СЕВЕРО-ЗАПАДНЫЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЗАОЧНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

НАДЕЖНОСТЬ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС

Санкт-Петербург
2010

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования
«СЕВЕРО-ЗАПАДНЫЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЗАОЧНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра электроснабжения

НАДЕЖНОСТЬ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС

Энергетический институт
Специальность
140211.65 - электроснабжение

Санкт-Петербург
Издательство СЗТУ
2010

Утверждено редакционно-издательским советом университета

УДК 621.3(075)

Надежность электроснабжения: учебно-методический комплекс / сост.: Г.З. Зайцев, Т.Е. Минакова, А.В. Сливкин. – СПб.: Изд-во СЗТУ, 2010. - 117 с.

Учебно-методический комплекс разработан в соответствии с государственным образовательным стандартом высшего профессионального образования.

Содержание дисциплины включает в себя основные сведения о надежности электрооборудования и систем электроснабжения.

Рассмотрено на заседании кафедры электроснабжения 28.12.2009 г., одобрено методической комиссией Энергетического института 29.12.2009 г.

Рецензенты: кафедра электроснабжения СЗТУ (зам. зав. кафедрой В.Н. Костин, канд. техн. наук, проф.); В.Л. Беляев, д-р техн. наук, проф. кафедры электротехники и электромеханики СЗТУ.

Составители: Г.З. Зайцев, канд. техн. наук, проф;
Т.Е. Минакова, канд. техн. наук, доц;
А. В. Сливкин, ст. преподаватель.

© Северо-Западный государственный заочный технический университет, 2010
© Зайцев Г.З., Минакова Т.Е., Сливкин А.В., 2010

1. Информация о дисциплине

1.1. Предисловие

Дисциплина «Надежность электроснабжения» (СД.04) изучается студентами специальности 140211.65 всех форм обучения в одном семестре.

Дисциплина включает следующие разделы: задачи и исходные положения оценки надежности; факторы, нарушающие надежность системы и их математические описания; математические модели и количественные описания, математические модели и количественные расчеты надежности систем; технико-экономическая оценка недоотпуска электроэнергии и эффективности надежного электроснабжения.

Целью изучения дисциплины является ознакомление студентов с основными понятиями и определениями из теории надежности, показателями надежности систем электроснабжения и их элементов, понятием об оптимальной надежности и принципами нормирования надежности, понятием об ущербе от перерыва электроснабжения, а также с математическими моделями надежности систем электроснабжения и методами их исследования.

В результате изучения дисциплины студент должен овладеть основами знаний по дисциплине, формируемыми на нескольких уровнях:

иметь представление об оценке и выборе с точки зрения надежности электроснабжения различных схем электроснабжения промышленных предприятий и электроустановок;

знать факторы, определяющие надежность электроснабжения; основные показатели надежности систем электроснабжения; методы расчета надежности и ущерба от недоотпуска электроэнергии;

уметь определить основные показатели надежности системы электроснабжения, определить рациональный метод для расчета надежности систем электроснабжения;

владеть методами расчета надежности систем электроснабжения, недоотпуска электрической энергии и расчета ущерба от ненадежности объекта энергетики.

Место дисциплины в учебном процессе. Теоретической и практической основами изучаемой дисциплины являются знания, полученные при изучении таких дисциплин, как «Математика», «Теоретические основы электротехники», «Электроэнергетика», «Системы электроснабжения» и «Электропитающие системы и электрические сети». Приобретенные знания будут использованы в дипломном проектировании и дальнейшей производственной деятельности.

1.2. Содержание дисциплины и виды учебной работы

1.2.1. Содержание дисциплины по ГОС

Задачи и исходные положения оценки надежности; факторы, нарушающие надежность системы и их математические описания; математические модели и количественные описания; математические модели и количественные расчеты надежности систем; технико-экономическая оценка недоотпуска электроэнергии и эффективности надежного электроснабжения.

1.2.2. Объем дисциплины и виды учебной работы

Вид учебной работы	Всего часов		
	Форма обучения		
	Очная	Очно-заочная	Заочная
Общая трудоемкость дисциплины (ОТД)	100		
Работа под руководством преподавателя (включая ДОТ)	60	60	60
В т.ч. аудиторные занятия: лекции, практические занятия (ПЗ), лабораторные работы (ЛР)	 34 16 -	 18 8 -	 8 4 -
Самостоятельная работа студента (СР)	40	40	40
Промежуточный контроль, количество, контрольные работы	4	5 1	5 1
Вид итогового контроля	Экзамен		

1.2.3. Перечень видов практических занятий и контроля:

- одна контрольная работа (для очно-заочной и заочной форм обучения);
- практические занятия;
- тесты по разделам дисциплины;
- экзамен.

2. Рабочие учебные материалы

2.1. Рабочая программа (100 часов)

Введение (2 часа)

[1], с. 3, [2] с. 5-7, [5] с. 8-10

Экономическое значение проблемы обеспечения надежного электроснабжения промышленных потребителей электроэнергии. Краткий исторический обзор развития теории надежности.

Раздел 1. Задачи и исходные положения оценки надежности (20 часов)

1.1. Основные положения теории надежности систем электроснабжения

[1], с. 3...6; [2], с. 5...52; [3], с. 3...12; [5], с. 14...52

Применение основных положений и методов теории надежности к электроэнергетическим системам и системам электроснабжения потребителей. Общее определение надежности объекта. Понятие о надежности системы электроснабжения промышленного предприятия. Безотказность, ремонтопригодность, долговечность и сохраняемость – свойства, определяющие надежность объекта; их определения. Восстанавливаемые и невосстанавливаемые объекты. Восстановление работоспособности системы электроснабжения.

Понятие о показателях надежности – единичных, комплексных, первичных, вторичных.

Понятие о нормировании надежности. Прямое и опосредствованное нормирование. Нормирование надежности в «Правилах устройства электроустановок». Нормирование надежности на основе предварительного технико-экономического анализа схем.

Последствия перерывов электроснабжения и их технико-экономическая оценка. Прямой и дополнительный ущербы. Дополнительные ущербы, вызванные некомпенсированным недовыпуском продукции, компенсация недовыпуска путем организации сверхурочных работ и путем форсированной работы технологического оборудования.

1.2. Показатели надежности систем электроснабжения

[1], с. 7...10; [2], с. 52...72; [3], с. 3...12 [5], с. 14,..52

Показатели надежности элементов системы электроснабжения: параметр потока отказов, среднее время восстановления, наработка между отказами, вероятность безотказной работы, вероятность отказа, параметр потока восстановления, коэффициенты готовности и простоя, коэффициент аварийности (опасность отказов).

Показатели плановых ремонтов элементов систем электроснабжения: периодичность проведения, ремонтопригодность, коэффициент простоя в плановых ремонтах.

Понятие о расчетных отказах систем электроснабжения. Расчетные отказы кратковременные, средней продолжительности и продолжительные.

Показатели надежности систем электроснабжения (для отказов любой продолжительности): параметр потока отказов, средняя продолжительность восстановления, вероятность возникновения отказа работоспособности, недоотпуск электроэнергии, ущерб от перерыва питания.

Применение показателей надежности при анализе и выборе вариантов систем электроснабжения. Понятие об оптимальной надежности.

Раздел 2. Факторы, нарушающие надежность системы, и их математические описания (26 часов)

2.1. Допущения и особенности режимов работы систем электроснабжения

[1], с. 9...17; [3], с. 14...23; [4], с. 36...50

Описания процессов функционирования элементов системы электроснабжения (СЭС) и СЭС в целом, факторы и особенности режимов работы, допущения, учитываемые в математической модели надежности элемента и СЭС.

Совокупность математических моделей надежности элементов и СЭС, используемых на практике, их сходство и отличие.

Способы представления математических моделей: словесный, графический, аналитический.

2.2. Факторы, влияющие на надежность систем электроснабжения

[1], с. 17..37; [3], с. 23..31; [4], с. 36..50

Три направления в решении задачи математических моделей надежности: поиск приближенных решений с последующей проверкой их более мощными средствами; получение точных решений с последующим их упрощением; нахождение решений с регламентируемой степенью точности. Преимущества и недостатки направлений.

Методы, определяющие каждое из направлений. Их особенности, трудоемкость, математическая корректность.

Оценка точности математических моделей надежности и методов их исследования. Необходимость согласования их точности с точностью информационной базы о процессах функционирования, режиме работы, допущениях и т. п.

Обоснование использования для оценки надежности СЭС специализированных математических моделей и соответствующих им методов расчета надежности в зависимости от напряжения (до 1000 В, 6-35 кВ и 110-220 кВ).

Раздел 3. Математические модели и количественные описания, математические модели и количественные расчеты надежности систем (26 часов)

3.1. Инженерный метод расчета надежности систем электроснабжения

[1], с. 45…54; [2], с. 167...181, [2], с. 30...63

Приближенные вычисления показателей надежности.

Общие сведения об оценках важности элементов. Важность элементов на логическом уровне задания системы. Способы оценки. Практическое использование результатов оценок.

Важность элементов на вероятностном уровне задания системы. Способы получения оценок и области их использования.

3.2. Логико-аналитические методы расчета. Важность элементов систем электроснабжения

[1], с. 54…69; [2], с. 181...206, [2], с. 30...63

Общие сведения о логико-вероятностных методах расчета надежности. Основные этапы. Разновидность логических функций системы и способы их получения. Способы перехода к вероятностным функциям. Способы нахождения показателей надежности.

Логико-аналитический метод расчета надежности. Особенности и погрешность метода.

Раздел 4. Технико-экономическая оценка недоотпуска электроэнергии и эффективности надежного электроснабжения (24 часа)

4.1. Особенности технико-экономических расчетов с учетом расчета надежности

[2], с. 30...45, [3], с. 52...55

Особенности технико-экономических расчетов в энергетике. Методы расчета недоотпуска электрической энергии с учетом особенности расчета надежности.

4.2. Ущерб от ненадежности электроснабжения объекта энергетики

[2], с. 45...63, [3], с. 52...55

Стоимостная оценка ущерба от ненадежности объекта энергетики. Убытки производителя поставщика и потребителя, вызванные ненадежностью объекта энергетики, а также связанные с ней экономические нарушения

Заключение (2 часа)

[2], с. 223…225, [3], 74…76

Обеспечение надежности является одной из важнейших проблем при создании и эксплуатации любой технической системы.

Особенно актуальна она для сложных систем таких, как системы электроснабжения, состоящие из большого числа элементов и имеющие многочисленные внешние и внутренние связи.

В современных рыночных условиях надежность электроснабжения тесно связана с экономическими показателями и энергетической безопасностью потребителей электрической энергии.

Целью изучения дисциплины «Надежность электроснабжения» является приобретение будущими инженерами-электриками навыков самостоятельного решения инженерных задач по расчету и выбору схемы электроснабжения с учетом надежности.

2.2. Тематический план дисциплины

2.2.1. Тематический план дисциплины для студентов очной формы обучения

№ п/п	Наименование раздела (отдельной темы)	Кол-во часов по дневной форме обучения	Виды занятий и контроля							
			Лекции		ПЗ		Самостоят. работа	Тесты	Контрольные работы	ПЗ
			аудит.	ДОТ	аудит.	ДОТ				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	ВСЕГО	**100**	**34**	**4**	**16**	**6**	**40**	**4**		**5**
	ВВЕДЕНИЕ	**2**	**1**				**1**			
1	**Раздел 1. Задачи и исходные положения оценки надежности**	**20**	**6**		**2**		**12**	**№1**		
1.1	Основные положения теории надежности систем электроснабжения	10	4				6			
1.2	Показатели надежности систем электроснабжения	10	2		2		6			№1
2	**Раздел 2. Факторы, нарушающие надежность системы, и их математические описания**	**26**	**10**	**2**	**4**	**2**	**8**	**№ 2**		
2.1	Допущения и особенности режимов работы систем электроснабжения	16	6		4	2	4			№2
2.2	Факторы, влияющие на надежность систем электроснабжения	10	4	2			4			
3	**Раздел 3. Математические модели и количественные описания, математические модели и количественные расчеты надежности систем**	**26**	**8**	**2**	**8**	**4**	**4**	**№3**		
3.1	Инженерный метод расчета надежности систем электроснабжения	14	4		4	2	4			№3
3.2	Логико-аналитические методы расчета. Важность элементов систем электроснабжения	12	4	2	4	2				№4

4	**Раздел 4. Технико-экономическая оценка недоотпуска электро-энергии и эффективности надежного электро-снабжения**	**24**	**8**		**2**		**14**	№4		
4.1	Особенности технико-экономических расчетов с учетом расчета надежности	12	4				8			
4.2	Ущерб от ненадежности электроснабжения объекта энергетики	12	4		2		6			№5
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	2	1				1			

2.2.2. Тематический план дисциплины для студентов очно-заочной формы обучения

№ п/п	Наименование раздела (отдельной темы)	Кол-во часов по дневной форме обучения	Виды занятий и контроля							
			Лекции		ПЗ		Самостоят. работа	Тесты	Контрольные работы	ПЗ
			аудит.	ДОТ	аудит.	ДОТ				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	ВСЕГО	**100**	**18**	**18**	**8**	**16**	**40**	**4**	**1**	**4**
	ВВЕДЕНИЕ	**2**	**1**				**1**			
1	**Раздел 1. Задачи и исходные положения оценки надежности**	**20**	**4**	**4**			**12**	№ 1		
1.1	Основные положения теории надежности систем электроснабжения	10	2	2			6			
1.2	Показатели надежности систем электроснабжения	10	2	2			6			
2	**Раздел 2. Факторы, нарушающие надежность системы, и их математические описания**	**26**	**4**	**6**	**2**	**4**	**10**	№ 2		
2.1	Допущения и особенности режимов работы систем электроснабжения	16	2	2	2	4	6			№2
2.2	Факторы, влияющие на надежность систем электроснабжения	10	2	4			4			
3	**Раздел 3. Математические модели и количественные описания, математические модели и количественные расчеты надежности систем**	**26**	**4**	**4**	**4**	**8**	**6**	№3		
3.1	Инженерный метод расчета надежности систем электроснабжения	14	2	2	2	4	4			№3
3.2	Логико-аналитические методы расчета. Важность элементов систем электроснабжения	12	2	2	2	4	2			№4

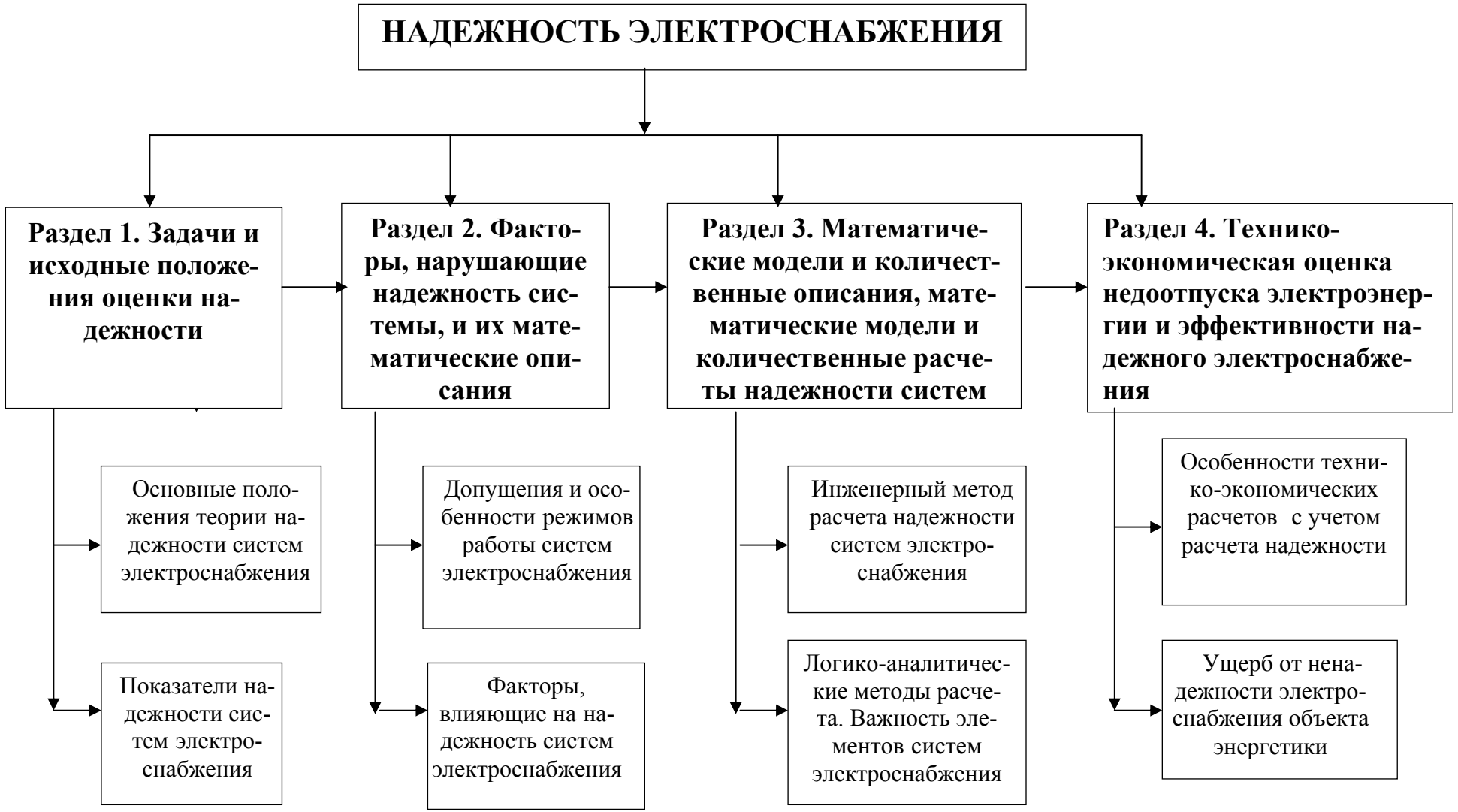
4	**Раздел 4. Технико-экономическая оценка недоотпуска электро-энергии и эффектив-ности надежного электроснабжения**	**24**	**4**	**4**	**2**	**4**	**10**	№4		
4.1	Особенности технико-экономических расчетов с учетом расчета надеж-ности	12	2	2			8			
4.2	Ущерб от ненадежно-сти электроснабжения объекта энергетики	12	2	2	2	4	2			№5
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	2	1				1			

2.2.3. Тематический план дисциплины для студентов заочной формы обучения

№ п/п	Наименование раздела (отдельной темы)	Кол-во часов по дневной форме обучения	Виды занятий и контроля							
			Лекции		ПЗ		Самостоят. работа	Тесты	Контроль-ные работы	ПЗ
			аудит.	ДОТ	аудит.	ДОТ				
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	ВСЕГО	**100**	**8**	**30**	**4**	**18**	**40**	**4**	**1**	**4**
	ВВЕДЕНИЕ	**2**		**1**			**1**			
1	**Раздел 1. Задачи и исходные положения оценки надежности**	**20**	**2**	**6**			**12**	№ 1		
1.1	Основные положения теории надежности систем электроснабжения	10	1	2			7			
1.2	Показатели надежности систем электроснабжения	10	1	4			5			
2	**Раздел 2. Факторы, нарушающие надежность системы, и их математические описания**	**26**	**2**	**8**	**2**	**4**	**10**	№ 2		
2.1	Допущения и особенности режимов работы систем электроснабжения	16	1	4	2	4	5			№2
2.2	Факторы, влияющие на надежность систем электроснабжения	10	1	4			5			
3	**Раздел 3. Математические модели и количественные описания, математические модели и количественные расчеты надежности систем**	**26**	**2**	**8**	**2**	**8**	**6**	№ 3		
3.1	Инженерный метод расчета надежности систем электроснабжения	14	2	4		4	4			№3

3.2	Логико-аналитические методы расчета. Важность элементов систем электроснабжения	12		4	2	4	2			№4
4	**Раздел 4. Технико-экономическая оценка недоотпуска электроэнергии и эффективности надежного электроснабжения**	**24**	**2**	**6**		**6**	**10**	№4		
4.1	Особенности технико-экономических расчетов с учетом расчета надежности	12	1	2			9			
4.2	Ущерб от ненадежности электроснабжения объекта энергетики	12	1	4		6	1			№5
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	2		1			1			

2.3. Структурно-логическая схема дисциплины «Надежность электроснабжения»



2.4. Временной график изучения дисциплины при использовании информационно-коммуникационных технологий

№	Названия разделов	Продолжительность изучения раздела (дней) (из расчета – 4 часа в день)
1	Введение **Раздел 1**. Задачи и исходные положения оценки надежности	5,5
2	**Раздел 2.** Факторы, нарушающие надежность системы, и их математическое описание	6,5
3	**Раздел 3.** Математические модели и количественные описания. Математические модели и количественные расчеты надежности систем	6,5
4	**Раздел 4.** Технико-экономическая оценка недоотпуска электроэнергии и эффективности надежного электроснабжения. Заключение	6,5
	Итого	25
	В том числе контрольная работа	2,5

2.5. Практический блок

2.5.1. Лабораторный практикум

Лабораторные занятия учебным планом не предусмотрены.

2.5.2. Практические занятия

2.5.2.1 Практические занятия для студентов очной формы обучения

Номер раздела (темы)	Наименование практического занятия	Кол-во часов	
		АУД.	ДОТ.
1.2	№1. Показатели надежности систем электроснабжения	2	-
2.1	№ 2. Функции работоспособности (ФР) и неработоспособности (ФНР) схемы электроснабжения	4	2
3.1	№ 3. Вероятностный полином по ФНР, показатели надежности системы (Т, $T_в$)	4	2
3.2	№ 4.Оценка важности на логическом и вероятностном уровнях задания системы	4	2
4.2	№ 5. Расчет надежности нерезервированных участков системы. Оценка недоотпуска электроэнергии	**2**	-

2.5.2.2. Практические занятия для студентов очно-заочной формы обучения

Номер раздела (темы)	Наименование практического занятия	Кол-во часов	
		Ауд.	ДОТ
2.1	№ 2. Функции работоспособности (ФР) и неработоспособности (ФНР) схемы электроснабжения	**2**	**4**
3.1	№ 3. Вероятностный полином по ФНР, показатели надежности системы (Т, $Т_в$).	**2**	**4**
3.2	№ 4. Оценка важности на логическом и вероятностном уровнях задания системы	2	4
4.2	№ 5. Расчет надежности нерезервированных участков системы. Оценка недоотпуска электроэнергии	**2**	**4**

2.5.2.3. Практические занятия для студентов заочной формы обучения

Номер раздела (темы)	Наименование практического занятия	Кол-во часов	
		Ауд.	ДОТ
2.1	№ 2. Функции работоспособности (ФР) и неработоспособности (ФНР) схемы электроснабжения	2	4
3.1	№ 3. Вероятностный полином по ФНР, показатели надежности системы (Т, $Т_в$).	-	4
3.2	№ 4. Оценка важности на логическом и вероятностном уровнях задания системы	2	4
4.2	№ 5. Расчет надежности нерезервированных участков системы. Оценка недоотпуска электроэнергии	-	6

2.6. Балльно-рейтинговая система оценки знаний

Для успешного освоения дисциплины, кроме изучения теоретического материала, необходимо выполнение предусмотренных учебным планом программы практических занятий и для очно-заочной и заочной форм обучения контрольной работы.

Базисные рейтинг-баллы равны 100, в том числе:

- 48 баллов – лекционные занятия (теоретический материал - по результатам тестирования). Весь материал разбит на 4 раздела. По ним составлены 4 теста, каждый из которых содержит 8 вопросов. Правильный ответ на вопрос оценивается в 1,5 балла. Итого максимальное количество баллов: 4 теста * 8 * 1,5 балла = 48 баллов.

- 30 баллов – практические занятия: каждое практическое занятие оценивается в 6 баллов; студенты очно-заочной и заочной форм обучения за выполнение всей программы практических занятий получают дополнительно 6 баллов.

- 22 балла – контрольная работа (для очно-заочной и заочной форм обучения).

Студенты очной формы обучения могут получить дополнительно до 22 баллов за активную работу на практических занятиях.

Итого каждый студент может получить не более 100 баллов.

Оценка результатов обучения проводится в соответствии со следующей схемой:

Оценка	Количество набранных баллов
Удовлетворительно	51-70
Хорошо	71-85
Отлично	86-100

3. Информационные ресурсы дисциплины

3.1. Библиографический список

Основной:

1. Калявин, В.П. Надежность и диагностика элементов электроустановок: учеб. пособие для вузов/В.П. Калявин, Л.М. Рыбаков. – СПб.: Элмор, 2009. – 331 с.

Дополнительный:

2. Китушин, В.Г. Надежность энергетических систем/В.Г. Китушин. – М.: Высш. шк., 1984. – 256 с.

3. Лосев, Э.А. Методы расчета надежности систем электроснабжения/Э.А. Лосев, С.Ф. Миронов, Б.Д. Щукин. – Куйбышев: Авиац. ин-т, 1987. -76 с.

4. Гук, Ю.Б. Оценки надежности электроустановок/ Ю.Б. Гук, Э.А. Лосев, А.В. Мясников. – М.: Энергия, 1974.-200 с.

5. Рябинин, И.А. Надежность и безопасность структурно-сложных систем/И.А. Рябинин. – СПб.: Политехника, 2000. − 248 с.

6. Надежность систем энергетики: терминология.- М.: Наука, 2002.-81с.

7. Семёнов, А.А. Технико-экономические расчеты и обоснования в энергетике/А.А. Семёнов. – Л.:СЗПИ, 1973.- 98 с.

8. Зайцев, Г.З. Специальные вопросы электроснабжения: рабочая программа, метод. указ./Г.З. Зайцев, Э.А. Лосев. – Л.: СЗПИ, 1989, − 18 с.

9. Правила пользования электрической и тепловой энергией.−М.: Энергоатомиздат, 1998. – 112 с.

10. Инструкция по проектированию электроснабжения промышленных предприятий. (СН174-75).

11. Инструктивные материалы Главгосэнергонадзора. – М.: Энергоатомиздат, 1986.

12. ГОСТ 27.002-89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения.

13. Каазик, Ю.А. Математический словарь/Ю.А. Каазик. – Таллинн: Валгус, 1985.–296 с.

14.Методы расчета экономического ущерба от нарушения энергетического оборудования. МТХЗ-70-001-95. – М., 1995. – 25 с.

15.Рекомендации по оценке показателей безотказности, ремонтопригодности и готовности энергетических блоков (агрегатов) электростанций. – М., СПООР-РАС, 1991.- 46 с.

16.Нечипоренко, В.И. Структурный анализ систем (эффективность и надежность)/В.П. Нечипоренко. – М.: Сов. радио, 1977. – 216 с.

3.2. Опорный конспект

Введение

Обеспечение надежной работы электростанций и подстанций, электрических сетей и систем, бесперебойное снабжение потребителей электрической энергией являются важнейшими задачами проектирования и эксплуатации электрических систем, сетей и электроустановок (ЭУ). Развитие электроэнергетики базируется на методах проектирования и эксплуатации, обеспечивающих минимальный расход материальных ресурсов и затрат труда при обеспечении заданной степени надежности электроснабжения.

Надежность электроснабжения определяется надежностью элементов электрических сетей и систем, схемами распределительных устройств электрических станций и трансформаторных подстанций, работой сетевой автоматики и релейной защиты, а также квалификацией обслуживающего персонала.

Основные задачи теории надежности сводятся к следующему:

- изучение закономерностей возникновения отказов и восстановления работоспособности изделий;
- разработка методов определения количественных показателей и сравнительной оценки надежности;
- разработка мероприятий по повышению надежности;
- изучение взаимосвязей между внешними воздействиями и процессами, происходящими в изделии.

Раздел 1. Задачи и исходные положения оценки надежности

Более подробно материал данного раздела изложен в [1], [2], [3], [5].

В разделе рассматриваются две темы:

1. Основные положения теории надежности систем электроснабжения.
2. Показатели надежности систем электроснабжения.

При работе с теоретическими материалами следует ответить на вопросы, приведенные в конце данного раздела. После проработки теоретического мате-

риала раздела 1 следует выполнить задание практического занятия № 1(для очной формы обучения) и выполнить тренировочный тест № 1.

Изучение раздела заканчивается контрольным мероприятием: необходимо ответить на вопросы контрольного теста № 1.

1.1. Основные положения теории надежности систем электроснабжения

1.1.1. Общие понятия и определения надежности

Обеспечение надежной работы электростанций и подстанций, электрических сетей и систем; бесперебойное снабжение потребителей электрической энергией являются важнейшими задачами проектирования и эксплуатации электрических систем, сетей и электроустановок (ЭУ). Развитие электроэнергетики базируется на методах проектирования и эксплуатации, обеспечивающих минимальный расход материальных ресурсов и затрат труда при заданной степени надежности электроснабжения.

Надежность электроснабжения определяется надежностью элементов электрических сетей и систем, схемами распределительных устройств электрических станций и трансформаторных подстанций, работой сетевой автоматики и релейной защиты, а также квалификацией обслуживающего персонала.

Основные задачи теории надежности сводятся к следующему:

- изучение закономерностей возникновения отказов и восстановления работоспособности изделий;
- разработка методов определения количественных показателей и сравнительной оценки надежности;
- разработка мероприятий по повышению надежности;
- изучение взаимосвязей между внешними воздействиями и процессами, происходящими в изделии.

В теории надежности широко используются понятия элемента и системы. Объект, надежность которого рассматривается независимо от надежности составляющих его частей, а только в зависимости от его функциональной роли и места в системе или установке, называют *элементом*. Совокупность взаимосвя-

занных объектов или элементов, предназначенных для решения определенного круга задач, имеющая единое управление функционированием и развитием, называется *системой*.

Например, изолятор в гирлянде изоляторов выполняет роль элемента, а гирлянда изоляторов - это система. На трансформаторной подстанции выключатели, отделители, разъединители, силовые трансформаторы и т. п. являются элементами, а сама подстанция является системой. Из приведенных примеров видно, что в зависимости от уровня решаемой задачи и степени объединения анализируемых аппаратов и устройств определенный объект может в одном случае быть системой, а в другом - элементом. Так, при анализе надежности трансформатора его можно "разложить" на множество элементов: обмотки высшего и низшего напряжений, высоковольтные и низковольтные вводы, магнитопровод, бак трансформатора и т. д. С другой стороны, для трансформаторной подстанции трансформатор удобнее представить как элемент, у которого есть свои характеристики надежности, нормативно-техническая документация, требования к эксплуатации.

Электрооборудование является, с одной стороны, элементом соответствующей системы, а с другой стороны, изделием, то есть объектом, надежность которого рассматривается независимо от его роли в системе, но в соответствии с ТУ и ГОСТом на продукцию данного типа.

В соответствии с ГОСТ 27.002-89 "Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения" надежность определяется как свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих его способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, ремонта, хранения и транспортирования. Как видно из определения, надежность является комплексным свойством, которое в зависимости от назначения объекта и условий его эксплуатации может включать безотказность, долговечность, ремонтопригодность и сохраняемость или определенное сочетание этих свойств.

Безотказность - свойство объекта непрерывно сохранять работоспособное состояние в течение некоторого времени или наработки (наработка – продолжительность работы, или объем работы объекта – ГОСТ 27.002-89).

Долговечность - свойство объекта сохранять работоспособное состояние при установленной системе технического обслуживания и ремонта.

Ремонтопригодность **-** свойство объекта, заключающееся в приспособленности к поддержанию и восстановлению работоспособного состояния путем технического обслуживания и ремонта.

Сохраняемость - свойство объекта сохранять в заданных пределах значения параметров, характеризующих способность объекта выполнять требуемые функции, в течение и после хранения и (или) транспортирования.

Указанные важнейшие свойства надежности характеризуют определенные технические состояния объекта. Различают пять основных видов технического состояния объектов.

Исправное состояние. Состояние объекта, при котором он соответствует всем требованиям нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации.

Неисправное состояние. Состояние объекта, при котором он не соответствует хотя бы одному из требований нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации.

Работоспособное состояние. Состояние объекта, при котором значения всех параметров, характеризующих способность выполнять заданные функции, соответствуют требованиям нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации.

Неработоспособное состояние. Состояние объекта, при котором значение хотя бы одного параметра, характеризующего способность выполнять заданные функции, не соответствует требованиям нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации.

Предельное состояние. Состояние объекта, при котором его дальнейшая эксплуатация недопустима или нецелесообразна либо восстановление его работоспособного состояния невозможно или нецелесообразно.

Восстанавливаемость – важное свойство надежности. Восстанавливаемость – свойство элемента, системы или установки, заключающееся в возможности восстановления работоспособности в случае отказа.

По характеру исполнения и функционирования объекты могут быть восстанавливаемыми и невосстанавливаемыми.

Невосстанавливаемыми называются такие объекты (или электроустановки), работоспособность которых в процессе возникновения отказа не подлежит восстановлению (например, трансформаторы тока, кабельные вставки, плавкие предохранители).

Восстанавливаемыми являются изделия, работоспособность которых в случае возникновения отказа подлежит восстановлению (электрические машины, силовые трансформаторы). Разделение объектов на восстанавливаемые и невосстанавливаемые зависит во многом от решения, которое принимается в случае отказа объекта. Если его восстановление признается нецелесообразным или неосуществимым, то такой объект в данной ситуации является невосстанавливаемым. Таким образом, один и тот же объект в зависимости от особенностей или периодов эксплуатации может считаться восстанавливаемым или невосстанавливаемым.

Невосстанавливаемые объекты характеризуются безотказностью, долговечностью и сохраняемостью, а восстанавливаемые – безотказностью, долговечностью, ремонтопригодностью и сохраняемостью.

Переход объекта (изделия) из одного технического состояния в другое обычно происходит вследствие событий: ***повреждений*** или ***отказов***. Совокупность фактических состояний объекта и возникающих событий, способствующих переходу в новое состояние, охватывает так называемый жизненный цикл объекта, который протекает во времени и имеет определенные закономерности, изучаемые в теории надежности.

Ремонтируемым объектом называется объект, ремонт которого возможен и предусмотрен в нормативно-технической, ремонтной и (или) конструкторской (проектной) документации.

Неремонтируемый объект – объект, ремонт которого не возможен и (или) не предусмотрен нормативно-технической, ремонтной и конструкторской (проектной) документацией.

1.1.2. Характеристики отказов

Согласно ГОСТ 27.002-89 ***отказ*** - это событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния объекта.

Повреждение - событие, заключающееся в нарушении исправного состояния объекта при сохранении работоспособного состояния.

Еще одно понятие, отражающее состояние объекта, - дефект. Дефектом называется каждое отдельное несоответствие объекта установленным нормам или требованиям. В соответствии с определением отказа как события, заключающегося в нарушении работоспособности, предполагается, что до появления отказа объект был работоспособен.

Отказом в работе (отказом функционирования) называют отказ в момент выполнения заданной функции, а дефектом – отказ, обнаруженный при наладке, профилактическом осмотре или плановом ремонте.

Дефектом называют нарушение работоспособного состояния объекта, обнаруженное при наладке, профилактическом осмотре или плановом ремонте.

В теории надежности, как правило, предполагается внезапный отказ, который характеризуется скачкообразным изменением значений одного или нескольких параметров объекта. На практике приходится анализировать и другие отказы, к примеру, ресурсный отказ, в результате которого объект приобретает предельное состояние, или эксплуатационный отказ, возникающий по причине, связанной с нарушением установленных правил или условий эксплуатации.

Внезапный отказ обычно является следствием постепенного накопления неисправностей и повреждений.

Независимый отказ элемента – отказ элемента объекта, не обусловленный повреждениями или отказами других элементов объекта.

Зависимый отказ элемента – отказ элемента объекта, обусловленный повреждениями или отказами других элементов объекта.

Неполный отказ – отказ, после возникновения которого использование возможно, но при этом значения одного или нескольких основных параметров находятся в недопустимых пределах, т. е. работоспособность объекта понижена.

Перемежающийся отказ – многократно возникающий и самоустраняющийся отказ одного и того же характера.

Конструкционный отказ – отказ, возникающей вследствие ошибок конструктора.

Производственный отказ – отказ, возникающий вследствие нарушения или несовершенства технологического процесса изготовления объекта или комплектующих.

Эксплуатационный отказ – отказ, возникающий вследствие нарушения установленных правил эксплуатации.

1.1.3. Причины и характер отказов объектов

Факторы, влияющие на надежность электроустановок, можно условно разделить на несколько категорий. Это факторы окружающей среды, эксплуатационные факторы, ошибки и случайные факторы.

К факторам окружающей среды относятся интенсивность грозовой и ветровой деятельности, гололедные отложения, обложные дожди, мокрый снег, густой туман и др.

К эксплуатационным факторам относятся перегрузки элементов ЭУ, дуги коротких замыканий, перенапряжения, а также значительное место в эксплуатационных факторах занимают квалификация персонала, некачественный ремонт и обслуживание.

К ошибкам проектирования и монтажа относятся несоблюдение руководящих материалов при проектировании, неучет требований надежности, не-

учет величины емкостных токов в сетях 10…35 кВ, некачественное изготовление элементов ЭУ, дефекты монтажа и т. д.

Небольшую группу влияющих на показатели надежности электроустановок в эксплуатации составляют случайные факторы: наезд транспорта на опоры ЛЭП (линий электропередач), перекрытие на движущийся транспорт под проводами ВЛ (воздушных линий), обрывы КЛ (кабельных линий) при проведении земляных работ и т. д.

Целью исследования взаимодействия ЭУ с воздействующими факторами является разработка технических, организационных и экономических мероприятий, направленных на повышение надежности элементов ЭУ. Применительно к взаимодействию ЭУ с факторами окружающей среды региона необходимо выяснить характер и причины взаимного влияния, качественной и количественной оценки; рассмотреть поток отказов из-за воздействующих факторов с учетом пространства и времени.

Отказ установки в выполнении заданных функций наступает в результате отказов оборудования, смежных установок и противоаварийной автоматики. При наличии в установке резервных элементов, возможности замены отказавшего оборудования, ремонта без прекращения работы надежность установки будет определяться не только частотой отказов, но и временем восстановления работоспособного состояния основных и резервных элементов. Отказы и восстановления –те случайные события, которые определяют надежность любой ЭУ.

1.1.4. Средства обеспечения надежности

Необходимая надежность объекта обеспечивается совокупностью различных средств, которые принципиально можно разделить: на резервирование, техническое обслуживание; ремонт и целенаправленное управление процессами, протекающими в системе.

Резервирование – повышение надежности введением избыточности, которое в свою очередь подразделяется на следующие виды: структурное, функциональное, временное и информационное.

Структурное резервирование – использование избыточных элементов структуры объекта, то есть элементов, которые не являются необходимыми для выполнения возложенных на объект функций, например установка дополнительного трансформатора на подстанции, сооружение вторых цепей, когда пропускная способность первых еще не исчерпана. Кратность резервирования в этих случаях определяется как

$$K = \frac{n - m}{m}, \qquad (1.1)$$

где n –число всех цепей;

m – число цепей, необходимых для продолжения работы.

При анализе надежности электроснабжения выделяют три типа схем:

- нерезервированная схема;
- схема с ограниченным резервированием;
- схема с полным резервированием.

В первом случае отказ каждого элемента приводит к перерыву в электроснабжении, наступающему с вероятностью отказа данного элемента. Отказ элемента во втором случае может привести к ограничению потребляемой мощности с некоторой вероятностью и к полному погашению при наложении отказа в резервной цепи во время восстановления или профилактического ремонта рабочей цепи.

Для третьего случая полное погашение наступает лишь при наложении отказов.

Функциональное резервирование - использование способности элементов выполнять дополнительные функции, повышая надежность работы системы за счет перераспределения функций при отказе элементов, выполняющих до появления отказа более ограниченные функции. Например, межсистемная ЛЭП, предназначенная для реализации каких-то режимных состояний или передачи энергии, в то же время может быть использована и для резервирования отказов генерирующего оборудования.

Временное резервирование - использование избыточного времени. Суть его заключается в том, что в системе в процессе функционирования предоставляет-

ся возможность израсходовать дополнительное время для выполнения задания. Оно осуществляется либо за счет резерва времени, в течение которого система имеет возможность выполнять задание, либо за счет использования резерва мощности уменьшением времени выполнения задания. Например, при недовыпуске продукции из-за перерыва в электроснабжении этот недовыпуск может быть компенсирован за счет проведения сверхурочных работ.

Информационное резервирование – использование избыточной информации.

Для поддержания работоспособного состояния оборудования в процессе его эксплуатации планируют периодическое проведение технического обслуживания и ремонтов.

Техническое обслуживание - обеспечение надежности путем выполнения комплекса работ для поддержания работоспособности объекта. Комплекс технического обслуживания включает в себя систематическое диагностирование состояния объекта; поддержание режимов работы, наиболее благоприятных для обеспечения надежного функционирования; обеспечение благоприятных условий содержания оборудования.

Ремонт – обеспечение надежности путем выполнения комплекса работ для восстановления работоспособности объекта.

Техническое и ремонтное обслуживание представляет собой систему мероприятий по техническому уходу, поддержанию и восстановлению работоспособности ЭУ. Правильно организованное техническое обслуживание позволяет повысить надежность ЭУ и своевременно подготовиться к ремонтным работам, обеспечить безопасную работу техники, уменьшить общие эксплуатационные расходы за счет снижения числа аварийных отказов и убытков из-за их возникновения.

Сущность системы планово-предупредительных ремонтов (ППР) состоит в подготовке и выполнении в соответствии со структурой ремонтного цикла установленных видов технического обслуживания и плановых ремонтов.

Текущий ремонт – это минимальный по объему вид ремонта, при котором обеспечивается нормальная эксплуатация изделия до очередного планового ре-

монта. Во время текущего ремонта устраняются неисправности (заменой или восстановлением) и выполняются регулировки.

Капитальный ремонт заключается в диагностике и тестирования ЭУ, в замене или ремонте всех основных узлов, в том числе и базовых, регулировке и испытании. Плановый капитальный ремонт (К) обычно выполняется специализированными ремонтными подразделениями с периодичностью, установленной технической документацией.

При формировании плана ППР капитальный ремонт можно назначить при одновременной замене нескольких сложных в ремонте узлов в один срок и при попадании этого срока в период, близкий к середине длительности эксплуатации участка.

Продолжительность всех видов планового технического обслуживания (ТО) и ремонта устанавливается отраслевыми ремонтными нормативами. Объемы технического обслуживания и ремонта для конкретных условий эксплуатации ЭУ разрабатываются службой энергопредприятий на основании инструкций по ТО и других нормативных документов, в которых приводятся состав необходимых работ и технология их выполнения, сроки, привлекаемые трудовые ресурсы.

Четкое проведение регламентных работ по техническому обслуживанию и ремонтам приводит к существенному сокращению отказов ЭУ.

Надежность систем электроснабжения обеспечивается внедрением прогрессивных схемно-конструкторских решений, резервированием их элементов и проведением плановых ремонтов.

1.2. Показатели надежности систем электроснабжения

1.2.1. Единичные показатели для невосстанавливаемых объектов

Свойство безотказности невосстанавливаемых объектов характеризует вероятность безотказной работы.

Вероятность безотказной работы - это вероятность того, что время работы объекта до отказа t_0 будет не меньше заданного времени t.

$$P(t) = P(t_0 \geq t). \tag{1.2}$$

Можно воспользоваться определением вероятности безотказной работы исходя из статистических данных, выявленной во время испытания на вероятность безотказной работы.

Вероятность безотказной работы - это вероятность того, что в пределах заданной наработки отказ объекта не возникнет. На практике этот показатель можно определить статистической оценкой.

Вероятность безотказной работы в течение времени t – это вероятность того, что за время t не произойдет ни одного отказа объекта:

$$\hat{P}(t) = \frac{N_\sigma}{N} = 1 - \frac{m}{N} , \qquad (1.3)$$

где m – число элементов ЭУ, отказавших за время t;

N_σ - число однотипных элементов, безотказно проработавших до момента времени t;

N – число элементов, работоспособных в начальный момент времени.

Иногда целесообразно пользоваться не вероятностью безотказной работы, а вероятностью отказа $Q(t)$. Поскольку работоспособность и отказ являются состояниями несовместными и противоположными, то их вероятности связаны зависимостью

$$P(t) + Q(t) = 1. \qquad (1.4)$$

Следовательно,

$$Q(t) = 1 - P(t) . \qquad (1.5)$$

В практических расчетах используется другой показатель свойства безотказности - интенсивность отказов $\lambda(t)$.

Вероятность того, что элемент, проработавший безотказно до момента времени t, откажет в следующей момент $(t+\Delta t)$, называется плотностью условной вероятности отказа в момент времени t (при условии, что до этого момента изделие работало безотказно) и определяется как

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)} = -\frac{\frac{dP(t)}{dt}}{P(t)}, \qquad (1.6)$$

где $f(t)$ – плотность распределения наработки до отказа;

$P(t)$ – вероятность безотказной работы.

Статистическая оценка интенсивности отказов имеет вид

$$\hat{\lambda}(t) = \frac{n(t+\Delta t) - n(t)}{N \cdot \Delta t}\ , \qquad (1.7)$$

где $n(t+\Delta t)$, $n(t)$ – число объектов, отказавших на отрезке соответственно от 0 до $(t+\Delta t)$ и от 0 до t;

Δt – интервал времени, для которого определяется λ;

N - число однотипных объектов, работающих в начальный момент времени.

Если при статистической оценке среднего значения интенсивности отказов ($\hat{\lambda}(t)$) время эксперимента разбить на достаточно большое количество одинаковых интервалов Δt за длительный срок, то результатом обработки опытных данных будет график, изображенный на рис. 1.1.

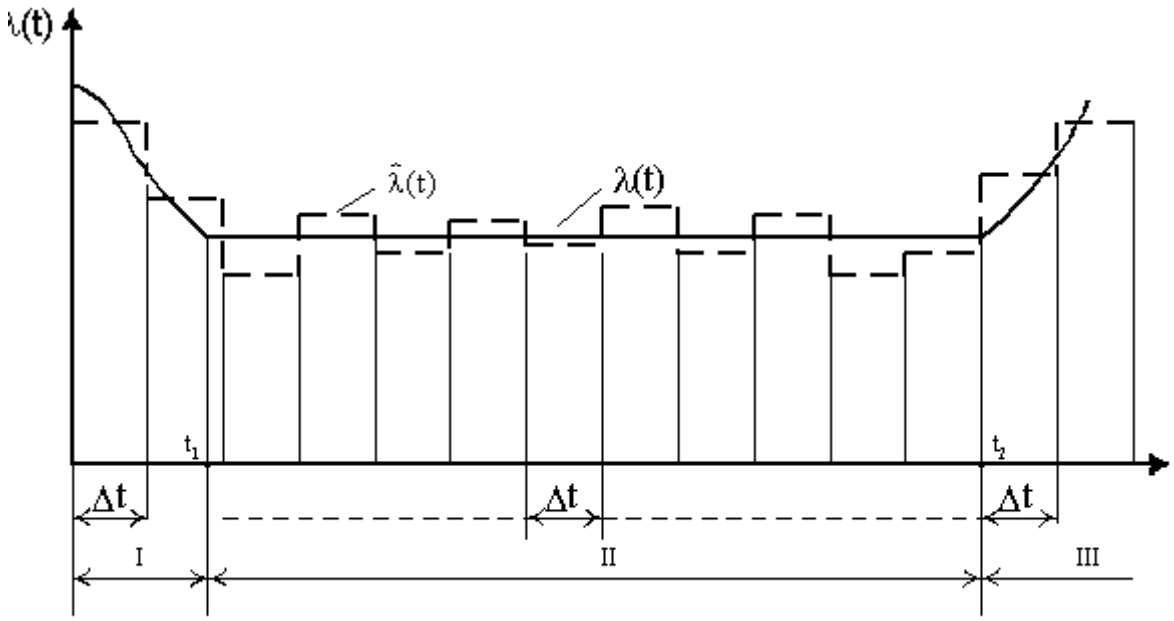


Рис. 1.1. Кривая жизни элемента (опытные данные)

Как показывают многочисленные данные анализа надежности большинства объектов техники, в том числе и электроустановок, линеаризованная обобщенная зависимость $\lambda(t)$ представляет собой сложную кривую с тремя характерными интервалами (I, II, III).

Участок (интервал) I соответствует периоду приработки или наладки (обычно непродолжительному). Интервал может увеличиваться или умень-

шаться в зависимости от уровня организации отбраковки элементов на заводе-изготовителе, где элементы с внутренними дефектами своевременно изымаются из партии выпускаемой продукции. Величина интенсивности отказов на этом интервале во многом зависит от качества сборки схем сложных устройств, соблюдения требований монтажа и т. п. Включение под нагрузку собранных схем приводит к быстрому "выжиганию" дефектных элементов и по истечении некоторого времени t_1 в схеме остаются только исправные элементы, и их эксплуатация связана с периодом времени, когда $\lambda = \text{const}$ (участок II). Участок II - период нормальной эксплуатации и III участок – участок старения изделия, когда параметр потока отказов возрастает за счет износа, старения изоляции и т. д. На интервале III по причинам, обусловленным естественными процессами старения (изнашивания, коррозии и т. д.), интенсивность отказов резко возрастает, увеличивается число деградационных отказов.

Интервал $\lambda=\text{const}$ соответствует экспоненциальной модели распределения вероятности безотказной работы. Расчеты обычно ведутся для периода нормальной эксплуатации (участок II), когда параметр потока отказов не изменяется длительное время ($\lambda(t) = \lambda = \text{const}$).

Поток отказов, имеющий место в течение периода времени II, обладает свойствами ординарности, стационарности и отсутствием последствия.

Ординарность заключается в малой вероятности совпадений отказов, которой можно пренебречь.

Свойство стационарности выражается в постоянстве параметра потока отказов.

Отсутствие последствия заключается в том, что число отказов в один период времени не зависит от числа отказов в предыдущие.

Такой поток в теории надежности называется простейшим.

Каждый элемент системы с течением времени становится менее надежным. Скорость изменения надежности элемента с течением времени, отнесенная к вероятности безотказной работы в данный момент времени и будет опреде-

лять интенсивность или опасность отказов. Поэтому зависимость между $P(t)$ и $\lambda(t)$ можно записать как

$$\int_0^t \lambda(t)dt = -\ln P(t) \quad \text{или} \quad P(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t)dt}, \tag{1.8}$$

при λ = const (принятом выше допущении) формула (1.8) примет вид

$$P(t) = e^{-\lambda t}. \tag{1.9}$$

Важной характеристикой надежности является наработка на отказ (время безотказной работы), которое определяется:

$$T = \int_0^\infty P(t)dt. \tag{1.10}$$

С учетом, что λ = const, средняя наработка на отказ равна

$$\hat{T} = \frac{1}{\lambda}. \tag{1.11}$$

Статистическая оценка для средней наработки на отказ определяется по формуле

$$\hat{T} = \frac{1}{N} \cdot \sum_j^N t_j, \tag{1.12}$$

где N - число работоспособных однотипных невосстанавливаемых объектов при $t = 0$ (в начале испытания);

t_j - наработка на отказ j-го объекта.

Средняя наработка на отказ может оцениваться не только в часах (годах), но и в циклах, километрах пробега и другими аргументами.

1.2.2. Единичные и комплексные показатели для восстанавливаемых объектов

Процесс функционирования восстанавливаемого объекта можно представить как последовательность чередующихся интервалов работоспособности и восстановления (простоя) (рис. 1.2).

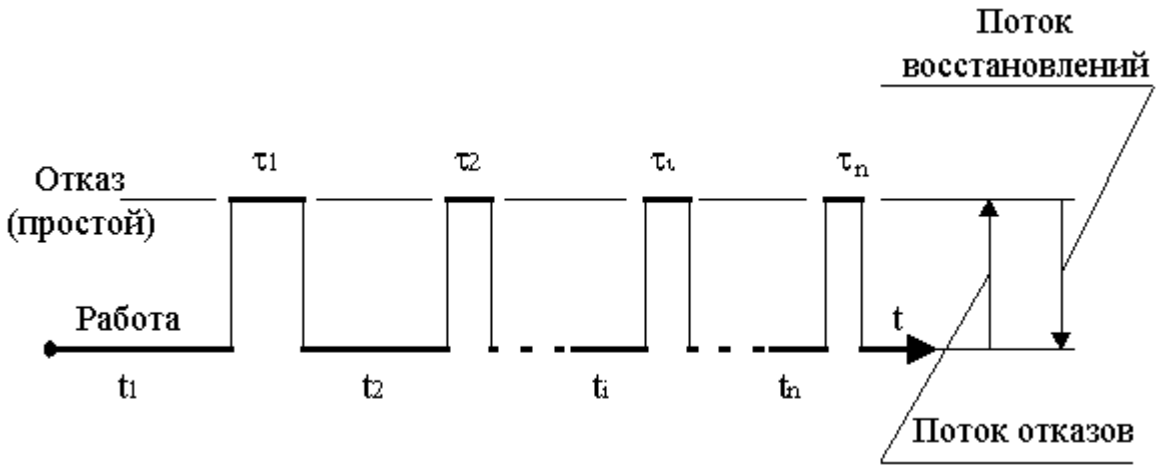


Рис. 1.2. График функционирования восстанавливаемого объекта ($t_1 \ldots t_n$ – интервалы работоспособности, $\tau_1 \ldots \tau_n$ – интервалы восстановления)

Количественным показателем свойства безотказности в цикле работ может служить вероятность безотказной работы. На практике принимают $P(t)$ постоянной для всех циклов, хотя после ремонтов вероятности безотказной работы $P(t)$ для различных циклов различны.

К показателям безотказности относятся: вероятность безотказной работы (или вероятность отказа), поток отказов, средняя наработка на отказ.

Процесс возникновения отказов является потоком случайных событий. Последовательность отказов, происходящих один за другим в случайный момент времени, имеет название *поток отказов*.

Параметр потока отказов представляет собой плотность вероятности возникновения отказа восстанавливаемого объекта.

Другими словами, поток отказов − это математическое ожидание числа отказов в единицу времени.

$$\omega(t) = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{P(t)}{\Delta t}, \qquad (1.13)$$

где $P(t)$ вероятность того, что в течение промежутка времени Δt произойдет не менее одного отказа.

По статистическим данным среднее значение потока отказов определяется с помощью формулы

$$\hat{\omega}(t) = \frac{n(t_2) - n(t_1)}{t_2 - t_1}, \tag{1.14}$$

где $n(t_1)$ и $n(t_2)$ - количество отказов объекта, зафиксированных соответственно по истечении времени t_1 и t_2.

Если используются данные об отказах по определенному количеству восстанавливаемых объектов, то

$$\hat{\omega}(t) = \frac{n(\Delta t_i)}{N \cdot \Delta t_i}, \tag{1.15}$$

где $n(\Delta t_i)$ - количество отказов за интервал времени Δt_i;

N - количество однотипных объектов, участвующих в эксперименте (отказавший объект восстанавливается, поэтому N = const).

Для восстанавливаемых объектов эта характеристика аналогична средней интенсивности отказов для невосстанавливаемых объектов ($\omega = \lambda$).

Для восстанавливаемых ЭУ в период их нормальной работы вероятность безотказной работы определяется формулой

$$P(t) = e^{-\varpi t}. \tag{1.16}$$

Средняя наработка на отказ восстанавливаемых объектов – это показатель, характеризующий объекты, при эксплуатации которых допускаются многократно повторяющиеся отказы. Эксплуатация таких объектов может быть описана следующим образом: в начальный момент времени объект начинает работу и продолжает работу до первого отказа; после отказа происходит восстановление работоспособности, и объект вновь работает до отказа и т. д. На оси времени моменты отказов образуют поток отказов, а моменты восстановлений - поток восстановлений. Средняя наработка на отказ для восстанавливаемых объектов равна

$$\hat{T} = \frac{\sum_{i=1}^{n} t_i}{n(t)} \ , \qquad (1.17)$$

где t_i - наработка между i-1 и i-м отказами, ч;

$n(t)$ - суммарное число отказов за время t.

Другими словами, средняя наработка на отказ - это математическое ожидание времени между двумя ближайшими последовательными отказами.

Для периода работы при экспоненциальном законе распределения справедливы следующие формулы:

$$T = \frac{1}{\omega} = \frac{1}{\lambda} \text{ или } \omega = \lambda = \frac{1}{T} \ . \qquad (1.18)$$

Ремонтопригодность восстанавливаемых объектов характеризуется вероят-ностью восстановления в заданное время T, средним временем восстановления $T_в$ и интенсивностью ремонта.

Функция вероятности восстановления есть количественная мера ремонтопригодности, означающая, что объект будет отремонтирован за время t с вероятностью $P_в(t) = P\{t_в \le T\}$, где T - некоторое заданное время.

Вероятность восстановления (применяя экспоненциальный закон распреде-ления вероятности) можно вычислить по формуле

$$P_B(t) = 1 - e^{-\mu t} , \qquad (1.19)$$

где μ – интенсивность восстановления.

Интенсивность восстановления - это отношение условной плотности вероятности восстановления работоспособного состояния объекта в некоторый момент t при условии, что до этого момента восстановление не было завершено.

Аналитическая формула интенсивности восстановления имеет вид

$$\mu(t) = \frac{P'_{в}(t)}{1 - P_{в}(t)}, \qquad (1.20)$$

где $P'_{в} = \frac{\partial P_{в}}{\partial t}$.

Статистическая оценка этого показателя определяется как

$$\hat{\mu}(t) = \frac{n_B(\Delta t)}{N_{H.CP} \cdot \Delta t}, \qquad (1.21)$$

где $n_в(\Delta t)$ - количество восстановлений однотипных объектов за интервал Δt;

$N_{н.ср}$ - среднее количество объектов, находящихся в невосстановленном состоянии на интервале Δt.

У большинства электроэнергетических объектов поток восстановлений близок к экспоненциальному. Используя свойства этого распределения, запишем зависимость, связывающую среднее время восстановления и интенсивность восстановления:

$$T_B = \frac{1}{\mu} \quad \text{или} \quad \mu = \frac{1}{T_B} \qquad (1.22)$$

1.2.3. Комплексные показатели надежности

К основным комплексным показателям надежности относятся коэффициент готовности и коэффициент простоя.

Коэффициент готовности - это вероятность того, что объект окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени, кроме планируемых периодов, в течение которых применение объекта по назначению не предусматривается.

Этот показатель одновременно оценивает свойства работоспособности и ремонтопригодности объекта.

Для ремонтируемого объекта коэффициент готовности определяется как

$$K_г = \frac{\sum_{i=1}^{n} t_i}{\sum_{i=1}^{n} t_i + \sum_{i=1}^{n} \tau_i} \quad \text{или} \quad K_г = \frac{\hat{T}}{\hat{T} + \hat{T}_B} \quad , \tag{1.23}$$

где t_i - интервалы работоспособности;

τ_i – интервалы простоя;

$\hat{T}$ - среднее время наработки на отказ;

$\hat{T}_B$ - среднее время восстановления.

Коэффициент простоя также является комплексным показателем надежности.

Коэффициент простоя - это вероятность того, что рассматриваемый объект будет в нерабочем состоянии.

$$K_п(t) = 1 - K_г(t) = \frac{T_B}{T + T_B} = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \ . \tag{1.24}$$

1.2.4. Последовательное соединение элементов систем электроснабжения

Последовательное соединение элементов является частым соединением элементов в электроснабжении. В понятие отказа заложен физический аналог электрической схемы с последовательным включением элементов.

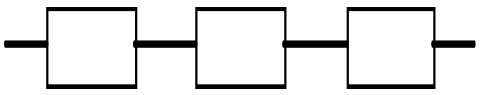


Рис. 1.3. Последовательное соединение элементов

Предположим, что система состоит из *n* последовательно включенных элементов (рис. 1.3). Из теории вероятности известно, что если определены вероятности появления нескольких независимых случайных событий, то совпадение этих событий определяется как произведение вероятностей их появлений. Система будет находиться в работоспособном состоянии только при условии совпадения работоспособных состояний всех элементов. Таким образом, рабо-

тоспособность системы оценивается как произведение вероятностей безотказной работы элементов:

$$, P(t) = P_1(t) \cdot P_2(t) .... P_n(t) = \prod_{i=1}^{n} P_i(t) \ , \qquad (1.25)$$

где $P_i(t)$ - вероятность безотказной работы *i*-го элемента.

Полагая $P_i = e^{-\lambda_i t}$, имеем

$$P(t) = \prod_{i=1}^{n} e^{-\lambda_i t} = e^{\sum_{i=1}^{n} -\lambda_i t} = e^{-\lambda_\Sigma t}, \qquad (1.26)$$

где $\lambda_\Sigma = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_n = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i$.

Соответственно значение среднего времени безотказной работы

$$\hat{T} = \frac{1}{\sum_{i=1}^{n} \lambda_i} = \frac{1}{\lambda_\Sigma} \qquad (1.27)$$

и будет определяться как среднее время наработки на отказ.

Если представить $\lambda_\Sigma = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i$ как интенсивность отказов системы, сведенной к эквивалентному элементу с интенсивностью отказов $\lambda_0 = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i$ = const, то систему из *n* последовательно включенных элементов легко заменить эквивалентным элементом, который имеет экспоненциальный закон распределения вероятности безотказной работы. А это значит, если λ_o= const, то средняя наработка до отказа системы $T_0 = \frac{1}{\lambda_0}$. Верно также и то, что при условии λ_o= const искомая величина определится как $\lambda_0 = \frac{1}{T_0}$.

Средняя наработка на отказ системы определяется по выражению

$$T_o = \int_0^{\infty} P(t)dt \,. \qquad (1.28)$$

Если $\lambda(t)$ зависит от времени, то при произвольном законе распределения времени, наработка до отказа для каждого из элементов равна

$$Pi(t) = e^{-\int_0^t \lambda_i(t)dt}, \qquad (1.29)$$

где $\lambda_i(t)$ - интенсивность отказов *i*-го элемента.

Вероятность безотказной работы системы соответственно определяется как

$$P(t) = \prod_{i=1}^{n} e^{-\int_0^t \lambda_i(t)dt} \,. \qquad (1.30)$$

По выражению (2.28) можно определить вероятность безотказной работы системы до первого отказа при любом законе изменения интенсивности отказов каждого из *n* элементов во времени.

Последовательное соединение восстанавливаемых элементов

Последовательное соединение восстанавливаемых элементов рассмотрим на примере двух элементов, соединенных последовательно и образующих общую цепь (рис. 1.4).

Пусть p_i - численно равно установившемуся значению готовности и является вероятностью того, что в заданный момент времени элемент будет исправлен, то есть он будет в рабочем состоянии.

q_i - мера ненадежности, или коэффициент аварийности, выражающий среднюю относительную долю года, в течение которой элемент находился в поврежденном состоянии во время восстановления.

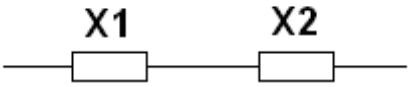


Рис. 1.4. Два последовательно соединенных восстанавливаемых элемента системы электроснабжения

Для двух элементов будут справедливы следующие математические рассуждения.

$(p_1+q_1)(p_2+q_2)=1,$

$p_1p_2+p_1q_2+p_2q_1+q_1q_2=1.$

Состояния p_1q_2, p_2q_1, q_1q_2 соответствуют нерабочему состоянию системы, поэтому можно записать:

$q=1-p_1p_2$.

Расписывая последнюю формулу, получаем

$q=1-(1-q_1)(1-q_2) = q_1 + q_2 - q_1q_2$.

Учитывая, что $q1q2 << 1$ и им можно пренебречь, то $q = q_1 + q_2$.

Это будет справедливо и для n соединенных последовательно элементов.

$$q = q_1 + q_2 + ... + q_n . \qquad (1.31)$$

Для потока отказов $\omega = \sum_1^n \omega_i$ среднее время между отказами, или время наработки на отказ:

$$T_{ср} = \frac{1}{\omega} \quad \text{или} \quad T_{ср} = \frac{1}{\frac{1}{T_1} + \frac{1}{T_2} + ... + \frac{1}{T_n}} \quad . \qquad (1.32)$$

Если объекты характеризуются одинаковыми показателями потока отказов, то есть $\omega_1 = \omega_2 = \omega$, то $T_{ср} = \dfrac{1}{\dfrac{1}{T}+\dfrac{1}{T}} = \dfrac{1}{\dfrac{2}{T}} = \dfrac{T}{2}$, то есть с ростом элементов время рабочего состояния падает.

1.2.5. Параллельное соединение элементов системы электроснабжения

Под группой параллельно включенных элементов будем понимать систему из n постоянно включенных в работу элементов (рис. 1.5), где m элементов обеспечивают нормальное функционирование группы, а n-m элементов являются постоянно включенным «горячим резервом».

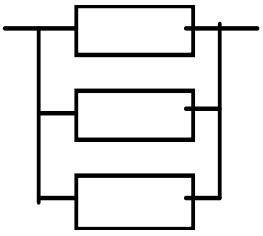


Рис. 1.5. Параллельное соединение элементов

Если параллельные по схеме элементы рассчитаны на неполную пропускную способность для покрытия нагрузки, то отказ любого элемента в каждой цепи вызывает одинаковые последствия в нарушении электроснабжения. Поэтому с точки зрения надежности эти элементы считаются соединенными последовательно.

Будем считать, что отказ еще одного элемента после отказа всех резервных приводит к отказу всей группы в целом. Таким образом, вероятность отказа группы определяется как вероятность совпадения отказов (n-m+1) элементов в течение расчетного времени.

Если отказы одного элемента независимы от отказов других элементов, то вероятность отказа системы равна

$$Q_c(t) = \prod_{j=1}^{n-m+1} Q_j(t) . \qquad (1.33)$$

При равнонадёжных элементах

$$Q_c(t) = \left(Q_j(t)\right)^{n-m+1} \quad . \tag{1.34}$$

При экспоненциальном законе распределения интенсивности отказов

$$Q_{\tilde{a}}(t) = (1 - e^{-\lambda_0(t)})^{n-m+1} \quad . \tag{1.35}$$

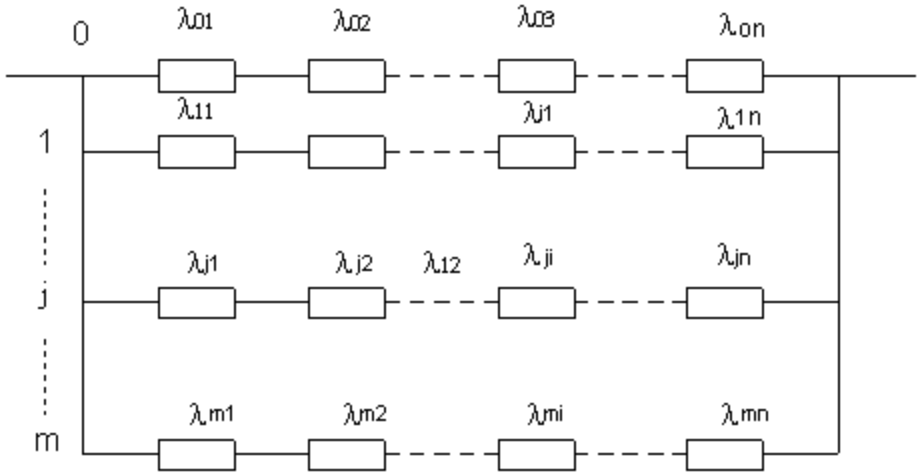


Рис. 1.6. Схема с общим нагруженным резервированием (количество резервных цепей $0 \le j \le m$)

На рис. 1.6 изображена резервированная схема. Данная схема имеет основную (с индексом "0") электрическую цепь с "n" последовательно включенными элементами. Параллельно ей включены "m" резервных цепей, имеющих точно такие же параметры элементов, как и в основной цепи.

Вероятность безотказной работы системы с количеством цепей $m + 1$ равна

$$P(t) = 1 - Q(t) = 1 - [1 - \prod_{i=1}^{n} P_{0j}(t)]^{m+1}. \tag{1.36}$$

В случае, когда $\lambda_i = \text{const}$, в каждой из цепей (поток отказов простейший):

$$\prod_{i=1}^{n} P_{0i}(t) = \prod_{i=1}^{n} e^{-\lambda_{0i} \cdot t} = e^{\lambda_0 t},$$

где $\lambda_0 = \sum_{i=1}^{n} \lambda_{0i} = \ldots = \sum_{i=1}^{n} \lambda_{ji} = \ldots = \sum_{i=1}^{n} \lambda_{mi}$.

Тогда вместо выражения (1.36) можно записать:

$$P(t) = 1 - (1 - e^{-\lambda_0 t})^{m+1}, \tag{1.37}$$

где $P_0(t) = e^{-\lambda_0 t}$ - вероятность безотказной работы основной цепи.

Средняя наработка до отказа резервированной системы

$$T = \int_0^\infty P(t)dt = \int_0^\infty (1 - (1 - e^{-\lambda_0 t})^{m+1})dt . \tag{1.38}$$

После некоторых преобразований получим

$$T = \frac{1}{\lambda_0} \sum_{i=0}^{m} \frac{1}{i+1}, \tag{1.39}$$

где i – номер параллельного элемента системы (параллельной цепи).

Интенсивность отказов системы определяется по выражению

$$\lambda(t) = -\frac{1}{P(t)} \cdot P'(t) \tag{1.40}$$

Параллельное соединение работающих восстанавливаемых элементов

Распишем состояние функционирования рассматриваемой системы с помощью функции вероятности отказа и функции вероятности безотказной работы.

$$(P_1(t)+Q_1(t))(P_2(t)+Q_2)=P_1(t)P_2(t)+P_1(t)Q_2(t)+P_2(t)Q_1(t)+Q_1(t)Q_2(t) .$$

При пропускной способности S = 100 % первые три члена соответствуют рабочему состоянию системы и только последний член выражает одновременный отказ обоих элементов, то есть полный разрыв цепи.

Для двух параллельно соединенных элементов (рис. 1.7) с неизменным параметром потока отказов (при пропускной способности каждого из элементов S = 100 % вероятность безотказной работы равна

$$P(t) = e^{-\omega_1 t} + e^{-\omega_2 t} - e^{-(\omega_1+\omega_2)t} . \tag{1.41}$$

При $\omega_1 = \omega_2 = \omega$, $P(t) = 2e^{-\omega t} - e^{-2\omega t}$

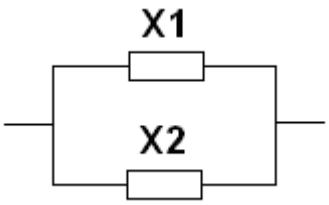


Рис. 1.7. Два параллельно соединенных элемента системы электроснабжения

Вместо функции вероятности безотказной работы и функции вероятности отказа можно воспользоваться коэффициентом готовности и коэффициентом аварийности (простоя).

Тогда вероятность отказа рассматриваемой системы можно найти по формуле

$$\boldsymbol{q}_c = \prod_{i=1}^{n} \boldsymbol{q}_i \ . \tag{1.42}$$

Вероятность того, что система будет в рабочем состоянии,

$$\boldsymbol{p}_c = 1 - \prod_{i=1}^{n} \boldsymbol{q}_i \ . \tag{1.43}$$

Для упрощения расчетов вероятности отказа и вероятности безотказной работы можно воспользоваться аппроксимацией

Если $P(t) = e^{-\omega t} = 1 - \omega t + \frac{(\omega t)^2}{2!}$ и $Q(t) = 1 - e^{-\omega t} = \omega t - \frac{(\omega t)^2}{2!}$,

то можно принять:

$$P(t) = 1 - \omega t \quad \text{и} \quad Q(t) = \omega t \ . \tag{1.44}$$

Если для последовательного соединения параметр потока отказов остается постоянным и равным сумме параметров потока отказов отдельных элементов, то для параллельного соединения это уже не применимо.

Параметр потока отказов цепи из параллельного соединения элементов является временной функцией работы, хотя среднее время между отказами (наработка на отказ) является величиной постоянной.

$$T_C = \int_0^{\infty} P(t)dt \ ,$$

для двух элементов

$$T_c = \int_0^{\infty} (e^{-\omega_1 t} + e^{-\omega_2 t} - e^{-(\omega_1 + \omega_2)t} dt = \frac{1}{\omega_1} + \frac{1}{\omega_2} - \frac{1}{\omega_1 + \omega_2} .$$

Если $\omega_1=\omega_2=\omega$, то для n элементов $T_c = \frac{1}{\omega} + \frac{1}{2\omega} + ... + \frac{1}{n\omega}$.

Средняя наработка на отказ системы из двух элементов

$$T_c = \int_0^\infty P(t)dt = \int_0^\infty (1+\omega t)e^{-\omega t}dt = \int_0^\infty e^{-\omega t}dt + \int_0^\infty \omega t e^{-\omega t}dt = \frac{1}{\omega} + \frac{\omega}{\omega^2} = \frac{2}{\omega} \quad . \qquad (1.45)$$

Для случая, когда n резервных линий резервируют одну линию или один элемент:

$$T_c = \frac{n}{\omega} \qquad (1.46)$$

1.2.6. Ущерб от недоотпуска электроэнергии

Недоотпуск электроэнергии характеризует не только все основные свойства надежности системы, но и режим загрузки системы электроснабжения.

Средний недоотпуск электроэнергии представляет собой математическое ожидание недоотпуска электроэнергии в расчетный промежуток времени. Его оценка для узлов нагрузки системы является одной из конечных целей расчетов надежности.

Во время t произошел отказ. В это время нагрузка потребления составляла величину $W_н$

В результате отказа система оказалась способна удовлетворять не всю нагрузку, а только ее часть (W_R)

Недоотпуск электроэнергии может быть найден по формуле

$$\Delta W = \int_t^{t_1} [W_н(t) - W_R(t)]dt = \int_t^{t_1} Д(t)dt \qquad (1.46)$$

где $Д(t) = W_H(t) - W_R(t)$.

Если в интервале времени $(t \to t_1)$ произошел дефицит энергии, то $Д(t) \geq 0$.

Экономический ущерб от перерыва в электроснабжении

Экономический ущерб от ненадежности электроснабжения характеризует интегральные свойства надежности системы, включая ее загрузку и значимость потребления энергии.

Ущерб по удельным показателям в зависимости от аварийного или планово недоотпущенной электроэнергии во время перерыва электроснабжения определяется как

$$У = У' \cdot \Delta w_1 + У'' \Delta \mathbf{w}_2; \qquad (1.47)$$

где $У'$ - удельная составляющая ущерба от аварийно-недоотпущенной электроэнергии, руб./кВт·ч);

$У''$- удельная составляющая ущерба от планово-недоотпущенной электроэнергии, руб/(кВт·час);

Δw_1 – среднегодовая аварийно-недоотпущенная электроэнергия, кВт·ч/год,

Δw_2 – среднегодовая планово-недоотпущенная электроэнергия, кВт·ч/год;

$У$ – ущерб от перерыва электроснабжения, руб/год.

Удельные показатели от перерыва электроэнергии промышленных предприятий, отнесенные к аварийному или плановому недоотпуску электроэнергии для различных отраслей промышленности и видов предприятий, приведены в справочной литературе.

Вопросы для самопроверки

1. Что понимается под надежностью?

2. Какие свойства объекта определяют его надежность?

3. Назовите и охарактеризуйте периоды жизни элементов.

4. Что такое условная вероятность безотказной работы и плотность распределения наработки до отказа?

5. Каковы показатели невосстанавливаемых элементов?

6. Каковы показатели восстанавливаемых элементов?

7. Как нормируется надежность в ПУЭ («Правилах устройства электроустановок»)?

Раздел 2. Факторы, нарушающие надежность системы, и их математические описания

Более подробно материал данного раздела изложен в [1], [3], [4].

В разделе рассматриваются две темы:

1. Допущения и особенности режимов работы систем электроснабжения.

2. Факторы, влияющие на надежность систем электроснабжения.

При работе с теоретическими материалами следует ответить на вопросы, приведенные в конце данного раздела. После проработки теоретического материала раздела 2 следует выполнить задание практического занятия № 2 и тренировочный тест № 2.

Изучение раздела заканчивается контрольным мероприятием: необходимо ответить на вопросы контрольного теста № 2.

2.1. Допущения и особенности режимов работы систем электроснабжения

2.1.1. Расчеты надежности систем по последовательным, параллельным, смешанным логическим схемам

Основные понятия процесса функционирования систем можно представить двумя способами - в виде подмножеств работоспособных состояний или неработоспособных состояний. Количество работоспособных и неработоспособных элементов зависит от схемы соединения. Так, для системы, состоящей из последовательных элементов 1,2….*n*, работоспособность системы имеет место, когда все элементы находятся в работоспособном состоянии. Вероятность произведения нескольких независимых событий в виде вероятностной функции, или вероятностного полинома, есть произведение вероятностей этих событий:

$$P_C = \prod_{i=1}^{n} P_i \qquad (2.1)$$

где $P_i(t)$ — функция надежности i-го элемента.

Неработоспособное состояние системы будет при отказе хотя бы одного элемента. Формула описания этого состояния

$$q_c = \sum_{i=1}^{n} q_i - \sum_{i,j} q_i q_j + \sum_{ijk} q_i q_j q_k + \ldots + (-1)^{n-1} q_1 q_2 \cdots q_n \quad . \qquad (2.2)$$

Для систем, состоящих только из параллельного соединения элементов, полный отказ существует при повреждении всех элементов, а вероятность его:

$$q_c = \prod_{i=1}^{m} q_i \quad . \qquad (2.3)$$

Работоспособность состояния системы, состоящей из параллельных элементов, наблюдается при сохранении работоспособности хотя бы одного элемента.

$$p_c = \sum_{i=1}^{m} p_i - \sum_{i,j} p_i p_j + \sum_{ijk} p_i p_j p_k + \ldots + (-1)^{n-1} p_1 p_2 \cdots p_n \quad . \qquad (2.4)$$

Для элементов системы электроснабжения, исходя из того, что второе, третье и последующие слагаемые имеют порядок малости, ими можно пренебречь, тогда формулы (2.2) и (2.4) примут вид

$$\boldsymbol{P}_c = \sum_{\boldsymbol{i}=1}^{\boldsymbol{m}} \boldsymbol{P}_i \quad . \qquad (2.5)$$

Реальную систему, состоящую из большого количества элементов, необходимо логически проанализировать, а затем изобразить в виде структуры системы, при этом структура системы изображается в виде специальной логической схемы, характеризующей состояние (работоспособное или неработоспособное) системы в зависимости от состояний отдельных элементов.

На логических схемах реальную систему сводят к трем основным способам соединения элементов последовательному, параллельному и смешанному. Причем смешанные соединения элементов возникают в том случае, когда реальную систему нельзя свести к последовательным или параллельным соединениям. Существуют соединения, которые, в принципе, не могут быть сведены: ни к последовательным, ни к параллельным, ни к смешанным. Такие соединения требуют специальных методов расчета показателей надежности системы.

Проанализируем три способа соединения элементов системы:

1. Если два элемента включены последовательно, то рабочее состояние системы заключается в работе двух элементов одновременно.

Неработоспособное состояние заключается в отказе хотя бы одного из элементов.

2. Если два элемента включены параллельно, то рабочее состояние системы заключается в работе хотя бы одного элемента, а неработоспособное состояние заключается в отказе одновременно обоих элементов.

3. Если невозможно свести схему к последовательно-параллельному соединению, например мостиковую схему (рис. 2.1), то такую схему необходимо логически анализировать.

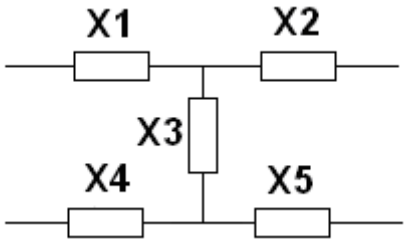


Рис. 2.1. Мостиковая схема соединения элементов системы электроснабжения

$X_1X_2 + X_4X_5 + X_1X_3X_5 + X_4X_3X_2$ – работоспособные состояния, которые можно представить в виде определителя:

$$\begin{vmatrix} X_1X_2 \\ X_4X_5 \\ X_1X_3X_5 \\ X_4X_3X_2 \end{vmatrix} .$$

Графическая схема, соответствующая такому определителю, представлена на рис. 2.2.

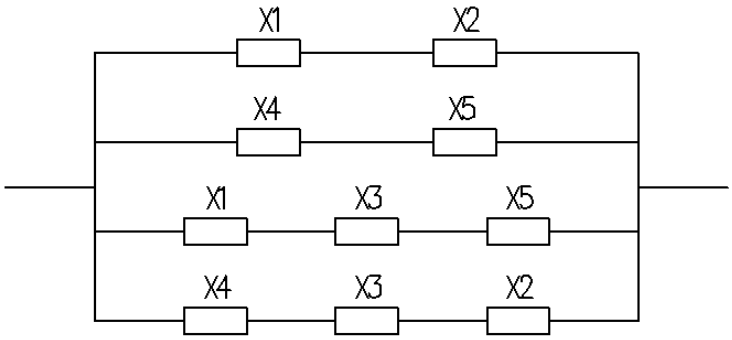


Рис. 2.2. Графическая схема метода минимальных путей

Для упрощения вычисления надежности систем условия функционирования определяются в виде условий работоспособности (ФР) или неработоспособности (ФНР). Неработоспособное состояние можно определить отрицанием работоспособного состояния:

$$(\overline{X}_1 + \overline{X}_2) \bullet (\overline{X}_4 + \overline{X}_5) \bullet (\overline{X}_1 + \overline{X}_3 + \overline{X}_5) \bullet (\overline{X}_4 + \overline{X}_3 + \overline{X}_2).$$

При составлении логической схемы использовались минимальные пути электроснабжения.

Неработоспособное состояние можно вывести через минимальное сечение, а работоспособное состояние получить отрицанием минимальных сечений.

Неработоспособное состояние

Неработоспособное состояние можно описать:

$$\overline{X}_1 \cdot \overline{X}_4 + \overline{X}_2 \overline{X}_5 + \overline{X}_1 \overline{X}_3 \overline{X}_5 + \overline{X}_2 \overline{X}_3 \overline{X}_4$$

$$\left| \begin{array}{l} \overline{X_1}\,\overline{X_4} \\ \overline{X_2}\,\overline{X_5} \\ \overline{X_1}\,\overline{X_3}\,\overline{X_5} \\ \overline{X_2}\,\overline{X_3}\,\overline{X_4} \end{array} \right|$$

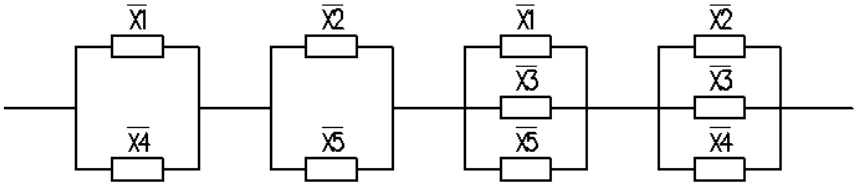


Рис. 2.3. Графическая схема метода минимальных сечений

Тогда работоспособное состояние описывается:

$$(X1 + X4) \cdot (X2 + X5) \cdot (X1 + X3 + X5) \cdot (X2 + X3 + X4).$$

Применение методов логического анализа для исследования схем электрических систем электроснабжения позволяет изучать их в общем виде. При расчете показателей надежности с помощью этих схем анализируются не все возможные состояния системы, тем более элементов, а только те состояния безотказной работы, тот минимальный набор элементов, которые обеспечивают нормальное функционирование системы передачи энергии от источника питания до узла нагрузки (минимальные пути), или тот минимальный набор элементов, отказ которых приводит к отказу системы относительно рассматриваемого узла (минимального сечения).

2.2. Факторы, влияющие на надежность систем электроснабжения

Системный подход к решению задачи оптимизации надежности заключается в выборе показателей, оценивающих надежность с учетом таких факторов, как сложность системы и процесса ее функционирования, качество исходной информации, необходимость выработки массовых решений, выбор необходимой точности оценки надежности. Выбор необходимой точности оценки надежности обеспечивается согласованием точности исходной информации, математических моделей надежности элементов и системы, а также методов их исследования.

Качество исходных данных о показателях надежности электрооборудования, о показателях ущерба от нарушения электроснабжения, о режимах работы и планово-предупредительном ремонте (ППР) оценивается точностью, то есть шириной интервала исследуемого показателя и достоверностью, то есть вероятностью попадания значения показателя в данный интервал.

Точность математических значений надежности оценивается степенью их адекватности, то есть внешним правдоподобием, которая должна удовлетворять технической постановке задачи . Точность моделей взаимосвязана с их сложностью, которая оценивается числом и особенностью учитываемых факторов.

Точность метода исследования оценивается степенью адекватности полученного решения идеальному (внутренним правдоподобием). Затруднения при

оценке точности возникают только в случае использования эмпирического метода исследования.

Согласование точности модели и метода исследования оценивается группой критериев качества: универсальностью, то есть способностью единым образом описать широкий класс явлений; разрешимостью - получением решения при минимальных затратах средств и времени; оптимальностью – разумным сочетанием универсальности и эффективности; согласованностью – соответствием параметров на входе реально управляемым свойствам системы; возможностью формализованного представления физических законов в математической форме.

Степень массовости вырабатываемых решений легко может быть оценена степенью оригинальности или типичности решений, а ее согласование с точностью исходной информации и точностью системы может быть оценено только качественно.

Согласованность точности исходных данных, модели и метода исследования – сложная задача. Инженерный метод ее решения основан на использовании принципа «слабого звена» - в качестве согласованной точности выбирается минимальная точность составляющих, то есть исходных данных, модели и метода.

Точность исходных данных целесообразно оценивать не в целом для СЭС, а для отдельных иерархических уровней. Для оценки надежности достаточно разделить СЭС на три уровня: высшее напряжение (110 кВ и выше), среднее напряжение (6-10 и 35 кВ) и низшее (менее 1 кВ). Одна из основных причин такого разделения – состояние информационной базы.

На низшем уровне информация о показателях надежности работы электрооборудования, о показателях ущерба от нарушений электроснабжения для большинства отраслей практически отсутствует.

На высшем уровне состояние информационной базы можно признать удовлетворительным. Данные об ущербах относятся к полным и внезапным перерывам в электроснабжении, а для оценки последствий ограничений в электроснабжении в лучшем случае предлагаются коэффициенты для пересчета от полного перерыва. По показателям надежности в основном оценивается отказ в целом, без дифференциации его по различным факторам и особенностям оборудования.

На среднем уровне информационная база существует, но она значительно меньше по номенклатуре и числу источников информации.

Таким образом, с точки зрения состояния информационной базы целесообразно рассмотрение СЭС не в качестве единой системы, а в виде трех различных подсистем.

Методы исследования надежности условно могут быть разделены на два противоположных направления: получение точных решений с последующим упрощением и поиск более приближенных решений с последующей проверкой их более мощными средствами. К первому направлению относятся логико-вероятностные и топологические методы. Эти методы считаются сложными, и поэтому чаще применяются методы второго направления, причем часто без проверки полученных приближенных решений.

Также применяются модели, относящиеся к промежуточному направлению и позволяющие получить решение с заданной степенью точности за счет совместного использования логико-вероятностных и топологических методов расчета.

В связи с тем, что состояние информационной базы на высших уровнях СЭС наилучшее, математические модели надежности элементов и СЭС на этих уровнях обладают наибольшим правдоподобием.

В математической модели надежности элемента должны быть учтены следующие основные факторы и особенности:

1. В качестве расчетных элементов рассматриваются основное генерирующее и силовое оборудование, средства канализации электроэнергии и коммутационная аппаратура.

2. Устройства релейной защиты и автоматики учитываются при описании условий возникновения отказов работоспособности системы и в вероятностных характеристиках коммутационной аппаратуры;

3. В качестве расчетных не рассматриваются те элементы, которые из-за своих функциональных свойств, места расположения или показателей надежно-

сти не влияют на работу СЭС или степень влияния соизмерима с допустимой погрешностью вычислений.

Для уменьшения размерности СЭС эффективна замена нескольких смежных элементов, отказы и выводы в ППР которых приводят к одинаковым последствиям, одним эквивалентным элементом с новыми вероятностными характеристиками, вычисленными по характеристикам составляющих его элементов. Элементы СЭС считаются восстанавливаемыми.

Предусматривается их возможность нахождения в одном из трех состояний: нормальная работа, аварийный ремонт (АР) и ППР. Последнее допустимо не учитывать, если ППР электротехнического и технологического оборудования совмещается.

Вывод в ППР элементов допускается только в том случае, когда образующие системы не являются критическими (предаварийными).

Основные вероятностные характеристики элементов задаются в виде времени безотказной работы T_i, времени между ППР T_{ni}, продолжительности АР T_{Bi} или обратных им значений параметров потока отказов ω_i, ППР ω_{ni} и интенсивностей восстановления μ_i и μ_{ni}, комплексной характеристики опасности отказа $\rho_i = \omega_i/\mu_i = T_{Bi}/T_i$ и опасности нахождения в ППР $\rho_{ni} = \omega_{ni}/\mu_{ni}$.

В качестве общепринятых при расчете надежности технических систем допущений применяются следующие:

1. Законы распределения T_i, T_{Bi}, T_{ni} и T_{Bni} являются экспоненциальными.

2. Момент отказа обнаруживается практически немедленно после его возникновения.

3. В процессе АР и ППР происходит полное восстановление ресурсов элементов.

4. Отсутствует простой в ожидании восстановления.

5. Процессы отказа и восстановления элементов считаются независимыми событиями.

В математической модели надежности СЭС должны быть учтены следующие особенности.

Для расчета надежности СЭС представляется в виде расчетной схемы, то есть без незначительных элементов и с эквивалентными элементами.

Независимо от числа состояний, в которых может находиться расчетный элемент, расчетная схема для каждого отказа работоспособности может находиться только в двух подмножествах расчетных состояний – полностью работоспособных или полностью неработоспособных.

В качестве причины возникновения отказов работоспособности рассматриваются одиночные отказы расчетных элементов или их наложения на аварийные или плановые ремонты других элементов. Разделение расчетных состояний на подмножества определяется отдельно для каждого выбранного отказа работоспособности системы.

В реальной СЭС можно сформулировать множество различных отказов, но не более пяти-семи из них можно отнести к числу значимых по последствиям, определяющим уровень надежности СЭС в целом.

Значимость отказа работоспособности определяется технико-экономической оценкой, вычисляемой по техническим и экономическим показателям. В качестве технико-экономической оценки служит ожидаемое значение ущерба за год из-за данного вида отказа.

В качестве основных факторов, определяющих значимость отказа, могут выступать: глубина нарушения электроснабжения; степень внезапности - без предупреждения и с различной заблаговременностью предупреждения; продолжительность нарушения – с ликвидацией при помощи переключений, ремонта или без него; область ограничения – глобальная, то есть объект в целом, или локальная, то есть отдельное производство.

Для разумно спроектированных СЭС наиболее распространенные значимые отказы - это полный перерыв электроснабжения наиболее чувствительной группы потребителей на время автоматических, ручных переключений и ремонтов.

В качестве основного критерия оптимальной надежности СЭС выступает минимум приведенных затрат с учетом ожидаемого ущерба за год от всех значимых отказов работоспособности, а в качестве дополнительного критерия – отношение ожидаемого ущерба к приведенным затратам.

Оптимальным направлением исследования надежности СЭС является нахождение решений с регламентируемой степенью точности.

Из двух разновидностей условий функционирования системы – функций работоспособности (ФР) и неработоспособности (ФНР) наиболее предпочтительной является ФНР.

Из двух возможных способов представления ФНР – через функции минимальных путей (ФМП) и функции минимальных сечений (ФМС) наиболее предпочтительным является ФМС за счет более простого способа нахождения и более легкого вычисления вероятностных характеристик системы.

Процесс нахождения вероятностных характеристик СЭС заключается в выполнении следующих этапов: предварительное упрощение системы; нахождение или задание значимых отказов работоспособности; окончательное упрощение системы для каждого из отказов работоспособности; нахождение условий возникновения отказа системы в виде таблицы отказов или ФМС; нахождение вероятностных характеристик системы по условиям возникновения отказа системы и вероятностным характеристикам элементов.

Вопросы для самопроверки

1. Какие основные виды соединений на логических схемах для расчета надежности Вы знаете?

2. Перечислить операции, выполняемые при вычислении значений показателей надежности.

3. Перечислить формулы для расчета последовательных и параллельных логических соединений.

4. Из чего состоит информационная база надежности ?

5. На какие иерархические уровни делятся СЭС при расчете надежности?

6. Какие существуют математические модели надежности?

7. Какие допущения принимают при расчете надежности СЭС?

8. Основные этапы нахождения вероятностных характеристик надежности СЭС .

Раздел 3. Математические модели и количественные описания, математические модели и количественные расчеты надежности систем

Более подробно материал данного раздела изложен в [1], [2], [4].

В разделе рассматриваются две темы:

1. Инженерный метод расчета надежности систем электроснабжения.

2. Логико-аналитические методы расчета. Важность элементов систем электроснабжения.

При работе с теоретическими материалами следует ответить на вопросы, приведенные в конце данного раздела. После проработки теоретического материала раздела 3 следует выполнить задания практических занятий № 3, № 4 и тренировочный тест № 3.

Изучение раздела заканчивается контрольным мероприятием: необходимо ответить на вопросы контрольного теста № 3.

3.1. Инженерный метод расчета надежности систем электроснабжения

3.1.1. Надежность схем электроснабжения и разные типы отказов

На современном этапе развития техники и технологии для оценки надежности схем систем электроснабжения широкое распространение получили элементные методы расчетов надежности. В этих методах предполагается, что схемы систем электроснабжения состоят из отдельных самостоятельных (в смысле анализа надежности) элементов, исключаются из рассмотрения функциональные зависимости между параметрами отдельных элементов устройства.

Рассматриваемые схемы систем электроснабжения состоят из элементов: линий электропередачи, трансформаторов, выключателей, отделителей, разъединителей, автоматических выключателей и т. д. Под узлами схемы понимаются физические пункты систем электроснабжения, которые непосредственно связаны не менее чем с тремя направлениями передачи энергии, т. е. обычно это сборные шины или секции распределительных устройств и т. д.

Живучесть электроэнергетической системы зависит от ее структуры, конфигурации, надежности электрооборудования, средств релейной защиты и противоаварийной автоматики, а также от квалификации обслуживающего персонала, запаса устойчивости, резерва активной мощности и т. д. При эксплуатации систем электроснабжения наблюдается появление так называемых цепочечных аварий из-за последовательного отказа в срабатывании нескольких выключателей при отключении повреждений.

Из наибольшего появления отказов можно отнести следующие виды отказов элементов схемы: отказ типа «короткое замыкание», отказ типа «обрыв цепи» и отказ в срабатывании (скрытый отказ), все остальные отказы, которые встречаются, появляются на порядок реже.

1. Отказ типа «короткое замыкание». Такой вид отказа может происходить во всех элементах схемы, через которые проходит ток нагрузки в нормальном режиме работы. Короткие замыкания в таких элементах отключаются основной релейной защитой, в зоне действия которой находится рассматриваемый элемент сети, либо резервной с выдержкой времени. Перекрытие изоляции в самом защитном коммутационном аппарате в этих расчетах не учитываем, так как такие повреждения встречаются на порядок реже, чем короткое замыкание в защищаемых этими коммутационными аппаратами элементах сети.

2. Отказ выключателя типа «*обрыв цепи*». К таким отказам будем относить автоматические отключения выключателей в результате повреждений, а также ложные и излишние отключения выключателей в результате действия релейной защиты, которые ликвидируются с помощью ручного переключения.

3. Отказ выключателя в срабатывании. Эти отказы выявляются в результате профилактических осмотров выключателей: привода, катушки отключения, дугогасительной камеры, контактной системы; оценивается возможность перекрытия изоляции при внешних и внутренних перенапряжениях; проверяются пути утечки тока. Производится осмотр релейных защит, контактов самих реле, проверяются установки защит, оперативные цепи питания, работа устройства

автоматического повторного включения (АПВ), устройства автоматического ввода резерва (АВР) и т. д.

Второй и третий типы отказов проявляются в срабатывании защитных коммутационных аппаратов.

Ввиду того, что отказ защитного коммутационного аппарата типа «*обрыв цепи*» и «*отказ в срабатывании*» – события независимые и несовместные, а также по- разному действуют на рассматриваемый узел нагрузки (секция шин, либо отдельно взятый потребитель), то для оценки надежности электроснабжения узла нагрузки составляются две логические схемы замещения.

Причины появления отказов могут быть разные. Электрическое оборудование промышленных предприятий в процессе эксплуатации находится под влиянием различных факторов – повышенной влажности, агрессивных сред, пыли, механических и электрических нагрузок. При этом изменяются свойства материалов электроустановок, что приводит к возникновению коротких замыканий, которые вызывают отключение электроустановок и электрических сетей, т. е. к перерыву в электроснабжении. Перерывы в электроснабжении приводят к простою производства, снижению объема выпускаемой продукции и т. д. В связи с этим возникает необходимость в новых методах расчета надежности систем электроснабжения, чтобы обеспечить бесперебойность подачи электроэнергии.

3.1.2. Анализ основного силового оборудование электрических цепей

Воздушные и кабельные ЛЭП представляют собой восстанавливаемые объекты, которые могут находиться в работоспособном состоянии, отказывать, находиться в неработоспособном состоянии, ремонтироваться и после восстановления снова находиться в работоспособном состоянии. Под отказом понимается всякое событие, происходящее на линии, которое приводит к необходимости отключения. Кроме этого, объект отключают для проведения профилактического ремонта. Частота отказов ЛЭП обычно зависит от длины линий. Удобно

пользоваться удельной частотой отказа, отношением полной частотой отказа к длине линии.

Трансформаторы. Трансформаторы представляют собой восстанавливаемые объекты, которые могут находиться в работоспособном состоянии, отказывать и переходить в неработоспособное состояние, а также они могут отключаться для профилактического ремонта. Под отказом понимается всякое повреждение в трансформаторе, приводящее к необходимости его отключения.

Основные параметры: частота отказов - отказ/год; средняя длительность аварийного ремонта - год/отказ; средняя длительность планового ремонта отключения/год.

Выключатели являются одними из сложных объектов электрической сети. Они также являются восстанавливаемыми объектами, которые могут находиться в трех состояниях: работоспособном, неработоспособном и плановом ремонте.

Выключатели имеют многообразные виды отказов, которые могут привести к различным последствиям в сетях.

Поэтому частота отказов может иметь различные значения в зависимости от повреждений.

Есть и другие объекты в сетях электроснабжения: отделители, разъединители, шины распределительных устройств.

Кроме этого, анализу подвергаются генерирующие подсистемы и подсистемы нагрузок.

Для обеспечения надежности элементов системы электроснабжения информация об отказе фиксируется в соответствии с существующей нормативно-технической документацией, при этом она должна содержать определенные информационные признаки: дату возникновения отказа или неисправности; общую наработку объекта с начала его эксплуатации до момента установления отказа (определения неисправности); внешние признаки и характер появления отказа или неисправности; условия эксплуатации и вид работы, при которых был обнаружен отказ или установлена неисправность; способ устранения неисправ-

ности; принятые или рекомендованные меры по предупреждению возникновения отказов или неисправностей. Сбор информации и заполнение документации о надежности проводятся в обычных условиях обслуживающим персоналом, либо дежурным персоналом, либо представителями службы ремонта.

3.1.3. Инженерные методы расчета надежности

Системы электроснабжения характеризуются высокими коэффициентами готовности, близкими к 1, благодаря чему в большинстве случаев можно ограничиться для резервирования вторым параллельно включенным элементом – двумя линиями, двумя трансформаторами и т.д.

Вероятность безотказной работы цепи системы электроснабжения

$$P_{ц}(t) = e^{-\omega_{ц} T} . \quad (3.1)$$

Если имеется цепь электроснабжения, состоящая из выключателей, ячеек РУ, трансформаторов, кабельных или воздушных линий, соединенных последовательно, то для такой цепи можно определить суммарное значение параметра потока отказов:

$$\omega_{ц} = \sum_{1}^{k} \omega_i \quad (3.2)$$

где k – число элементов в цепи.

Вероятность работы цепи без учета отключений:

$$P(t) = e^{-(\omega_{ц} + \mu) t} . \quad (3.3)$$

Среднее время восстановления цепи из последовательных элементов в часах или долях года:

$$T_{в.ц.} = \frac{1}{\omega_{ц}} \cdot \sum_{1}^{к} \omega_i T_{Bi} . \quad (3.4)$$

Время наработки цепи из последовательных элементов:

$$T_{ср.ц} = \frac{1}{\omega_{ц}} \quad (3.5)$$

$K_{в.ц} = \sum_{i=1}^{n} K_{Bi} = \sum_{i=1}^{n} T_{Bi} \cdot \omega_i$ - коэффициент вынужденного простоя при последовательном соединении n элементов;

$T_{в,ц} = K_{в.ц}/\omega_ц$ (лет/отказ) – среднее время восстановления.

$K_{р.ц} < \sum_{i=1}^{n} K_{pi}$ - коэффициент планового простоя, но не меньше $K_{Pi\max}$ того элемента, у которого коэффициент планового простоя имеет максимальное значение.

Для определения показателей надежности системы, состоящей из двух цепей, включенных параллельно используются выражения

$$\omega_{1\text{-}2} = \omega_1 \cdot \omega_2 (T_{в1} + T_{в2}) + \omega_2 \cdot K_{1р} + \omega_1 \cdot K_{2р} \qquad (3.6)$$

(или $\omega_{1\text{-}2} = \omega_1 \cdot K_{в2} + \omega_2 \cdot K_{в1}$). Индексы 1 и 2 соответственно означают первую и вторую цепи, соединенные параллельно.

Коэффициент вынужденного простоя цепи из двух параллельно включенных элементов равен

$K_{1\text{-}2} = K_{в1} K_{в2} + K_{в1р2} + K_{в2р1}$,

где $K_{в1р2}$ - коэффициент совместного вынужденного простоя первого элемента и планового ремонта второго, $K_{в2р1}$ – соответственно вынужденного простоя первого элемента и планового ремонта второго;

$K_{в2р1} = 0{,}5 \cdot \omega_2 \cdot K^2_{р1}$ при $K_{р1} \le T_{в2}$;

$K_{в2р1} = K_{в2} \cdot (K_{р1} - 0{,}5 \cdot T_{в1})$ при $K_{р1} > T_{в2}$,

$T_{рц} = K_{рц.}/\mu$ – средняя продолжительность одного планового ремонта.

В теории надежности резервирования систем с восстановлением показано, что при *n* параллельных цепях с одинаковыми характеристиками среднее время нарушения электроснабжения системы при отказе всех *n* цепей:

$$T_{в.с} = \frac{t_{в.ц.}}{n}. \qquad (3.7)$$

И время наработки системы между отказами всех цепей

$$T_{ср.с} = \frac{T_{В.ц}}{n} \cdot \left[\left(\frac{T_{В.ц} + T_{ср.ц}}{T_{В.ц}} \right)^n - 1 \right]. \qquad (3.8)$$

При двух параллельных цепях время восстановления системы

$$T_{B.c} = \frac{T_{в.ц.}}{2} \ . \qquad (3.9)$$

Время наработки системы из двух параллельных цепей:

$$T_{ср.с} = \frac{T^2_{ср.ц}}{2 \cdot T_{в.ц}} + T_{ср.ц} \ . \qquad (3.10)$$

Если параллельные по схеме элементы рассчитаны на неполную пропускную способность для покрытия нагрузки, то отказ любого элемента в каждой цепи вызывает одинаковые последствия в нарушении электроснабжения. Поэтому с точки зрения надежности эти элементы считаются соединенными последовательно.

Для расчета показателей надежности электроснабжения нагрузочного узла анализируется схема замещения сети на участке между источниками питания и рассматриваемым узлом. В схеме последовательно соединяются элементы, отказ любого из которых вызывает простой всей данной ветви, а параллельно соединяются ветви, отключение любой из которых не приводит к простою других. В последовательную цепь, кроме элементов данной ветви, вводятся также смежные выключатели, повреждение которых с развитием аварии приведет к отключению рассматриваемой цепи (например, выключателей всех присоединений, секции шин, к которой подключена анализируемая цепь).

Для оценки надежности системы электроснабжения какого-либо потребителя сначала выявляются цепи, связывающие потребителя П с источниками питания И. Затем определяются результирующие показатели надежности цепей, состоящих из последовательно включенных элементов . Далее по формулам параллельного сложения определяются результирующие показатели цепей, включенных параллельно. При этом выявляются элементы, отказ которых при нормальном состоянии схемы влечет за собой отказ всей системы электроснабжения. Для восстановления работы необходимо отключить разъединители отказавшего элемента и включить обратно смежные присоединения. Время восстановления работы в этом случае определяется длительностью необходимых переключений. Например, T^*_B = 0,5 час = 0,06 10^{-3} год.

Коэффициент аварийного простоя цепи:

$$K_{n} = \sum_{1}^{n} K_{i} \ , \qquad (3.11)$$

где $K_i = \omega_i \cdot t_{ei}$;

t_{ei} - продолжительность аварийного ремонта *i*-го элемента.

Коэффициент планового простоя цепи из-за ремонта:

$$K_p = \mu \cdot t_n; \qquad (3.12)$$

где μ – параметр потока восстановления в плановых ремонтах;

t_n - продолжительность планового ремонта.

Продолжительность планового ремонта цепи обычно принимают по элементу с наибольшей продолжительностью ремонта.

Коэффициент аварийного простоя является вероятностью аварийного простоя. Коэффициент простоя в плановом ремонте - вероятностью простоя в плановом ремонте.

Ожидаемое время аварийного простоя цепи в течение времени t :

$$t_в = K_n \cdot t \ , \qquad (3.13)$$

где t - время работы цепи.

Это время обычно равно одному году или 8760 часам.

Среднее время восстановления цепи, приходящееся на один отказ:

$$T_{В.Ц.} = \frac{K_{n}}{\omega_{Ц}} \ . \qquad (3.14)$$

Общий коэффициент простоя из-за отказов элементов, а также из-за планового ремонта цепи:

$$K_O = K_n + K_p \ . \qquad (3.15)$$

Общая длительность нахождения цепи в отключенном состоянии за календарное время:

$$t_o = K_O t \ . \qquad (3.16)$$

Для оценки надежности РУ при различных вариантах их схем может быть использован метод последовательного и параллельного сложения показателей элементов или цепей.

Рассмотрим для примера схему с одной несекционированной системой шин, в которой имеются 2 линейных и 2 трансформаторных присоединения (рис. 3.1) . Полный отказ РУ происходит при отказе секционного выключателя, вызвавшего действие релейной защиты.

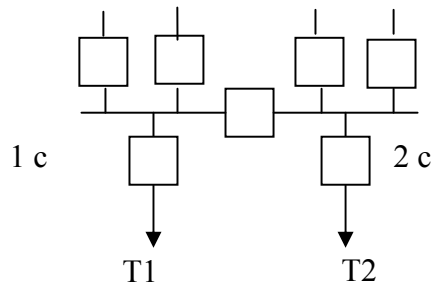


Рис. 3.1. Схема РУ с одной секционированной системой шин

Показатели полного отказа:

$\omega_{РУ} = \omega_{секц.выкл} K_з$,

$\omega_{секц.выкл} = 0{,}016$ 1/год,

$K_з = 0{,}6$ (60 % процентов отказов выключателя приводят к отключению смежных цепей, табличное значение),

$T_{В.РУ} = 0{,}8$ час $= 0{,}0913\ 10^{-3}$ год,

$K_{В.РУ} = T_{В.РУ}\, \omega_{РУ,}$

$, K_{В.РУ} = 1{,}46\ 10^{-6}$.

Показатели отказов каждой из секций РУ (частичные отказы РУ):

$\omega_{секц.РУ} = K_з\ (n_Л\ \omega_{п.л.} + n_Т\ \omega_{п.т})$,

где $K_з = 0{,}6$; $\omega_{п.т} = 0{,}016$ 1/год, $\omega_{п.л} = 0{,}032$ 1/год,

$n_Т = 1$, $n_Л = 2$ (количество присоединений трансформаторов и линий на секцию РУ.

$\omega_{секц.РУ} = 0{,}6\ (2\ 0{,}032 + 1\ 0{,}016) = 0{,}048$ 1/год;

$T_{в.РУ} = 0{,}8$час $= 0{,}0913\ 10^{-3}$ год;

$K_{секц.РУ} = T_{В.РУ}\, \omega_{секц.РУ}$;

$K_{секц..РУ} = 4{,}38\ 10^{-6}$.

Полные отказы РУ из-за совпадений отказов одной секции с ремонтом шин другой секции можно определить, применяя формулы параллельного сложения.

$$\omega_{\text{отк-рем.РУ}} = \omega_{1\text{секц.}} K_{в\,2} + \omega_{2\text{секц.}} K_{B1}\ .$$

Этот показатель на порядок меньше, чем показатель потока отказов секционного выключателя.

Наработка на отказ РУ

$$T_{ц} = \frac{1}{\omega_{ц}} = \frac{1}{0{,}016} = 62{,}5 \text{ года.}$$

Вероятность безотказной работы:

$$P_{Ц}(t) = e^{-\omega_w t} = e^{-0.016t} = 0{,}985.$$

3.2. Логико-аналитические методы расчета. Важность элементов систем электроснабжения

3.2.1. Логико-вероятностный метод расчета

К логико-аналитическим относится логико-вероятностный метод (ЛВМ) расчета надежности. В данном методе математические модели надежности элементов и системы описываются с помощью аппарата алгебры логики, а показатели надежности вычисляются с помощью теорем теории вероятностей.

Математическая модель системы (при использовании ЛВМ) описывается с помощью функций алгебры логики (ФАЛ), т. е. функций, принимающих лишь два значения (y=1 или y=0), и наборами двоичных аргументов, x_1, x_2,…x_n, которые также могут находиться лишь в двух несовместных положениях (x_j = 1 или x_j=0).

Символы x_1, x_2 ..., $x_п$ характеризуют состояния элементов, причем $x_j = 1$ соответствует работоспособности элемента, x_j = 0 соответствует его неработоспособности. Аналогично понимают символы $y = 1$, y = 0 для системы.

Функцию алгебры логики, связывающую состояния элементов с состоянием системы, называют функцией работоспособности системы. Эту функцию составляют путем анализа физических особенностей работы системы. Обычно имеют дело с монотонными ФАЛ, для которых при любых наборах $\tilde{x} = (x_1,...,x_n)$ и $\tilde{z} = (z_1,...,z_n)$ таких, что $x_j \le z_j$, имеет место соотношение $y(\tilde{x}) \le y(\tilde{z})$.

Монотонными являются функции работоспособности систем, в которых замена неработоспособного элемента на работоспособный не может привести к отказу системы.

От логической функции работоспособности переходят к уравнению работоспособности в символах обычной алгебры. При этом используют зависимости:

если x_1 и x_2 связаны операцией конъюнкции (логического умножения), то

$x_1 \cap x_2 = x_1 x_2$;

если x_1 и x_2 связаны операцией дизъюнкции (логического сложения), то

$x_1 \cup x_2 = x_1 + x_2$;

если x_1 и x_2 связаны операцией строго разделительной (исключающей) дизъюнкции («исключающее ИЛИ»), то

$x_1 \cup\cup x_2 = x_1 + x_2 - 2x_1x_2$

При использовании этих зависимостей учитывают, что $x_1x_1 = x_1$.

В уравнение работоспособности вместо обозначений простых событий x_j подставляют вероятности этих событий P_j и вычисляют вероятность P_c нахождения системы в работоспособном состоянии (в течение заданного интервала времени).

Достоинства логико-вероятностного метода расчета надежности:

1) можно применять при любой логической структуре системы (не только при последовательно-параллельных логических схемах);

2) можно применять при любых распределениях наработки до отказа.

Недостатки метода:

1) не всегда удается составить логическую функцию работоспособности, достаточно точно соответствующую рассматриваемой системе;

2) для сложных систем преобразования ФАЛ становятся очень громоздкими.

Метод нашел применение для расчета надежности систем, в которых работоспособное состояние связано с наличием электрической проводимости между входом и выходом системы. Также этот метод можно использовать для оценки надежности спроектированных систем электроснабжения от генератора или выбранного узла до потребителя, а также для определения риска в этой системе, то есть определения тех объектов, которые вносят основной вклад в надежность системы электроснабжения.

Работоспособное и неработоспособное состояния описываются с помощью функции алгебры логики. Существуют две логические функции: функция работоспособности и функция неработоспособности.

Порядок расчета показателей надежности логико-вероятностным методом:

1. Анализируем действующую схему электроснабжения, по возможности составляем логическую схему;

2. Определим условия работоспособности для потребителя;

3. Определим условия неработоспособности для потребителя;

4. Находим приближенное значение функции работоспособности или функции неработоспособности по полиномам;

5. Находим интересующие показатели надежности:

- среднее время восстановления системы:

$$\widetilde{T}в = \frac{\widetilde{Q}_{П1}}{\sum \frac{\partial \widetilde{Q}_{П1}}{\partial q_i} \cdot q_i \mu_i} \quad ,$$

- среднее время безотказной работы электроснабжения потребителя:

$$\widetilde{T} = \frac{1 - \widetilde{Q}_{П1}}{\sum \frac{\partial \widetilde{Q}_{П1}}{\partial q_i} \cdot q_i \mu_i} \, .$$

3.2.2. Методы оценки важности элементов СЭС

В проблеме надежности электроэнергетических систем интенсивно развивается направление, связанное с оценкой влияния показателей надежности лю-

бого элемента на надежность системы в целом, то есть *степень ответственности* (важности) элемента.

Знание этого обстоятельства позволяет повысить надежность системы за счет увеличения надежности наиболее ответственных элементов; позволяет упростить сложную систему, исключив наименее значимые элементы. Кроме того, знание наиболее ответственных элементов позволяет подойти к оценке неточности информации, акцентировав внимание на точности показателей существенных элементов.

Важность элементов оценивается как на логическом, так и на вероятностном уровнях задания системы.

Под логическим уровнем задания системы подразумевается представление ее только условиями функционирования с помощью алгебры логики в графическом или аналитическом виде.

Важность элементов на логическом уровне, называемая *весом*, учитывает только структурную сложность системы и место элемента в ней. Показатели надежности самих элементов могут быть неизвестны, а элементы считаются равнонадежными.

Точная оценка *веса* основана на анализе определенных состояний системы, что для реальных систем является очень сложной задачей.

Для практических целей наиболее предпочтительной является приближенная оценка *веса* элемента i числом и порядком минимальных сечений, проходящих через него.

Если i элемент a раз участвует в сечении ранга j и $в$ раз в сечении ранга $j+1$, то оценка его веса имеет вид

$$C_i = aC^{(j)} + вC^{(j+1)}. \qquad (3.17)$$

Оценку целесообразно проводить не более чем по двум сечениям младших рангов (j и $j+1$), проходящих через элемент i. Предпочтительность по весу в первую очередь определяется рангом j - чем меньше, тем весомее элемент, а во вторую очередь числом a – чем больше, тем весомее элемент.

Например, для схемы электроснабжения типа «мостик» (рис. 2.1) ФНР имеет вид

$$\overline{F_1} = \begin{vmatrix} \overline{1}\cdot\overline{2} \\ \overline{3}\cdot\overline{4} \\ \overline{1}\cdot\overline{4}\cdot\overline{5} \\ \overline{2}\cdot\overline{3}\cdot\overline{5} \end{vmatrix}.$$

Оценки важности для элементов (C_i) определяются:

$C_1 = C_2 = C_3 = C_4 = 1\cdot C^{(2)} + 1\ C^{(3)}$; $C_5 = 2\cdot C^{(3)}$.

В исследуемой функции элементы 1÷4 равноважны и каждый из них важнее элемента 5.

Количественные оценки веса могут быть использованы для упрощения сложной схемы и ее логической функции. Для упрощения выполняется следующее:

- в ФМП (или в графе системы) исключаются как «абсолютно надежные» элементы, имеющие наименьший вес, или

-в ФМС исключаются сечения, включающие в себя наименее важные элементы. Приведенная выше ФНР после упрощения приобретает следующий вид:

$$\overline{F} = \begin{vmatrix} \overline{1} & \overline{2} \\ \overline{3} & \overline{4} \end{vmatrix}.$$

Под вероятностным уровнем задания системы подразумевается представление ее условиями функционирования и вероятностными характеристиками элементов. Важность элементов на вероятностном уровне задания системы принято называть *значимостью*. *Значимость*, в отличие от *веса*, является точной оценкой важности элемента и оценивается вероятностью

$$P_i^{/} = \frac{\partial P_c}{\partial r_i}, \qquad Q_i^{/} = \frac{\partial Q_c}{\partial q_i}. \tag{3.18}$$

Определим значимость для элементов вероятностной функции, которая в матричной форме имеет вид

$$Q_c = \begin{vmatrix} q_1\ q_2 \\ q_3\ q_4 \\ q_1\ q_4\ q_5 \\ q_2\ q_3\ q_5 \end{vmatrix} - \begin{vmatrix} q_1\ q_2\ q_3\ q_4 \\ q_1\ q_2\ q_4\ q_5 \\ q_1\ q_2\ q_3\ q_5 \\ q_1\ q_3\ q_4\ q_5 \\ q_2\ q_3\ q_4\ q_5 \end{vmatrix} + 2 \begin{vmatrix} q_1\ q_2\ q_3\ q_4\ q_5 \end{vmatrix}$$

Значимость первого элемента равна:

$$Q_1' = q_2 + q_4 q_5 - (q_2 q_3 q_4 + q_2 q_4 q_5 + q_2 q_3 q_5 + q_3 q_4 q_5) + 2 q_2 q_3 q_4 q_5$$

Ограничиваясь в вероятностном полиноме конъюнкциями не более чем третьего порядка, будем иметь приближенную значимость первого элемента

$$\tilde{Q}_1' = q_2 + q_4 q_5.$$

Значимость других элементов равна

$$\tilde{Q}_2' = q_1 + q_3 q_5,$$

$$\tilde{Q}_3' = q_4 + q_2 q_5,$$

$$\tilde{Q}_4' = q_3 + q_1 q_5,$$

$$\tilde{Q}_5' = q_1 q_4 + q_2 q_3.$$

Повышение надежности системы необходимо осуществлять в первую очередь повышением надежности наиболее значимых элементов.

Вопросы для самопроверки

1. Какие основные способы получения логических функций?
2. На каких этапах расчета надежности возможно и невозможно проведение приблизительных вычислений?
3. В чем заключается инженерный метод расчета надежности?
4. Какие существуют типы отказов в электроснабжении и в чем их особенность?
5. Каковы показатели важности при вероятностном задании системы?
6. Укажите область практического использования показателей важности.

Раздел 4. Технико-экономическая оценка недоотпуска электроэнергии и эффективности надежного электроснабжения

Более подробно материал данного раздела изложен в [2], [3].

В разделе рассматриваются две темы:

1. Особенности технико-экономических расчетов с учетом расчета надежности.

2. Ущерб от ненадежности электроснабжения объекта энергетики.

При работе с теоретическим материалом следует ответить на вопросы, приведенные в конце данного раздела. После проработки теоретического материала раздела 4 следует выполнить задание практического занятия № 5 и тренировочный тест № 4.

Изучение раздела заканчивается контрольным мероприятием: необходимо ответить на вопросы контрольного теста № 4.

4.1. Особенности технико-экономических расчетов с учетом расчета надежности

В качестве основного критерия оптимальной надежности СЭС выступает минимум приведенных затрат с учетом ожидаемого ущерба за год от всех значимых отказов работоспособности, в качестве дополнительного критерия – отношение ожидаемого ущерба к приведенным затратам.

В случае, когда в качестве экономической оценки надежности принимаются удельные разовые показатели ущерба конкретных производств, в качестве основных технических показателей надежности выступают время безотказной работы T, время восстановления $T_в$ (или обратные им характеристики – параметр потока отказов системы $\lambda_с = T^{-1}$ и параметр потока восстановления системы $\mu_с = T_в^{-1}$) и опасность отказов $P = \lambda_с/\mu_с = T_в/T$.

Если в качестве экономической оценки надежности принимаются усредненные для производства удельные разовые показатели ущерба, то в качестве технического показателя выступает вычисляемая по опасности отказа (P) вели-

чина условного недоотпуска электроэнергии, учитывающая основные факторы отказа работоспособности.

Если при отказе работоспособности системы *j* отключаются потребители суммарной мощностью S_{aj} , кВ·А (или P кВт) на время $T_{вj}$ (ч) λ_j раз в году, то величина недоотпущенной электроэнергии ΔW_j равна

$$\Delta W_j = S_{aj}\, T_{вj}\, \lambda_j , \qquad (4.1)$$

где $T_{вj}$, λ_j - показатели надежности системы для отказа *j*.

Вместо них возможно использование комплексного показателя – опасности отказа $K_п$. Тогда величина недоотпущенной электроэнергии равна

$$\Delta W_j = S_{aj}\, K_{nj}\, 8760. \qquad (4.2)$$

Однако из-за особенностей расчета надежности подобная оценка недоотпуска не всегда точна. Особенность заключается в том, что при расчете надежности находятся вероятностные характеристики сформулированного отказа и всех более тяжелых отказов системы. Так, если отказ системы – погашение одного трансформатора из трех, то в показателях надежности учитывается погашение также и двух, и трех трансформаторов, тогда как для подсчета недоотпуска требуется оценить погашение только одного трансформатора.

Рассмотрим способы оценки величины ущерба от недоотпуска электроэнергии с учетом показателей надежности системы электроснабжения. На рис. 4.1 представлена структурная схема системы электроснабжения.

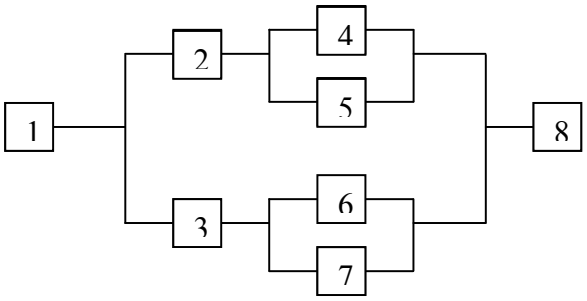


Рис. 4.1. Структурная схема системы электроснабжения:
1 – генератор; 2,3 – трансформаторы; 4,5,6,7 – линии электропередач; 8 – потребитель

Пропускные способности элементов 2,3 – 0,5 о. е., 4-7 – 0,25 о. е. Под отказом работоспособности подразумевается ограничение электроснабжения на величину ΔS_a = 0,25 о.е. Для решения используем функцию алгебры логики, называемую «*или, но не и*» и обозначаемую символом $\oplus$. Эта операция вводится для тех конъюнкций, совместное возникновение которых недопустимо, так как не отвечает формулировке состояния отказа. Вероятностный полином такой функции для двух событий равен

$P(1 \oplus 2) = P(1 \cdot \overline{2} + \overline{1} \cdot 2) = p_1 + p_2 - 2p_1p_2.$

Для большого числа событий

$$P(1 \oplus 2 \oplus 2 \oplus \ldots\ldots \oplus n) = \sum_i r_i - 2\sum_{i,j,i\neq j} r_i r_j + 3\sum_{i,j,kk,i\neq j\neq k} r_i r_j r_k .... \qquad (4.3)$$

В рассматриваемой системе электроснабжения к заданному отказу приводят одиночные отказы линий электропередач. Одиночные отказы других элементов и сочетания отказов не должны присутствовать в логической функции. Находим логическую функцию и полином:

$\overline{F}(1 \cdot 2 \cdot 3(\overline{4} \oplus \overline{5} \oplus \overline{6} \oplus \overline{7})$;

$Q(\overline{F}) = p_1p_2p_3[(q_4+q_5+q_6+q_7) - 2\ (q_4q_5+q_4q_7+q_1q_6+q_5q_6+q_6q_7) +$

$3(q_4q_5q_6+q_4q_5q_7+q_4q_6q_7+q_5q_6q_7) - 4(q_4q_5q_6q_7)] = 4q - 24q^2+60q^3-80q^4+60q^5-24q^6+4q^7$

Определим вероятность отказа системы электроснабжения с помощью обычных функций логики (конъюнкции и дизъюнкции).

$\overline{F}(\overline{4} + \overline{5} + \overline{6} + \overline{7})$; $Q(\overline{F}) = 4q-6q^2+4q^3-q^4.$

Вероятность получается завышенной (приблизительно на $24q^2 - 6q^2 = 18q^2$). Погрешность возникает за счет наложения отказов линий и за счет неучета работы других элементов системы. Такой способ рекомендуется для систем с $q_i << 1$.

4.2. Ущерб от ненадежности электроснабжения объекта энергетики

Оценка ущерба при перерывах электроснабжения более точно производится на основании данных удельных разовых ущербов для различных произ-

водств в технологической цепочке, рассчитанных относительно их производительности.

Данный способ в большей степени учитывает последствия перерыва электроснабжения для данного предприятия. При оценке по этому способу ущерб разделяют на первичный и вторичный. Первичный ущерб – это ущерб, вызванный перерывом в электроснабжении данного агрегата или объекта. Вторичный ущерб – ущерб, вызванный перерывом в электроснабжении предыдущего агрегата или объекта по ходу технологического процесса.

При определении ущерба в зависимости от схемы электроснабжения учитываются аварийные и плановые перерывы электроснабжения (простои) или только аварийные.

Первичный ущерб:

$$У_1 = [(У_а + T_в \cdot 8760 \cdot У_в)\omega_р + К_п \cdot 8760 У_в] \cdot П \cdot \gamma \,, \qquad (4.4)$$

где *Уа* – составляющая удельного ущерба, связанная с самим фактом перерыва электроснабжения;

Ув – составляющая удельного ущерба, связанная с длительностью перерыва электроснабжения. При плановом простое учитывается только составляющая Ув, пропорциональная длительности перерыва в электроснабжении.

$У_1$ – первичный ущерб; тыс.руб/год;

П – производительность агрегата или объекта;

γ - коэффициент, учитывающий степень ограничения производства при перерывах электроснабжения.

$T_в$- время восстановления объекта, с отказом которого связан перерыв в электроснабжении;

$К_п$ – коэффициент простоя;

$\omega_р$ – параметр потока отказов элементов, чей отказ и вызвал перерыв в электроснабжении объекта (агрегата).

Вторичный ущерб:

$$У_2 = (\Delta T_в \cdot У_в \cdot \omega_р + К_п \cdot 8760 \cdot У_в) \cdot П \cdot \gamma; \qquad (4.5)$$

где $\Delta T_в = T_в - T_0/\gamma$,

T_0 – допустимое время перерыва первичного производства, которое не вызывает ущерба вторичного производства;

$У_2$ – вторичный ущерб, тыс.руб/год.

Итоговый ущерб от перерыва (ограничения) в электроснабжении предприятия равен сумме первичного и вторичного ущербов ($У = У_1 + У_2$).

Вопросы для самопроверки

1. Что является основным критерием оптимальной надежности схемы электроснабжения?
2. Чему равен недоотпуск электроэнергии с учетом показателей надежности элементов и системы электроснабжения?
3. Что такое первичный ущерб от недоотпуска электроэнергии ?
4. Что такое вторичный ущерб от недоотпуска электроэнергии ?
5. Чему равен итоговый ущерб от недоотпуска электроэнергии (с учетом первичного и вторичного ущерба)?
6. При каком условии возможно определение ущерба от недоотпуска электроэнергии с помощью простых функций алгебры логики − сложения и умножения (конъюнкции и дизъюнкции)?

Заключение

Обеспечение надежности является одной из важнейших проблем при создании и эксплуатации любой технической системы.

Особенно актуальна она для сложных систем таких, как системы электроснабжения, состоящие из большого числа элементов и имеющие многочисленные внешние и внутренние связи.

В современных рыночных условиях надежность электроснабжения тесно связана с экономическими показателями и энергетической безопасностью потребителей электрической энергии.

Как показывает опыт функционирования конкурентных рынков электроэнергии различных стран, характер организации рынка имеет исключительное влияние на эффективность и надежность системы электроснабжения потребителей.

Должны быть созданы координирующие процедуры по обеспечению надежности ЕЭС России и надежности электроснабжения потребителей, а также соответствующие координирующие органы.

Необходимы создание государственной системы контроля за обеспечением надежности, разработка национальных стандартов надежности и контроль за их выполнением.

3.3. Глоссарий

Термин	Что обозначает
Безотказность	Свойство объекта непрерывно сохранять работоспособное состояние в течение некоторого времени или наработки
Долговечность	Свойство объекта сохранять работоспособное состояние до наступления предельного состояния при установленной системе технического обслуживания и ремонта
Ремонтопригодность	Свойство объекта, заключающееся в приспособленности к поддержанию и восстановлению работоспособного состояния путем технического обслуживания и ремонта
Сохраняемость	Свойство объекта сохранять в заданных пределах значения параметров, характеризующих способности объекта выполнять требуемые функции в течение и после хранения и (или) транспортирования
Наработка	Продолжительность, или объем работы объекта
Наработка до отказа	Наработка объекта от начала эксплуатации до возникновения первого отказа
Наработка между отказами	Наработка объекта от окончания восстановления его работоспособного состояния после отказа до возникновения следующего отказа
Время восстановления	Продолжительность восстановления работоспособного состояния объекта
Срок сохраняемости	Календарная продолжительность хранения и (или) транспортировки объекта, в течение которой сохраняются в заданных пределах значения параметров, характеризующих способность объекта выполнять заданные функции
Срок службы	Календарная продолжительность эксплуатации от начала эксплуатации объекта или ее возобновления после ремонта до перехода в предельное состояние
Остаточный ресурс	Суммарная наработка объекта от момента контроля его технического состояния до перехода в предельное состояние
Показатель надежности	Количественная характеристика одного или нескольких свойств, составляющих надежность объекта

Термин	Что обозначает
Резерв	Совокупность дополнительных средств и (или) возможностей, используемых для резервирования
Нормирование надежности	Установление в нормативно-технической документации и (или) конструкторской (проектной) документации количественных и качественных требований к надежности
Нормируемый показатель надежности	Показатель надежности, значение которого регламентировано нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документацией на объект
Определение надежности	Определение численных значений показателей надежности объекта
Контроль надежности	Проверка соответствия объекта заданным требованиям надежности
Расчетный метод определения надежности	Метод, основанный на вычислении показателей надежности по справочным данным о надежности компонентов и комплектующих элементов объекта, по данным о надежности объектов-аналогов, по данным о свойствах материалов и другой информации, имеющейся к моменту оценки надежности
Экспериментальный метод определения надежности	Метод, основанный на статистической обработке данных, получаемых при испытании или эксплуатации объекта в целом
Нормальные испытания на надежность	Лабораторные (стендовые) испытания, методы и условия проведения которых максимально приближены к эксплуатационным для объекта
План испытания на надежность	Совокупность правил, устанавливающих объем выборки, порядок проведения испытаний, критерии их завершения и принятия решений по результатам испытаний

3.4. Технические и программные средства обеспечения дисциплины

Материально-техническое обеспечение учебного процесса по дисциплине «Надежность электроснабжения» включает в себя:

- персональные компьютеры;
- лицензионное программное обеспечение *Microsoft Office*.

3.5. Методические указания к проведению практических занятий

Общие указания:

1. Перед выполнением заданий следует изучить материал соответствующего раздела.

2. Студенты, обучающиеся с применением ДОТ, выполняют задания практических занятий на учебном сайте СЗТУ.

3. Варианты исходных данных к заданиям выбираются в соответствии с последней цифрой шифра студента.

Практическое занятие № 1

Показатели надежности систем электроснабжения

Задание 1.1

В результате испытания N=1000 однотипных конденсаторов за t час отказало m =X штук. Определить вероятность безотказной работы $\hat{p}(t)$, вероятность отказа $\hat{q}(t)$, интенсивность отказов $\hat{\lambda}(t)$ и время наработки до отказа Т.

Пример выполнения задания

Пусть t = 2000 час., X = 80 штук. Тогда вероятность безотказной работы в течение времени t (вероятность того, что за время t не произойдет ни одного отказа объекта) определяют по формуле (1.3):

$$\hat{P}(t) = 1 - \frac{m}{N},$$

где m – число элементов ЭУ, отказавших за время t, N – число элементов, работоспособных в начальный момент времени.

$$\hat{P}(t) = 1 - \frac{80}{1000} = 0{,}92.$$

Определим вероятность отказа:

$P(t) + Q(t) = 1$, следовательно, $Q(t) = 1 - P(t) = 1 - 0{,}92 = 0{,}08$.

Статистическая оценка интенсивности отказов вычисляется по формуле (1.7):

$$\hat{\lambda}(t) = \frac{n(t+\Delta t) - n(t)}{N \cdot \Delta t} = \frac{80}{1000 \cdot 2000} = 4 \cdot 10^{-5} \ 1/\text{час}$$

$$T = 1/\hat{\lambda} = 1/(4 \cdot 10^{-5}) = 25000 \text{час.} = 2{,}85 \text{года}$$

Варианты исходных данных

№ вар	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
T_u, час	2500	2400	2300	2100	2000	1800	1700	1600	1500	1900
X, штук	80	90	100	95	85	70	65	60	55	75

Задание 1.2

В аварийно-восстановительном ремонте находятся 20 однотипных трансформаторов. Статистика восстановительных ремонтов такова:

t	20	35	40	60
$n(t)$	X_1	X_2	X_3	X_4

Определить статистические значения интенсивности восстановления и среднюю продолжительность восстановления на каждом интервале.

Пример выполнения задания

Пусть $X_1 = 2$, $X_2 = 3$, $X_3 = 5$ $X_4 = 6$.

Значение интенсивности восстановления определяем по формуле (1.21):

$$\hat{\mu}(t) = \frac{n_B(\Delta t)}{N_{H.CP} \cdot \Delta t},$$

где $n_в(\Delta t)$ - количество восстановлений однотипных объектов за интервал Δt;

$N_{н.ср}$ - среднее количество объектов, находящихся в невосстановленном состоянии на интервале Δt.

На интервале времени от 0 до 20 часов для 20 невосстановленных трансформаторов интенсивность восстановления равна

$\hat{\mu}(20) = \frac{2}{20 \cdot 20} = 0{,}005\ 1/\text{час}$. Средняя продолжительность восстановления на этом интервале равна $T_{в1}$ = 1/0,005 = 200 час. На интервале от 20 до 35 часов интенсивность восстановления равна $\hat{\mu}(35) = \frac{3}{18 \cdot 15} = 0{,}011$ 1/час, $T_{в2}$ = 90 час, на интервале от 35 до 40 часов интенсивность восстановления равна $\hat{\mu}(40) = \frac{5}{15 \cdot 5} = 0{,}067$ 1/час, $T_{в3}$ = 15 час, на интервале от 40 до 60 часов интенсивность восстановления равна $\hat{\mu}(60) = \frac{6}{10 \cdot 20} = 0{,}03$ 1/час, $T_{в3}$ = 33,3 час,

Варианты исходных данных

№ вар	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
X_1, штук	2	5	3	4	6	2	5	4	7	1
X_2, штук	5	7	4	6	5	4	6	7	8	3
X_3, штук	7	5	6	7	8	5	6	5	4	5
X_4,штук	6	3	7	3	6	4	8	4	6	6

Задание 1.3

Система электроснабжения состоит из семи основных элементов. Время восстановления каждого из элементов составляет $t_{1\text{-}7}$ = 5,2; 6; 7,0; 7,0; 7,0; 8,2; 5,9 час соответственно. Поток отказов каждого из элементов системы составляет $\omega_{1\text{-}7}$ = 0,016, 0,09, 0,03, 0,03, 0,03, 0,045 0,024 1/год соответственно. Опре-

делить среднее время восстановления системы при условии, что элементы соединены параллельно или последовательно согласно вариантам заданий

Пример выполнения задания

Предположим, что все элементы системы соединены последовательно. Тогда при последовательном соединении элементов найдем поток отказов системы согласно формуле $\omega_C = \sum_1^7 \omega_{1-7} = 0{,}245$ 1/год. Время восстановления системы определяем $T_C = \dfrac{\sum_1^7 \omega_{1-7} \cdot t_{1-7}}{\omega_C} = 7{,}2$ часа.

Варианты исходных данных

№ вар	Схемы соединения элементов
1	1, 2 и 3, 4 элементы попарно параллельны и соединены последовательно с 5, 6, 7 элементами
2	2, 3 и 4, 5 элементы попарно параллельны и соединены последовательно с 1, 6, 7 элементами
3	3, 4 и 5, 6 элементы попарно параллельны и соединены последовательно с 1, 2, 7 элементами
4	4, 5 и 6, 7 элементы попарно параллельны и соединены последовательно с 1, 2, 3 элементами
5	1, 2 и 6, 7 элементы попарно параллельны и соединены последовательно с 3, 4, 5 элементами
6	1, 2 и 5, 6 элементы попарно параллельны и соединены последовательно с 3, 4, 7 элементами
7	1, 2 , 3 элементы соединены параллельно и соединены последовательно с 4, 5, 6, 7 элементами
8	2, 3 , 4 элементы соединены параллельно и соединены последовательно с 1, 5, 6, 7 элементами
9	3, 4 , 5 элементы соединены параллельно и соединены последовательно с 1, 2, 6, 7 элементами
0	4, 5 , 6 элементы соединены параллельно и соединены последовательно с 1, 2, 3, 7 элементами

Практическое занятие № 2. Функции работоспособности (ФР) и неработоспособности (ФНР) схемы электроснабжения

Задание 2.1

Составить ФР для системы электроснабжения, представленной на рис. 2.1 для потребителя, номер которого выбирается в соответствии с заданным номером варианта. Представить ФР в виде определителя.

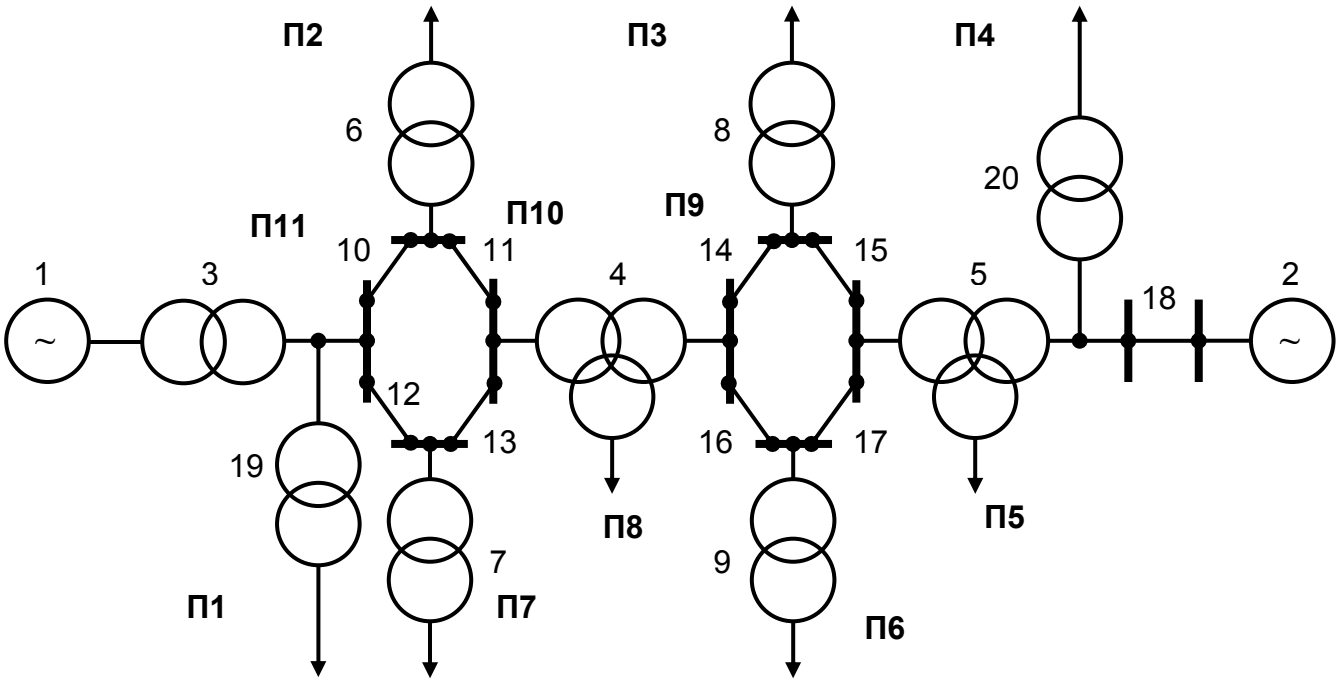


Рис. 2.1. Схема системы электроснабжения

Пример выполнения задания

Составим упрощенную структурную схему для потребителя П1(рис. 2.2)

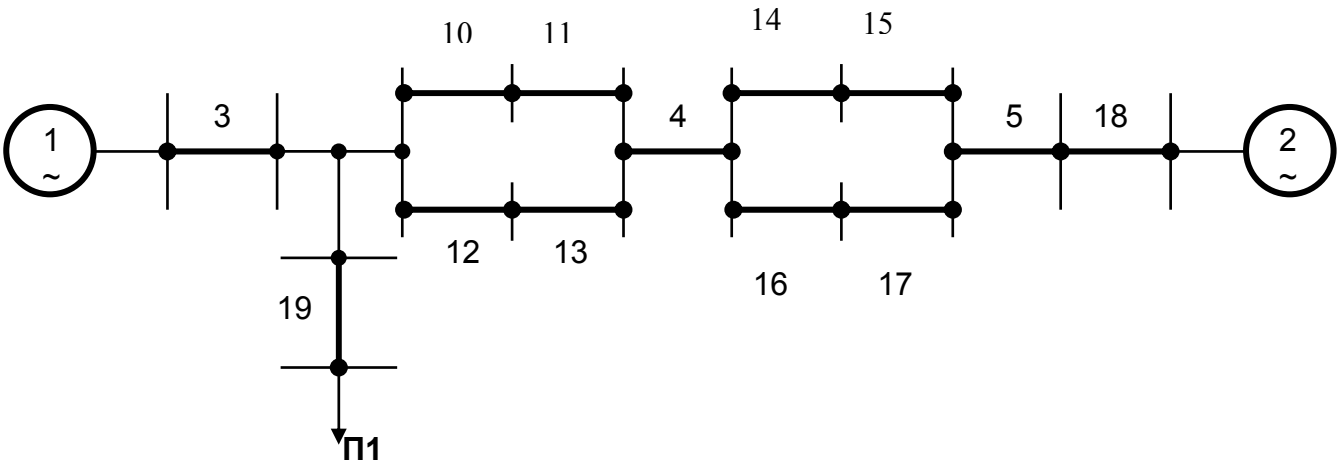


Рис. 2.2. Упрощенная схема электроснабжения потребителя П1

Условие работоспособности потребителя П1

$$F_{\text{П1}}= \begin{vmatrix} 19\cdot 3\cdot 1 \\ 19\cdot 12\cdot 13\cdot 4\cdot 16\cdot 17\cdot 5\cdot 18\cdot 2 \\ 19\cdot 10\cdot 11\cdot 4\cdot 16\cdot 17\cdot 5\cdot 18\cdot 2 \\ 19\cdot 12\cdot 13\cdot 4\cdot 14\cdot 15\cdot 5\cdot 18\cdot 2 \\ 19\cdot 10\cdot 11\cdot 4\cdot 14\cdot 15\cdot 5\cdot 18\cdot 2 \end{vmatrix}$$

Варианты исходных данных

№ вар	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Потребитель	П11	П2	П3	П4	П5	П6	П7	П8	П9	П10

Задание 2.2

Составить ФНР для системы электроснабжения, представленной на рис. 2.1, используя метод минимальных сечений. Число элементов системы электроснабжения в сечении не превышает 3.

Пример выполнения задания

Определим условие неработоспособности потребителя П1, используя упрощенную схему электроснабжения потребителя П1 (рис. 2.2):

$$\overline{F}_{B7} = \left|\overline{19}\right| + \begin{vmatrix} \overline{1}\cdot\overline{2} \\ \overline{1}\cdot\overline{18} \\ \overline{1}\cdot\overline{5} \\ \overline{1}\cdot\overline{4} \\ \overline{3}\cdot\overline{2} \\ \overline{3}\cdot\overline{18} \\ \overline{3}\cdot\overline{5} \\ \overline{3}\cdot\overline{4} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \overline{1}\cdot\overline{15}\cdot\overline{17} \\ \overline{1}\cdot\overline{15}\cdot\overline{16} \\ \overline{1}\cdot\overline{14}\cdot\overline{17} \\ \overline{1}\cdot\overline{14}\cdot\overline{16} \\ \overline{1}\cdot\overline{11}\cdot\overline{13} \\ \overline{1}\cdot\overline{11}\cdot\overline{12} \\ \overline{1}\cdot\overline{10}\cdot\overline{13} \\ \overline{1}\cdot\overline{10}\cdot\overline{12} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \overline{3}\cdot\overline{15}\cdot\overline{17} \\ \overline{3}\cdot\overline{15}\cdot\overline{16} \\ \overline{3}\cdot\overline{14}\cdot\overline{17} \\ \overline{3}\cdot\overline{14}\cdot\overline{16} \\ \overline{3}\cdot\overline{11}\cdot\overline{13} \\ \overline{3}\cdot\overline{11}\cdot\overline{12} \\ \overline{3}\cdot\overline{10}\cdot\overline{13} \\ \overline{3}\cdot\overline{10}\cdot\overline{12} \end{vmatrix}$$

Приближенное значение функции неработоспособности потребителя П1:

$$\widetilde{\widetilde{F}}_{П1} = \left|\overline{19}\right| + \begin{vmatrix} \bar{1}\cdot\bar{2} \\ \bar{1}\cdot\overline{18} \\ \bar{1}\cdot\bar{5} \\ \bar{1}\cdot\bar{4} \\ \bar{3}\cdot\bar{2} \\ \bar{3}\cdot\overline{18} \\ \bar{3}\cdot\bar{5} \\ \bar{3}\cdot\bar{4} \end{vmatrix}$$

Варианты заданий

№ вар	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Потребитель	П11	П2	П3	П4	П5	П6	П7	П8	П9	П10

Практическое занятие № 3. Вероятностный полином по ФНР, показатели надежности системы (T, $T_в$).

Задание 3.1

В соответствии с полученной в задании 2.3 ФНР определите полином вероятности отказа системы электроснабжения.

Пример выполнения задания

1. В соответствии со схемой энергосистемы, представленной на рис. 2.1 ФНР, составленной при выполнении задания 2.3, определяем полином вероятности отказа системы электроснабжения. Приближенный вероятностный полином для системы электроснабжения потребителя П1:

$$\widetilde{Q}_{П1} = |q_{19}| + \begin{vmatrix} q_1 q_2 \\ q_1 q_{18} \\ q_1 q_5 \\ q_1 q_4 \\ q_3 q_2 \\ q_3 q_{18} \\ q_3 q_5 \\ q_3 q_4 \end{vmatrix},$$

где вероятности отказов элементов системы:

$$P(\overline{1}) = q_1, \quad P(\overline{2}) = q_2, \quad P(\overline{3}) = q_3, \quad P(\overline{4}) = q_4, \quad P(\overline{5}) = q_5, \quad P(\overline{18}) = q_{18},$$

$P(\overline{19}) = q_{19}$, $P(\overline{1} \cdot \overline{2}) = q_1 q_2, \ldots$ и т. д.

Задание 3.2

Используя полученный в задании 3.1 полином вероятности отказа системы электроснабжения ($Q_{П1}$), определите аналитически время восстановления ($T_в$) и время безотказной работы (T) системы электроснабжения, представленной на рис. 2.1. Определите значения T, $T_в$ при условии равновероятностных значений отказов элементов системы электроснабжения ($q_1 = q_2 = \ldots = q_n$) и одинаковой интенсивности восстановления элементов ($\mu_1 = \mu_2 = \ldots = \mu_n$).

Пример выполнения задания

Среднее время восстановления электроснабжения потребителя П1 по приближенному полиному $\widetilde{Q}_{П1}$:

$$\widetilde{T}в = \frac{\widetilde{Q}_{П1}}{\sum \frac{\partial \widetilde{Q}_{П1}}{\partial q_i} \cdot q_i \mu_i}.$$

Среднее время безотказной работы системы электроснабжения потребителя П1:

$$\widetilde{T} = \frac{1 - \widetilde{Q}_{П1}}{\sum \frac{\partial \widetilde{Q}_{П1}}{\partial q_i} \cdot q_i \mu_i}.$$

Определим частные производные приближенного полинома $\widetilde{Q}_{П1}$:

$\frac{\partial \widetilde{Q}_{П1}}{\partial q_{19}} q_{19}\mu_{19} = q_{19}\mu_{19}$;

$$\frac{\partial \widetilde{Q}_{П1}}{\partial q_1} q_1\mu_1 = (q_2 + q_4 + q_5 + q_{18}) q_1\mu_1 \ ;$$

$$\frac{\partial \widetilde{Q}_{П1}}{\partial q_2} q_2\mu_2 = (q_1 + q_3) q_2\mu_2 \ ;$$

$$\frac{\partial \widetilde{Q}_{П1}}{\partial q_3} q_3\mu_3 = (q_2 + q_4 + q_5 + q_{18}) q_3\mu_3 \ ;$$

$$\frac{\partial \widetilde{Q}_{П1}}{\partial q_4} q_4\mu_4 = (q_1 + q_3) q_4\mu_4 \ ;$$

$$\frac{\partial \widetilde{Q}_{П1}}{\partial q_5} q_5\mu_5 = (q_1 + q_3) q_5\mu_5 \ ;$$

$$\frac{\partial \widetilde{Q}_{П1}}{\partial q_{18}} q_{18}\mu_{18} = (q_1 + q_3) q_{18}\mu_{18} \ .$$

Тогда значения $\widetilde{T}_в$ и $\widetilde{T}$ будут равны

$$\widetilde{T}в = \frac{q_{19} + (q_1 + q_3)(q_2 + q_4 + q_5 + q_{18})}{q_{19}\mu_{19} + (q_2 + q_4 + q_5 + q_{18})(q_1\mu_1 + q_3\mu_3) + (q_1 + q_3)(q_2\mu_2 + q_4\mu_4 + q_5\mu_5 + q_{18}\mu_{18})}$$

$$\widetilde{T} = \frac{1 - [q_{19} + (q_1 + q_3)(q_2 + q_4 + q_5 + q_{18})]}{q_{19}\mu_{19} + (q_2 + q_4 + q_5 + q_{18})(q_1\mu_1 + q_3\mu_3) + (q_1 + q_3)(q_2\mu_2 + q_4\mu_4 + q_5\mu_5 + q_{18}\mu_{18})}.$$

При равновероятностных значениях отказов элементов системы электроснабжения $q_i = q$ и интенсивности восстановления элементов системы электроснабжения $\mu_i = \mu$, среднее время восстановления электроснабжения потребителя П1 и среднее время безотказной работы системы электроснабжения потребителя П1 будут определяться по выражению

$$\widetilde{T}в = \frac{q + 2q \cdot 4q}{q\mu + 4q \cdot 2q\mu + 2q \cdot 4q\mu} = \frac{q + 8q^2}{q\mu + 8q^2\mu + 8q^2\mu} = \frac{q + 8q^2}{q\mu + 16q^2\mu} = \frac{q(1 + 8q)}{q\mu(1 + 16q)} = \frac{1 + 8q}{\mu(1 + 16q)};$$

$$\widetilde{T} = \frac{1 - (q + 2q \cdot 4q)}{q\mu + 4q \cdot 2q\mu + 2q \cdot 4q\mu} = \frac{1 - (q + 8q^2)}{q\mu(1 + 16q)} = \frac{1 - q - 8q^2}{q\mu(1 + 16q)}$$

Практическое занятие № 4. Оценка важности на логическом и вероятностном уровнях задания системы

Задание 4.1

Определите важность каждого из элементов системы электроснабжения , представленной на рис. 2.1, на логическом уровне (вес каждого элемента).

Пример выполнения задания

Определяем важность каждого из элементов системы электроснабжения потребителя П1 на логическом уровне (вес элемента). Приближенное значение функции неработоспособности потребителя П1:

$$\widetilde{\widetilde{F}}_{П1} = \left|\overline{19}\right| + \begin{vmatrix} \bar{1}\cdot\bar{2} \\ \bar{1}\cdot\overline{18} \\ \bar{1}\cdot\bar{5} \\ \bar{1}\cdot\bar{4} \\ \bar{3}\cdot\bar{2} \\ \bar{3}\cdot\overline{18} \\ \bar{3}\cdot\bar{5} \\ \bar{3}\cdot\bar{4} \end{vmatrix}$$

Вес первого элемента: $B1 = 4 \cdot B^{(2)}$.

Вес второго элемента: $B2 = 2 \cdot B^{(2)}$.

Вес третьего элемента: $B3 = 4 \cdot B^{(2)}$.

Вес четвертого элемента: $B4 = 2 \cdot B^{(2)}$.

Вес пятого элемента: $B5 = 2 \cdot B^{(2)}$.

Вес восемнадцатого элемента: $B18 = 2 \cdot B^{(2)}$.

Вес девятнадцатого элемента: $B19 = 1 \cdot B^{(1)}$.

Исходя из определенных весов элементов, можно сказать, что наименее важными и равновесомыми являются элементы − второй, четвертый, пятый и восемнадцатый. Наиболее весомый элемент – элемент 19.

Задание 4.2

Определите важность каждого из элементов электроснабжения системы, представленной на рис. 2.1, на вероятностном уровне (значимость каждого элемента). Вероятности отказов элементов системы электроснабжения представлены в таблице исходных данных.

Таблица исходных данных

№ эл.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$q_{эл.}$	0,01	0,015	0,02	0,025	0,03	0,035	0,04	0,045	0,045	0,05
№ эл.	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$q_{эл.}$	0,055	0,006	0,055	0,045	0,035	0,025	0,02	0,03	0,07	0,05

Пример выполнения задания

Определяем важность каждого из элементов системы электроснабжения потребителя П1 на вероятностном уровне (значимость элемента). Для определения значимости каждого из элементов используем вероятностный полином для системы электроснабжения потребителя П1:

$$\widetilde{Q}_{П1} = |q_{19}| + \begin{vmatrix} q_1 q_2 \\ q_1 q_{18} \\ q_1 q_5 \\ q_1 q_4 \\ q_3 q_2 \\ q_3 q_{18} \\ q_3 q_5 \\ q_3 q_4 \end{vmatrix},$$

Значимость элемента 1: $З1 = q_2 + q_4 + q_5 + q_{18} = 0{,}1.$

Значимость элемента 2: $З2 = q_1 + q_3 = 0{,}04.$

Значимость элемента 3: $З3 = q_2 + q_4 + q_5 + q_{18} = 0{,}1.$

Значимость элемента 4: $З4 = q_1 + q_3 = 0{,}04.$

Значимость элемента 5: $З5 = q_1 + q_3 = 0{,}04$.

Значимость элемента 18: $З18 = q_1 + q_3 = 0{,}04$.

Значимость элемента 19: $З19 = q_{19} = 0{,}07$.

Наиболее значимыми элементами заданной системы электроснабжения являются элементы 19, 2, 4, 5, а наименее значимыми - элементы 1 и 3.

Практическое занятие № 5. Расчет надежности нерезервированных участков системы. Оценка недоотпуска электроэнергии

Задание 5.1

Выполнить расчет надежности участка электрической сети с заданным резервированием элементов сети. Произвести расчет кратности резервирования и показателей надежности участка системы (P,Q, T, T_B), где n - количество элементов, включая резервные, m – количество элементов, функционирование которых необходимо для работы системы. Расчет производится для системы с однотипными элементами (равнонадежными) при условии полного погашения.

Таблица исходных данных

	N варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
n	4	4	4	3	3	4	4	4	3	3
m	3	2	1	2	1	3	2	1	2	1
p	0,9	0,9	0,9	0,85	0,85	0,85	0,87	0,87	0,92	0,92
μ,1/год	0,1	0,09	0,085	0,1	0,09	0,085	0,1	0,09	0,1	0,09

Пример выполнения задания

Пусть для нормальной работы участка сети требуется $m = 1$ элемент, при имеющихся $n = 2$ элементах. Элементы равнонадежные, вероятность безотказ-

ной работы элемента сети равна $p_1 = p_2 = 0{,}85$, поток восстановления каждого из элементов $\mu_1 = \mu_2 = 0{,}1$ 1/год.

Определим кратность резервирования как $k = \frac{n-m}{m} = 1$.

Условие работоспособности имеет место тогда, когда первый или второй элемент находится в работоспособном состоянии. Условие неработоспособности характеризуется наличием одновременных отказов первого и второго элементов:

$$F_{\text{с}} = 1 + 2\,;\ \overline{F_c} = \overline{1} \cdot \overline{2}$$

Соответственно вероятность безотказной работы $P_{\text{с}}$ и вероятность отказов $Q_{\text{с}}$ определяем как:

$$P_{\text{с}} = p_1 + p_2 - p_1 p_2 = 2p - p^2 = 2 \cdot 0{,}85 - 0{,}85^2 = 0{,}9775;$$

$$Q_{\text{с}} = q_1 q_2 = q^2 = 0{,}15^2 = 0{,}0225.$$

Время безотказной работы системы определяем как :

$$T_{\text{С}} = \frac{1 - Q_C}{\sum \frac{\partial Q_C}{\partial q_i} \cdot \mu_i} = \frac{1 - q_1 \cdot q_2}{q_2 \cdot \mu_1 + q_1 \cdot \mu_2} = \frac{1 - q^2}{2q\mu} = 32{,}5 \text{ лет.}$$

Время восстановления системы:

$$T_{\text{В С}} = \frac{Q_C}{\sum \frac{\partial Q_C}{\partial q_i} \cdot \mu_i} = \frac{q^2}{2q\mu} = \frac{q}{2\mu} = 0{,}75 \text{ года.}$$

Задание 5.2

Определить среднегодовой недоотпуск электроэнергии потребителю, схема электроснабжения которого приведена на рис. 5.1. Пропускные способности ВЛ_1 и ВЛ_2 равны $P_{\text{нmax}}$ (МВт) каждая, коэффициенты готовности $k_{готЛ1}$ =

$k_{готЛ2}$. Коэффициенты готовности $k_{готТР1} = k_{готТР2}$. Мощность каждого из трансформаторов $S_{тр}$ достаточна для полного обеспечения потребителя электроэнергией. Суточный график нагрузки одинаковый в течение года и характеризуется тем, что с 0 до 8 ч и с 20 до 24 ч нагрузка равна $X \cdot P_{н\ max}$, а с 8 до 20 ч – $P_{н\ max}$. Система имеет 100 %-ную надежность.

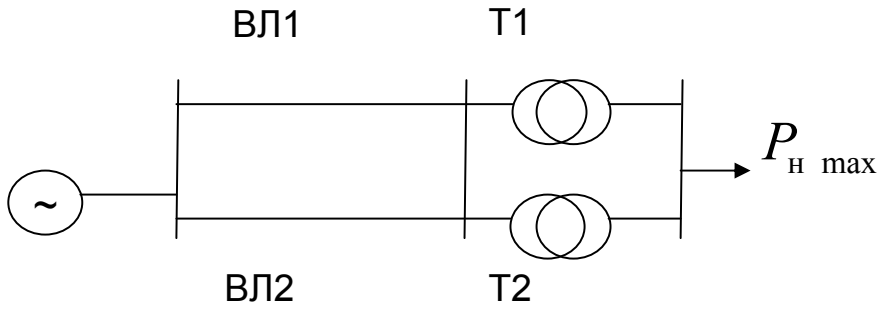


Рис. 5.1. Схема электроснабжения потребителя

Таблица исходных данных

№ вар.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$P_{н\ max}$, МВт	20	20	20	35	35	35	12	12	12	55
$k_{готЛ}$	0,85	0,85	0,75	0,75	0,8	0,8	0,85	0,85	0,75	0,75
$k_{готТР}$	0,95	0,9	0,89	0,95	0,9	0,89	0,95	0,9	0,89	0,95
X	0,65	0,7	0,67	0,8	0,65	0,7	0,75	0,8	0,65	0,7

Пример выполнения задания

Пусть $P_{н\ max}$ = 20 МВт, $k_{готЛ}$=0,8, $k_{готТР}$=0,95 , X= 0,75. В соответствии со схемой, приведенной на рис. 5.1, используем формулы для последовательно соединенных элементов и для параллельно соединенных. Определим коэффициент готовности схемы.

$$k_{ГС} = (k_{готЛ1} + k_{готЛ2} - k_{готЛ1}\, k_{готЛ2})\,(k_{готТР1} + k_{готТР2} - k_{готТР1}\, k_{готТР2}).$$

Подставив численные значения значения коэффициентов, получим

$k_{ГС}$ = (0,8 + 0,8 – 0,8 × 0,8) (0,95 + 0,95 – 0,95 × 0,95) = 0,96 × 0,9975 = 0,9576.

Соответственно коэффициент неготовности схемы (опасности простоя)

$k_{НГС} = 1 - k_{ПС} = 0{,}00424$.

Из характеристик суточного графика нагрузки видно, что 12 ч она составляет 0,75 $P_{H\max}$ и 12 ч $- P_{H\min}$. Поэтому математическое ожидание среднегодового недоотпуска электроэнергии определится (в соответствии с формулой (4.2)) как:

$$\Delta W_j = (0{,}75 \cdot 20 \cdot \frac{8760}{2} + 1{,}0 \cdot 20 \cdot \frac{8760}{2}) \cdot 0{,}0424 = 153300 \cdot 0{,}0424;$$

$\Delta W_j \approx 6500$ МВт·час

4. Блок контроля освоения дисциплины

4.1. Общие указания

Блок контроля освоения дисциплины включает:

1. Задание на контрольную работу и методические указания к ее выполнению.

Порядок выбора индивидуальных заданий приведен в п. 4.2 данного УМК.

2. Блок тестов текущего контроля.

Приводятся 4 теста текущего контроля – по тесту на каждый раздел дисциплины. Они предлагаются студентам в качестве тренировочных (репетиционных). После работы с этими тестами можно проверить ответы. Они приведены на с. 111… 112. Завершив работу с тренировочными тестами по разделу, студент должен пройти аналогичный контрольный тест. Время ответа и число попыток ответа на контрольный тест ограничены.

3. Блок итогового контроля по дисциплине.

Изучение дисциплины завершается сдачей экзамена.

В данном блоке приводятся вопросы для подготовки к экзамену.

4.2. Задание на контрольную работу и методические указания к ее выполнению

4.2.1. Задание на контрольную работу

Рассчитать в общем виде логико-вероятностным методом показатели надежности T и $T_в$ системы электроснабжения конкретного потребителя в схемах электроснабжения, приведенных на рис. 1 и рис. 2. Показатели надежности элементов системы электроснабжения (μ_i и q_i) заданы.

В контрольной работе используются следующие показатели надёжности системы электроснабжения конкретного потребителя:

T- среднее время безотказной работы;

$T_в$- среднее время восстановления работоспособного состояния;

$\mu_{i;}$- интенсивность восстановления элементов;

q_i - вероятность отказа элемента.

Порядок выбора индивидуальных заданий

Номер потребителя выбирается по последней цифре шифра зачетной книжки студента. Студенты, у которых получается четная сумма двух последних цифр шифра, выбирают номер потребителя по рис. 1, а те, у которых она нечетная, - по рис. 2. Показатели надежности элементов системы электроснабжения (q_i, μ_i) заданы.

Последняя цифра шифра зач. книжки	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
№ потребителя	В1	В2	В3	В4	В5	В6	В7	В8	В9	В0

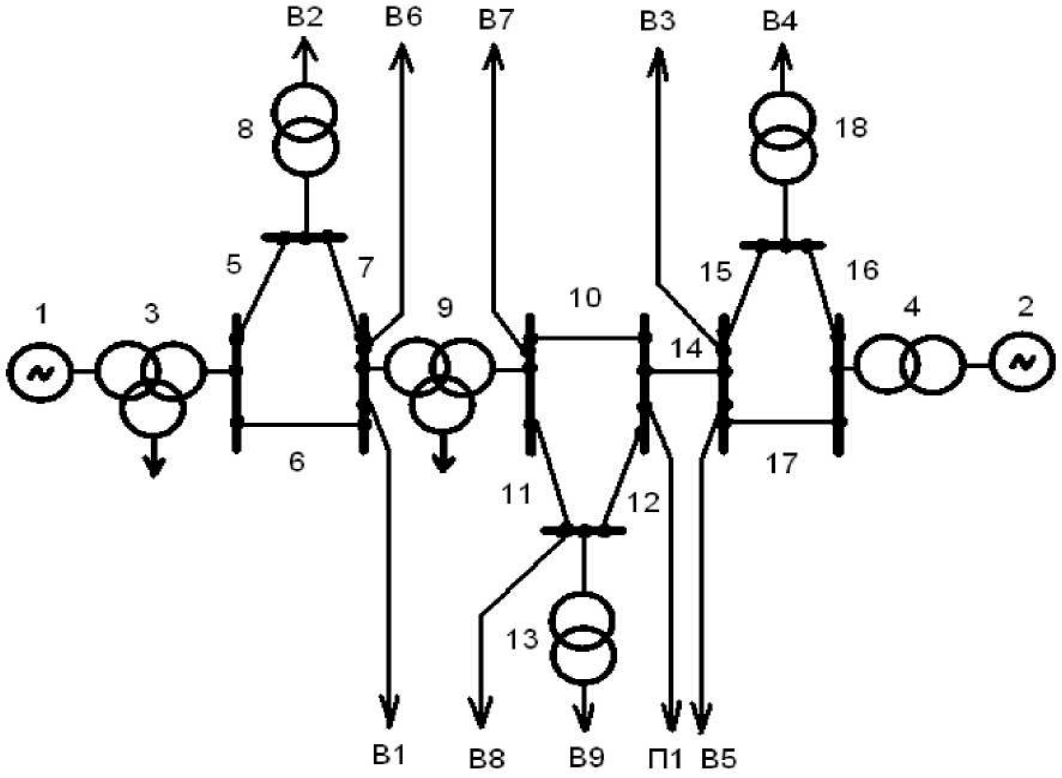


Рис. 1. Схема системы электроснабжения потребителей (выбирать по четной сумме двух последних цифр шифра)

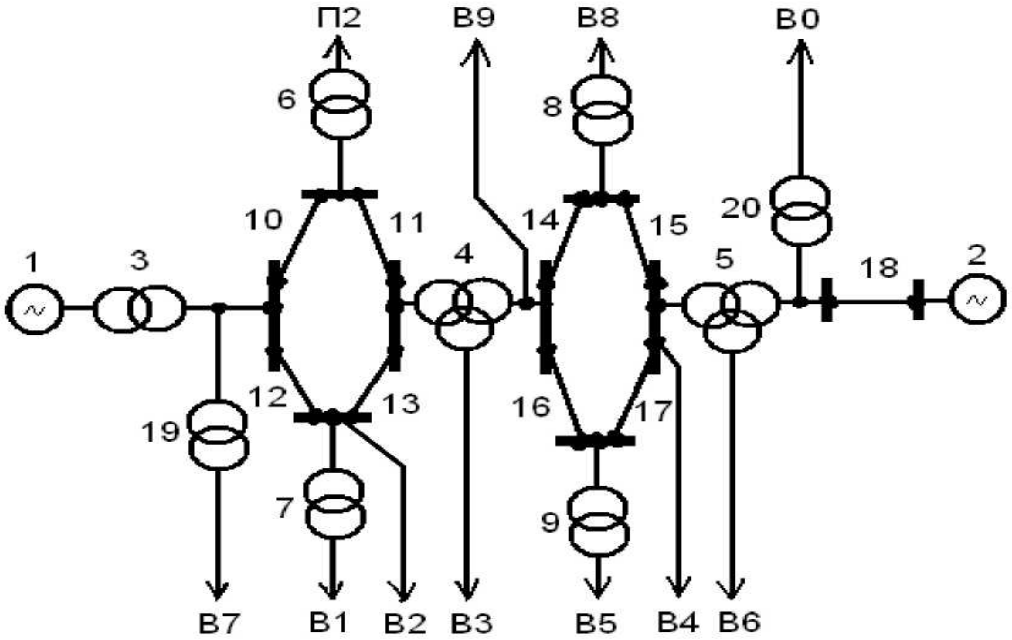


Рис. 2. Схема системы электроснабжения потребителей (выбирать по нечетной сумме двух последних цифр шифра)

4.2.2. Методические указания к выполнению контрольной работы

Текст работы должен быть изложен аккуратно, с обязательным приведением условий задач, исходных данных, необходимых формул, схем, единиц измерения физических величин.

Студенты допускаются к экзамену по дисциплине только после рецензирования и защиты контрольной работы.

Порядок выполнения контрольной работы:

1. Определить условия работоспособности (F) конкретного потребителя (Порядок выполнения данного пункта контрольной работы и пример выполнения приведены в задании 2.1 к практическому занятию № 2).

2. Определить условия неработоспособности ($\overline{F}$) конкретного потребителя. (Порядок выполнения данного пункта контрольной работы и пример выполнения приведены в задании 2.2 к практическому занятию № 2).

3. Найти приближенное значение функции неработоспособности ($\overline{\widetilde{F}}$) конкретного потребителя. Приближенное значение $\overline{\widetilde{F}}$ получаем путем исключения из $\overline{F}$ сечений с числом элементов большим 2. Пример выполнения приведен в задании 2.2 к практическому занятию № 2.

4. Найти приближенный вероятностный полином ($\widetilde{Q}$) для системы электроснабжения конкретного потребителя. Приближенный вероятностный полином для системы электроснабжения конкретного потребителя получаем путем замены условия неработоспособности каждого элемента в $\overline{\widetilde{F}}$ на его вероятность отказа q_{i}, $\overline{2} \Rightarrow q_2$. Пример выполнения пункта контрольной работы приведен в задании 3.1 к практическому занятию № 3.

5. Определить частные производные приближенного полинома по каждому из элементов $\dfrac{\partial \widetilde{Q}}{\partial q_i} \cdot q_i \mu_i$. Пример выполнения данного пункта приведен в задании 3.2 к практическому занятию № 3.

6. Определить среднее время восстановления электроснабжения конкретного потребителя : $T_B = \dfrac{\widetilde{Q}}{\sum \dfrac{\partial \widetilde{Q}}{\partial q_i} \cdot q_i \mu_i}$.

7. Определить среднее время безотказной работы системы конкретного потребителя : $\widetilde{T} = \dfrac{1-\widetilde{Q}}{\sum \dfrac{\partial \widetilde{Q}}{\partial q_i} \cdot q_i \mu_i}$.

4.3. Текущий контроль

Текущий контроль уровня знаний осуществляется с помощью тестирования. Тест по каждому разделу содержит 8 вопросов. Время ответов ограничено. Для подготовки к тестированию студентам предлагаются тренировочные тесты.

Тренировочные тесты

Тест № 1 (к разделу 1)

1. Безотказность - это свойство объекта:

a) сохранять работоспособное состояние в течение некоторого времени при транспортировке и (или) хранении;

b) непрерывно сохранять работоспособное состояние в течение некоторого времени или наработки;

c) сохранять работоспособное состояние при установленной системе технического обслуживания и ремонта;

d) заключающееся в приспособленности к поддержанию и восстановлению работоспособного состояния путем технического обслуживания и ремонта.

2. Ремонтопригодность - это свойство объекта:

a) сохранять в заданных пределах значения параметров, характеризующих способность объекта выполнять требуемые функции, в течение и после хранения и (или) транспортирования;

b) непрерывно сохранять работоспособное состояние в течение некоторого времени или наработки;

c) заключающееся в приспособленности к поддержанию и восстановлению работоспособного состояния путем технического обслуживания и ремонта;

d) сохранять работоспособное состояние при установленной системе технического обслуживания и ремонта.

3. Повреждение - это:

a) событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния объекта;

b) каждое отдельное несоответствие объекта установленным нормам или требованиям;

c) событие, заключающееся в переходе объекта из работоспособного в предельное состояние;

d) состояние объекта, при котором значение хотя бы одного параметра, характеризующего способность выполнять заданные функции, не соответствует требованиям нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации

4. Отказ – это:

a) событие, заключающееся в нарушении исправного состояния объекта при сохранении работоспособного состояния;

b) состояние объекта, при котором его дальнейшая эксплуатация нецелесообразна;

c) состояние объекта, при котором он не соответствует хотя бы одному из требований нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации;

d) событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния объекта.

5. Вероятность безотказной работы статистически (на практике) определяется по формуле (N_σ - число однотипных элементов, безотказно проработавших до момента времени t; N – число элементов, работоспособных в начальный момент):

a) $\hat{P}(t) = (N - N_\sigma) \cdot N$;

b) $\hat{P}(t) = \frac{N_\sigma}{N}$;

c) $\hat{P}(t) = \frac{N - N_\sigma}{N}$;

d) $\hat{P}(t) = \frac{N}{N_\sigma}$.

6. Интенсивность отказов $\lambda(t)$ при нормальном распределении определяется по формуле ($f(t)$ - плотность распределения наработки до отказа; $P(t)$ – вероятность безотказной работы.):

a) $\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)}$, ;

b) $\lambda(t) = f(t) \cdot P(t)$;

c) $\lambda(t) = \frac{P(t)}{f(t)}$, ;

d) $\lambda(t) = f(t) + P(t)$.

7. Среднее время восстановления - это

a) математическое ожидание времени восстановления работоспособного состояния объекта после отказа;

b) время приработки после включения в работу отремонтированного объекта;

c) время, затраченное на обнаружение, поиск причины отказа и устранение последствий отказа;

d) время, затраченное на устранение последствий отказа.

8. Коэффициент готовности - это вероятность того, что объект окажется:

a) в состоянии отказа в произвольный момент времени и начиная с этого момента будет находиться в этом состоянии в течение заданного интервала времени;

b) в работоспособном состоянии в произвольный момент времени и начиная с этого момента будет работать безотказно в течение заданного интервала времени;

c) в работоспособном состоянии в произвольный момент времени, кроме планируемых периодов, в течение которых применение объекта по назначению не предусматривается;

d) в состоянии отказа в произвольный момент времени, кроме планируемых периодов, в течение которых предусматривается применение объекта по назначению.

Тест № 2 (к разделу 2)

1. На логических схемах реальную систему сводят к трем основным способам соединений элементов:

a) последовательным, параллельным и смешанным;

b) последовательным, параллельным и зигзагом;

c) последовательным, параллельным и треугольником;

d) последовательным, параллельным и звездой.

2. Если элементы включены последовательно, то работоспособное состояние системы:

a) заключается в работоспособном состоянии хотя бы одного элемента системы;

b) заключается в работоспособном состоянии всех элементов одновременно;

c) заключается в работоспособном состоянии больше половины элементов системы;

d) не зависит от работоспособного состояния элементов.

3. Если два элемента системы включены параллельно, то неработоспособное состояние системы:

a) заключается в отказе одного из параллельно включенных элементов;

b) заключается в отказе обоих параллельно включенных элементов одновременно;

c) заключается в последовательном (по времени) отказе параллельно включенных элементов;

d) не зависит от состояния параллельно соединенных элементов системы.

4. Для оценки надежности достаточно разделить СЭС (системы электроснабжения) на:

a) три уровня: высшее напряжение (110 кВ и выше), среднее напряжение (6-10 и 35 кВ) и низшее (менее 1 кВ);

b) два уровня: высшее напряжение (1 кВ и выше) и низшее (менее 1 кВ);

c) пять уровней напряжения: 220 кВ и выше, 110 кВ, 35 кВ, 6-10 кВ, ниже 1 кВ;

d) классы в соответствии с номинальными напряжениями (0,4 кВ, 6 кВ, 10 кВ, 35 кВ, 110 кВ и т. д.).

5. В качестве расчетных элементов рассматриваются :

a) только средства канализации электроэнергии;

b) основное генерирующее оборудование, коммуникационная аппаратура, средства РЗ и А;

c) каждый элемент системы электроснабжения, не зависимо от его значимости и роли в обеспечении надежности электроснабжения;

d) основное генерирующее и силовое оборудование, средства канализации электроэнергии и коммутационная аппаратура.

6. Нахождение элементов системы электроснабжения в состоянии планово-предупредительного ремонта можно не учитывать, если :

a) ППР электротехнического и технологического оборудования совмещаются;

b) длительность ППР данного вида оборудования не превышает 1 час;

c) частота ППР данного вида оборудования не превышает 1/5 1/год;

d) в системе электроснабжения установлены современные средства РЗ и А.

7. Элементы системы электроснабжения считаются :

a) невосстанавливаемыми;

b) восстанавливаемыми;

c) восстанавливаемыми или невосстанавливаемыми в зависимости от вида элемента СЭС;

d) восстанавливаемыми или невосстанавливаемыми в зависимости от времени восстановления элемента СЭС.

8. При расчете функции работоспособности методом минимальных путей анализируется :

a) состояние отказа минимального набора элементов, которые обеспечивают передачу энергии от источника питания до узла нагрузки;

b) минимальный набор элементов, отказ которых приводит к отказу системы относительно рассматриваемого узла;

c) состояние безотказной работы минимального набора элементов, которые обеспечивают передачу энергии от источника питания до узла нагрузки;

d) минимальный набор элементов, безотказное состояние которых приводит к отказу системы относительно рассматриваемого узла.

Тест № 3 (к разделу 3)

1. Отказ типа «короткое замыкание» может произойти :

a) только в коммуникационной аппаратуре ;

b) только в генерирующих элементах системы;

c) в средствах коммуникации электрической энергии;

d) во всех элементах схемы.

2. Для цепи электроснабжения, состоящей из выключателей, ячеек РУ, трансформаторов, кабельных или воздушных линий, соединенных последовательно, суммарное значение параметра потока отказов цепи ($\omega_ц$) определяется как (k – число элементов в цепи):

a) $\omega_ц = \prod_{i=1}^{k} \omega_i$;

b) $\omega_ц = \sum_{1}^{k} \omega_i$;

c) $\omega_ц = \frac{\sum_{1}^{k} \omega_i}{K}$;

d) $\omega_ц = K \cdot \prod_{i=1}^{k} \omega_i$.

3. Время наработки цепи из последовательных элементов $T_Ц$ (k – число элементов в цепи):

a) $T_{.ц} = \frac{1}{\prod_{i}^{k} \omega_i}$;

b) $T_{.ц} = \frac{1}{\sum_{i}^{k} \omega_i}$;

c) $T_{.ц} = \sum_{i}^{k} \omega_i$;

d) $T_{.ц} = \frac{K}{\sum_{i}^{k} \omega_i}$.

4. При n параллельных цепях с одинаковыми характеристиками среднее время нарушения электроснабжения системы при отказе всех n цепей:

a) $T_{в.с} = t_{в.ц.} \cdot n$;

b) $T_{в.с} = \frac{t_{в.ц.}}{n}$;

c) $T_{в.с} = \frac{t_{в.ц.}}{2n}$;

d) $T_{в.с} = t^2_{в.ц.} \cdot n$.

5. Время наработки системы электроснабжения ($T_{\text{с}}$) из двух параллельных цепей равно, где $T_{\text{в.ц}}$, $T_{\text{ср.ц}}$ – среднее время восстановления и время наработки на отказ цепи системы электроснабжения:

a) $T_{\text{с}} = \frac{T_{ср.ц}^4}{2 \cdot T_{в.ц}^2} + T_{ср.ц}$;

b) $T_{\text{с}} = \prod T_{ср.ц}$;

c) $T_{\text{с}} = \frac{T_{ср.ц}^2}{2 \cdot T_{в.ц}} + T_{ср.ц}$;

d) $T_{\text{с}} = \sum T_{ср.ц}$.

6. Логико-вероятностный метод (ЛВМ) расчета надежности. Относится к методам расчета надежности :

a) экспериментальным;

b) статистическим;

c) инженерным;

d) логико-аналитическим.

7. Важность элементов на логическом уровне, называемая *весом* :

a) учитывает только структурную сложность системы и место элемента в ней;

b) учитывает количественные значения показателей надежности элементов системы электроснабжения;

c) является точной количественной оценкой *важности* элементов;

d) не учитывает структурную сложность системы.

8. Важность элементов на вероятностном уровне задания системы называется *значимостью* и оценивается вероятностью (где $P_{\text{с}}$, r_i –вероятности безотказной работы системы электроснабжения и i-го элемента системы; Q_C, q_i – вероятности отказа системы электроснабжения и i-го элемента системы):

a) $P_i^{/} = \frac{\partial P_c}{\partial r_i}$ (или $Q_i^{/} = \frac{\partial Q_c}{\partial q_i}$);

b) $P_i^{/} = \frac{\partial P_c}{\partial q_i}$;

c) $Q_i^{/} = \frac{\partial Q_c}{\partial r_i}$;

d) $P_i^{/} = \frac{\partial (P_c + Q_C)}{\partial r_i}$.

Тест № 4 (к разделу 4)

1. В качестве основного критерия оптимальной надежности СЭС выступает :

a) минимум приведенных затрат с учетом ожидаемого ущерба за год от всех значимых отказов работоспособности;

b) минимум недоотпуска электроэнергии;

c) минимальное время восстановления системы электроснабжения;

d) максимальная вероятность безотказной работы системы электроснабжения.

2. Если при отказе работоспособности системы типа *j* отключаются потребители суммарной мощностью S_{aj} на время $T_{вj}$ (ч) λ_j раз в году, то величина недоотпущенной электроэнергии ΔW_j равна:

a) $\Delta W_j = S_{aj} /(T_{вj} \lambda_j)$;

b) $\Delta W_j = S_{aj}\, T_{вj}\, \lambda_j$;

c) $\Delta W_j = S_{aj}+T_{вj}+\lambda_j$;

d) $\Delta W_j = T_{вj}\, \lambda_j / \ S_{aj}$.

3. Первичный ущерб - это ущерб:

a) вызванный кратковременным перерывом в электроснабжении предприятия (не более 1 часа);

b) вызванный перерывом в электроснабжении только основного оборудования предприятия;

c) вызванный перерывом в электроснабжении непосредственно агрегата или объекта;

d) учитывающий только выплату заработной платы персоналу предприятия за время простоя.

4. Вторичный ущерб – это ущерб:

a) вызванный перерывом в электроснабжении вспомогательного оборудования предприятия;

b) вызванный долговременным перерывом в электроснабжении предприятия (более 1 часа);

c) не учитывающий выплату заработной платы персоналу предприятия за время простоя;

d) вызванный перерывом в электроснабжении предыдущего агрегата или объекта по ходу технологического процесса.

5. Итоговый ущерб от перерыва (ограничения) в электроснабжении предприятия равен :

a) разности первичного и вторичного ущербов ($У = У_1 – У_2$);

b) произведению первичного и вторичного ущербов ($У = У_1 \cdot У_2$);

c) сумме первичного и вторичного ущербов ($У = У_1 + У_2$);

d) сумме квадратов первичного и вторичного ущербов ($У = У_1^2 + У_2^2$).

6. Недоотпуск электроэнергии ΔW может быть найден по формуле (где $W_H(t)$, $W_R(t)$ – количество электроэнергии, необходимое предприятию для нормального функционирования и потребленное предприятием с учетом ограничений):

a) $\Delta W = \int_t^{t_1} [W_н(t) + W_R(t)]dt$;

b) $\Delta W = \int_t^{t_1} [W_н(t) - W_R(t)]dt$;

c) $\Delta W = \int_t^{t_1} [W_н(t) / W_R(t)]dt$;

d) $\Delta W = \int_t^{t_1} [W_н(t) \cdot W_R(t)]dt$.

7. Экономический ущерб от ненадежности электроснабжения характеризует:

a) свойство безотказности;

b) интегральные свойства надежности системы, включая значимость потребителя электроэнергии;

c) свойство ремонтопригодности;

d) свойства безотказности и долговечности.

8. В качестве основных критериев при экономической оценке надежности принимаются :

a) средний недоотпуск электроэнергии за 1 год;

b) удельные разовые показатели ущерба конкретных производств;

c) время безотказной работы T, время восстановления $T_в$;

d) параметр потока отказов системы $\lambda_c = T^{-1}$ и параметр потока восстановления системы $\mu_c = T_в^{-1}$.

Правильные ответы на тренировочные тесты

№ теста	Раздел	Номера вопросов/Номера правильных ответов				
1	1	Номер вопроса	1	2	3	4
		Правильный ответ	b	c	d	a
		Номер вопроса	5	6	7	8
		Правильный ответ	b	a	a	C
2	2	Номер вопроса	1	2	3	4
		Правильный ответ	a	b	b	d
		Номер вопроса	5	6	7	8
		Правильный ответ	a	a	b	c
3	3	Номер вопроса	1	2	3	4
		Правильный ответ	d	a	b	b
		Номер вопроса	5	6	7	8
		Правильный ответ	c	d	a	a
4	4	Номер вопроса	1	2	3	4
		Правильный ответ	a	b	c	d
		Номер вопроса	5	6	7	8
		Правильный ответ	c	b	b	b

4.4. Итоговый контроль

Вопросы для подготовки к экзамену

1. Общее определение надежности объекта. Понятие о надежности системы электроснабжения промышленного предприятия.

2. Совокупность математических моделей надежности элементов и СЭС, используемых на практике, их сходство и отличие.

3. Безотказность, ремонтопригодность, долговечность и сохраняемость – свойства, определяющие надежность объекта; их определения.

4. Три направления в решении задачи математических моделей надежности.

5. Восстанавливаемые и невосстанавливаемые объекты.

6. Методы, определяющие каждое из направлений в решении задачи математических моделей надежности. Их особенности, трудоемкость, математическая корректность.

7. Основные показатели надежности – единичные и комплексные.

8. Оценка точности математических моделей надежности и методов их исследования. Необходимость согласования их точности с точностью информационной базы о процессах функционирования, режиме работы, допущениях и т. п.

9. Нормирование надежности в «Правилах устройства электроустановок».

10. Обоснования использования для оценки надежности СЭС специализированных математических моделей и соответствующих им методов расчета надежности в зависимости от напряжения (до 1000 В, 6-35 кВ и 110-220 кВ).

11. Последствия перерывов электроснабжения и их технико-экономическая оценка.

12. Приближенные вычисления показателей надежности.

13. Прямой и дополнительный ущербы.

14. Восстанавливаемые и невосстанавливаемые объекты. Восстановление работоспособности системы электроснабжения.

15. Показатели надежности невосстанавливаемых элементов системы электроснабжения.

16. Понятие о расчетных отказах систем электроснабжения. Расчетные отказы кратковременные, средней продолжительности и продолжительные.

17. Показатели плановых ремонтов элементов систем электроснабжения.

18. Применение основных положений и методов теории надежности к электроэнергетическим системам и системам электроснабжения потребителей.

19. Применение показателей надежности при анализе и выборе вариантов систем электроснабжения. Понятие об оптимальной надежности.

20. Общие сведения об оценках важности элементов. Важность элементов на логическом уровне задания системы.

21. Важность элементов на вероятностном уровне задания системы. Способы получения оценок и области их использования.

22. Способы представления математических моделей: словесный, графический, аналитический.

23. Показатели надежности систем электроснабжения для отказов любой продолжительности: параметр потока отказов, средняя продолжительность отказов, вероятность возникновения отказа, недоотпуск электроэнергии, ущерб от перерыва электроснабжения.

24. Показатели плановых ремонтов элементов систем электроснабжения: периодичность проведения, ремонтопригодность, коэффициент простоя в плановых ремонтах.

25. Коэффициенты готовности и простоя, коэффициент аварийности (опасность отказов).

26. Вероятность отказа, параметр потока восстановления для восстанавливаемых объектов.

27. Общие сведения о логико-вероятностных методах расчета надежности. Основные этапы.

28. Среднее время восстановления, наработка между отказами, вероятность безотказной работы для восстанавливаемых объектов,

29. Разновидности логических функций системы и способы их получения. Способы перехода к вероятностным функциям.

30. Понятие о нормировании надежности. Прямое и опосредствованное нормирование.

31. Методы расчета недоотпуска электрической энергии с учетом особенности расчета надежности.

32. Стоимостная оценка ущерба от ненадежности объекта энергетики.

33. Убытки производителя, поставщика и потребителя, вызванные ненадежностью объекта энергетики, а также связанные с ней экономические нарушения.

Содержание

1. Информация о дисциплине 3

1.1. Предисловие 3

1.2. Содержание дисциплины и виды учебной работы 4

2. Рабочие учебные материалы 5

2.1. Рабочая программа (100 часов) 5

2.2. Тематический план дисциплины 10

2.3. Структурно-логическая схема дисциплины «Надежность электроснабжения» 16

2.4. Временной график изучения дисциплины 17

2.5. Практический блок 17

2.6. Балльно-рейтинговая система оценки знаний 19

3. Информационные ресурсы дисциплины 20

3.1. Библиографический список 20

3.2. Опорный конспект 22

3.3. Глоссарий 82

3.4. Технические и программные средства обеспечения дисциплины 84

3.5. Методические указания к проведению практических занятий 84

4. Блок контроля освоения дисциплины 98

4.1. Общие указания 98

4.2. Задание на контрольную работу и методические указания к ее выполнению 99

4.3. Текущий контроль 102

4.4. Итоговый контроль 113

Вопросы для подготовки к экзамену 113

Зайцев Герман Зельманович
Минакова Татьяна Евгеньевна
Сливкин Александр Владимирович

Надежность электроснабжения.

Учебно-методический комплекс

Редактор И.Н. Садчикова
Сводный темплан 2010 г.

Лицензия ЛР № 020308 от 14.02.97

Подписано в печать		Формат 60x84 1/16	
Б.кн.-журн.	П.л.	Б.л.	Изд-во СЗТУ
Тираж			Заказ

Северо-Западный государственный заочный технический университет
Издательство СЗТУ, член Издательско-полиграфической ассоциации университетов России
191186, Санкт-Петербург, ул. Миллионная, д.5