

НАДЕЖНОСТЬ РЕЗЕРВИРОВАННЫХ РЕЛЕЙНО-КОНТАКТНЫХ СИСТЕМ

Аннотация

В статье рассматриваются возможные структуры резервированных релейно-контактных систем, применение которых позволяет повысить надежность работы устройств автоматического контроля и управления электро- и теплоэнергетическими процессами. На основе показателей надежности этих систем формируются шкалы предпочтений, позволяющие выбрать оптимальную, исходя из желаемого показателя надежности, систему с учетом ограничений на количество резервных элементов.

Annotation

This article discusses the possible structure of redundant relay-contact systems, the use of which can improve the reliability of the automatic control devices of electric and heat power processes. Based on the reliability values of these systems, scales of preferences are formed, which allow to choose the optimal one, based on the desired reliability index of the system, taking into account the limitations on the number of reserve elements.

Статья поступила в редакцию 1 апреля 2019 года

Надежность энергосистем можно обеспечить не только за счет использования составляющих ее высоконадежных элементов, но и путем структурного резервирования. Причем резервирование релейно-контактных систем может как повысить, так и снизить их надежность. Это зависит от структуры самой системы, количества резервных элементов и преобладающего типа отказа. В нормальных условиях релейно-контактная система работает удовлетворительно, но может иметь отказы двух типов: «обрыв цепи» и «короткое замыкание». В условиях воздействия внешних неблагоприятных факторов возможны самопроизвольные ложные срабатывания системы.

Выражения для расчета показателей надежности релейно-контактных соединений выводят исходя из биномиального разложения Ньютона [1–4]:

$$\prod_{i=1}^k (p_i + q_{oi} + q_{si} + r_{oi} + r_{si}) = 1, \quad (1)$$

где k – общее количество последовательных и параллельных элементов в системе; p_i – вероятность безотказной работы i -го элемента электрического реле; q_{oi} – вероятность отказа i -го элемента типа «обрыв цепи», когда элемент остается в разомкнутом положении, несмотря на поданную команду на замыкание; q_{si} – вероятность отказа i -го элемента типа «короткое замыкание», когда элемент остается в замкнутом положении, несмотря на команду на размыкание; r_{oi} – вероятность самопроизвольного размыкания i -го элемента; r_{si} – вероятность самопроизвольного замыкания i -го элемента.

Для идентичных элементов ($p_i = p$, $q_{oi} = q_o$, $q_{si} = q_s$, $r_{oi} = r_o$, $r_{si} = r_s$) формула (1) принимает вид:

$$(p + q_o + q_s + r_o + r_s)^k = 1. \quad (2)$$

Отказы типа «обрыв цепи» и «короткое замыкание» определяют проектную надежность системы, учитывающую внутренние факторы, которые



В.А. АНИЩЕНКО,
д.т.н., профессор кафедры
«Электроснабжение» БНТУ



Т.А. ЛАПТЕВА,
м.т.н., инспектор РЭГИ № 1 ММРО
ЭУ филиала ГУ «Государственный
энергетический и газовый надзор»
по городу Минску и Минской
области

влиять на надежность. К ним относятся различные конструктивные недостатки элементов, некачественное их изготовление. Условия эксплуатации системы при этом не рассматриваются.

Проектная надежность характеризуется тремя составляющими:

$$P + Q_o + Q_s = 1, \quad (3)$$

где P – вероятность безотказной работы системы; Q_o и Q_s – вероятности отказов системы типа «обрыв цепи» и «короткое замыкание» соответственно.

Самопроизвольные срабатывания релейно-контактных устройств при отсутствии соответствующей команды вызываются такими внешними факторами, как электромагнитные помехи, неудовлетворительное качество монтажа, вибрация, экстремальная температура и другие неблагоприятные условия окружающей среды. Эксплуатационная надежность системы характеризуется пятью составляющими:

$$P + Q_0 + Q_s + R_0 + R_s = 1, \quad (4)$$

где R_0 и R_s – вероятности самопроизвольных размыканий и замыканий системы соответственно.

В таблице 1 представлены структуры резервированных систем, их схемы и формулы для расчета показателей проектной надежности. Последние выведены из выражений (2) и (4) исходя из предположения статистической независимости отказов и самопроизвольных срабатываний элементов системы.

В мажоритарных системах используются три или пять промежуточных реле с двумя и шестью контактами. В основу работы этих систем положен принцип выбора по большинству «голосов», когда из двух возможных состояний системы (исправного и неисправного) выбирается то, которое получено от большинства исправных цепей.

На основе показателей проектной надежности по приведенным в таблице 1 формулам были построены шкалы предпочтений резервированных систем по трем критериям надежности: максимуму вероятности безотказной работы и минимумам отказов типа «обрыв цепи» и «короткое замыкание» (таблицы 2–4). Выбор критерия должен производиться с учетом основной функции, которую выполняет релейно-контактная система в конкретном устройстве автоматического контроля и управления.

Шкалы предпочтений позволяют определить наилучшую по выбранному критерию (показателю, характеризующему надежность) систему резервирования при наличии ограничений на количество резервных элементов (реле) k_p . Результаты выбора оптимальных систем с учетом этих ограничений приведены в таблице 5.

Выбор системы производился исходя из предположения о равенстве вероятностей отказов противоположных типов ($q_0 = q_s$) всех элементов в системе. Поэтому один резервный элемент не повышает вероятность безотказной работы системы ($P = p$). По критерию минимума

Таблица 1. Схемы резервированных релейно-контактных систем и формулы расчета показателей их эксплуатационной надежности

Структура системы	Схема соединений элементов системы	Показатели эксплуатационной надежности системы
Последовательная, $k = n$		$Q_s = q_s^n;$ $Q_0 = 1 - (1 - q_0)^n;$ $R_s = r_s^n;$ $R_0 = 1 - (1 - r_0)^n;$ $P = (1 - q_0)^n + (1 - r_0)^n - q_s^n - r_s^n - 1$
Параллельная, $k = m$		$Q_s = 1 - (1 - q_s)^m;$ $Q_0 = q_0^m;$ $R_s = 1 - (1 - r_s)^m;$ $R_0 = r_0^m;$ $P = (1 - q_s)^m + (1 - r_s)^m - q_0^m - r_0^m - 1$
Последовательно-параллельная, $k = n \cdot m$		$Q_0 = (1 - (1 - q_0)^n)^m;$ $Q_s = 1 - (1 - q_s^n)^m;$ $R_0 = (1 - (1 - r_0)^n)^m;$ $R_s = 1 - (1 - r_s^n)^m;$ $P = (1 - q_s^n)^m + (1 - r_s^n)^m - (1 - (1 - q_0)^n)^m - (1 - (1 - r_0)^n)^m - 1$
Параллельно-последовательная, $k = n \cdot m$		$Q_0 = 1 - (1 - q_0^n)^m;$ $Q_s = (1 - (1 - q_s)^n)^m;$ $R_0 = 1 - (1 - r_0^n)^m;$ $R_s = (1 - (1 - r_s)^n)^m;$ $P = (1 - q_0^n)^m + (1 - r_0^n)^m - (1 - (1 - q_s)^n)^m - (1 - (1 - r_s)^n)^m - 1$
Мажоритарная «2 из 3», $k = 3$		$Q_0 = 3 \cdot q_0^2 - 2 \cdot q_0^3;$ $Q_s = 3 \cdot q_s^2 - 2 \cdot q_s^3;$ $R_0 = 3 \cdot r_0^2 - 2 \cdot r_0^3;$ $R_s = 3 \cdot r_s^2 - 2 \cdot r_s^3;$ $P = 1 - 3 \cdot (q_0^2 + q_s^2 + r_0^2 + r_s^2) + 2 \cdot (q_0^3 + q_s^3 + r_0^3 + r_s^3)$
Мажоритарная «3 из 5», $k = 5$		$Q_0 = 6 \cdot q_0^5 - 15 \cdot q_0^4 + 10 \cdot q_0^3;$ $Q_s = 6 \cdot q_s^5 - 15 \cdot q_s^4 + 10 \cdot q_s^3;$ $R_0 = 6 \cdot r_0^5 - 15 \cdot r_0^4 + 10 \cdot r_0^3;$ $R_s = 6 \cdot r_s^5 - 15 \cdot r_s^4 + 10 \cdot r_s^3;$ $P = 1 - 6 \cdot (q_0^5 + q_s^5 + r_0^5 + r_s^5) + 6 \cdot (q_0^4 + q_s^4 + r_0^4 + r_s^4) - 10 \cdot (q_0^3 + q_s^3 + r_0^3 + r_s^3)$

отказа типа «обрыв цепи» наилучшим вариантом схемы будет параллельное подключение резервного элемента, а по критерию минимума отказа типа «короткое замыкание» – последовательное.

Последовательно-параллельная и параллельно-последовательная системы равноценны по критерию максимума

вероятности безотказной работы при количестве резервных элементов $k_p = 3$.

Достоинством мажоритарных систем «два из трех» и «три из пяти» является равенство вероятностей противоположных отказов систем Q_0 и Q_s . В отличие от других систем они состоят из промежуточных реле с несколькими контактами.

Таблица 2. Шкала предпочтений резервированных релейно-контактных систем по критерию максимума вероятности безотказной работы (P)

Тип схемы системы	Количество элементов	Показатели надежности элемента		
		$q_o = q_s = 0,005;$ $p = 0,99$	$q_o = q_s = 0,025;$ $p = 0,95$	$q_o = q_s = 0,035;$ $p = 0,93$
Мажоритарная «3 из 5»	$k = 5$	0,999998	0,999699	0,999187
Последовательно-параллельное соединение элементов	$n = m = 3$	0,999996	0,999562	0,998830
Параллельно-последовательное соединение элементов				
Последовательно-параллельное соединение элементов	$n = 2; m = 3$	0,999924	0,998006	0,996004
Параллельно-последовательное соединение элементов				
Мажоритарная «2 из 3»	$k = 3$	0,999851	0,996313	0,992822
Последовательно-параллельное соединение элементов	$n = m = 2$			
Параллельно-последовательное соединение элементов				
Последовательно-параллельное соединение элементов	$n = 3; m = 2$	0,999777	0,994619	0,989639
Параллельно-последовательное соединение элементов				
Последовательное соединение элементов	$n = 2$	0,99	0,95	0,93
Параллельное соединение элементов	$m = 2$			
Последовательное соединение элементов	$n = 3$	0,985075	0,926844	0,898589
Параллельное соединение элементов	$m = 3$			
Последовательное соединение элементов	$n = 4$	0,980149	0,903688	0,867179
Параллельное соединение элементов	$m = 4$			
Последовательное соединение элементов	$n = 5$	0,975249	0,881096	0,836829
Параллельное соединение элементов	$m = 5$			

Таблица 3. Шкала предпочтений резервированных релейно-контактных систем по критерию минимума вероятности отказа типа «обрыв цепи» (Q_o)

Тип схемы системы	Количество элементов	Показатели надежности элемента		
		$q_o = q_s = 0,005;$ $p = 0,99$	$q_o = q_s = 0,025;$ $p = 0,95$	$q_o = q_s = 0,035;$ $p = 0,93$
Параллельное соединение элементов	$m = 5$	0,000000000003	0,0000000098	0,0000000525
	$m = 4$	0,0000000006	0,00000039	0,0000015
	$m = 3$	0,00000013	0,00001563	0,00004288
Параллельно-последовательное соединение элементов	$n = 3; m = 2$	0,00000025	0,000031	0,000086
	$n = m = 3$	0,00000037	0,000047	0,000129
Последовательно-параллельное соединение элементов	$n = 2; m = 3$	0,00000099	0,000121	0,000325
Мажоритарная схема «3 из 5»	$k = 5$	0,0000012	0,00015	0,000407
Последовательно-параллельное соединение элементов	$n = m = 3$	0,0000033	0,000392	0,001042
Параллельное соединение элементов	$m = 2$	0,000025	0,000625	0,001225
Параллельно-последовательное соединение элементов	$n = m = 2$	0,0000499	0,00125	0,00245
Мажоритарная схема «2 из 3»	$k = 3$	0,000075	0,001874	0,003670
Параллельно-последовательное соединение элементов	$n = 2; m = 3$			
Последовательно-параллельное соединение элементов	$n = m = 2$	0,000099	0,00244	0,00473
	$n = 3; m = 2$	0,000223	0,00535	0,01028
Последовательное соединение элементов	$n = 2$	0,009975	0,049375	0,068775
	$n = 3$	0,014925	0,073141	0,101368
	$n = 4$	0,019851	0,096312	0,132820
	$n = 5$	0,024751	0,118904	0,163171

Таблица 4. Шкала предпочтений резервированных релейно-контактных систем по критерию минимума вероятности отказа типа «короткое замыкание» (Q_s)

Тип схемы системы	Количество элементов	Показатели надежности элемента		
		$q_o = q_s = 0,005;$ $p = 0,99$	$q_o = q_s = 0,025;$ $p = 0,95$	$q_o = q_s = 0,035;$ $p = 0,93$
Последовательное соединение элементов	$n = 5$	0,00000000003	0,0000000098	0,0000000525
	$n = 4$	0,0000000006	0,00000039	0,0000015
	$n = 3$	0,00000013	0,00001563	0,00004288
Последовательно-параллельное соединение элементов	$n = 3; m = 2$	0,00000025	0,000031	0,000086
	$n = m = 3$	0,00000037	0,000047	0,000129
Параллельно-последовательное соединение элементов	$n = 2; m = 3$	0,00000099	0,000121	0,000325
Мажоритарная схема «3 из 5»	$k = 5$	0,0000012	0,00015	0,000407
Параллельно-последовательное соединение элементов	$n = m = 3$	0,0000033	0,000392	0,001042
Последовательное соединение элементов	$n = 2$	0,000025	0,000625	0,001225
Последовательно-параллельное соединение элементов	$n = m = 2$	0,0000499	0,00125	0,00245
Мажоритарная «2 из 3»	$k = 3$	0,000075	0,001874	0,003670
Последовательно-параллельное соединение элементов	$n = 2; m = 3$			
Параллельно-последовательное соединение элементов	$n = m = 2$	0,000099	0,00244	0,00473
	$n = 3; m = 2$	0,000223	0,00535	0,01028
Параллельное соединение элементов	$m = 2$	0,009975	0,049375	0,068775
	$m = 3$	0,014925	0,073141	0,101368
	$m = 4$	0,019851	0,096312	0,132820
	$m = 5$	0,024751	0,118904	0,163171

Таблица 5. Результаты выбора оптимальных систем с учетом ограничений по количеству резервных элементов

Количество резервных элементов	Оптимальная система		
	по критерию максимума P	по критерию минимума Q_o	по критерию минимума Q_s
$k_p = 1$	Схема с последовательным соединением элементов	Схема с параллельным соединением элементов	Схема с последовательным соединением элементов
	Схема с параллельным соединением элементов		
$k_p = 2$	Мажоритарная система «2 из 3»		
$k_p = 3$ ($n = m = 2$)	Схема с последовательно-параллельным соединением элементов		
	Схема с параллельно-последовательным соединением элементов		
$k_p = 4$	Мажоритарная система «3 из 5»		

Влияние самопроизвольных срабатываний реле на надежность можно оценить на примере мажоритарной системы «два из трех». В таблице 6 приведены результаты расчетов показателей проектной и эксплуатационной надежности. Анализ этих и аналогичных показателей других систем показал, что самопроизвольные срабатывания реле снижают вероятность безотказной работы определенной системы, но практически не влияют

на шкалы предпочтений и выбор оптимальных систем при ограничениях на количество резервных элементов.

Заключение

1. В статье рассмотрены особенности резервированных релейно-контактных систем и предложено разделение надежности этих систем на проектную

и эксплуатационную. Математическая модель проектной надежности учитывает три возможных состояния: исправное, отказ типа «обрыв цепи» и отказ типа «короткое замыкание». Математическая модель эксплуатационной надежности включает дополнительные отказы, вызванные самопроизвольными срабатываниями системы при отсутствии командного сигнала вследствие воздействия внешних неблагоприятных факторов.

Таблица 6. Показатели проектной и эксплуатационной надежности мажоритарной системы «2 из 3»

P	0,99	0,98	0,97	0,95	0,96	0,93
q_o	0,005	0,005	0,015	0,015	0,02	0,02
q_s	0,005	0,005	0,015	0,015	0,02	0,02
r_o	0	0,005	0	0,01	0	0,015
r_s	0	0,005	0	0,01	0	0,015
Q_o	0,000075	0,000075	0,000668	0,000668	0,001184	0,001184
Q_s	0,000075	0,000075	0,000668	0,000668	0,001184	0,001184
R_o	0	0,000075	0	0,000298	0	0,000668
R_s	0	0,000075	0	0,000298	0	0,000668
P	0,999851	0,999701	0,998664	0,998068	0,997632	0,996296

2. На основании проведенных расчетов надежности различных релейно-контактных систем сформированы шкалы предпочтений систем по различным критериям: максимуму вероятности безотказной работы и минимумам вероятности отказов типа «обрыв цепи» и «короткое замыкание».

3. Исходя из шкал предпочтений произведен выбор оптимальных по различным критериям резервированных релейно-контактных систем с учетом ограничений на количество резервных элементов.

4. Полученные в работе оценки надежности резервированных релейно-кон-

тактных систем могут быть использованы при проектировании высоконадежных устройств автоматического контроля и управления электро- и теплоэнергетическими процессами.

Список литературы

1. Диллон, Б.С. Инженерные методы обеспечения надежности систем: пер.с англ. / Б. Диллон, Ч.Сингх. – М.: Мир, 1984. – 318 с.; ил.
2. Ложные срабатывания [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://energoboard.ru/articles/3040-lognoe-srabativanie.html>. – Дата доступа: 25.05.2017.

3. Анищенко, В.А. Математическая модель надежности релейно-контактных систем / В.А. Анищенко, Т.А. Бакун // Наука – образованию, производству, экономике: материалы 13-й Международной научно-технической конференции. Т. 1 – Минск: БНТУ, 2015. – С.16–17.

4. Бакун, Т.А. Надежность релейно-контактных систем контроля и управления / Т.А. Бакун; научн. рук. В.А. Анищенко // Актуальные проблемы энергетики: материалы 71-й научно-технической конференции студентов и аспирантов / Белорусский национальный технический университет. Энергетический факультет. Секция 3: Электроснабжение. – Минск: БНТУ, 2015. – С. 125–128.

Новые издания

Стандарты ГПО «Белэнерго»:

- ✓ СТП 33240.01.217-19
«Система условных единиц электрических сетей, электротехнического и иного оборудования, находящихся на балансе филиалов РУП-облэнерго»
- ✓ СТП 33240.05.500-19
«Нормы времени на подключение электроустановок потребителей к электрическим сетям энергоснабжающих предприятий»
- ✓ СТП 33240.45.311-19
«Методические указания по проверке параметров настройки автоматических регуляторов возбуждения сильного действия синхронных генераторов на физической модели энергосистемы»

ОЗНАКОМИТЬСЯ

с документами можно
в ЭИС «Энергодокмент»
www.energodoc.by

ЗАКАЗАТЬ

- в редакции по телефонам:
+375 17 286-08-28 (многоканальный)
+375 29 399-11-04, +375 33 319-11-04
- на сайте: www.energodoc.by