

УДК 621.019.3(075.8)

ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА НАДЕЖНОСТИ РЕЗЕРВИРОВАННЫХ РЕЛЕЙНО-КОНТАКТНЫХ СХЕМ УСТРОЙСТВ АВТОМАТИКИ

Докт. техн. наук, проф. АНИЩЕНКО В. А.,
студенты МАЙСТРОВИЧ А. Г., ЛЕСОТА А. В.

Белорусский национальный технический университет

Надежность электроэнергетических систем существенно зависит от надежности устройств релейной защиты (РЗ), противоаварийной автоматики (ПА) и других автоматических устройств, содержащих релейно-контактные схемы. По данным службы РЗ ЦДУ ЕЭС, в России за 2000–2009 гг. зафиксировано 17529 случаев работы электромеханических устройств РЗ, из них 93,53 % – правильной и 6,47 % – неправильной работы [1].

Человеческий фактор, связанный с ошибками в уставках и настройках реле, при испытаниях и эксплуатации защит, по данным российских специалистов, составляет 52,8 % случаев неправильных действий РЗ [2]. В западных странах доля человеческого фактора достигает 78 % [3]. Тем не менее от четверти до половины отказов РЗ вызываются техническими причинами. Для повышения надежности устройств защиты и автоматики целесообразно в ответственных случаях резервировать элементы релейно-контактных схем, входящих в эти устройства. Особенность оценки надежности резервированных релейно-контактных схем, на основе которых строятся различные устройства автоматики, в частности релейная защита и противоаварийная автоматика, состоит в том, что элементы этих схем и сами схемы в целом имеют отказы противоположных типов: «обрыв» и «замыкание». Причем вероятности этих отказов могут быть неодинаковы.

При расчете надежности необходимо также учитывать, что нередко наряду со статистически независимыми отказами элементов встречаются множественные отказы, вызываемые одной общей для нескольких (или всех) элементов схемы причиной [4, 5]. Неучет множественных отказов может привести к существенному снижению вероятности безотказной работы схем. В [6–8] был проведен количественный анализ влияния множественных отказов на надежность ряда резервированных релейно-контактных схем.

Другим фактором, от которого зависит надежность релейно-контактных схем, является возможная неодинаковость вероятностей разнотипных отказов. Было показано, что неравенство вероятностей отказов типов «обрыв» и «замыкание» может приводить к изменению предпочтения той или иной схемы резервирования исходя из критериев максимума вероятности безотказной работы или минимума вероятности того или иного вида отказов.

Ниже рассматривается совместное влияние на надежность резервированных релейно-контактных схем как множественных отказов, так и неодинаковых вероятностей разнотипных отказов элементов схем.

Методика моделирования множественных и разнотипных отказов. Интенсивность отказов контактного элемента λ рассматривается как сумма интенсивности независимых отказов элемента λ_I и интенсивности множественных отказов системы λ_{II}

$$\lambda = \lambda_I + \lambda_{II}. \quad (1)$$

Эти интенсивности определяются следующим образом:

$$\lambda_I = (1 - \alpha)\lambda; \quad \lambda_{II} = \alpha\lambda; \quad \alpha = \lambda_{II}/\lambda, \quad (2)$$

где параметр α представляет долю отказов, вызываемых общей причиной, т. е. вероятность того, что отказ некоторого элемента относится к числу множественных отказов [5].

Для каждого элемента имеем соотношение

$$p(t) + q_o(t) + q_s(t) = 1, \quad (3)$$

где $p(t)$ – вероятность безотказной работы; $q_o(t)$ – вероятность отказа типа «обрыв»; $q_s(t)$ – вероятность отказа типа «замыкание»; t – время.

С учетом (1)–(3) получаем выражения, позволяющие различать интенсивности разнотипных отказов:

$$\lambda = \lambda_o + \lambda_s; \quad \lambda_o = \lambda_{Io} + \lambda_{IIo}; \quad \lambda_s = \lambda_{Is} + \lambda_{IIs}; \quad \lambda_{Io} = (1 - \alpha)\lambda_o; \quad (4)$$

$$\lambda_{IIo} = \alpha\lambda_o; \quad \lambda_{Is} = (1 - \alpha)\lambda_s; \quad \lambda_{IIs} = \alpha\lambda_s,$$

где λ_o, λ_s – суммарные интенсивности независимых и множественных отказов типов «обрыв» и «замыкание» соответственно; $\lambda_{Io}, \lambda_{Is}$ – интенсивности независимых отказов типов «обрыв» и «замыкание» соответственно; $\lambda_{IIo}, \lambda_{IIs}$ – интенсивности множественных отказов типов «обрыв» и «замыкание» соответственно.

Схема моделирования, учитывающая разнотипные как независимые, так и множественные отказы, состоит из двух последовательно соединенных под-схем I и II (рис. 1).

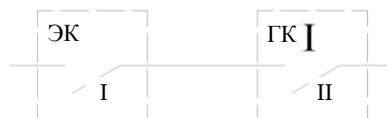


Рис. 1. Схема моделирования отказов (общий случай)

Подсхема I содержит эквивалентный исходной резервированной схеме контакт ЭК и учитывает статистически независимые отказы. Подсхема II с гипотетическим контактом ГК отражает множественные отказы всех тех элементов, которые приводят к полному отказу резервированной схемы.

Вероятность безотказной работы схемы $P(t)$ соответствует логической схеме «И»

$$P(t) = P_I(t)P_{II}(t), \quad (5)$$

где $P_I(t)$ – вероятность безотказной работы эквивалентного элемента; $P_{II}(t)$ – вероятность безотказной работы гипотетического элемента.

Полагаем, что интенсивности отказов всех элементов постоянны и надежность каждого элемента подчиняется экспоненциальному закону. Тогда суммарная вероятность разнотипных независимых отказов каждого элемента в подсистеме I будет равна

$$q(t) = q_o(t) + q_s(t) = 1 - e^{-(1-\alpha)\lambda t}, \quad (6)$$

а вероятности отказов типа «обрыв» и «замыкание» определяются следующим образом:

$$q_o(t) = k_o[1 - e^{-(1-\alpha)\lambda t}]; \quad q_s(t) = k_s[1 - e^{-(1-\alpha)\lambda t}]. \quad (7)$$

Долевые коэффициенты k_o , k_s характеризуют соотношение между интенсивностями разнотипных отказов:

$$k_o = \frac{\lambda_o}{\lambda_o + \lambda_s}; \quad k_s = \frac{\lambda_s}{\lambda_o + \lambda_s}; \quad k_o + k_s = 1. \quad (8)$$

Формула для расчета вероятности безотказной работы резервированной схемы при независимых отказах идентичных элементов выводится исходя из биномиального разложения Ньютона

$$[P(t) + q_o(t) + q_s(t)]^n = 1, \quad (9)$$

где n – число элементов схемы.

Вероятность безотказной работы схемы при множественных отказах всех элементов тождественна вероятности безотказной работы гипотетического элемента

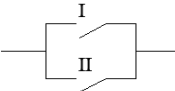
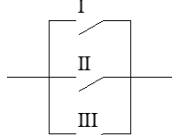
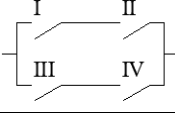
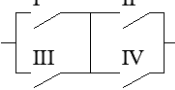
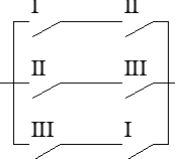
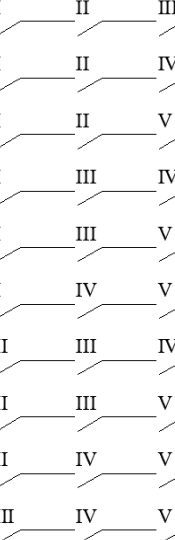
$$P_{II}(t) = e^{-\alpha\lambda t}. \quad (10)$$

Таким образом, при отсутствии множественных отказов ($\alpha = 0$) схема моделирования вырождается в подсхему I, а при отсутствии независимых отказов ($\alpha = 1$) – в подсхему II.

Сравнительный анализ надежности резервированных релейно-контактных схем. В табл. 1 представлены схемы резервирования релейно-контактных схем и формулы, по которым рассчитывалась вероятность их безотказной работы $P(t)$ с учетом множественных и разнотипных отказов элементов.

Таблица 1

Резервированные релейно-контактные схемы

№ п/п	Схема	Название схемы	Формула показателя надежности
1		Параллельное дублирование	$P_1 = [(1 - k_s[1 - e^{-(1-\alpha)\lambda t}])^2 - (k_o[1 - e^{-(1-\alpha)\lambda t}])^2]e^{-\alpha\lambda t}$
2		Параллельное троирование	$p_2 = [(1 - k_s[1 - e^{-(1-\alpha)\lambda t}])^3 - (k_o[1 - e^{-(1-\alpha)\lambda t}])^3]e^{-\alpha\lambda t}$
3		Последовательное дублирование	$P_3 = [(1 - k_o[1 - e^{-(1-\alpha)\lambda t}])^2 - (k_s[1 - e^{-(1-\alpha)\lambda t}])^2]e^{-\alpha\lambda t}$
4		Последовательное троирование	$P_4 = [(1 - k_o[1 - e^{-(1-\alpha)\lambda t}])^3 - (k_s[1 - e^{-(1-\alpha)\lambda t}])^3]e^{-\alpha\lambda t}$
5		Последовательно-параллельное соединение	$P_5 = [(1 - (k_s[1 - e^{-(1-\alpha)\lambda t}])^2)^2 - (1 - (1 - k_o[1 - e^{-(1-\alpha)\lambda t}])^2)^2]e^{-\alpha\lambda t}$
6		Параллельно-последовательное соединение	$P_6 = [(1 - (k_o[1 - e^{-(1-\alpha)\lambda t}])^2)^2 - (1 - (1 - (k_s[1 - e^{-(1-\alpha)\lambda t}])^2))^2]e^{-\alpha\lambda t}$
7		Мажоритарная схема «2 из 3»	$P_7 = [1 - 3(k_o^2 + k_s^2)(1 - e^{-(1-\alpha)\lambda t})^2 + 2(k_o^3 + k_s^3)(1 - e^{-(1-\alpha)\lambda t})^3]e^{-\alpha\lambda t}$
8		Мажоритарная схема «3 из 5»	$P_8 = [1 - 6(k_s^5 + k_o^5)(1 - e^{-(1-\alpha)\lambda t})^5 + 15(k_s^4 + k_o^4)(1 - e^{-(1-\alpha)\lambda t})^4 - 10(k_s^3 + k_o^3)(1 - e^{-(1-\alpha)\lambda t})^3]e^{-\alpha\lambda t}$

При отсутствии множественных отказов и их симметричности ($\lambda_o = \lambda_s = \lambda = 0,5$) вероятности безотказной работы в зависимости от интенсивности отказов для различных схем резервирования представлены на рис. 2. В этом случае надежность параллельно и последовательно дублированных

схем совпадает с надежностью нерезервированной схемы (одиночного элемента). Параллельное и последовательное троирование снижают вероятность безотказной работы. Надежности параллельно-последовательной, последовательно-параллельной схем и мажоритарной схемы «2 из 3» совпадают и выше надежности нерезервированной схемы. Наиболее эффективна мажоритарная схема «3 из 5».

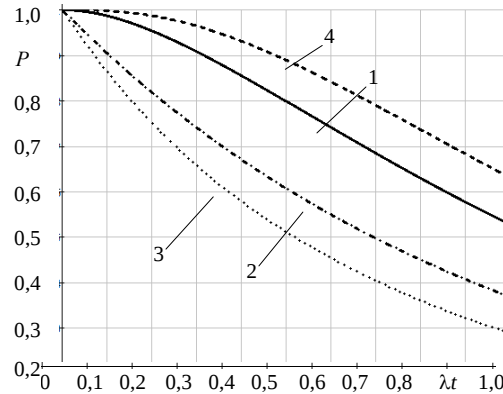


Рис. 2. Вероятность безотказной работы при одиночных симметричных отказах:
1 – схемы № 5–7; 2 – одиночный контакт, схемы № 1, 3;
3 – схемы № 2, 4; 4 – схема № 8

При наличии множественных отказов ($\alpha = 0,5$) вероятность безотказной работы для симметричных отказов представлена на рис. 3.

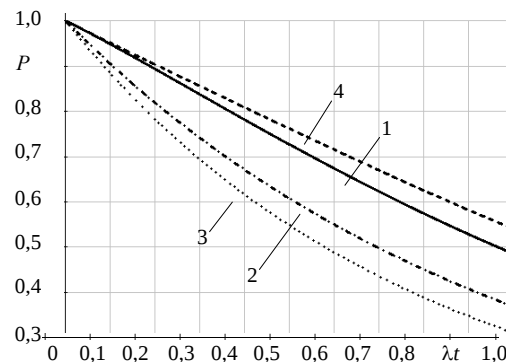


Рис. 3. Вероятность безотказной работы при множественных симметричных отказах:
1 – схемы № 5–7; 2 – одиночный контакт, схемы № 1, 3;
3 – схемы № 2, 4; 4 – схема № 8

При наличии множественных симметричных отказов наблюдается снижение вероятности безотказной работы параллельно-последовательной, последовательно-параллельной и обеих мажоритарных схем и повышение вероятности безотказной работы троированных схем. На надежность дублированных схем множественные симметричные отказы не влияют. Шкала предпочтений по критерию наибольшей вероятности безотказной работы при симметричных отказах не зависит от доли множественных отказов.

Вероятность безотказной работы в зависимости от множественных симметричных отказов иллюстрирует рис. 4. Увеличение доли множественных

отказов приближает вероятности безотказной работы резервированных схем к вероятности безотказной работы нерезервированной схемы; при $\alpha = 1$ надежности всех схем одинаковы.

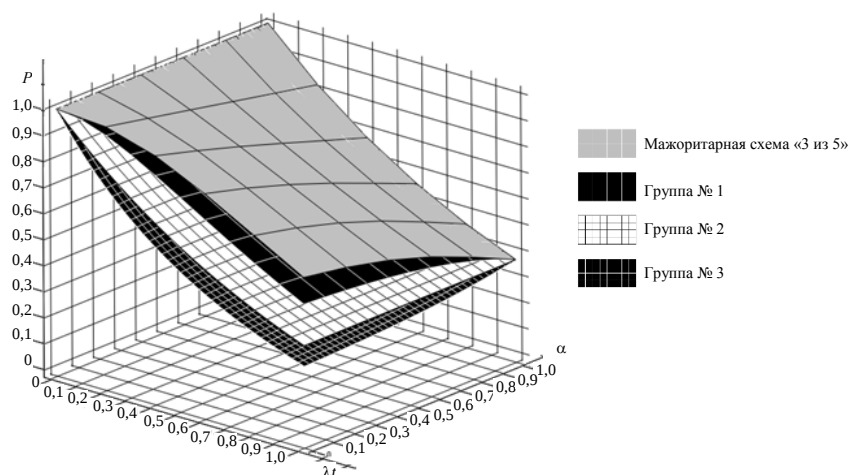


Рис. 4. Вероятность безотказной работы в зависимости от интенсивности и доли множественных отказов

Влияние несимметричности статистически независимых отказов ($\alpha = 0$) на вероятность безотказной работы схем при одной и той же интенсивности отказов ($\lambda t = 0,5$) показано на рис. 5.

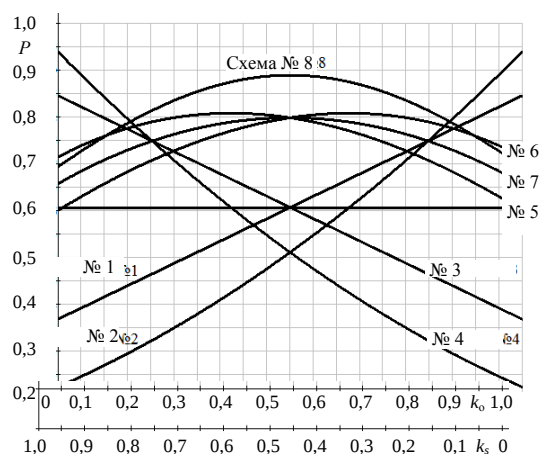


Рис. 5. Вероятность безотказной работы в зависимости от асимметрии отказов

На основе расчетов по формулам, представленным в табл. 1, строятся шкалы предпочтений схем резервирования по критерию наибольшей вероятности безотказной работы.

В интервале несимметрии разнотипных отказов ($k_0 = 0,25-0,42$; $k_s = 0,75-0,58$) шкала предпочтений резервированных схем по критерию максимума вероятности безотказной работы неизменна и выглядит следующим образом: № 8; 5; 7; 6; 3; 4; 1; 2.

В интервале несимметрии отказов ($k_0 = 0,58-0,75$; $k_s = 0,42-0,25$) шкала предпочтений также неизменна и принимает вид: схемы № 8; 6; 7; 5; 1; 2; 3; 4.

За пределами этих интервалов шкалы предпочтений резервированных схем претерпевают большие изменения. Например, при $\lambda t = 0,25$ имеют место 18 шкал предпочтений (рис. 6), при $\lambda t = 0,50$ – 20 шкал (рис. 7), зависящих от доли множественных отказов и несимметрии их типов.

В табл. 2 представлены последовательности схем резервирования по критерию наибольшей вероятности безотказной работы, соответствующие различным шкалам предпочтений.

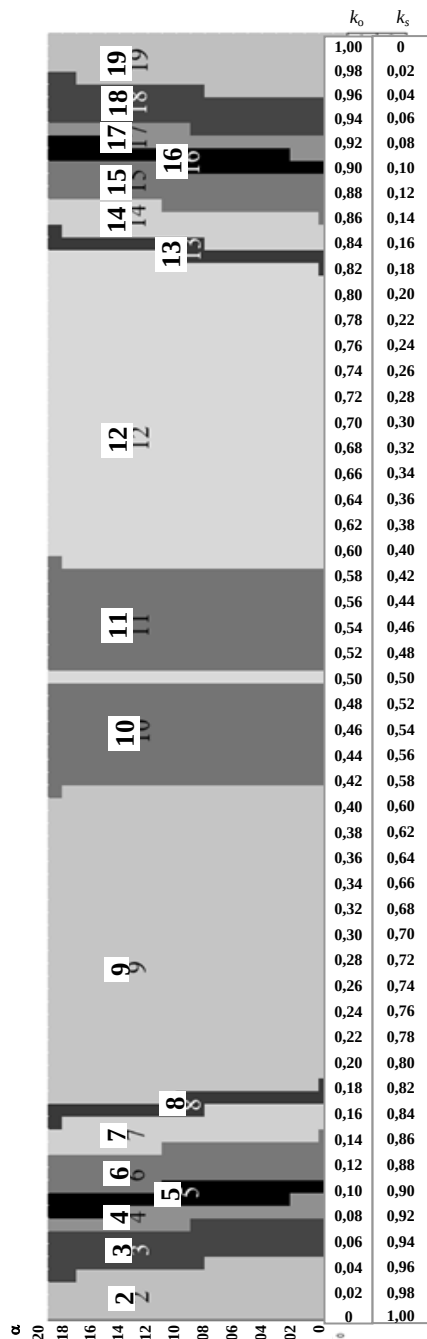


Рис. 6. Шкалы предпочтений резервированных схем при $\lambda t = 0,25$

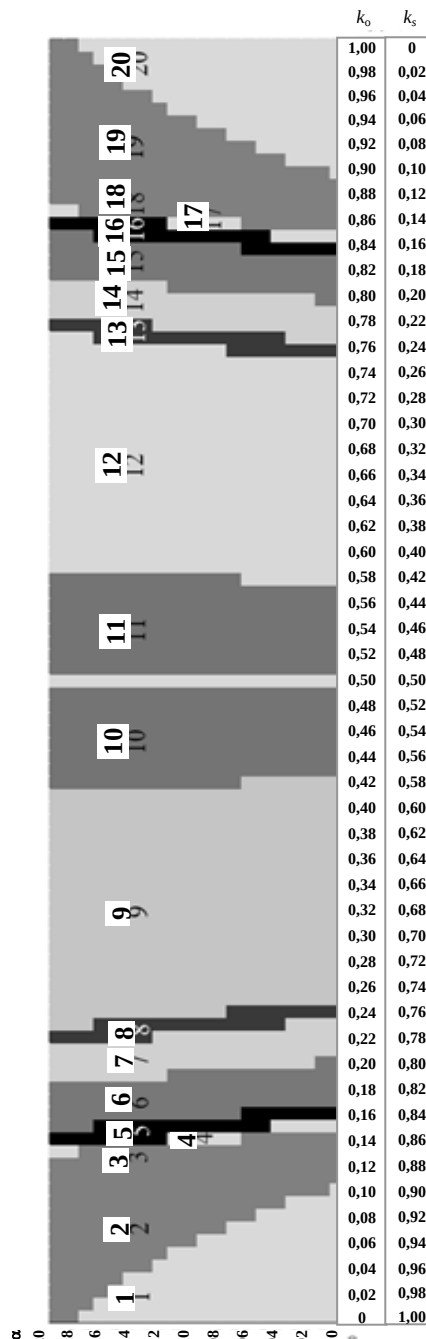


Рис. 7. Шкалы предпочтений резервированных схем при $\lambda t = 0,50$

Таблица 2

Шкалы предпочтений схем резервирования

№ п/п	Шкала предпочтений																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Схема резервирования	1	4	4	4	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	2	2	2
	2	3	3	8	4	4	5	5	5	5	5	6	6	6	6	2	2	8	1	1
	3	5	8	3	3	5	4	7	7	7	7	7	7	7	2	6	1	1	8	6
	4	8	5	5	5	3	3	3	3	6	6	5	5	1	1	1	6	6	6	8
	5	7	7	7	7	7	7	4	6	3	3	1	1	5	2	7	7	7	7	7
	6	6	6	6	6	6	6	6	4	4	1	3	2	2	5	5	5	5	5	5
	7	1	1	1	1	1	1	1	1	4	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	8	2	2	2	2	2	2	2	2	2	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4

ВЫВОДЫ

1. Установлено, что учет множественных отказов и неодинаковых вероятностей отказов типа «обрыв» и «замыкание» элементов существенно влияет на вероятность безотказной работы резервированных релейно-контактных схем.

2. Построены шкалы предпочтений резервированных релейно-контактных схем по критерию наибольшей вероятности безотказной работы.

3. Показана необходимость сбора и обработки информации о множественных отказах и соотношения вероятностей противоположных типов отказов, что позволит выбирать рациональные схемы резервирования релейно-контактных элементов в устройствах релейной защиты и автоматики электро-энергетических объектов.

ЛИТЕРАТУРА

- Гуревич, В. И. Проблемы оценок надежности релейной защиты / В. И. Гуревич // Электричество. – 2011. – № 2. – С. 28–31.
- Коновалова, Е. В. Основные результаты эксплуатации устройств РЗА энергосистем Российской Федерации / Е. В. Коновалова // Релейная защита и автоматика энергосистем: сб. докл. XV науч.-техн. конф. – М., 2002.
- Protection System Faults 1999–2000 and the Influence on the Reliability of Supply / G. H. Kjolle [et al.] // 2005 IEEE St. Petersburg Power Tech. – St. Petersburg (Russia), 27–30 June 2005.
- Taylor, J. R. A study of Failure Causes Based on U. S. Power Reactor Abnormal Occurrence Reports / J. R. Taylor // Reliable Nuclear Power Plants, IAEA – SM – 195/6, 1975.
- Диллон, Б. Инженерные методы обеспечения надежности систем / Б. Диллон, Ч. Сингх. – М.: Мир, 1984. – 318 с.
- Машко, А. В. Учет множественных отказов при расчетах надежности резервированных релейно-контактных систем / А. В. Машко, В. А. Анищенко // Актуальные проблемы энергетики: материалы научной конференции учащихся, студентов и аспирантов. – Минск: БНТУ, 2005. – С. 59–61.
- Анищенко, В. А. Надежность резервированных релейно-контактных схем при множественных отказах / В. А. Анищенко, А. В. Машко // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2007. – № 1. – С. 16–22.
- Северин, Л. А. Анализ надежности релейно-контактных систем с несимметричными отказами / Л. А. Северин, В. А. Анищенко // Актуальные проблемы энергетики: материалы научной конференции учащихся, студентов и аспирантов. – Минск: БНТУ, 2008. – С. 194–198.

Представлена кафедрой
электроснабжения

Поступила 19.12.2011