяющихся в ходе процесса показателей качества, включая показатели затухания (нарастания), угловые частоты и переходные амплитуды и фазы отдельных составляющих переходного процесса, модули и аргументы (фазы) составляющих и результирующих изображающих векторов, переходные значения реальных токов в фазах обмоток, переходные значения электромагнитного момента и потокосцеплений обмоток, продолжительность процесса и т. п.