

ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ТЕОРИИ ВЕРОЯТНОСТЕЙ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ

© 2022

Ран Н.А., Антипов А.В., Городничева Е.В.

*Филиал Самарского государственного технического университета в г. Новокуйбышевске
(г. Новокуйбышевск, Самарская область, Российская Федерация)*

Аннотация. В статье рассматриваются методы теории вероятностей, используемые в учебном процессе при подготовке специалистов инженерных специальностей. Случайные события в большом количестве встречаются в электроэнергетике так же, как и в любой другой деятельности. Работа большого числа даже технологически или конструктивно схожих технических устройств отличается друг от друга и носит с точки зрения всей системы случайный характер. Множество устройств: электродвигатель, осветительный прибор, нагреватель и другие – случайно могут быть включенными или выключенными, а также работать с разной мощностью. В результате наложения рассматриваемых случайных событий требуемая мощность в энергосистеме получается переменной и зависящей от множества случайных факторов. Аварии отдельных элементов или снижение располагаемой мощности (из-за загрязнения нагреваемых поверхностей котлов, водных или паровых протоков турбин и т.п.) также имеют случайную природу, возникают в результате наложения неблагоприятных условий. Аварии могут создать перебои в электроснабжении, если в наличии нет резервных мощностей в достаточном количестве. Таким образом, работа энергосистемы в целом определяется большим числом случайных событий и случайных величин. Правильно рассчитывая вероятностные характеристики подобных случайных событий, можно точно определить суммарный спрос и необходимые резервы энергосистемы. Поэтому применение теории вероятностей к электроэнергетике всегда было важным и актуальным.

Ключевые слова: теория вероятностей; вероятность; случайные события; энергетические системы; мощность; математическая модель; теория массового обслуживания; метод статистических испытаний.

APPLICATION OF PROBABILITY THEORY ELEMENTS IN SOLVING ELECTRIC POWER PROBLEMS

© 2022

Ran N.A., Antipov A.V., Gorodnicheva E.V.

Branch of Samara State Technical University in Novokuibyshevsk (Novokuibyshevsk, Samara Region, Russian Federation)

Abstract. The paper discusses methods of probability theory used in the educational process for training specialists majoring in engineering. Random events can be found in energy as much as in other human activities. Energy systems include many energy-generating and energy-transforming apparatuses; the number of energy-transforming devices is particularly large. The operating conditions of a large set of even homogeneous technical devices differ from each other and are random. A device (electric motor, lighting fixture, heater) may be randomly switched on or off, operating at different outputs. As a result of the superposition of such random events you get a particular value of power demand in the power system, depending on the set of random events. Failures of individual elements or reduction of the available capacity from contamination of boiler heating surfaces, turbine flow parts, etc. are also accidental events resulting from the superposition of unfavorable conditions. Failures can create interruptions in the power supply if there is no reserve capacity available in the required size.

Keywords: probability theory; probability; random events; power systems; power; mathematical model; mass service theory; statistical test method.

Цель исследования: рассмотреть часто применяемые на практике понятия теории вероятностей, их смысл, применяемые для решения задач методы и их выбор, а также показать связь математического аппарата теории вероятностей с реальными ситуациями.

Все разделы высшей математики тесно связаны с решением задач электроэнергетики, поэтому необходимы для подготовки будущих специалистов данной области. В филиале ФГБОУ ВО «СамГТУ» в г. Новокуйбышевске студенты направления «Электроэнергетика и электротехника» изучают все разделы высшей математики в течение четырех семестров, в том числе и математические задачи электроэнергетики.

Теория вероятностей как раздел математики сформировалась сравнительно недавно. Ее возникновение

связано с попытками построения теории азартных игр, со временем стало развиваться ее применение на практике – в демографии, для создания теории ошибок наблюдения в разделах физики и других науках, в самых разных отраслях для работы со статистикой. По мере выделения теории вероятностей в самостоятельный раздел ее методы стали находить применение во многих науках.

В настоящее время методы теории вероятностей используются для прогнозирования и моделирования работы сложных систем, в том числе и электроэнергетических систем. Расчеты с использованием данных о надежности и аварийности отдельных элементов позволяют планировать меры защиты, повышения надежности, создания резервных мощностей.

Развитие и внедрение современных технологий сбора и обработки данных позволяет иметь как никогда полную картину происходящего в системе и делать важные выводы на этой основе.

Теория вероятностей – раздел математики, изучающий закономерности случайных событий, случайных величин и случайных функций [1, с. 15]. Возможность возникновения любых событий в жизни находится под влиянием многих случайных факторов и других событий.

Случайным событием называется событие, которое в данных конкретных условиях может или произойти, или не произойти [2, с. 8]. Случайной функцией называется величина, изменяющаяся при изменении аргумента случайным образом [2, с. 42].

Определить вероятность возможно двумя способами – классическим и статистическим. *Классическое определение* применимо, если возможные события образуют полную группу, т.е. в одном опыте обязательно произойдет одно из возможных событий. Вероятность рассчитывается как отношение нужных событий исходов к всевозможному числу опытов [3, с. 12]. Поскольку зачастую подсчитать число событий и опытов невозможно, в электроэнергетике обычно используется статистическое определение вероятности. Данное определение основывается на статистических данных. Наблюдая какое-либо случайное событие, можно определить относительную частоту его возникновения. При большом количестве наблюдений относительная частота возникновения события приближается к значению *статистической вероятности* данного события [4, с. 321]. По этой причине для решения практических задач нельзя пользоваться статистическим методом, если не иметь необходимого объема начальных данных.

Рассмотрим практическое применение теории вероятностей в электроэнергетике. Аварийные повреждения оборудования по своей природе являются случайными событиями. В крупных системах с множеством элементов повреждения нескольких устройств могут сочетаться, и появляется задача нахождения вероятности таких одновременных множественных аварий. Для определения надёжности всего оборудования иногда необходимо определять вероятность безаварийной работы [5].

Рассмотрим на примере решения задачи 1.

Задача 1. Потребитель (П) получает электроэнергию от двух источников питания – И₁ и И₂ (рис. 1). Каждая цепь может пропустить всю необходимую мощность.

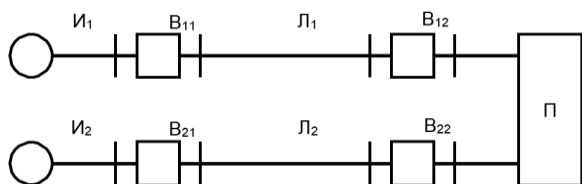


Рисунок 1 – Схема электроснабжения потребителя

Параметры потоков отказов и преднамеренных отключений элементов системы электроснабжения, сред-

ние времени восстановления и длительность преднамеренных отключений приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Параметры надежности элементов

Параметр	Элементы					
	V ₁₁	L ₁	V ₁₂	V ₂₁	L ₂	V ₂₂
λ ₀ , 1/(км/г)	0,099	0,023	0,048	0,137	0,019	0,137
L, км	–	80	–	–	30	–
t _в , ч.	10	30	10	15	30	15
λ _{пр} , 1/г	0,4	0,3	0,4	0,4	0,3	0,4
t _{пр} , ч.	60	50	60	80	20	80

Определить параметр потока отказов системы электроснабжения, среднее время безотказной работы, среднюю вероятность отказа, среднее время восстановления, а также недоотпуск электроэнергии за год, считая, что средняя годовая мощность потребителя P̄ = 30 МВт. При расчете принять, что преднамеренные отключения последовательно включенных элементов цепей совмещаются по времени. Надежность источников питания не учитывать.

Решение:

Параметры потоков отказов первой и второй цепей, каждая из которых состоит из трех последовательно соединенных элементов:

$$\lambda_I = \lambda_{0L1}L_1 + \lambda_{B11} + \lambda_{B12} + \lambda_{прB11} = 0,023 \times 80 + 0,099 + 0,048 + 0,4 = 2,387 (1/г);$$

$$\lambda_{II} = \lambda_{0L2}L_2 + \lambda_{B21} + \lambda_{B22} + \lambda_{прB21} = 0,019 \times 30 + 2 \times 0,137 + 0,4 = 1,244 (1/г).$$

Параметр потока отказов системы определяется как для системы, состоящей из двух параллельно соединенных элементов, и с учетом того, что возможно лишь наложение аварии оставшейся части схемы на преднамеренное отключение j-го элемента по формуле:

$$\lambda_c = \lambda_I q_{II} + \lambda_{II} q_I + (\lambda_I - \lambda_{прB11}) q_{прII} + (\lambda_{II} - \lambda_{прB21}) q_{прI}$$

$$q_I = q_{B11} + q_{L1} + q_{B12} = \lambda_{B11} t_{вB11} + \lambda_{L1} t_{вL1} + \lambda_{B12} t_{вB12} = (0,099 \times 10 + 1,84 \times 30 + 0,048 \times 10) / 8760 = 6,47 \times 10^{-3};$$

$$q_{II} = q_{B21} + q_{L2} + q_{B22} = (0,137 \times 15 + 0,57 \times 30 + 0,137 \times 15) / 8760 = 2,43 \times 10^{-3}.$$

$$\lambda_c = 2,387 \times 2,43 \times 10^{-3} + 1,244 \times 6,47 \times 10^{-3} + (0,844 \times 0,4 \times 60 + 1,987 \times 0,4 \times 80) / 8760 = 23,41 \times 10^{-3} (1/г)$$

$$\bar{T}_c = 1/\lambda_c = 1/23,41 \times 10^{-3} = 42,7 \text{ лет.}$$

При α = 0,1:

$$T_{cp} = -\ln(1 - \alpha) / \lambda_c = 1,105 / 23,41 \times 10^{-3} = 4,48 \text{ лет.}$$

Средние времена аварийного восстановления цепей:

$$t_{в1} = (q_I / (\lambda_I - \lambda_{прB11})) \times 8760 = 28,5;$$

$$t_{в2} = (q_{II} / (\lambda_{II} - \lambda_{прB21})) \times 8760 = 25,2.$$

Коэффициенты, учитывающие факторы уменьшения вероятности преднамеренного отключения элементов:

$$K_{п1} = 1 - e^{-t_{в1}/t_{пр1}} = 1 - e^{-28,5/60} = 0,9075;$$

$$K_{п2} = 1 - e^{-t_{в2}/t_{пр2}} = 1 - e^{-25,2/80} = 0,939.$$

Средняя вероятность состояния отказа:

$$q_c = q_1 q_{11} + K_{п1} \lambda_{np1} \times \bar{t}_{np1} \times q_{11} + K_{п2} \lambda_{np11} \times \bar{t}_{np11} \times q_1 = 6,47 \times 10^{-3} \times 2,43 \times 10^{-3} + (0,9075 \times 0,4 \times 60 \times 2,43 \times 10^{-3} + 0,939 \times 0,4 \times 80 \times 6,47 \times 10^{-3}) / 8760 = 15,7 \times 10^{-6} + 28,23 \times 10^{-6} = 43,93 \times 10^{-6}.$$

Среднее время восстановления системы:

$$t_c = q_c / \lambda_c = (43,93 \times 10^{-6}) / (23,41 \times 10^{-3}) \times 8760 = 16,43.$$

Математическое ожидание недоотпущенной потребителю энергии:

$$\Delta \bar{\mathcal{E}} = \bar{\mathcal{E}} \times q_c = \bar{P} T q_c = 30 \times 10^3 \times 43,93 \times 10^{-6} = 11542 \text{ кВт}\cdot\text{ч}.$$

Если в приведённом примере не учитывать преднамеренных отключений, то получим:

$$\lambda_c = 13,85 \times 10^{-3} / \text{год}; \\ q_c = 15,7 \times 10^{-6}.$$

Из сравнения данных расчета параметров надежности с учетом и без учета преднамеренных отключений следует, что преднамеренные отключения существенным образом влияют на параметры надежности схем электроснабжения.

По полученным показателям надежности можно оценить технико-экономические последствия от недоотпуска электроэнергии и перерывов электроснабжения. Задача решена.

При последовательном соединении нескольких устройств (электрических или в составе производственного блока) надежность всей цепи определяется по надежностям всех элементов, поскольку выход из строя одного элемента приведет к остановке всей цепи [6, с. 340]. При расчете надежности такой цепочки вероятность нормальной работы равна произведению таких вероятностей для отдельных элементов. Вероятности всегда меньше 1, поэтому при увеличении числа последовательных элементов в какой-либо системе общая надежность снижается. Например, цепь из 5 устройств с вероятностью нормальной работы за данный период времени для каждого 0,99 будет иметь общую вероятность $0,99^5 = 0,9509$, а из 30 – 0,7397. Таким образом, протяженная последовательная система из множества даже очень надежных устройств всегда будет иметь повышенный шанс того, что что-то пойдет не так. Оценивая риски аварий, можно предпринимать соразмерные меры защиты и предотвращения крупных аварий. Возможные действия – разделение цепей на секции (неполадки в одной части не приведут к повреждениям соседних), резервирование важных элементов, при возможности оптимизация техпроцесса и придание устойчивости к простоям (аварийная остановка процесса не должна приводить к полной потере задействованных материалов) [7].

Случайные события называют зависимыми, если вероятность возникновения одного изменится при возникновении другого. Для расчетов с такими событиями используется понятие условной вероятности, которая учитывает зависимость между событиями [8, с. 19]. Примеры зависимых событий – повреждение фаз в трехфазной сети с изолированной

нейтралью [9; 10]. Если принять вероятность повреждения одной фазы 0,001, а условные вероятности повреждения второй фазы 0,2 и третьей 0,6 при условии повреждения одной и двух до этого, то вероятность повреждения одной фазы – 0,001, двух – $0,001 \times 0,2 = 0,0002$, трех – $0,001 \times 0,2 \times 0,5 = 0,0001$, от общего числа аварий тогда можно считать, что около 77% из них – однофазные, 15% – двухфазные, 8% – трехфазные.

Для определения вероятности наступления события некоторого количества раз из данного числа испытаний используется формула Бернулли:

$$P(m;n) = C_m^n \times p^m \times q^{n-m}.$$

Зная вероятности интересующих событий p, q и число испытаний n , можно определить вероятность P наступления событий некоторое количество раз m .

Случайными величинами в энергетике являются потребление мощности, колебания напряжения и частоты, длительности нормальной работы и аварийного ремонта отдельных устройств и др. Встречаются как дискретные (число устройств в ремонте на данный момент), так и непрерывные (ошибки прогнозирования различных параметров режима сети) [11, с. 45].

Математическая модель процесса со случайными отклонениями представляет собой ряд значений (отдельные наблюдения), которые складываются из значений некоторой функции времени и значений случайных отклонений. При рассмотрении бесконечной в обе стороны последовательности значений из этой модели получается последовательность величин, называемая случайным процессом [12, с. 33]. Случайные процессы в энергетике в основном связаны с метеорологическими условиями (приточность рек для ГЭС, температура, ветер, облачность) и сериями однородных событий (множественные аварии или окончания ремонтов). Вероятностные методы определения характеристик случайных процессов в энергетике находятся в разработке, может использоваться метод Монте-Карло и теория массового обслуживания.

Рассматривая теорию массового обслуживания, простейшим случайным процессом является последовательность (поток) случайных однородных событий, например, вызовы абонентов телефонной станции. Простейшим называется поток случайных событий, обладающий свойствами стационарности, отсутствия последствий и ординарностью. *Стационарность* – независимость вероятностных характеристик от времени, *отсутствие последствий* – независимость вероятности от предшествующих событий (протекание потока в непересекающихся интервалах времени независимо, например, характер включения бытовых приборов в городе или отказ непрерывно работающих предохранителей), *ординарность* – свойство, означающее, что за короткий интервал времени ничтожна вероятность возникновения множественных событий.

Потоки различаются по внутренней структуре. Регулярный поток – такой, в котором события имеют одинаковые промежутки времени между ними, такие потоки встречаются довольно редко. У стационарных потоков вероятность появления определенного числа событий на заданном промежутке времени за-

висит только от длины интервала. Плотность стационарного потока (среднее число событий за единицу времени) считается постоянной на небольших временных интервалах, но при рассмотрении длительных может сильно варьироваться [13].

В случаях аварийного снижения мощности в системе, в расчетах вероятностей пользуются статистическими величинами вероятности нормального и аварийного состояний агрегатов [14]. Учитывая эти вероятности, можно определить вероятность аварийного состояния любого количества агрегатов. Однако можно считать, что выходы оборудования в ремонт и из ремонта являются однородными потоками случайных событий. Если допустить, что эти потоки являются простейшими и известно исходное состояние устройства, то можно доказать, что вероятности состояний не неизменны, а зависят от длительности рассматриваемого интервала. Только при достаточно больших интервалах наблюдений истинные вероятности состояний устройства приближаются к средне-статистическим.

Метод статистических испытаний, или метод Монте-Карло – численный метод, заключающийся в построении модели изучаемого процесса и наблюдения за ним вместо вычислений его вероятностных характеристик [15; 16]. Получил развитие вместе с появлением быстродействующих вычислительных машин: генераторы случайных чисел, основанные на квантово-механических процессах либо тепловых или электрических шумах.

Метод Монте-Карло может использоваться для расчета пути развития энергосистемы [17; 18]. Таким образом, с помощью данного метода можно смоделировать случайные значения максимального потребления мощности за сутки и значения располагаемой мощности в системе. Это позволит определить случайные значения избытка и дефицита мощности в заданные дни. Далее по одной модели рассчитывают случайные отклонения от заданных годовых пиков, значения суточных/среднемесячных/месячных пиков в рабочие дни, по другой модели – случайные чередования нормальных и аварийных состояний агрегатов с помощью генератора равномерно распределенных чисел и, суммируя мощности нормально работающих устройств, получают случайные значения располагаемой мощности. Многократным повторением расчетов получают нормально распределенное число дефицитов и избытков мощности, а также рассчитываются вероятности дефицитов в отдельные дни. При превышении вероятности дефицита относительно нормативного значения автоматически подключается резерв мощности [19; 20]. Такой метод позволяет быстро рассчитать некоторые экономические параметры плана развития системы за предстоящие несколько лет.

Таким образом, теория вероятностей широко используется для оценки рисков, моделирования и прогнозирования во многих отраслях науки и техники. Широкое распространение этого обусловлено зависимостью многих событий от случайных факторов, влияющих на результат. Когда дело доходит до оценки надежности или прогнозирования на основе

имеющихся данных, то методы теории вероятностей позволяют с высокой точностью предсказать возможные исходы и принять необходимые меры.

Список литературы:

1. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика: учебник. 12-е изд. М.: Издательство Юрайт, 2020. 479 с.
2. Трофимова Е.А., Кисляк Н.В., Гилёв Д.В. Теория вероятностей и математическая статистика: учеб. пособие. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2018. 157 с.
3. Малугин В.А. Теория вероятностей и математическая статистика: учебник и практикум. М.: Издательство Юрайт, 2019. 470 с.
4. Высшая математика: учебник и практикум / под общ. ред. М.Б. Хрипуновой, И.И. Цыганок. М.: Издательство Юрайт, 2020. 478 с.
5. Бородин С.В., Каитов М.Р. Применение элементов теории вероятности в системах электроснабжения // Международный студенческий научный вестник. 2018. № 3–1. С. 50–52.
6. Папков Б.В., Куликов А.Л. Теория систем и системный анализ для электроэнергетиков: учебник и практикум. 2-е изд., испр. и доп. М.: Издательство Юрайт, 2016. 470 с.
7. Папкова М.Д., Папков Б.В. Оценка вероятностей редких событий в энергетике // Великие реки – 2018: тр. науч. конгресса 20-го междунар. науч.-промышл. форума. Т. 3. Нижний Новгород, 15–18 мая 2018 года / отв. ред. А.А. Лапшин. Нижний Новгород: ННГАСУ, 2018. С. 31–34.
8. Перов С.Н. Элементы теории вероятностей и математической статистики в приложении к проблемам прочности и надежности: учеб. пособие. Самара: Изд-во Самарского университета, 2019. 152 с.
9. Курбацкий В.Г. Прикладные задачи теории вероятностей и случайных процессов: учеб. пособие. Благовещенск, 2013. 192 с.
10. Математические задачи электроэнергетики: сб. задач / сост. В.В. Соловьев. Благовещенск: Изд-во АмГУ, 2016. 86 с.
11. Гулай Т.А., Полуянов И.А., Чеканов И.И. Применение теории вероятностей в электроэнергетике // Научное обозрение. Педагогические науки. 2019. № 4–3. С. 45–48.
12. Папков Б.В., Осокин В.Л., Дулепов Д.Е. Оценка вероятностей несимметричных режимов систем электроснабжения // Вестник НГИЭИ. 2021. № 4 (119). С. 31–41. DOI: 10.24412/2227-9407-2021-4-31-41.
13. Любченко В.Я., Родыгина С.В. Применение математического моделирования в задачах электроэнергетики: учеб. пособие. Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет, 2018. 72 с.
14. Бородин С.В., Каитов М.Р. Применение элементов теории вероятности в системах электроснабжения // Международный студенческий научный вестник. 2018. № 3–1. С. 50–52.
15. Моделирование в электроэнергетике: учеб. пособие / А.Ф. Шаталов, И.Н. Воротников, М.А. Мастепаненко, И.К. Шарипов, С.В. Аникуев. Ставрополь: АГРУС Ставропольского гос. аграрного ун-та, 2014. 140 с.
16. Даценко В.А., Гетманов В.Т. Математическое моделирование в системах электроснабжения: учеб. пособие. Томск: Томский политехнический университет, 2005. 120 с.

17. Горпинич А.В., Саравас В.Е. Математические задачи электроэнергетики: учеб. пособие. Мариуполь: ПГТУ, 2015. 141 с.

18. Численные методы математической статистики в пакете R: учеб.-метод. пособие / сост.: А.В. Зорин, Е.В. Кудрявцев, М.А. Рачинская. Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2017. 37 с.

19. Грунин О.М., Савицкий Л.В. Математические задачи энергетики: учеб. пособие. Чита: ЗабГУ, 2014. 260 с.

20. Козловская В.Б., Сталович В.В. Математические задачи энергетики: пособие к практическим занятиям и курсовому проектированию. Минск: БНТУ, 2021. 43 с.

Информация об авторе(-ах):	Information about the author(-s):
<p>Ран Наталья Алексеевна, кандидат педагогических наук, доцент кафедры электроэнергетики, электротехники и автоматизации технологических процессов; Филиал Самарского государственного технического университета в г. Новокуйбышевске (г. Новокуйбышевск, Самарская область, Российская Федерация). E-mail: natalirahn@mail.ru.</p> <p>Антипов Андрей Владимирович, старший преподаватель кафедры электроэнергетики, электротехники и автоматизации технологических процессов; Филиал Самарского государственного технического университета в г. Новокуйбышевске (г. Новокуйбышевск, Самарская область, Российская Федерация). E-mail: ant-andrew@mail.ru.</p> <p>Городничева Елена Владиславовна, старший преподаватель кафедры электроэнергетики, электротехники и автоматизации технологических процессов; Филиал Самарского государственного технического университета в г. Новокуйбышевске (г. Новокуйбышевск, Самарская область, Российская Федерация). E-mail: yaelenkapavlenko@yandex.ru.</p>	<p>Ran Natalia Alekseevna, candidate of pedagogical sciences, associate professor of Electric Power Engineering, Electrical Engineering and Technological Processes Automation Department; Branch of Samara State Technical University in Novokuibyshevsk (Novokuibyshevsk, Samara Region, Russian Federation). E-mail: natalirahn@mail.ru.</p> <p>Antipov Andrey Vladimirovich, senior lecturer of Electric Power Engineering, Electrical Engineering and Technological Processes Automation Department; Branch of Samara State Technical University in Novokuibyshevsk (Novokuibyshevsk, Samara Region, Russian Federation). E-mail: ant-andrew@mail.ru.</p> <p>Gorodnicheva Elena Vladislavovna, senior lecturer of Electric Power Engineering, Electrical Engineering and Technological Processes Automation Department; Branch of Samara State Technical University in Novokuibyshevsk (Novokuibyshevsk, Samara Region, Russian Federation). E-mail: yaelenkapavlenko@yandex.ru.</p>

Для цитирования:

Ран Н.А., Антипов А.В., Городничева Е.В. Применение элементов теории вероятностей при решении задач электроэнергетики // Самарский научный вестник. 2022. Т. 11, № 2. С. 315–319. DOI: 10.55355/snv2022112309.