

УДК 621.311.018.782.3(075.8)

Д 64

Рецензенты:

д-р техн. наук, доцент *В.М. Левин*

канд. техн. наук, доцент *Н.А. Стрельников*

Работа подготовлена на кафедре АЭЭС

**Долгов А.П.**

Д 64

Переходные электромеханические процессы электрических систем : учебное пособие / А.П. Долгов. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2019. – 236 с.

ISBN 978-5-7782-3837-4

Рассмотрены вопросы параллельной работы электрических систем. Дано описание некоторых крупных системных аварий. Отражены особенности протекания электромеханического переходного процесса в электроэнергетической системе. Разобраны угловые характеристики мощности генераторов, статические характеристики асинхронных двигателей и комплексной нагрузки. Изложены основные методы анализа устойчивости электроэнергетических систем. Рассмотрен асинхронный режим. Даны сведения по противоаварийной автоматике, применяемой в современных условиях. Приведены уравнения Парка–Горева, отмечено их место в расчете электромеханических переходных процессов синхронных и асинхронных машин. Рассмотрены вопросы самозапуска синхронных и асинхронных двигателей. Материал сопровождается примерами и контрольными вопросами.

Учебное пособие отвечает требованиям Государственного образовательного стандарта высшего профессионального образования по подготовке бакалавров для направления 13.03.02 – «Электроэнергетика и электротехника» и магистров для направления 13.04.02 – «Электроэнергетика и электротехника». Пособие может быть полезно также аспирантам.

УДК 621.311.018.782.3(075.8)

**Долгов Александр Павлович**

## **ПЕРЕХОДНЫЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

**Учебное пособие**

Редактор *И.Л. Кескевич*

Выпускающий редактор *И.П. Брованова*

Корректор *И.Е. Семенова*

Дизайн обложки *А.В. Ладыжская*

Компьютерная верстка *С.И. Ткачева*

Налоговая льгота – Общероссийский классификатор продукции

Издание соответствует коду 95 3000 ОК 005-93 (ОКП)

---

Подписано в печать 19.03.2019. Формат 60 × 84 1/16. Бумага офсетная. Тираж 200 экз.

Уч.-изд. л. 13,71. Печ. л. 14,75. Изд. № 243/18. Заказ № 608. Цена договорная

---

Отпечатано в типографии

Новосибирского государственного технического университета

630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20

**ISBN 978-5-7782-3837-4**

© Долгов А.П., 2019

© Новосибирский государственный  
технический университет, 2019

## Оглавление

Предисловие .....	6
1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ .....	7
1.1. Проблема устойчивости .....	7
1.2. Переходный электромеханический процесс электроэнергетической системы .....	9
1.3. Условия существования послеаварийного установившегося режима .....	10
1.4. Нелинейности в электрических системах .....	13
1.5. Нормативные положения по устойчивости .....	14
1.6. Аварии в электроэнергетических системах .....	17
1.7. Назначение расчетов устойчивости .....	29
1.8. Математические модели основных элементов ЭЭС в расчетах устойчивости .....	30
Контрольные вопросы .....	32
2. СТАТИЧЕСКИЕ РЕЖИМЫ .....	33
2.1. Статистические характеристики турбоагрегата по частоте .....	34
2.2. Угловые характеристики мощности .....	36
2.2.1. Схема электропередачи .....	36
2.2.2. Векторная диаграмма электропередачи с неявнополюсным генератором .....	38
2.2.3. Векторная диаграмма электропередачи с явнополюсным генератором .....	40
2.2.4. Применение векторных диаграмм в анализе электромеханических переходных процессов .....	42
2.2.5. Мощность синхронной машины .....	43
2.2.5.1. Мощность электропередачи с неявнополюсной машиной .....	44
2.2.5.2. Мощность электропередачи с явнополюсной машиной .....	52
2.2.6. Угловые характеристики мощности в многомашинной системе .....	55
2.2.7. Представление о статической устойчивости электрической системы .....	63
2.3. Статические характеристики и устойчивость нагрузки .....	66
2.3.1. Статические характеристики нагрузки, представленной постоянным сопротивлением .....	66
2.3.2. Статические характеристики асинхронного двигателя .....	68
2.3.2.1. Активная мощность асинхронного двигателя .....	68
2.3.2.2. Активная мощность асинхронного двигателя с учетом внешнего сопротивления .....	72
2.3.2.3. Реактивная мощность асинхронного двигателя .....	73
2.3.3. Статические характеристики ламп накаливания .....	74
2.3.4. Статические характеристики комплексной нагрузки .....	75

2.3.5. Вторичные признаки устойчивости нагрузки .....	77
2.3.6. Применение критерия $dE/dU$ .....	78
Контрольные вопросы .....	80
3. ДИНАМИЧЕСКИЕ РЕЖИМЫ .....	81
3.1. Уравнение движения ротора .....	82
3.2. Виды записи уравнения движения ротора .....	86
3.3. Применение принципа постоянства потокоцепления обмотки возбуждения в расчетах динамической устойчивости .....	88
3.4. Динамическая устойчивость простейшей системы .....	91
3.5. Асинхронный режим .....	94
3.5.1. Процесс выпадения из синхронизма .....	94
3.5.2. Особенности асинхронного режима .....	96
3.5.3. Влияние асинхронного режима на генератор .....	99
3.5.4. Влияние асинхронного режима на систему .....	99
3.5.5. Прекращение асинхронного режима .....	100
Контрольные вопросы .....	103
4. МЕТОДЫ АНАЛИЗА УСТОЙЧИВОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ .....	104
4.1. Анализ устойчивости методом малых колебаний .....	104
4.2. Анализ устойчивости методом фазовой плоскости .....	116
4.3. Численное интегрирование дифференциальных уравнений .....	125
4.3.1. Метод последовательных интервалов .....	126
4.4. Анализ динамической устойчивости методом площадей .....	132
4.5. Критерии статической устойчивости .....	138
Контрольные вопросы .....	140
5. ПРОТИВОАВАРИЙНАЯ АВТОМАТИКА .....	142
5.1. Автоматика повторного включения .....	143
5.2. Автоматика предотвращения нарушения устойчивости (АПНУ) .....	145
5.2.1. Влияние регуляторов возбуждения на устойчивость ЭЭС .....	146
5.2.2. Повышение пропускной способности линий электропередачи .....	150
5.2.3. Разгрузка электропередачи при увеличении передаваемой мощности до критического значения .....	151
5.2.4. Влияние импульсной разгрузки турбин на динамическую устойчивость .....	151
5.2.5. Влияние электрического торможения (ЭТ) на динамическую устойчивость .....	152
5.2.6. Влияние отключения части генераторов на динамическую устойчивость .....	153
5.2.7. Изменение угла $\delta$ сдвига фаз напряжений по концам линии (фазовое управление) .....	154
5.3. Автоматика ликвидации асинхронного режима (АЛАР) .....	156
5.4. Автоматика предотвращения недопустимых изменений режимных параметров .....	157

5.4.1. Автоматика противоаварийных отключений и включений по изменению напряжения .....	157
5.4.1.1. Автоматика ограничения снижений напряжения (АОСН).....	157
5.4.1.2. Автоматика ограничения повышений напряжения (АОПН).....	158
5.4.2. Автоматика частотной разгрузки и частотного повторного включения (АЧР и ЧАПВ) .....	158
5.4.3. Автоматика управления синхронными генераторами при изменениях частоты .....	160
5.4.3.1. Автоматика отключения синхронных генераторов .....	160
5.4.3.2. Автоматика частотного пуска и загрузки гидрогенераторов...	161
5.5. Автоматический ввод резервного питания (АВР) .....	161
5.6. Факторы, влияющие на устойчивость .....	162
Контрольные вопросы .....	165
6. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИНХРОННЫХ И АСИНХРОННЫХ МАШИН. ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ УРАВНЕНИЙ ПАРКА–ГОРЕВА .....	167
6.1. Уравнения переходного процесса синхронной машины .....	167
6.2. Уравнения переходного процесса асинхронного двигателя.....	173
6.3. Схема замещения асинхронного двигателя.....	175
6.4. Самозапуск двигателей .....	187
6.4.1. Уравнение движения агрегата двигатель–механизм .....	188
6.4.2. Моменты сопротивления механизмов .....	189
6.4.3. Изменение угловой скорости при свободном выбеге двигателя.....	190
6.4.4. Напряжение на зажимах синхронного двигателя при свободном выбеге .....	193
6.4.5. Напряжение на зажимах асинхронного двигателя при свободном выбеге.....	197
6.4.6. Разгон двигателей при самозапуске.....	201
6.4.6.1. Разгон асинхронного двигателя.....	201
6.4.6.2. Разгон синхронного двигателя .....	204
6.4.6.3. Некоторые способы ресинхронизации синхронного двигателя.....	206
Контрольные вопросы .....	220
Библиографический список.....	221
Приложения .....	224