

Модель функционирования системы релейной защиты при регулярных проверках

Б. П. Зеленцов, А. С. Трофимов

Приведена аналитическая модель функционирования релейной защиты энергосистем, в которой учтены разные виды отказов, а проверки работоспособности проводятся с постоянным периодом. Модель основана на описании процесса функционирования полумарковским процессом. С помощью этой модели может быть получен ряд показателей эксплуатации и надёжности этой системы.

Ключевые слова: релейная защита энергосистем, отказы релейной защиты, модель функционирования системы релейной защиты, полумарковский процесс.

1. Введение

Основным назначением релейной защиты (РЗ) является автоматическое отключение повреждённого элемента (как правило, при коротком замыкании (КЗ)) от остальной, неповреждённой, части энергосистемы при помощи выключателей. Таким образом, РЗ является одним из видов автоматики энергосистем, важность которой определяется тем, что без неё невозможна бесперебойная работа электроэнергетических установок [16].

Проблема обеспечения надёжности стала особо актуальной в последние годы в связи с переходом на использование современных типов защит, выполняемых с большим числом элементов. В связи с этим важное значение приобретают вопросы резервирования в устройствах защиты, контроля их исправности в процессе функционирования, выбора рационального периода между проверками эксплуатационным персоналом и т.п.

Обеспечение надёжности и эффективности функционирования РЗ требует построения таких моделей, которые пригодны для теоретического и экспериментального изучения их свойств. Математическое моделирование является наиболее распространённым и перспективным методом изучения этих систем [6], который позволяет проводить исследование на этапе проектирования, решать задачи анализа и синтеза, прогнозировать качество функционирования и эффективность функционирования РЗ, обосновывать их необходимую или оптимальную структуру и правильно интерпретировать статистические данные. В основе математических моделей таких сложных систем лежат процессы, протекающие при их функционировании: возникновение и устранение отказов, проверки состояния оборудования и др.

В [14, 15] рассмотрена модель функционирования РЗ в непрерывном времени, в которой все события, приводящие к смене состояний системы, происходят в непрерывном времени с постоянными интенсивностями. В этой модели установлены закономерности формирования показателей эксплуатации и надёжности при разных значениях среднего времени между проверками. В данной статье поставлена и решена аналогичная задача для случая, когда время между проверками регламентировано, то есть проверки проводятся с постоянной периодичностью.

Целью данной статьи является разработка аналитической модели функционирования системы РЗ при регулярных проверках работоспособности и исследование на основе разрабо-

танной модели зависимости показателей эксплуатации и надёжности этой системы от периодичности регулярных проверок.

2. Функционирование системы релейной защиты

Надёжность в соответствии с разделением функций РЗ на три рода делится на надёжность срабатывания при внутренних КЗ и надёжность несрабатывания при внешних КЗ и режимах без КЗ. В соответствии со стандартом [10] определяются понятия надёжности несрабатывания и надёжности срабатывания. Невыполнение защитой требуемых функций может заключаться в непредусмотренном функционировании, например, ложном срабатывании либо отказе в функционировании РЗ [2, 18]. При этом удобно использовать понятие результирующей надёжности, которое определяет совокупность всех приведённых видов надёжности и называется коэффициентом неготовности.

Процесс функционирования РЗ заключается во взаимодействии различных потоков событий с системой РЗ, таких как дефекты в схемах РЗ, внутренние и внешние КЗ, регулярные проверки и восстановления и т.д. В результате такого взаимодействия система РЗ может находиться в различных состояниях. Обычно существует однозначная связь между видом возникающих в схеме дефектов и возможным при этом видом отказа в функционировании. Если в схеме РЗ присутствует дефект, опасный с точки зрения отказов защиты в срабатывании при повреждении защищаемого объекта, то при повреждении этого объекта может произойти отказ защиты в срабатывании. В нерезервируемых по несрабатыванию схемах РЗ появление дефекта, опасного с точки зрения ложных срабатываний, может сразу же привести к ложным срабатываниям защиты [17].

На надёжность системы РЗ существенное влияние оказывают события двух видов: отказы элементов и восстановления их работоспособности. Функционирование системы РЗ обусловлено взаимодействием, с одной стороны, потоков событий, а с другой – внутренней структурой, состоянием и параметрами самой системы РЗ. В процессе функционирования системы РЗ возникают потоки событий: короткие замыкания в зоне и вне зоны действия защиты, ремонты системы РЗ, профилактические проверки системы РЗ, срабатывания системы РЗ, отказы систем РЗ и т.д. Перечисленные потоки событий можно разделить на две группы: регулярные и случайные потоки. Регулярными будем называть такие потоки, в которых события возникают в заранее заданные, известные моменты времени. К ним обычно относят потоки профилактических проверок системы РЗ, потоки периодических тестовых проверок, которые имеют заданную периодичность в соответствии с [12]. Указанные проверки обычно планируют заранее и проводят регулярно по составленному расписанию. Проверки релейной защиты проводятся с постоянным периодом T , который отсчитывается от начала функционирования в работоспособном состоянии.

Большая часть перечисленных выше потоков событий относится к случайным. Случайные потоки состоят из событий, моменты возникновения которых заранее неизвестны, эти события возникают в случайные моменты времени. В связи с этим возникает непростой вопрос о том, как одновременно учесть случайные и регулярные составляющие потока восстановлений. Корректное решение возникшего противоречия возможно в рамках аппарата теории марковских процессов.

Для анализа примем систему РЗ линии электропередач, которая действует на отключение защищаемой линии при её повреждении. Известны параметры потоков отказов комплекта защиты и интенсивности восстановлений. Из работоспособного состояния системы РЗ можно перейти в неработоспособное состояние с дефектом, опасным с точки зрения отказа в срабатывании (скрытого отказа). После возникновения скрытого отказа система находится в неработоспособном состоянии, которое может прерываться двумя способами. Первый способ: при возникновении КЗ на линии происходит отказ в срабатывании РЗ, после чего в те-

чение нескольких часов происходит восстановление работоспособного состояния РЗ. Второй способ: если КЗ на линии до начала периодической проверки не происходит, то скрытый отказ обнаруживается при регулярной проверке в конце периода T . Также из работоспособного состояния комплекта защиты можно перейти в состояние непредусмотренного функционирования системы РЗ при отсутствии внешних КЗ и КЗ на линии. Непредусмотренное функционирование системы РЗ при отсутствии КЗ называется «ложным срабатыванием» (явный отказ), что приводит к ложному срабатыванию РЗ линии с параметром потока отказов. После обнаружения отказа с интенсивностью обнаружения отказа в течение нескольких часов происходит восстановление работоспособного состояния системы РЗ.

Регулярные проверки проводятся с постоянным интервалом T , который устанавливается после восстановления или после проведения очередной регулярной проверки. Таким образом, постоянный интервал регулярных проверок устанавливается после каждого вхождения в работоспособное состояние.

Возможны следующие переходы между состояниями на интервале $[0; T]$:

- 1) если на интервале $[0; T]$ не произойдут отказы, то в конце интервала, то есть при $t = T$, производится проверка системы, которая является работоспособной;
- 2) если произойдет только скрытый отказ, то в конце интервала, то есть при $t = T$, производится проверка системы, которая является неработоспособной;
- 3) если происходят отказы видов «ложное срабатывание» или «отказ в срабатывании», то система переходит в состояние восстановления на интервале времени $[0; T]$.

Итак, на восстановление система может попасть либо при $t = T$, когда проводится проверка неработоспособной системы РЗ, либо при $t \leq T$, когда наступают события «ложное срабатывание» или «отказ в срабатывании» системы РЗ.

Принято, что случайные события на интервале $[0; T]$ происходят с постоянными интенсивностями, то есть время до наступления случайных событий распределено по показательному закону.

3. Граф состояний

События «ложное срабатывание» и «отказ в срабатывании» наступают по разным причинам и имеют разные последствия. Событие «ложное срабатывание» проявляется как явный отказ, обнаруживаемый сразу после его наступления, а событие «отказ в срабатывании» может происходить после КЗ на защищаемой линии при условии существования скрытого отказа в системе РЗ, опасного с точки зрения отказа в срабатывании. Если происходит одно из них, то попадание на восстановление происходит внутри интервала $[0; T]$, то есть при $t \leq T$. Кроме того, эти события приводят к разным последствиям, которые описываются разными характеристиками.

Приведённые выше рассуждения реализованы в графе с 9 состояниями (рис. 1). На графе обозначены следующие состояния:

1. Р – работоспособное состояние, время нахождения в котором отсчитывается после завершения восстановления или после регулярной проверки;
2. Н – неработоспособное состояние, являющееся следствием скрытого отказа;
3. Л – ложное срабатывание системы РЗ;
4. О – отказ в срабатывании системы РЗ;
5. ПР – проверка системы РЗ, находящейся в работоспособном состоянии;
6. ПН – проверка системы РЗ, находящейся в неработоспособном состоянии;
7. В – состояние восстановления системы РЗ, являющееся следствием событий ложного срабатывания и переходом в состояние восстановления;
8. В – состояние восстановления, являющееся следствием событий отказа в срабатывании и перехода в состояние восстановления;

9. В – состояние восстановления, переход в которое происходит после проверки неработоспособной системы.

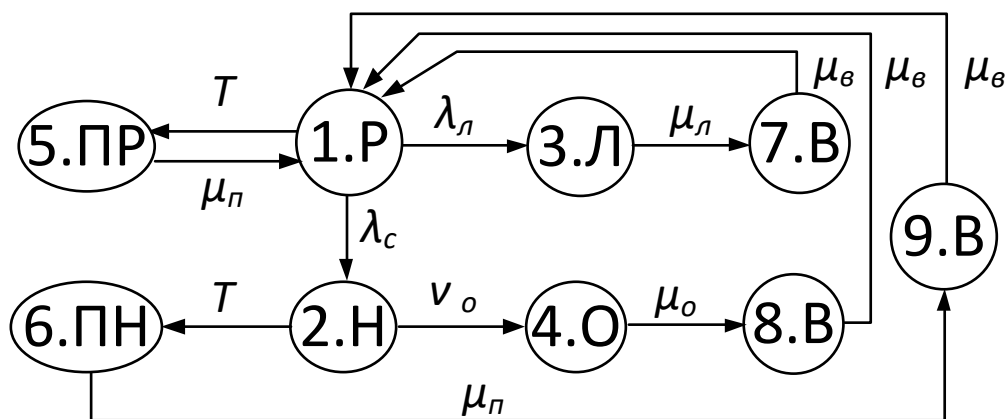


Рис. 1. Граф состояний и переходов системы релейной защиты

На графе обозначено:

λ_c – интенсивность отказов в срабатывании;

λ_l – интенсивность ложных срабатываний;

ν_o – интенсивность КЗ на защищаемом оборудовании;

μ_l – интенсивность обнаружения отказа «ложное срабатывание»;

μ_o – интенсивность обнаружения «отказа в срабатывании»;

μ_p – интенсивность завершения проверки;

μ_v – интенсивность завершения восстановления;

T – продолжительность установленного интервала между периодическими проверками.

На графе показаны три состояния восстановления: после регулярной проверки, после события «ложное срабатывание» и после события «отказ в срабатывании» РЗ линии. Переходы в состояния восстановления характеризуются разными вероятностными и временными характеристиками. Отметим различия между ними. Попадание в состояние 7 возможно на интервале $[0; T]$, если произойдёт событие «ложное срабатывание». Попадание в состояние 8 возможно на интервале $[0; T]$, если произойдёт событие «отказ в срабатывании» РЗ линии. Попадание в состояние 9 возможно только за пределами интервала $[0; T]$, после проверки системы, находящейся в неработоспособном состоянии. Целесообразность представления восстановления тремя состояниями обусловлена тем, что это даёт возможность учесть влияние разных факторов на эксплуатационные характеристики системы. В частности, такой подход позволяет сформулировать чёткие инструкции для персонала при записи сведений об отказах в журнал при организации сбора статистической информации об отказах системы в процессе эксплуатации.

Таким образом, если на интервале $[0; T]$ происходит переход в состояния «ложное срабатывание» или «отказ в срабатывании», то на этом же интервале имеет место переход в состояния восстановления. Если же эти переходы не происходят, то в конце интервала происходит попадание в состояния ПР или ПН. Проверки системы РЗ, находящейся в работоспособном и неработоспособном состоянии происходят в конце интервала $[0; T]$ при условии, что ложное срабатывание и отказ в срабатывании РЗ не произошли.

4. Характеристики состояний на интервале

Итак, в состоянии 1 система работоспособна, а в состоянии 2 – неработоспособна. В этих состояниях система находится конечное время. Для упрощения модели принято, что время нахождения в состояниях 3, 4, 5, 6 является пренебрежимо малым по сравнению со временем нахождения в состояниях 1 и 2. Поэтому временем нахождения в состояниях 3, 4, 5, 6 можно пренебречь. Теоретически это означает, что интенсивность перехода из этих состояний в другие состояния является бесконечно большой, то есть $\mu_{\pi} = \infty$, $\mu_o = \infty$, $\mu_{\pi} = \infty$.

На постоянном интервале $[0; T]$ процесс переходов между состояниями описывается дифференциальными уравнениями А. Н. Колмогорова. Система дифференциальных уравнений имеет вид [8, 11, 13]:

$$\begin{cases} p_1'(t) = -(\lambda_{\pi} + \lambda_c) \cdot p_1(t) \\ p_2'(t) = \lambda_c \cdot p_1(t) - \nu_o \cdot p_2(t) \\ p_3'(t) = \lambda_{\pi} \cdot p_1(t) \\ p_4'(t) = \nu_o \cdot p_2(t) \end{cases} \quad (1)$$

Решение этой системы на интервале $[0; T]$ при начальных условиях $p_1(0) = 1$, $p_2(0) = 0$, $p_3(0) = 0$, $p_4(0) = 0$:

$$\begin{cases} p_1(t) = \exp[-(\lambda_{\pi} + \lambda_c)t] \\ p_2(t) = \frac{\lambda_c}{\lambda_{\pi} + \lambda_c - \nu_o} [\exp(-\nu_o t) - \exp[-(\lambda_{\pi} + \lambda_c)t]] \\ p_3(t) = \frac{\lambda_{\pi}}{\lambda_{\pi} + \lambda_c} [1 - \exp[-(\lambda_{\pi} + \lambda_c)t]] \\ p_4(t) = \frac{\lambda_c}{\lambda_{\pi} + \lambda_c} + \frac{\lambda_c \cdot \nu_o}{(\lambda_{\pi} + \lambda_c - \nu_o) \cdot (\lambda_{\pi} + \lambda_c)} \cdot \exp[-(\lambda_{\pi} + \lambda_c)t] - \frac{\lambda_c}{\lambda_{\pi} + \lambda_c - \nu_o} \cdot \exp(-\nu_o t) \end{cases} \quad (2)$$

Среднее время, связанное с нахождением в i -м состоянии на одном интервале, вычисляется по формуле:

$$\theta_i = \int_0^T p_i(t) dt, \quad (3)$$

при этом θ_1 и θ_2 – средние времена нахождения в состояниях 1 и 2 соответственно; θ_3 и θ_4 – средние времена между попаданием в состояния 3 и 4 соответственно и концом интервала.

При реализации данной модели целесообразно выполнить проверочные процедуры путём проверки выполнения следующих условий в аналитическом или числовом виде:

$$p_1(t) + p_2(t) + p_3(t) + p_4(t) = 1 \quad (4)$$

при $t \in [0; T]$, а также

$$\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4 = T. \quad (5)$$

Характеристики состояний на интервале, вычисленные при разных значениях установленного интервала регулярных проверок, приведены в табл. 1. Исходные данные для численных расчётов взяты из [15]: $\lambda_{\pi} = 0.006$ 1/год, $\lambda_c = 0.012$ 1/год, $\nu_o = 2.45$ 1/год.

Максимальное значение $T = 8$ лет принято в соответствии с [12].

Таблица 1. Характеристики состояний на интервале, вычисленные при разных значениях T

T	$p_1(T)$	$p_2(T)$	$p_3(T)$	$p_4(T)$	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4
1/12	0.999	$9 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$9.5 \cdot 10^{-5}$	0.083	$3.9 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$2.7 \cdot 10^{-6}$
0.25	0.996	$2.2 \cdot 10^{-3}$	$1.5 \cdot 10^{-3}$	$7.6 \cdot 10^{-4}$	0.249	$3 \cdot 10^{-4}$	$1.9 \cdot 10^{-4}$	$6.6 \cdot 10^{-5}$
0.5	0.991	$3.4 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$2.5 \cdot 10^{-3}$	0.498	$1 \cdot 10^{-3}$	$7.5 \cdot 10^{-4}$	$4.6 \cdot 10^{-4}$
1	0.982	$4.4 \cdot 10^{-3}$	$6 \cdot 10^{-3}$	$7.5 \cdot 10^{-3}$	0.991	$3 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$
2	0.965	$4.7 \cdot 10^{-3}$	0.012	0.019	1.964	$7.7 \cdot 10^{-3}$	0.012	0.016
3	0.947	$4.7 \cdot 10^{-3}$	0.018	0.030	2.920	0.012	0.027	0.041
4	0.931	$4.6 \cdot 10^{-3}$	0.023	0.042	3.859	0.017	0.047	0.077
5	0.914	$4.5 \cdot 10^{-3}$	0.029	0.053	4.784	0.022	0.073	0.124
6	0.898	$4.4 \cdot 10^{-3}$	0.034	0.064	5.687	0.026	0.104	0.182
7	0.882	$4.4 \cdot 10^{-3}$	0.039	0.075	6.577	0.030	0.141	0.252
8	0.866	$4.3 \cdot 10^{-3}$	0.045	0.085	7.451	0.035	0.183	0.331

5. Циклы функционирования системы

На интервале $[0; T]$ могут быть попадания (переходы) в состояния 5, 6, 7, 8, 9. Эти попадания будем называть прохождением:

прохождение в состояние 5 ($1 \rightarrow 5$) возможно только при $t = T$;

прохождение в состояние 6 ($1 \rightarrow 2 \rightarrow 6$) возможно только при $t = T$;

прохождение в состояние 7 ($1 \rightarrow 3 \rightarrow 7$) возможно при $t \leq T$;

прохождение в состояние 8 ($1 \rightarrow 2 \rightarrow 4 \rightarrow 8$) возможно при $t \leq T$;

прохождение в состояние 9 возможно при завершении проверки неработоспособной системы.

Отказ в срабатывании (переход $1 \rightarrow 2$) представляет собой отказ скрытого типа, то есть он не может быть зафиксирован каким-либо инструментальным или иным способом. Считаем, что диагностика не выявляет данный вид отказа в момент его возникновения.

Поскольку время нахождения в состояниях 3, 4, 5, 6 принято пренебрежимо малым (теоретически оно равно нулю), то после попадания в эти состояния имеет место «отражение» от этих состояний, заключающееся в мгновенном переходе в другие состояния. Это обстоятельство обусловило выбор математической модели, а именно, переходы между состояниями описываются полумарковским процессом, в котором фиксируются только перемены состояний [7, 9]. Случайным событием в данной модели является попадание из одного состояния в другое при условии, что происходит выход из состояния 1. Вероятность такого события будем называть вероятностью прохождения в отличие от переходной вероятности процесса в дискретном или непрерывном времени. Вероятность прохождения p_{ij} – это условная вероятность перехода $w_i \rightarrow w_j$ при условии, что происходит выход из состояния w_i . Если непосредственный переход $w_i \rightarrow w_j$ невозможен, то $p_{ij} = 0$. Кроме того, принято, что $p_{ii} = 0$ для всех i .

Вероятности p_{ij} описывают процесс смены состояний на дискретном множестве W в моменты смены состояний. Эти вероятности являются исходными характеристиками полумарковского процесса смены состояний [3, 9].

Очевидно, что вероятности прохождений вычисляются по формулам:

$$p_{15} = p_1(T), p_{16} = p_2(T), p_{17} = p_3(T), p_{18} = p_4(T), p_{69} = 1. \quad (6)$$

Матрица вероятностей проходов имеет вид:

$$P = \begin{pmatrix} 0 & p_{15} & p_{16} & p_{17} & p_{18} & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

Матрица P является стохастической.

Функционирование системы во времени удобно представить в виде циклов. Отнесём состояния системы к одному из двух подмножеств U или V : в состояниях подмножества U система функционирует и проверяется, а в состоянии подмножества V она восстанавливается. С течением времени система находится в подмножестве U и затем переходит в подмножество V . Затем этот UV -цикл повторяется. Таким образом, множество состояний разбито на два подмножества по признаку фаз эксплуатации: $U = \{1, 5, 6\}$, $V = \{7, 8, 9\}$.

Разобьём матрицу вероятностей проходов на четыре подматрицы в соответствии с разбиением множества состояний на подмножества U и V :

$$P_{UU} = \begin{pmatrix} 0 & p_{15} & p_{16} \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}; P_{UV} = \begin{pmatrix} p_{17} & p_{18} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}; P_{VU} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}; P_{VV} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

По матрицам P_{UU} и P_{VV} вычисляются матрицы относительных частот N_U и N_V на подмножествах U и V [3, 4]:

$$N_U = \|n_U(i, j)\| = (E - P_{UU})^{-1} = \frac{1}{1 - p_{15}} \cdot \begin{pmatrix} 1 & p_{15} & p_{16} \\ 1 & 1 & p_{16} \\ 0 & 0 & 1 - p_{15} \end{pmatrix}; \quad (7)$$

$$N_V = \|n_V(i, j)\| = (E - P_{VV})^{-1} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (8)$$

где E – единичная матрица соответствующего порядка, $n_U(i, j)$ – средняя относительная частота j -го состояния, или математическое ожидание числа вхождений в j -е состояние до выхода из подмножества U при условии, что i -е состояние этого подмножества является начальным. Аналогичный смысл элементов матрицы N_V очевиден.

Переходы между подмножествами U и V описываются матрицами вероятностей попаданий B_{UV} и B_{VU} , а возвращения в подмножества – матрицами вероятностей возвращения A_U и A_V [4]:

$$B_{UV} = \|b_{UV}(i, j)\| = N_U \cdot P_{UV} = \frac{1}{1 - p_{15}} \cdot \begin{pmatrix} p_{17} & p_{18} & p_{16} \\ p_{17} & p_{18} & p_{16} \\ 0 & 0 & 1 - p_{15} \end{pmatrix}; \quad (9)$$

$$B_{VU} = \|b_{VU}(i, j)\| = N_V \cdot P_{VU} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}; \quad (10)$$

$$A_U = \|a_U(i, j)\| = B_{UV} \cdot B_{VU} = \frac{1}{1 - p_{15}} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}; \quad (11)$$

$$A_V = \|a_V(i, j)\| = B_{VU} \cdot B_{UV} = \frac{1}{1 - p_{15}} \cdot \begin{pmatrix} p_{17} & p_{18} & p_{16} \\ p_{17} & p_{18} & p_{16} \\ p_{17} & p_{18} & p_{16} \end{pmatrix}, \quad (12)$$

где $b_{UV}(i, j)$ [$b_{VU}(i, j)$] – вероятность того, что при переходе $U \rightarrow V$ [$V \rightarrow U$] система попадёт в состояние $v_j \in V$ [$u_j \in U$] при условии, что состояние $u_i \in U$ [$v_i \in V$] является начальным;
 $a_U(i, j)$ [$a_V(i, j)$] – вероятность того, что система попадёт в состояние $u_j \in U$ [$v_j \in V$] при возвращении из V в U [из U в V] при условии, что состояние $u_i \in U$ [$v_i \in V$] является начальным на предыдущем цикле.

Матрицы B_{UV} , B_{VU} , A_U и A_V являются стохастическими.

Видно, что матрицы вероятностей возвращения A_U и A_V состоят из одинаковых строк, то есть возвращения в подмножества U и V всегда происходят с одним и тем же распределением.

6. Характеристики цикла системы

Из приведённых формул видно, что поскольку состояние 1 при переходе $V \rightarrow U$ всегда является начальным, то относительные частоты состояний подмножества U описываются только первой строкой матрицы N_U . Первая строка матрицы N_U имеет вид:

$$\bar{n}_U(1) = \|n_U(1, j)\| = \frac{1}{1 - p_{15}} \cdot \|1 \quad p_{15} \quad p_{16}\|. \quad (13)$$

Первый элемент этой строки $n_{11} = 1/(1 - p_{15})$ представляет собой число проходов через состояние 1 на одном цикле. Второй элемент $n_{15} = p_{15}/(1 - p_{15})$ является средним числом проверок системы, являющейся работоспособной. Третий элемент $n_{16} = p_{16}/(1 - p_{15})$ является средним числом проверок неработоспособной системы на одном цикле. Сумма

$$n_{\Pi} = n_{\Pi p} + n_{\Pi n} = (p_{15} + p_{16})/(1 - p_{15}) \quad (14)$$

является средним числом проверок на одном цикле, или средним числом проверок, приходящимся на одно восстановление.

Итак, среднее число попаданий в состояние 1 на одном цикле равно n_{11} . При любом отказе система выходит из состояния 1 и через другие состояния подмножества U переходит в подмножество V . Это событие происходит достоверно на интервале, который является последним на цикле. Этот последний интервал является укороченным в связи с тем, что могут быть выходы из подмножества U через состояния 3 или 4 при $t < T$. Все предыдущие интервалы сохраняют значение T . Среднее число интервалов со значением T равно $n_{11} - 1$, и вклад этих интервалов в среднее время нахождения в подмножестве U равен $(n_{11} - 1) \cdot T$. Среднее значение последнего, укороченного, интервала составляет $\theta_1 + \theta_2$. Поэтому среднее время нахождения в подмножестве U определяется суммой этих времён:

$$t_U = (n_{11} - 1) \cdot T + \theta_1 + \theta_2 = n_{11} \cdot T - \theta_3 - \theta_4. \quad (15)$$

Среднее время цикла определяется суммой

$$t_{\Pi} = t_U + t_V, \quad (16)$$

где t_V – среднее время восстановления, принятое здесь равным 10 часам, что составляет 0.00114 года.

Средняя частота цикла, или среднее число восстановлений в течение года, является величиной, обратной среднему времени цикла [5]:

$$\omega_{\Pi} = 1/t_{\Pi}. \quad (17)$$

Рассмотренные характеристики при разных значениях периода T приведены в табл. 2.

Таблица 2. Характеристики цикла системы

T	n_{11}	n_{15}	n_{16}	n_{Π}	t_{Π}	ω_{Π}
1/12	667.2	666.2	0.603	666.8	55.6	0.018
0.25	222.7	221.7	0.498	222.2	55.7	0.018
0.5	111.6	110.6	0.384	111	55.8	0.018
1	56.1	55.1	0.248	55.3	56.0	0.018
2	28.3	27.3	0.134	27.4	56.5	0.018
3	19.0	18.0	0.089	18.1	57.0	0.018
4	14.4	13.4	0.066	13.5	57.5	0.017
5	11.6	10.6	0.052	10.7	57.9	0.017
6	9.8	8.8	0.043	8.8	58.3	0.017
7	8.4	7.4	0.037	7.5	58.8	0.017
8	7.5	6.5	0.032	6.5	59.1	0.017

7. Показатели надёжности системы

Коэффициент неготовности системы РЗ вычисляется в соответствии с [1]:

$$K_{\Pi} = \frac{t_{\Pi}}{t_U + t_V} = \frac{\theta_2}{t_U + t_V}, \quad (18)$$

где θ_2 – среднее время нахождения в неработоспособном состоянии на последнем интервале, то есть на интервале, на котором происходит переход $V \rightarrow U$.

Среднее число восстановлений в единицу времени (в данном случае за один год) вычисляется по формуле:

$$\omega_B = 1/t_{\Pi}, \quad (19)$$

поскольку каждый цикл завершается восстановлением.

Средняя частота проверок, или среднее число проверок в течение одного года, определяется числом проверок за один год и частотой цикла [15]:

$$\omega_{\Pi} = n_{\Pi} \cdot \omega_B. \quad (20)$$

Значения этих показателей при разных значениях установленной периодичности регулярных проверок приведены в табл. 3.

Таблица 3. Значения показателей эксплуатации и надёжности при разных значениях установленного интервала между проверками

T	K_{Π}	ω_B	ω_{Π}
1/12	$7 \cdot 10^{-7}$	0.018	12
0.25	$5.5 \cdot 10^{-6}$	0.018	4
0.5	$1.9 \cdot 10^{-5}$	0.018	2
1	$5.4 \cdot 10^{-5}$	0.018	0.987
2	$1.4 \cdot 10^{-4}$	0.018	0.485
3	$2.2 \cdot 10^{-4}$	0.018	0.318
4	$3 \cdot 10^{-4}$	0.017	0.234
5	$3.7 \cdot 10^{-4}$	0.017	0.184
6	$4.5 \cdot 10^{-4}$	0.017	0.151
7	$5.2 \cdot 10^{-4}$	0.017	0.127
8	$5.9 \cdot 10^{-4}$	0.017	0.111

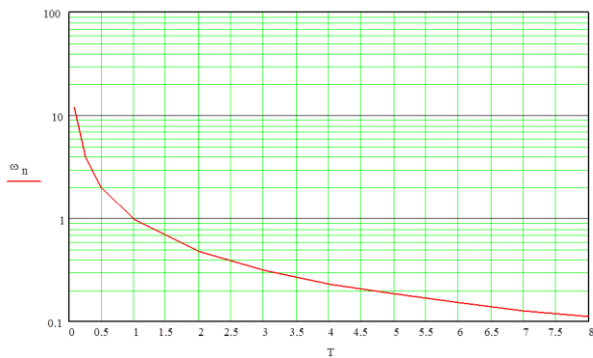


Рис. 2. Зависимость средней частоты периодических проверок ω_p от установленного интервала между периодическими проверками T

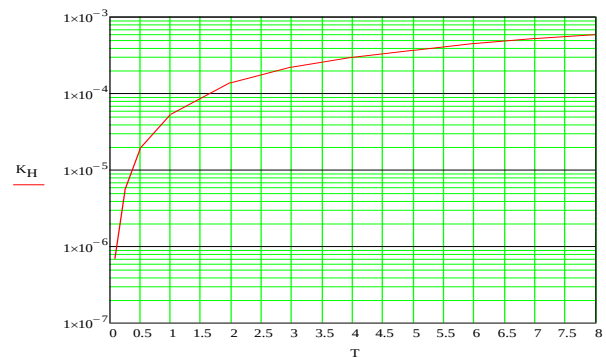


Рис. 3. Зависимость коэффициента неготовности системы РЗ K_n от установленного интервала между периодическими проверками T

8. Заключение

Рассмотрена модель функционирования системы РЗ, в которой учтены отказы видов «ложное срабатывание» и «отказ в срабатывании», при этом установленное время между периодическими проверками является постоянным. Модель позволяет рассчитать и спрогнозировать ряд показателей эксплуатации и надёжности, таких как коэффициент неготовности, частота восстановления и частота регулярных проверок. С помощью данной модели установлено, что при изменении периодичности проверок от одного месяца до 8 лет коэффициент неготовности увеличивается в 1000 раз, однако при больших значениях периодичности проверок (от 2 до 10 лет) увеличение коэффициента неготовности замедляется. Средняя частота восстановлений системы практически не зависит от установленной периодичности проверок, однако средняя частота проверок существенно зависит от этого фактора.

На основе приведённой модели могут быть сформулированы требования к периодичности регулярных проверок, которые обеспечивают необходимый уровень надёжности при соответствующих эксплуатационных затратах.

Литература

1. ГОСТ Р 53480–2009. Надёжность в технике. Термины и определения.
2. Гук Ю. Б. Анализ надёжности электроэнергетических установок. – Л.: Энергоатомиздат, 1988. 224 с.
3. Зеленцов Б. П., Максимов В. П., Шувалов В. П. Модель функционирования линии связи в условиях недостоверного контроля технического состояния // Вестник СибГУТИ. 2015. № 3. С. 35–43.
4. Зеленцов Б. П. Матричные модели функционирования оборудования систем связи // Вестник СибГУТИ. 2015. № 4. С. 62–73.
5. Зеленцов Б. П. Частотный метод моделирования вероятностных систем длительного использования // Вестник СибГУТИ. 2016. № 4. С. 25–38.
6. Зеленцов Б. П. Аналитическое моделирование сложных вероятностных систем // Моделирование информационных сетей. Труды Вычислительного центра СО РАН. Серия: Информатика, Вып. 1. Новосибирск, 1994. С. 144–152.
7. Зеленцов Б. П. Матричные модели надёжности систем: инженерные методы расчёта. Новосибирск: Наука, 1991. 112 с.

8. Кельберт М. Я., Сухов Ю. М. Вероятность и статистика в примерах и задачах. Т. II: Марковские цепи как отправная точка теории случайных процессов. М.: МЦНМО 2010.
9. Корольюк В. С. и др. Полумарковские процессы и их приложения. Киев, 1970.
10. Международный стандарт IEC 50 (448) Защита энергетических систем. Женева, 1995.
11. Надёжность технических систем: Справочник / Ю. К. Беляев, А. Богатырев, В. В. Болотин и др., под ред. И. А. Ушакова. Радио и связь, 1985. 608 с.
12. РД 153-34.3-35.613-00. Правила технического обслуживания устройств релейной защиты и электроавтоматики электрических сетей 0,4-35 кВ.
13. Самарский А. А. Математическое моделирование. М.: Физматлит, 2002. 320 с.
14. Смирнов Э. П. Влияние профилактического контроля на результирующую надёжность релейной защиты // Электричество. 1968. № 4. С. 10–15.
15. Трофимов А. С., Зеленцов Б. П. Модель функционирования релейной защиты энергосистем // Электроэнергия. Передача и распределение. 2016. № 6. С. 110–114.
16. Федосеев А. М. Релейная защита электроэнергетических систем. Учебник для вузов. М., «Энергия», 1976. 560 с.
17. Шалин А. И. Надёжность и диагностика релейной защиты энергосистем. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2003. 384 с.
18. Шнеерсон Э. М. Цифровая релейная защита. М.: Энергоатомиздат, 2007. 549 с.

Статья поступила в редакцию 28.02.2017

Зеленцов Борис Павлович

д.т.н., профессор кафедры высшей математики СибГУТИ (630102, Новосибирск, ул. Кирова, 86), тел. (383) 269-39-36, e-mail: zelentsovb@mail.ru.

Трофимов Андрей Сергеевич

к.т.н., доцент кафедры электрических станций НГТУ (630073, Новосибирск, пр-т К. Маркса, 20), тел. (383) 346-13-73, e-mail: as.trofimov@gmail.com.

A model of relay protection system functioning under regular check-out conditions

B. P. Zelentsov, A. S. Trofimov

An analytic model of relay protection system functioning of power systems is presented. Different types of failures are considered in the model taking into account regular periodical checking conditions. The model is based on the theory of semimarkov processes using matrix methods for mathematical operations. Some reliability and functioning measures can be calculated using the model e.g. mean down time, steady state unavailability, mean frequency of check-out operations.

Keywords: relay protection system of power systems, failures of relay protection system, functioning model of relay protection system, semimarkov process.