

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
образования
«ИРКУТСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»

Структурное подразделение «Электроснабжения и электротехники»

УТВЕРЖДЕНА:

на заседании кафедры электроснабжения и электротехники

Протокол №12 от 18 июня 2025 г.

Рабочая программа дисциплины

«СПЕЦИАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ»

Направление: 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника

Цифровая электроэнергетика

Квалификация: Магистр

Форма обучения: очная

Документ подписан простой
электронной подписью
Составитель программы:
Крупенёв Дмитрий Сергеевич
Дата подписания: 09.06.2025

Документ подписан простой
электронной подписью
Утвердил: Шакиров
Владислав Альбертович
Дата подписания: 18.06.2025

Документ подписан простой
электронной подписью
Согласовал: Шушпанов Илья
Николаевич
Дата подписания: 09.06.2025

Год набора – 2025

Иркутск, 2025 г.

1 Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине, соотнесённых с планируемыми результатами освоения образовательной программы

1.1 Дисциплина «Специальные вопросы надежности систем электроснабжения» обеспечивает формирование следующих компетенций с учётом индикаторов их достижения

Код, наименование компетенции	Код индикатора компетенции
ПК-3 Способен проектировать, производить расчёты и выбирать оборудование и технологическую автоматику электрических сетей, включающую в себя цифровую информационно-сетевую систему	ПК-3.4
ПК-4 Способен применять знания, умения, навыки управления проектами при проектировании и эксплуатации новых объектов профессиональной деятельности	ПК-4.4

1.2 В результате освоения дисциплины у обучающихся должны быть сформированы

Код индикатора	Содержание индикатора	Результат обучения
ПК-3.4	Знает технические характеристики и возможности серийных приборов и оборудования для проведения энергоаудита и диагностики электрооборудования и систем электрообеспечения	Знать основные понятия и определения надежности в электроэнергетике, наиболее используемые показатели и методы определения и поддержания надежности, критерии и задачи надежности систем электроснабжения. Уметь - применять полученные знания к конкретным задачам определения надежности систем электроснабжения, - решать достаточно сложные задачи определения надежности систем электроснабжения, - сопоставлять различные схемы систем электроснабжения по надежности и выбирать наилучшие решения. Владеть терминологией
ПК-4.4	Применяет знания о надежности систем электроснабжения при проектировании и эксплуатации новых объектов профессиональной деятельности	Знать назначение имеющихся показателей надёжности и как их интерпретировать на практике; - методы оценки надёжности, способы её повышения и средства её поддержания; Уметь проводить в практической деятельности (при наличии информационной базы) оценку надёжности системы

		электроснабжения и принимать решение по выбору при неудовлетворительной надёжности того или иного варианта мероприятий по её повышению с учётом, как показателей надёжности, так и технических и экономических преимуществ;- ориентироваться, выбирая из множества показателей наиболее подходящие для исследуемого объекта и методы для расчёта этих показателей; Владеть - различиями в области надёжности систем электроснабжения и систем более высокого уровня иерархии, чтобы корректно использовать методы оценки надёжности.
--	--	---

2 Место дисциплины в структуре ООП

Изучение дисциплины «Специальные вопросы надёжности систем электроснабжения» базируется на результатах освоения следующих дисциплин/практик: «Анализ электроэнергетических систем», «Проблемы развития и функционирования ЭЭС в современных условиях»

Дисциплина является предшествующей для дисциплин/практик: «Микросети, интеллектуальные сети и суперсети», «Оптимизация интеллектуальных систем электроснабжения»

3 Объем дисциплины

Объем дисциплины составляет – 3 ЗЕТ

Вид учебной работы	Трудоемкость в академических часах (Один академический час соответствует 45 минутам астрономического часа)	
	Всего	Семестр № 3
Общая трудоемкость дисциплины	108	108
Аудиторные занятия, в том числе:	26	26
лекции	13	13
лабораторные работы	0	0
практические/семинарские занятия	13	13
Самостоятельная работа (в т.ч. курсовое проектирование)	46	46
Трудоемкость промежуточной аттестации	36	36
Вид промежуточной аттестации (итогового контроля по дисциплине)	Экзамен	Экзамен

4 Структура и содержание дисциплины

4.1 Сводные данные по содержанию дисциплины

Семестр № 3

№ п/п	Наименование раздела и темы дисциплины	Виды контактной работы						СРС		Форма текущего контроля
		Лекции		ЛР		ПЗ(СЕМ)				
		№	Кол. Час.	№	Кол. Час.	№	Кол. Час.	№	Кол. Час.	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	Системы электроснабжения	1	2			1	2	3	10	Устный опрос
2	Основные понятия надежности систем электроснабжения	2	1			2	2	1	9	Устный опрос
3	Показатели надёжности.	3	2			3	2	2	7	Устный опрос
4	Методы определения надёжности.	4	2			4	2	2	5	Устный опрос
5	Обеспечение требуемого уровня надёжности систем электроснабжения.	5	2			5	2	2	5	Устный опрос
6	Критерии обеспечения надёжности электроснабжения.	6	3			6	3	2	10	Устный опрос
7	Задачи по обеспечению надежного электроснабжения	7	1							Устный опрос
	Промежуточная аттестация								36	Экзамен
	Всего		13				13		82	

4.2 Краткое содержание разделов и тем занятий

Семестр № 3

№	Тема	Краткое содержание
1	Системы электроснабжения	Особенности промышленных, городских и сельских систем электроснабжения с точки зрения надежности. Распределенная генерация в системах электроснабжения.
2	Основные понятия надежности систем электроснабжения	События, состояния и процессы в объекте. Работоспособные и неработоспособные состояния. Отказ. Восстановление. Потоки отказов и восстановлений. Надежность как комплексное свойство. Структурирование надежности.

3	Показатели надёжности.	Структурно-функциональные (условные) показатели. Вероятностные (без-условные) показатели. Показатели безотказности. Показатели долговечности. Показатели восстанавливаемости. Комплексные показатели для абстрактного объекта. Энергетические комплексные показатели.
4	Методы определения надёжности.	Классификация методов определения надёжности. Методы испытаний на надёжность. Методы наблюдения. Графический метод (граф состояний и переходов). Метод на основе булевой алгебры. Аналитический логико-вероятностный метод. Аналитический метод на основе формулы полной вероятности. Имитационный метод (статистическое моделирование). Методы определения состояний системы по состояниям ее элементов.
5	Обеспечение требуемого уровня надёжности систем электроснабжения.	Виды ремонтов, их характеристика. Различные стратегии ремонтов. Планово-предупредительные ремонты электрооборудования. Техническое обслуживание и ремонты электрооборудования с учетом технического состояния. Классификация средств диагностирования. Метод инфракрасной термографии. Метод хроматографического контроля маслonaполненного оборудования. Метод контроля диэлектрических характеристик изоляции. Метод контроля разрядов. Метод вибродиагностики. Электрофизический метод контроля. Прогнозирование технического состояния электрооборудования.
6	Критерии обеспечения надёжности электроснабжения.	Общие положения. Экономический подход в общем случае. Подход с позиции электроснабжающей организации. Подход с позиции потребителя. Нормативный подход. Обеспечение нормативного уровня надёжности. Приведение вариантов к одинаковой надёжности. Оптимизация надёжности с учетом ущербов у потребителей. Механизм согласования интересов электроснабжающей организации и потребителей. Координация системной надёжности и надёжности системы электроснабжения.
7	Задачи по обеспечению надёжного электроснабжения	Средства обеспечения надёжности. Виды резервирования. Роль управления в обеспечении надёжности. Задачи различных субъектов отношений в электроэнергетике в плане обеспечения надёжности электроснабжения потребителей. Системная надёжность и надёжность электроснабжения потребителей. Структуризация задач по обеспечению надёжности систем электроснабжения.

4.3 Перечень лабораторных работ

Лабораторных работ не предусмотрено

4.4 Перечень практических занятий

Семестр № 3

№	Темы практических (семинарских) занятий	Кол-во академических часов
1	Основные понятия, определения и теоремы теории вероятностей.	2
2	Формула полной вероятности, теорема гипотез Байеса и их применение в электроэнергетике.	2
3	Законы распределения случайных величин	2
4	Структурная функция по надёжности. Алгоритм логико-вероятностного метода оценки надёжности систем электроснабжения	2
5	Применение общей теоремы о повторении опытов для оценки надёжности систем электроснабжения.	2
6	Определение оптимального уровня надёжности систем электроснабжения при проектировании развития.	3

4.5 Самостоятельная работа

Семестр № 3

№	Вид СРС	Кол-во академических часов
1	Подготовка к практическим занятиям	9
2	Подготовка к практическим занятиям (лабораторным работам)	27
3	Проработка разделов теоретического материала	10

В ходе проведения занятий по дисциплине используются следующие интерактивные методы обучения: Дискуссия

5 Перечень учебно-методического обеспечения дисциплины

5.1 Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины

5.1.1 Методические указания для обучающихся по практическим занятиям

Практическая №1. Основные понятия, определения и теоремы теории вероятностей.

1. Событие. Вероятность события

Любая наука содержит ряд основных понятий, на которых она базируется. 'Это в полной мере относится и к теории вероятностей.

Под «событием» в теории вероятностей (ТВ) понимается всякий факт, который в результате опыта может произойти или не произойти. Каждое из событий обладает той или иной степенью возможности: одни - большей, другие - меньшей. Чтобы количественно сравнивать между собой события по степени их возможности, очевидно, нужно с каждым событием связать определенное число, которое тем больше, чем более возможно событие. Такое число назовем вероятностью события. Таким образом,

вероятность события есть численная мера степени объективной возможности этого события. Понятие вероятности события в самой своей основе связано с опытным, практическим понятием частоты события.

Сравнивая между собой различные события по степени их возможности необходимо установить какую-то единицу измерения. В качестве такой единицы измерения естественно принять вероятность достоверного события, т. е. такого события, которое в результате опыта непременно должно произойти.

Достоверным называется событие U , которое в результате опыта непременно должно произойти.

Пример достоверного события - нагрузка (ток) нормально работающей системы электроснабжения обязательно будет больше нуля и это является событием достоверным. Противоположностью по отношению к достоверному событию является невозможное событие, т. е. такое событие, которое в данном опыте не может произойти.

Невозможным называется событие V , которое в результате опыта не может произойти.

Пример невозможного события - нагрузка нормально работающей системы электроснабжения не может быть больше суммы нагрузок, присоединенных к системе потребителей. Естественно невозможному событию приписать вероятность, равную нулю.

Вероятность любого события A заключена между 0 и 1.

$$0 \leq P(A) \leq 1$$

Полной группой событий называется несколько событий таких, что в результате опыта непременно должно произойти хотя бы одно из них.

Несколько событий называются несовместными в данном опыте, если никакие два из них не могут появиться вместе.

Несколько событий в данном опыте называются равновозможными, если по условиям симметрии есть основания считать, что ни одно из этих событий не является объективно более возможным, чем другие.

Частота, или статистическая вероятность, события

Если произведена серия из n опытов, в каждом из которых могло появиться или не появиться некоторое событие A , то частотой события A в данной серии опытов называется отношение числа опытов, в которых появилось событие A , к общему числу произведенных опытов.

Частоту событий также называют его статистической вероятностью или вероятностью.

$$P(A) = m/n$$

где m — число появлений события A , n — общее число произведенных опытов.

Вероятность любого события A заключена между 0 и 1.

$$0 \leq P(A) \leq 1$$

При небольшом числе опытов частота события носит в значительной мере случайный характер и может заметно изменяться от одной группы опытов к другой. При увеличении числа опытов частота события все более теряет свой случайный характер, проявляет тенденцию стабилизироваться, приближаясь с незначительными колебаниями к некоторой средней, постоянной величине - его вероятности.

Пример:

1. В ящике находится 100 изоляторов, 10 из них бракованных. Найти вероятность того, что взятый первый изолятор будет исправным.

Решение:

$$m = 100 - 10 = 90 \quad n = 100 \quad p = 90/100 = 0,9$$

Теорема умножения вероятностей

Прежде, чем начать излагать теорему- умножения вероятностей, введем еще одно понятие: понятие о независимых и зависимых событиях.

Событие A называется независимым от события B , если вероятность события A не зависит от того, произошло событие B или нет.

Событие А называется зависимым от события В, если вероятность события А меняется в зависимости от того, произошло событие В или нет.

П р и м е р ы.

1. Опыт состоит в бросании двух монет и рассматриваются события:

А - появление герба на первой монете.

В - появление герба на второй монете.

В данном случае вероятность события А не зависит от того, произошло событие В или нет. Следовательно событие А независимо от события В.

2. В урне два белых шара и один черный. Два лица вынимают из урны по одному шару. Рассматриваются события:

А - появление белого шара у первого лица.

В - появление белого шара у второго лица.

Вероятность события А, если опыт начинает первое лицо, будет равна $2/3$. Если опыт начинает второе лицо, в результате которого произошло событие В. то вероятность события А становится равной $1/2$. Отсюда следует, что событие А зависит от события В. Вероятность события А, вычисленная при условии, что имело место другое событие В, называется условной вероятностью события А и обозначается

Для условий последнего примера

Условия независимости события А от события В можно записать в виде:

а условие зависимости - в виде:

Теперь формулируем теорему умножения вероятностей.

Вероятность произведения двух событий равна произведению вероятности одного из них на условную вероятность другого, вычисленную при условии, что первое имело место:

При применении теоремы умножения безразлично, какое из событий А и В считать первым, а какое вторым, и теорему умножения можно записать и в таком виде:

С л е д с т в и е 1. Если событие А не зависит от события В, то и событие В не зависит от события А.

В самом деле, пусть дано, что событие А не зависит от В. т. е.

Требуется доказать, что и событие В не зависит от А, т. е.

Напишем теорему умножения вероятностей в двух формах:

Откуда

или согласно условию (3)

из последнего выражения следует, что

что и требовалось доказать.

Из следствия 1 следует, что зависимость или независимость событий всегда взаимны.

Поэтому можно дать новое определение независимых событий.

Два события называются независимыми, если появление одного из них не изменяет вероятности появления другого.

Понятие независимости событий может быть распространено на любое число событий.

Несколько событий называются независимыми, если любое из них не зависит от любой совокупности остальных.

Следствие 2. Вероятность произведения двух независимых событий равна произведению

вероятностей этих событий.

Это следствие вытекает из определения независимых событий. Теорема умножения вероятностей может быть обобщена на случай произвольного числа событий. В общем виде она формулируется так.

Вероятность произведения нескольких событий равна произведению вероятностей этих событий, причем вероятность каждого следующего по порядку события вычисляется при условии, что все предыдущие имели место:

Для независимых событий теорема упрощается и принимает вид:

т.е. вероятность произведения независимых событий равна произведению вероятностей этих событий.

Применяя знак произведения, теорему можно записать в виде:

Пример.

Имеем распределительный пункт (РП) с четырьмя отходящими линиями к потребителям (П). Потребители имеют номинальную нагрузку: П1 - 20 кВт; П2 - 30 кВт; П3 - 20 кВт; П4 - 30 кВт. Вероятность включенного состояния потребителей соответственно равна $P_1 = 0,3$; $P_2 = 0,4$; $P_3 = 0,2$; $P_4 = 0,8$.

Определить вероятность того, что питающий РП кабель будет загружен на 100 %.

Решение. События включения потребителей - события независимые. Поэтому для решения задачи используем формулу (11). Обозначим через А событие полной загрузки питающего РП кабеля. Тогда

Из примера видно, что хотя вероятности работы каждого потребителя в отдельности достаточно велики, вероятность же одновременной работы всех четырех потребителей на порядок ниже. Это обстоятельство следует учитывать при выборе кабелей и электрооборудования.

На практике сравнительно редко встречаются задачи, в которых нужно применять только теорему сложения или только теорему умножения вероятностей. Обычно обе теоремы приходится применять совместно. При этом, чаще всего, событие, вероятность которого требуется определить, представляется в виде суммы нескольких несовместных событий (вариантов данного события), каждое из которых в свою очередь является произведением событий.

Пример.

Экскаватор производит вскрытие кабельной траншеи. При этом он три раза ковшем зацепил кабель. Вероятность повреждения кабеля при первом зацеплении $P_1 = 0,4$; при втором - $P_2 = 0,5$; при третьем - $P_3 = 0,7$.

Найти вероятность того, что в результате этих трех зацеплений кабель будет поврежден:

- а) ровно один раз;
- б) хотя бы один раз.

Решение. Рассмотрим событие А - ровно одно повреждение. Это событие может осуществиться несколькими способами, т. е. распадается на несколько несовместных вариантов: может быть повреждение при первом зацеплении, а второе и третье зацепление обошлось без повреждений; или может быть повреждение при втором зацеплении, а первое и третье зацепление не привело к повреждению; или, наконец, может быть повреждение при третьем зацеплении, а при первом и втором зацеплениях обошлось без повреждений. Следовательно.

где A_1, A_2, A_3 - повреждения при первом, втором и третьем зацеплениях; $\bar{A}_1, \bar{A}_2, \bar{A}_3$ - противоположные события.

Применяя теоремы сложения и умножения вероятностей и пользуясь свойством противоположных событий, находим:

Рассмотрим событие В - хотя бы одно повреждение кабеля. Пользуясь тем же приемом, который был применен выше, и теми же обозначениями, можно представить событие В в

виде суммы несовместных вариантов:

Далее необходимо найти вероятность каждого варианта по теореме умножения и все эти вероятности сложить. Однако такой путь решения задачи достаточно трудоемкий. Здесь целесообразно от прямого события В перейти к противоположному:

В - ни одного повреждения кабеля.

Очевидно:

По теореме умножения

На данном примере проиллюстрирован принцип целесообразности применения противоположных событий в теории вероятностей. Его можно сформулировать следующим образом.

Если противоположное событие распадается на меньшее число вариантов, чем прямое событие, то имеет смысл при вычислении вероятностей переходить к противоположному событию.

Практическая № 2. Формула полной вероятности, теорема гипотез Байеса и их применение в электроэнергетике.

Формула полной вероятности

Формула полной вероятности является следствием обоих основных теорем – теоремы сложения вероятностей и теоремы умножения вероятностей.

Пусть требуется определить вероятность некоторого события А, которое может произойти вместе с одним из событий:

образующих полную группу несовместных событий. Будем эти события называть гипотезами.

Так как гипотезы $H_1, H_2, \dots, H_n$ образуют полную группу, то событие А может появиться только в комбинации с какой-либо из этих гипотез:

Так как гипотезы $H_1, H_2, \dots, H_n$ несовместны, то и комбинации $H_1A + H_2A + \dots + H_nA$ также несовместны. Применяя к ним теорему сложения вероятностей, получим:

Применяя к событию H_iA теорему умножения, получим:

Или

Полученная формула (5) и есть формула полной вероятности.

Пример. Вдоль линии электропередачи (ЛЭП) происходит три грозовых разряда.

Вероятность попадания в ЛЭП первого грозового разряда равна 0.4; второго - 0.5; третьего - 0,7. ЛЭП выходит из строя при одном попадании молнии с вероятностью 0.2; при двух попаданиях с вероятностью 0.6 и при трех попаданиях с вероятностью 1,0.

Найти вероятность того, что в результате грозовых разрядов ЛЭП вышла из строя.

Решение. Рассмотрим четыре гипотезы:

Но - в ЛЭП не попало ни одного грозового разряда;

H_1 - в ЛЭП попал один разряд молнии;

H_2 -в ЛЭП попало два разряда молнии;

H_3 - в ЛЭП попало три разряда молнии.

Очевидно, что эти гипотезы имеют место при следующих сочетаниях событий, образующих несколько несовместных вариантов:

где $B_1; B_2; B_3$ - попадание молнии в ЛЭП при первом, втором и третьем грозовом разряде соответственно.

Пользуясь теоремами сложения, умножения и свойством противоположных событий, найдем вероятности этих гипотез.

Условные вероятности события А (выход из строя ЛЭП) при этих гипотезах равны:

Применяя формулу полной вероятности, получим:

Из результатов расчета видно, что первую гипотезу можно было бы не рассматривать, так как соответствующий член в формуле полной вероятности обращается в нуль. Так обычно и поступают при применении формулы полной вероятности, рассматривая не полную группу несовместных гипотез, а только те из них, при которых данное событие возможно.

Теорема гипотез (формула Байеса)

Следствием теоремы умножения и формулы полной вероятности является так называемая теорема гипотез или формула Байеса.

Поставим задачу.

Имеется полная группа несовместных гипотез $H_1, H_2, \dots, H_n$. Вероятности этих гипотез до опыта известны и равны соответственно $P(H_1), P(H_2), \dots, P(H_n)$. Произведен опыт, в результате которого имело место событие A . Спрашивается, как следует изменить вероятности гипотез в связи с появлением этого события?

По существу речь идет о том, чтобы найти условную вероятность $P(H_i|A)$ для каждой гипотезы.

Из теоремы умножения имеем:

где $i=1, 2, \dots, n$.

Из последнего уравнения, отбрасывая левую часть, находим:

Выражая $P(A)$ с помощью формулы полной вероятности (5), имеем:

Формула (8) и носит название формулы Байеса или теоремы гипотез.

Пример. Кабель, питающий трансформаторную подстанцию, работает в двух режимах:

а) номинальном;

б) с перегрузкой.

Первый режим работы составляет 80 % времени эксплуатации, а второй - 20 %.

Вероятность выхода кабеля из строя в течение времени t в номинальном режиме равна 0.1; во втором - 0.7.

Найти:

1. Вероятность выхода кабеля из строя в течение времени t .

2. Кабель вышел из строя. Какова вероятность того, что он вышел из строя работая в первом режиме?

Решение. Возможны две гипотезы:

H_1 - работа кабеля в номинальном режиме;

H_2 - работа кабеля в режиме перегрузки.

Вероятности этих гипотез до опыта:

Вероятность события A (выход кабеля из строя) при этих гипотезах равны:

Используя формулу полной вероятности (5), определяем вероятность выхода кабеля из строя в течение времени t

Вероятность того, что кабель вышел из строя, работая в первом режиме, определим по формуле Байеса (8)

Практическая № 3. Законы распределения случайных величин.

Одним из основных понятий теории вероятностей является понятие случайной величины. Случайной величиной называют величину, которая в результате испытания примет одно и только одно возможное значение, наперед не известное и зависящее от случайных причин, которые заранее не могут быть учтены.

Примеры: количество отказов в системе электроснабжения за месяц, время ремонта отказавшего оборудования, суммарная нагрузка потребителей и т.д.

Случайная величина называется дискретной, если она принимает отдельные, изолированные возможные значения с определенными вероятностями.

Случайная величина называется непрерывной, если она принимает все значения из некоторого конечного или бесконечного промежутка.

Ряд распределения. Многоугольник распределения

Условимся случайные величины обозначать большими буквами X, Y, Z и т. д., а их возможные значения - соответствующими малыми буквами x, y, z и т. д.

Рассмотрим дискретную случайную величину X с возможными значениями $x_1, x_2, \dots, x_n$.

Каждое из этих значений возможно, но не достоверно, и величина X может принять каждое из них с некоторой вероятностью. В результате опыта величина X примет одно из этих значений полной группы несовместных событий:

Обозначим вероятности этих событий буквами P с соответствующими индексами:

Так как несовместные события (1) образуют полную группу, то

т. е. сумма вероятностей всех возможных значений случайной величины равна единице.

Эта суммарная вероятность каким-то образом распределена между отдельными значениями. Случайная величина будет полностью описана с вероятностной точки зрения, если мы зададим это распределение, т. е. в точности укажем, какой вероятностью обладает каждое из событий (см. формулу (1)). Этим мы установим так называемый закон распределения случайной величины.

Законом распределения случайной величины называется всякое соотношение, устанавливающее связь между возможными значениями случайной величины и соответствующими им вероятностями.

Простейшей формой задания закона распределения является таблица:

Такую таблицу называют рядом распределения случайной величины. Значения приведенные в таблице можно представить в графическом виде рис.1, а полученная фигура будет называться многоугольником распределения случайной величины.

Рис. Многоугольник распределения случайной величины

Для непрерывной случайной величины не существует ряда распределений и соответственно многоугольника распределений. Существует так называемое «распределение вероятностей».

Для количественной характеристики этого распределения вероятностей удобно пользоваться не вероятностью события $X = x$, а вероятностью события $X \leq x$, где x - некоторая текущая переменная. Вероятность этого события, очевидно, зависит от x , есть некоторая функция от x . Эта функция называется функцией распределения случайной величины X и обозначается $F(x)$:

Функцию распределения $F(x)$ иногда называют также интегральной функцией распределения или интегральным законом распределения.

Функция распределения - самая универсальная характеристика случайной величины. Она существует как для дискретных случайных величин, так и для непрерывных. Функция распределения полностью характеризует случайную величину с вероятностной точки зрения, т. е. является одной из форм закона распределения.

Функция распределения любой дискретной величины всегда есть разрывная ступенчатая функция рис.2а. По мере увеличения числа возможных значений случайной величины функция сглаживается рис.2б., и в итоге случайная дискретная величина становится непрерывной, а её функция распределения к непрерывной функции.

Рис. Функции распределения случайных величин

Плотность распределения

Имеется непрерывная случайная величина X с функцией распределения $F(X)$ рис.

Рис. Функция распределения

Вычислим вероятность попадания случайной величины X на участок от x до $x+\Delta x$.

т.е. приращение функции распределения на этом участке.

Рассмотрим отношение этой вероятности к длине участка, т.е. среднюю вероятность приходящуюся на единицу длины на этом участке и будем приближать Δx к нулю. В пределе получим производную от функции распределения:

Обозначим:

Полученная функция $f(x)$ называется плотностью распределения или по-другому плотностью вероятности непрерывной случайной величины X . Иногда функцию $f(x)$ называют «дифференциальной функцией распределения» или «дифференциальным законом распределения» величины X .

Кривая, изображающая плотность распределения случайной величины X называется, называется кривой распределения рис..

Рис. Кривая распределения

Плотность распределения существует только для непрерывных случайных величин.

Законы распределения случайных величин в задачах надёжности электроснабжения

Рассмотрим законы распределения случайных величин, которые получили наибольшее распространение при решении задач надёжности электроснабжения (ЭЭС).

Биномиальное распределение

В системах электроснабжения для нормального функционирования, повышения надёжности эксплуатации и создания оптимального резерва стремятся по возможности использовать однотипное оборудование (выключатели, трансформаторы, приводы и т. п.). Это оборудование может находиться в исключаящем друг друга состояниях (исправно или неисправно, включено или выключено и т. д.).

Если производится n независимых опытов, в каждом из которых событие A появится с вероятностью p , то вероятность того, что событие A появится ровно m раз выражается формулой:

- число слагаемых вида C_n^m или коэффициент разложения бинома, члены разложения которого представляют собой вероятности, поэтому данное распределение называется биномиальным распределением.

Данная формула носит название формулы Бернулли.

Пример:

Имеем $n=4$ одинаковых электродвигателя. По технологическим условиям каждый электродвигатель может быть включен с вероятностью $P=0,4$ и быть выключенным $q=0,6$. Данная система может находиться в пяти возможных состояниях. Определим эти состояния и соответствующие им вероятности.

Решение:

Состояния:

1. ни один двигатель не работает - вероятность такого состояния
2. один двигатель работает - а три нет. вероятность состояния
3. два двигателя работают - два нет, вероятность состояния

4. три двигателя работают - один нет. вероятность состояния
 5. все двигатели включены и работают, вероятность состояния . Используя формулу
- (6) найдём вероятности состояний системы:

$$\begin{aligned}
 &= 0,64 = 0,1296 \\
 &= 4 * 0,4 * 0,63 = 0,3456 \\
 &= 6 * 0,42 * 0,62 = 0,1536 \\
 &= 4 * 0,43 * 0,6 = 0,1536 \\
 &= 0,0256
 \end{aligned}$$

Графически данное распределение будет иметь вид:

Пример.

Вероятность того, что расход электроэнергии в продолжении одних суток не превысит установленной нормы, равна $p = 0,75$. Найти вероятность того, что в ближайшие 6 суток расход электроэнергии в течение 4 суток не превысит нормы.

Решение.

Вероятность нормального расхода электроэнергии в продолжении каждых из 6 суток постоянна и равна $p = 0,75$. Следовательно, вероятность перерасхода электроэнергии в каждые сутки также постоянна и равна $q = 1 - p = 1 - 0,75 = 0,25$.

Искомая вероятность по формуле Бернулли равна

$$= (6 * 5 * 4 * 3 * 2 * 1 / 4 * 3 * 2 * 1 * 2 * 1) * 0,75^4 * 0,25^2 = 0,3$$

Практическая № 4. Структурная функция по надёжности. Алгоритм логико-вероятностного метода оценки надёжности систем электроснабжения.

Существо логико-вероятностных методов расчета надежности состоит в описании схемы системы с помощью аппарата математической логики с использованием теории вероятностей при определении ПН. В основе расчетов лежит исследование событий и высказываний. Произвести расчет надежности системы означает определить связь между сложным событием - отказом системы и простыми событиями - отказами элементов этой системы. Таким образом, в основе расчетов системы на надежность лежат операции с событиями и высказываниями. Каждая из логических операций устанавливает связь между истинностью сложного высказывания и истинностью простых высказываний. Множество возможных состояний системы можно описать с помощью алгебры логики (булевой алгебры, названной по имени Джорджа Буля, впервые изложившего математический подход к вопросам исчисления высказываний).

Алгебра логики представляет собой раздел математической логики, занимающийся исчислением высказываний. Под высказыванием понимается любое предложение, относительно которого можно утверждать его истинность или ложность без учета конкретного содержания. Например, высказывание «частота системы измеряется в герцах» – истинное, а высказывание « $2 > 5$ » – ложное. Отдельные (элементарные) высказывания обозначаются некоторыми переменными (x). При этом высказывание можно рассматривать как величину, которая принимает два значения: «истина» и «ложь». Если x истинно, то $x = 1$; если x ложно, то $x = 0$.

Логическая связь между элементами системы выражается знаками конъюнкции (и, $\wedge$ (умножить)) и дизъюнкции (ИЛИ, $\vee$ (сложить)).

Дизъюнкция (аналог объединения множеств). Логическое сложение высказываний x_1 и x_2 обозначается как $x_1 \vee x_2$ или $x_1 + x_2$ (читается « x_1 или x_2 »). Результат операции есть «Ложь» в том и только том случае, когда обе составляющие принимают значение «Ложь». Если хотя бы одна составляющая есть «Истина», результат операции также «Истина»: $0 \vee 0 = 0$; $0 \vee 1 = 1$; $1 \vee 0 = 1$; $1 \vee 1 = 1$.

Конъюнкция (аналог пересечения множеств). Логическое умножение высказываний x_1 и x_2 обозначается как $x_1 \wedge x_2$ или $x_1 \cdot x_2$ (читается « x_1 и x_2 »). Результат операции есть «Истина» в том и только том случае, когда обе составляющие принимают значение

«Истина». Если хотя бы одна составсоставляющая есть «Ложь», то результат операции также «Ложь»:

$$0 \wedge 0 = 0; 0 \wedge 1 = 0; 1 \wedge 0 = 0; 1 \wedge 1 = 1.$$

Каждый элемент может находиться в двух состояниях: работоспособном (1) и неработоспособном (0). Логико-вероятностный метод иногда называют методом деревьев событий. Он заключается в описании схемы функцией алгебры логики, выражающей функцию отказа системы или работоспособности.

Алгоритм метода

1. Составляется эквивалентная структурная схема системы.
2. Строится граф дерева событий на основе алгебры логики, начиная с нижнего яруса. При этом изображаются в кружках элементы, отказ которых приводит к отказу части системы. Затем элементы соединяются логическими связями $\wedge$ или $\vee$, в зависимости от структуры надежности и обозначается вершинное действие, т.е. отказ (или работа системы). На рис. 1 показано как составлять графы деревьев событий на примере последовательного, параллельного соединений элементов системы и для системы с поперечной связью.

Рис.1 Графы деревьев событий

3. Дается логическое описание отказов в системе на основе графа дерева событий (ДС). При этом работоспособность обозначается X , а отказ $\bar{X}$.

Например, для построения графа на рис. 1в:

4. Осуществляется переход от логических переменных к вероятностным совместно с подстановкой соответствующих алгебраических знаков операций. Например для последнего графа, приведенного на рис. 1в.

5. Рассчитывается численное значение вероятности отказов с учетом автоматического ввода резерва, если он предусмотрен в анализируемой схеме.

Преимущества логико-вероятностного метода:

- Можно применять при любой логической структуре системы, а не только при последовательно-параллельных логических схемах;
- Можно применять при любых распределениях наработки до отказа.

Недостатки:

- Не всегда удается составить логическую функцию работоспособности или отказа, соответствующую рассматриваемой системе;
- Громоздкость метода для сложных систем преобразования.

Практическая № 5. Применение общей теоремы о повторении опытов для оценки надёжности систем электроснабжения.

Данный метод применяется для схем со смешанным соединением элементов при известной производительности каждого элемента системы.

Для оценки надёжности систем электроснабжения можно воспользоваться общей теоремой о повторении опытов. Теорема формулируется следующим образом:

Вероятность того, что событие A в n независимых опытах появится ровно m раз, равна коэффициенту при x^m в выражении производящей функции:

где p_i – вероятность появления события A в i -м опыте, $q_i = 1 - p_i$.

Вышеприведенная формулировка общей теоремы о повторении опытов в отличие от частной теоремы не дает явного выражения для вероятности

P_m, n . Такое выражение в принципе написать можно, но оно является слишком сложным. Однако, не прибегая к такому явному выражению, все же можно записать общую теорему о повторении опытов в виде одной формулы:

Левая и правая части данного равенства представляют собою одну и ту же производящую функцию $\varphi(z)$, только слева она написана в виде одночлена, а справа – в виде многочлена. Раскрывая скобки в левой части и выполняя приведение подобных членов, получим все вероятности:

как коэффициенты при нулевой, первой и т. д. степенях z .

Производящую функцию можно записать в виде бинома Ньютона:

В этом выражении принимается, что установка содержит n одинаковых бинарных элементов, состояния которых являются независимыми, совместными событиями. Под бинарным элементом здесь понимается элемент, характеризующийся двумя состояниями: полной работоспособности ($z = N$) или неработоспособности $N = 0$.

Разложение бинома

Рассмотрим следующие выражения со степенями $(a + b)^n$, где $a + b$ есть любой бином, а n – целое число.

Алгоритм метода.

1. Составляется эквивалентная структурная схема системы (схема замещения по надёжности).

Рис. Исходная схема

Рис. Эквивалентная структурная схема.

2. Составляется структурная функции по надёжности (S).

Символом p обозначаются последовательные соединения элементов в смысле надёжности, символом β параллельное соединение элементов в смысле надёжности.

Для взятого примера:

$$p(\beta_1(x_1, x_2) \cdot \beta_2(x_3, x_4))$$

3. В соответствии со структурной функцией и при положений общей теоремы о повторении опытов вычисляется требуемая вероятность безотказной работы (отказа) системы электроснабжения.

Практическая № 6. Определение оптимального уровня надёжности систем электроснабжения при проектировании развития.

Здесь N – характеристики (показатели) надёжности объекта, $Z(N)$ – затраты на обеспечение надёжности, которые дополнительно повысят цену электроэнергии. Точка и будет характеризовать искомую, эффективную надёжность объекта. Особенность ситуации состоит в том, что каждый из субъектов вкладывает свой смысл в составляющие, представленные на рис. 6.1, хотя они имеют единую объективную основу. Для электроснабжающей организации $Z(N)$ – это действительно затраты на обеспечение надёжности, для потребителя же – цена на электроэнергию, которую он должен

Рис. 6.1. К определению оптимального уровня надёжности электроснабжения

платить, а эта цена в рыночных условиях не всегда может соответствовать реальным затратам.

Характеристика $U(N)$ также воспринимается рассматриваемыми субъектами по-разному.

Для потребителя – это реальный ущерб от недостаточной надёжности, для электроснабжающей организации – платежи, которые она вынуждена нести в случае, если не может обеспечить требуемую надёжность электроснабжения потребителя. Так что минимумы итоговой характеристики, т.е. для этих субъектов, могут не совпадать, и это представляет дополнительную трудность в процессе нахождения компромисса.

Рассмотрим поиск точки с позиций как электроснабжающей организации, так и потребителя.

Подход с позиции электроснабжающей организации

Критерий эффективности с позиции электроснабжающей организации может быть найден

с использованием общепринятой методики оценки эффективности инвестиционных проектов.

Пусть K_t – капиталовложения в t -м году в объект с заданными его параметрами, которые обеспечивают определенный уровень его надежности H_t ; C_t – текущие затраты в t -м году, необходимые для функционирования этого объекта; R_t – результат функционирования объекта на t -м году (объем реализованной продукции или выручка от проданной в этом году электроэнергии потребителям); E – норма дисконта (норма дохода на капитал для инвестора, годовая цена капитала на рынке); T – горизонт расчета (например, срок службы объекта); K_T – суммарные приведенные за период T капиталовложения в объект; C_T – суммарные приведенные за период T затраты на обеспечение функционирования объекта; R_T – суммарный за период T приведенный ущерб потребителю из-за ненадежности объекта; R_T^* – суммарный приведенный за период T результат функционирования объекта, где

Все приведенные параметры являются функциями от показателей надежности.

Критерием согласованной степени (эффективной) надежности объекта-системы электроснабжения может служить один из следующих:

1) чистый дисконтированный доход (ЧДД) эффективного (i -го) варианта объекта-системы должен быть положительным и максимальным)

2) индекс доходности (ИД) i -го варианта должен быть не меньше единицы и максимальным

3) внутренняя норма доходности (ВНД), определяемая из условия $R = K$, для эффективного (i -го) варианта объекта-системы электроснабжения должна быть не меньше нормы дисконта и максимальной

4) срок окупаемости эффективного (i -го) варианта объекта-системы должен быть не больше периода T и минимальным

Здесь индекс i обозначает искомый эффективный вариант объекта-системы электроснабжения с оптимальными параметрами надежности H , с которой электроснабжающая организация обеспечивает потребителя электроэнергией.

Нормативный подход

Рассмотренный в предыдущем параграфе экономический подход к определению рациональной надежности требует объемной информации, выполнения достаточно квалифицированных расчетов, анализа. К сожалению, далеко не всегда можно иметь необходимую информацию. При такой массовости использования электроэнергии во всех сферах деятельности человека и соответственно массовости принимаемых решений по организации электроснабжения трудно обеспечить и необходимую высокую квалификацию специалистов.

С другой стороны, практика проектирования и эксплуатации накопила определенный опыт в решении этой задачи на эмпирической основе, который позволил сформулировать определенные требования по надежности в виде нормативов.

Кроме того, возникают случаи, когда экономический подход трудно применим по принципиальным соображениям, например, когда надежность связана с жизнью людей (опасность взрывов на химических производствах, откачка воды и вентиляция в шахтах, ядерная энергетика и т.п.). Определять и использовать цену жизни человека выглядит антигуманно и даже кощунственно. Однако, зная, что невозможно обеспечить абсолютную надежность, принимая либо нормируя ту или иную надежность, мы тем самым производим оценку жизни человека.

Используемые в нашей стране нормативы сформулированы в правилах устройства электроустановок (ПУЭ). Здесь компромисс между потребителями и поставщиками

разрешается следующим образом. С позиции потребителей они (точнее, их токоприемники) подразделены на категории по важности (что отражает ущерб потребителей в экономическом подходе). Поставщики же обязаны обеспечивать разные категории потребителей надежностью различной степени, которая формируется разной кратностью резервирования и разной скоростью восстановления нарушенного электроснабжения (что отражается, естественно, на экономических показателях системы электроснабжения).

В соответствии с ПУЭ электроприемники потребителей подразделяются на следующие три категории.

I категория – электроприемники, перерыв электроснабжения которых может повлечь за собой: опасность для жизни людей, значительный ущерб экономике, повреждение дорогостоящего основного оборудования, массовый брак продукции, расстройство сложного технологического процесса, нарушение функционирования особо важных элементов коммунального хозяйства.

Из состава электроприемников I категории выделяется особая группа электроприемников, бесперебойная работа которых необходима для безаварийного останова производства с целью предотвращения угрозы жизни людей, взрывов, пожаров, повреждения дорогостоящего основного оборудования.

II категория – электроприемники, перерыв электроснабжения которых приводит к массовому недоотпуску продукции, массовым простоям рабочих, механизмов и промышленного транспорта, нарушению нормальной деятельности значительного количества городских и сельских жителей.

III категория – все остальные электроприемники, не подходящие под определения I и II категорий.

5.1.2 Методические указания для обучающихся по самостоятельной работе:

Воропай Н. И. Надежность систем электроснабжения : учебное пособие для вузов по направлению подготовки "Электроэнергетика и электротехника" / Н. И. Воропай, 2015. - 206 с.

6 Фонд оценочных средств для контроля текущей успеваемости и проведения промежуточной аттестации по дисциплине

6.1 Оценочные средства для проведения текущего контроля

6.1.1 семестр 3 | Устный опрос

Описание процедуры.

Опрос в начале занятия о показателях надёжности электроэнергетических систем.

Критерии оценивания.

«Зачтено» - правильный ответ.

«Не зачтено» - неправильный ответ.

6.2 Оценочные средства для проведения промежуточной аттестации

6.2.1 Критерии и средства (методы) оценивания индикаторов достижения компетенции в рамках промежуточной аттестации

Индикатор достижения компетенции	Критерии оценивания	Средства (методы) оценивания промежуточной аттестации
ПК-3.4	Полнота, системность, прочность знаний, степень осознанности, понимания изученного.	Решение задач. Устное собеседование по теоретическим вопросам и/или тестирование.
ПК-4.4	Полнота, системность, прочность знаний, степень осознанности, понимания изученного.	Решение задач. Устное собеседование по теоретическим вопросам и/или тестирование.

6.2.2 Типовые оценочные средства промежуточной аттестации

6.2.2.1 Семестр 3, Типовые оценочные средства для проведения экзамена по дисциплине

6.2.2.1.1 Описание процедуры

Экзамен проходит в формате собеседования с обучающимся. К экзамену допускаются обучающиеся, которые присутствовали на всех занятиях и выполнили все работы. Оценивается понимание пройденного материала. В случае невыполнения критерия оценивания назначается дата пересдачи, но не более 2 раз с последующим опросом по всем темам дисциплины.

Пример задания:

1. Работоспособные и неработоспособные состояния объекта
2. Отказ. Периоды жизни объекта. Восстановление
3. Потоки отказов и восстановлений
4. Надежность как комплексное свойство
5. Структуризация надежности
6. Структурно-функциональные (условные) показатели безотказности и восстанавливаемости
7. Вероятностные (безусловные) показатели безотказности
8. Вероятностные (безусловные) показатели восстанавливаемости
9. Комплексные вероятностные показатели надежности
10. Энергетические показатели надежности
11. Экспериментальные методы определения надежности
12. Граф состояний и переходов
13. Метод определения надежности на основе булевой алгебры на структурно-функциональном уровне
14. Аналитический метод определения надежности на основе марковского процесса
15. Аналитический логико-вероятностный метод определения надежности
16. Метод определения надежности на основе формулы полной вероятности

17. Имитационный метод определения надежности
18. Определение последствий для потребителей при различных состояниях системы
19. Виды ремонтов, стратегии организации профилактики оборудования
20. Планово-предупредительные ремонты электрооборудования
21. Средства и методы диагностирования электрооборудования, прогнозирование его технического состояния
22. Экономический подход к обоснованию решений по обеспечению надежности
23. Экономические критерии обоснования решений по обеспечению надежности с позиций электроснабжающей организации
24. Экономические критерии обоснования решений по обеспечению надежности с позиций потребителя
25. Нормативный подход к обеспечению надежности
26. Средства обеспечения надежности
27. Субъектная декомпозиция задачи обеспечения надежности
28. Структура и содержание задач надежности электроснабжения
29. Обеспечение нормативного уровня надежности
30. Приведение вариантов системы к одинаковой надежности
31. Оптимизация надежности с учетом ущербов у потребителей
32. Механизм согласования интересов по надежности электроснабжающей организации и потребителей

6.2.2.1.2 Критерии оценивания

Отлично	Хорошо	Удовлетворительно	Неудовлетворительно
отличное понимание предмета, всесторонние знания, отличные умения и владения.	достаточно полное понимание предмета, хорошие знания, умения и владения.	приемлемое понимание предмета, удовлетворительные знания, умения и владения.	результаты обучения не соответствуют минимальным требованиям

7 Основная учебная литература

1. Надежность систем энергетики и их оборудования : справочник : в 4 т. / под общ. ред. Ю. Н. Руденко. Т. 2 : Надежность электроэнергетических систем / Н. И. Воропай [и др.]; под ред. М. Н. Розанова, 2000. - 564, [1].
2. Надежность систем электроснабжения : программа, метод. указания и контрол. задания для заоч. фак. направления 140200 "Электроэнергетика"... / Иркут. гос. техн. ун-т, 2006. - 16.
3. Воропай Н. И. Надежность систем электроснабжения : конспект лекций / Н. И. Воропай, 2006. - 205.
4. Воропай Н. И. Надежность систем электроснабжения : учебное пособие для вузов по направлению подготовки "Электроэнергетика и электротехника" / Н. И. Воропай, 2015. - 206.

8 Дополнительная учебная литература и справочная

1. Гук Ю. Б. Анализ надежности электроэнергетических установок / Ю. Б. Гук, 1988. - 222.

2. Гук Ю. Б. Теория надежности в электроэнергетике : учеб. пособие для электроэнерг. специальностей вузов / Ю. Б. Гук, 1990. - 206.

3. Надежность систем энергетики и их оборудования : справочник: В 4 т. Т. 4. Надежность систем теплоснабжения/ [Е. В. Сеннова и др.]; Отв. ред. Е. В. Сеннова.-Новосибирск: Наука / [Рос. акад. наук, Сиб. отд-ние, Ин-т систем. энергетики им. Л. А. Мелентьева], 2000. - 349.

9 Ресурсы сети Интернет

1. <http://library.istu.edu/>
2. <https://e.lanbook.com/>

10 Профессиональные базы данных

1. <http://new.fips.ru/>
2. <http://www1.fips.ru/>

11 Перечень информационных технологий, лицензионных и свободно распространяемых специализированных программных средств, информационных справочных систем

1. Microsoft Office 2003 VLK (поставки 2007 и 2008)

12 Материально-техническое обеспечение дисциплины

1. Проектор ViewSonic PJD5134 (Разрешение 1024*768;Мощность лампы 190Вт;Расстояние проекционное 1-12м;Размер проекции по диагонали 0,6-7,6 м)
2. Экран Classic Scutum