

3. С е р г е й, И. И. Динамика проводов электроустановок энергосистем при коротких замыканиях: теория и вычислительный эксперимент / И. И. Сергей, М. И. Стрелюк. – Минск: ВУЗ-ЮНИТИ, 1999. – 252 с.

4. С е р г е й, И. И. Два подхода к расчету пляски расщепленных фаз воздушных ЛЭП / И. И. Сергей, П. И. Климович // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2005. – № 1. – С. 15–23.

5. F i n a l Report on Tests of TDD Antigalloping Device / Scientific-industrial Company Electrosetjstroyproject (ESSP). – Almaty; Moscow, 1998.

6. С е р г е й, И. И. Математическое моделирование гасителей колебаний расщепленных проводов воздушных ЛЭП / И. И. Сергей // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 1999. – № 6. – С. 11–24.

7. M a s a r y, Yamaoka. A Numerical Calculation Method for Galloping Oscillation of a Bundle Conductor Transmission Line / Yamaoka Masary // Trans. IEE Japan. – 1979. – B99, № 9. – P. 569–576.

Представлена кафедрой  
электрических станций

Поступила 1.09.2006

УДК 621.311.019.3(075.8)

## **НАДЕЖНОСТЬ РЕЗЕРВИРОВАННЫХ РЕЛЕЙНО-КОНТАКТНЫХ СИСТЕМ ПРИ МНОЖЕСТВЕННЫХ ОТКАЗАХ**

**Докт. техн. наук, проф. АНИЩЕНКО В. А., инж. МАШКО А. В.**

*Белорусский национальный технический университет*

Релейно-контактные системы, к которым принадлежат устройства релейной защиты и автоматики, состоят из элементов в трех состояниях: исправном, неисправном по причине отказов типа «обрыв» и неисправном по причине отказов типа «замыкание». Для повышения надежности систем при одной и той же надежности элементов может предусматриваться структурное резервирование. Принимаемое при расчетах надежности таких систем допущение о статистической независимости отказов элементов не всегда соблюдается. По зарубежным данным, до 20 % отказов от их общего числа могут оказываться отказами двух и более элементов по общей причине [1].

Неучет множественных, т. е. статистически зависимых, отказов элементов ведет к ошибочному завышению расчетных надежностных показателей систем, содержащих эти элементы.

Известны [2] методика расчета надежности систем, состоящих из элементов в трех состояниях при учете только статистически независимых отказов, и методика расчета надежности систем с двумя состояниями с учетом как независимых, так и множественных отказов. В настоящей работе рассматривается надежность релейно-контактных систем на основе совместного использования этих методик.

**Учет независимых и множественных отказов элементов с тремя состояниями.** Интенсивность отказов физического контактного элемента  $\lambda$  рассматривается как сумма двух взаимоисключающих компонент: интен-

сивности статистически независимых отказов элемента  $\lambda_I$  и интенсивности множественных отказов системы и элемента  $\lambda_{II}$

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

Эти интенсивности определяются как:

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

где параметр  $\alpha$  представляет собой долю отказов, вызываемых общей причиной.

Для каждого контактного элемента

$$p t + q_O t + q_S t = 1, \quad (3)$$

где  $p t$  – вероятность безотказной работы;  $q_O t$  – вероятность отказов типа «обрыв»;  $q_S t$  – вероятность отказов типа «замыкание»;  $t$  – время.

С учетом (1)–(3) получаем дополнительные соотношения:

$$\begin{aligned} \lambda &= \lambda_O + \lambda_S; \quad \lambda_O = \lambda_{IO} + \lambda_{IIO}; \quad \lambda_S = \lambda_{IS} + \lambda_{IIS}; \quad \lambda_{IO} = 1 - \alpha \lambda_O; \\ \lambda_{IIO} &= \alpha \lambda_O; \quad \lambda_{IS} = 1 - \alpha \lambda_S; \quad \lambda_{IIS} = \alpha \lambda_S, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $\lambda_O$  – суммарная интенсивность отказов типа «обрыв»;  $\lambda_S$  – то же типа «замыкание»;  $\lambda_{IO}$  – интенсивность отказов типа «обрыв», обусловленная статистически независимыми отказами;  $\lambda_{IIO}$  – то же, обусловленная множественными отказами;  $\lambda_{IS}$  – интенсивность отказов типа «замыкание», обусловленная статистически независимыми отказами;  $\lambda_{IIS}$  – то же, обусловленная множественными отказами.

Предполагается, что параметр  $\alpha$  – общий для отказов разных типов.

В общем виде схема моделирования независимых и множественных отказов для системы любой конфигурации состоит из двух последовательно соединенных подсхем I и II (рис. 1).



Рис. 1. Общая схема моделирования отказов

Подсхема I отображает независимые отказы системы и характеризуется эквивалентным контактом ЭК. Подсхема II с гипотетическим контактом ГК отражает все множественные отказы. Предполагается, что множественные отказы полностью взаимосвязаны, т. е. происходит одновременный выход из строя всех элементов резервированной системы по общей причине. Таким образом, отказ эквивалентного или гипотетического контакта приводит к отказу всей системы.

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

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

где вероятность безотказной работы эквивалентного элемента  $P_I(t)$  обусловлена только независимыми отказами, а вероятность безотказной работы гипотетического элемента  $P_{II}(t)$  – только множественными отказами.

Суммарная вероятность разнотипных независимых отказов каждого физического контактного элемента в подсхеме I при экспоненциальном законе надежности и постоянных интенсивностях отказов равна

$$q(t) = q_O(t) + q_S(t) = 1 - e^{-1-\alpha} \lambda t. \quad (6)$$

Вероятности отказов элементов типа «обрыв» и «замыкание» определим 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  $k_O$  и  $k_S$  учитывают соотношение между интенсивностями разнотипных отказов:

$$k_O = \frac{\lambda_O}{\lambda_O + \lambda_S}; \quad k_S = \frac{\lambda_S}{\lambda_O + \lambda_S}; \quad k_O + k_S = 1. \quad (8)$$

Выражение для вероятности безотказной работы при независимых отказах  $P_I(t)$  выводится на основе биномиального разложения Ньютона. Для системы с  $n$  равнонадежными контактными элементами имеем

$$[p(t) + q_O(t) + q_S(t)]^n = 1. \quad (9)$$

После составления таблицы всех возможных в соответствии с (9) вариантов состояния элементов выделяются комбинации, при которых система работоспособна, вычисляются с учетом (7), (8) и суммируются вероятности этих комбинаций.

Вероятность безотказной работы системы при множественных отказах  $P_{II}(t)$  тождественна вероятности безотказной работы гипотетического элемента

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

Если  $\alpha = 0$ , то общая схема моделирования независимых и множественных отказов представляет собой обычную схему с независимыми отказами, а при  $\alpha = 1$  она ведет себя как один элемент, так как все отказы множественные.

**Надежность последовательного соединения элементов.** Схема для моделирования независимых и множественных отказов последовательно соединенных  $n$  элементов представлена на рис. 2.

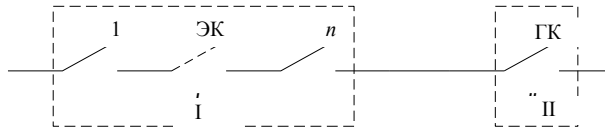


Рис. 2. Схема моделирования отказов для последовательного соединения

Вероятность безотказной работы подсхемы I

$$P_1 t = [1 - q_0 t]^n - q_s^n t. \quad (11)$$

Вероятность безотказной работы системы в целом при независимых и множественных отказах с учетом зависимостей (5), (7), (8), (10), (11) составит

$$P t = [1 - k_0 1 - e^{-\lambda t}]^n - k_s^n 1 - e^{-1-\alpha \lambda t} e^{-\alpha \lambda t}. \quad (12)$$

Вероятность отказов типа «обрыв» системы данной конфигурации не зависит от того, какие происходят отказы – независимые или множественные. Поэтому

$$Q_0 t = 1 - [1 - k_0 1 - e^{-\lambda t}]^n. \quad (13)$$

Вероятность отказов системы типа «замыкание»

$$Q_s t = 1 - P t - Q_0 t. \quad (14)$$

Влияние множественных отказов на показатели надежности при последовательном дублировании элементов ( $n = 2$ ) показано на рис. 3.

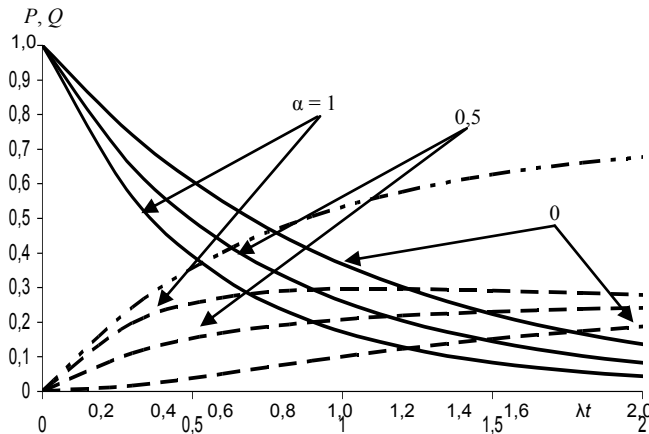


Рис. 3. Показатели надежности при последовательном дублировании: — —  $P$ ; — — —  $\bar{P}$ ; — · —  $Q_0$ ; — · —  $Q_s$ ; — · —  $\bar{Q}_0$ ; — · —  $\bar{Q}_s$

**Надежность параллельного соединения элементов.** Схема для моделирования независимых и множественных отказов параллельно соединенных  $n$  элементов приведена на рис. 4.

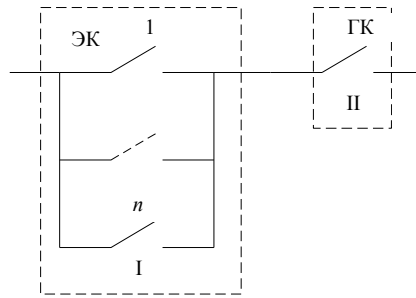


Рис. 4. Схема моделирования отказов для параллельного соединения

В силу принципа двойственности параллельного и последовательного соединений в данном случае вместо отказа типа «обрыв» следует рассматривать отказ типа «замыкание» и наоборот. Следовательно, вероятность безотказной работы системы будет

$$P t = \left[ 1 - k_s \left( 1 - e^{-\lambda t} \right) \right]^n - k_o^n \left( 1 - e^{-(1-\alpha)\lambda t} \right)^n e^{-\alpha \lambda t}. \quad (15)$$

При  $\lambda_o = \lambda_s$  вероятности безотказной работы параллельной и последовательной схем одинаковы.

Вероятность отказа системы типа «замыкание»

$$Q_s t = 1 - \left[ 1 - k_s \left( 1 - e^{-\lambda t} \right) \right]^n. \quad (16)$$

Вероятность отказа системы типа «обрыв» можно рассчитать по формуле

$$Q_o t = 1 - P t - Q_s t. \quad (17)$$

Влияние параметра  $\alpha$  на надежность при параллельном соединении элементов аналогично представленным на рис. 3 зависимостям для последовательного соединения с учетом принципа двойственности.

**Надежность последовательно-параллельного соединения элементов.** Схема моделирования независимых и множественных отказов для данной конфигурации приведена на рис. 5.

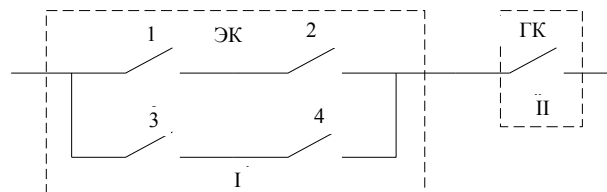


Рис. 5. Схема моделирования отказов для последовательно-параллельного соединения

Как и в рассмотренных выше конфигурациях систем, элементами 1–4 могут быть четыре реле или четыре контактные пары одного промежуточного реле. В первом случае рассматривается надежность реле в целом, во втором – надежность только контактных соединений одного реле.

Вероятность безотказной работы системы составляет

$$P(t) = \left\{ \left[ \left[ \left[ 1 - k_s^2 k_b^2 + e^{-\lambda t} e^{-\lambda t} \right]^2 \right]^2 \left[ 1 + \left[ \left[ k_s k_b + e^{-\lambda t} e^{-\lambda t} \right]^2 \right]^2 \right]^2 \right\} e^{-\lambda t} e^{-\lambda t} . \quad (18)$$

Разделить в аналитической форме вероятности отказов типа «обрыв» и «замыкание» с учетом множественности отказов не удастся. Но можно уверенно утверждать, что вероятность отказов типа «обрыв» в данной системе выше вероятности отказов типа «замыкание». Суммарная вероятность разнотипных отказов равна

$$Q(t) = 1 - P(t) . \quad (19)$$

На рис. 6 представлена зависимость показателей надежности работы системы от времени при вариации доли множественных отказов.

**Надежность параллельно-последовательного соединения элементов.** Схема моделирования отказов для этой системы приведена на рис. 7.

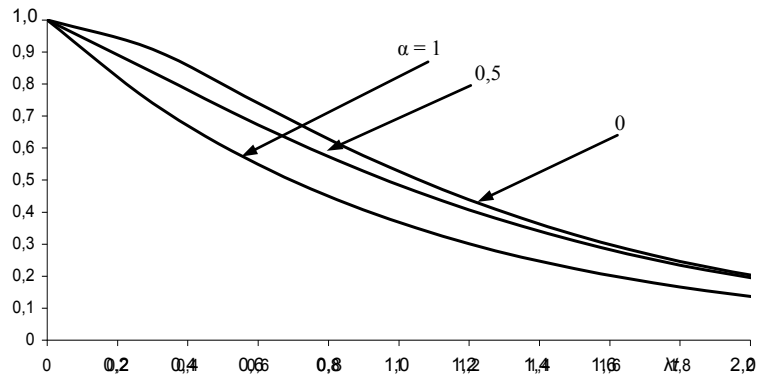


Рис. 6. Показатели надежности при последовательно-параллельном соединении

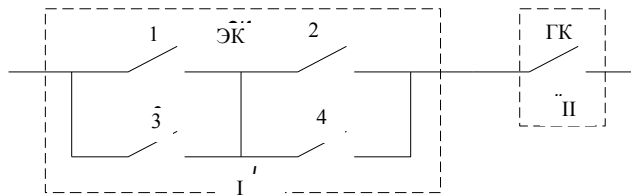


Рис. 7. Схема моделирования отказов для параллельно-последовательного соединения

Вероятность безотказной работы определяется следующим образом:

$$P t = \left\{ \left[ 1 - k_O^2 \left( 1 - e^{-1-\alpha \lambda t} \right)^2 \right]^2 - \left[ 1 - \left[ 1 - k_S \left( 1 - e^{-1-\alpha \lambda t} \right) \right]^2 \right]^2 \right\} e^{-\alpha \lambda t}. \quad (20)$$

При одинаковых интенсивностях отказов элементов вероятности безотказной работы параллельно-последовательной и последовательно-параллельной систем совпадают.

Вероятность отказов типа «обрыв» для параллельно-последовательного соединения ниже, чем вероятность отказов типа «замыкание». Сумма вероятностей обоих типов отказов определяется согласно выражению (19).

Временные зависимости вероятности безотказной работы для рассматриваемого случая совпадают при  $\lambda_O = \lambda_S$  с аналогичными зависимостями для последовательно-параллельного соединения (рис. 6).

**Надежность мажоритарной системы «два из трех».** Соответствующая этой системе схема моделирования приведена на рис. 8.

Вероятность безотказной работы системы можно рассчитать по формуле

$$P t = \left[ 1 - 3 k_O^2 + k_S^2 \left( 1 - e^{-1-\alpha \lambda t} \right)^2 + 2 k_O^3 + k_S^3 \left( 1 - e^{-1-\alpha \lambda t} \right)^3 \right] e^{-\alpha \lambda t}. \quad (21)$$

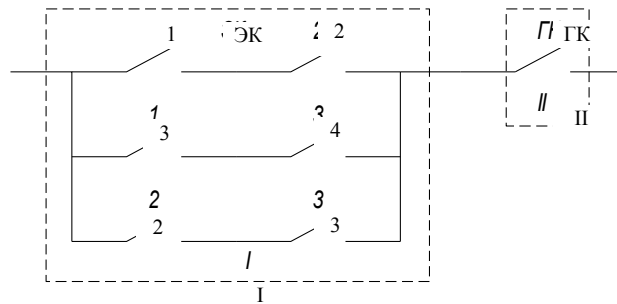


Рис. 8. Схема моделирования отказов для системы «два из трех»

При  $\lambda_O = \lambda_S$  вероятности безотказной работы мажоритарной, последовательно-параллельной и параллельно-последовательной систем совпадают. Достоинством мажоритарной схемы является ее симметричность по отношению к противоположным отказам. В рассматриваемом частном случае ( $\lambda_O = \lambda_S$ ) имеем

$$Q_O t = Q_S t = 0,5[1 - P t]. \quad (22)$$

## ВЫВОДЫ

1. Получены формулы для расчета надежности резервированных релейно-контактных систем различной конфигурации, учитывающие три возможные состояния элементов систем и влияние множественных отказов.

2. Анализ результатов расчетов показал существенное влияние множественных отказов на надежность резервированных релейно-контактных систем и необходимость их учета при разработке устройств релейной защиты и автоматики.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Т а у л о р, J. R. A Study of Failure Causes Based on U. S. Power Reactor Abnormal Occurrence Reports / J. R. Taylor // Reliab. Nucl. Power Plants, IAEA – SM – 195/16, 1975.

2. Д и л л о н, Б. Инженерные методы обеспечения надежности систем / Б. Диллон, Ч. Сингх. – М.: Мир, 1984. – 318 с.

Представлена кафедрой  
электроснабжения

Поступила 13.02.2006