

К РАСЧЕТУ НАДЕЖНОСТИ РЕАЛЬНЫХ РЕЛЕЙНО-КОНТАКТНЫХ СХЕМ

В. А. Артеменко, В. К. Дущенко

Х а р ь к о в

Известно, что при работе особо важных систем нужны надежные переключающие устройства. Промышленные переключающие устройства часто не отвечают этим требованиям. В этих случаях резервируются отдельные контакты, т. е. создаются схемные контактные группы, работающие как один контакт. Не всегда легко определить надежность подобной контактной группы, особенно при учете многих факторов, влияющих на релейный контакт.

Существующие методы расчета вероятности безотказной работы релейно-контактных схем допускают только два вида отказа контактного элемента: отказ типа «обрыв» и отказ типа «короткое замыкание». Однако в некоторых особо ответственных случаях учет лишь двух указанных типов неисправностей недостаточен. При резервировании реальных релейных схем приходится учитывать и надежность обмотки, отказ которой проявляется в виде обрыва.

Заметим, что для релейно-контактных схем вероятность безотказной работы определяется из расчета на «одно срабатывание», тогда как для непрерывных систем аналогичная величина вычисляется в течение определенного промежутка времени.

Ниже, наряду с термином «отказ», согласно К. Шеннону [1], употребляется термин «ошибка», который более точен, так как отказ в релейной системе не всегда приводит к ошибке. Действительно, наличие в нормально разомкнутом контакте отказа типа «короткое замыкание» (сваривание контакта) при возбужденной обмотке не приводит к появлению «ошибки», так как в это время контакт должен быть замкнут. «Ошибка» обнаруживается только при отсутствии возбуждения.

В данной статье излагается методика определения вероятности безотказной работы релейно-контактных схем с учетом отказа типа «обрыв обмотки». При построении релейно-контактной схемы можно использовать как одноконтатные, так и многоконтатные реле. Расчет надежности релейной схемы (выражение «расчет надежности» мы употребляем в смысле «расчет вероятности безотказной работы на одно срабатывание») при использовании многоконтатного реле без учета обрыва обмотки не отличается от расчета надежности схемы, составленной из одноконтатных реле. Это обусловлено статистической независимостью отдельных контактов при абсолютной надежности обмотки. При конечной надежности обмотки отдельные контакты перестают быть статистически независимыми и ранее известная методика уже неприемлема. В связи с этим учет влияния надежности обмоток на надежность системы в целом при использовании одноконтатных и двухконтатных реле мы рассмотрим отдельно.

В дальнейшем изложении рассматриваются только реле с нормально разомкнутыми контактами. Для любого и, в частности, для одноконтактного реле возможны два состояния: возбуждено и не возбуждено. В каждом из состояний выполняются различные гипотезы, т. е. события, сопутствующие основному событию. Вероятность обрыва обмотки весьма просто выражается через вероятности гипотез. Так, для одноконтактного реле с нормально разомкнутым контактом обрыв обмотки физически означает отсутствие замыкания при возбуждении реле. Математически вероятность обрыва обмотки будет отождествляться с вероятностью одной из гипотез в возбужденном состоянии.

Вероятностное распределение гипотез можно представить следующим образом.

Состояние I — реле возбуждено

В возбужденном состоянии возможны две гипотезы: гипотеза H_1 — обмотка реле целая; гипотеза H_2 — обмотка реле оборвана.

$P(H_1) = 1 - q_{об}$ — вероятность гипотезы H_1 ;

$P(H_2) = q_{об}$ — вероятность гипотезы H_2 .

При выполнении гипотезы H_1 контакт может быть замкнут с вероятностью $1 - q_0$ и разомкнут с вероятностью q_0 . При выполнении гипотезы H_2 контакт может быть замкнут с вероятностью $q_{к.з}$ и разомкнут с вероятностью $1 - q_{к.з}$.

Поскольку обрыв обмотки физически означает отсутствие возбуждения, принципиально возможно гипотезу H_2 отнести к состоянию реле, когда возбуждение отсутствует. Однако этого не следует делать, так как при переходе к многоконтактным реле и многорелейным схемам эта операция значительно усложняет математическое описание релейной схемы.

Состояние II — реле не возбуждено

При отсутствии возбуждения состояние обмотки, очевидно, не играет роли. Это соответствует наличию одной гипотезы со 100-процентной вероятностью. Поэтому состояние II характеризуется тем, что контакт может быть замкнут с вероятностью $q_{к.з}$ и разомкнут с вероятностью $1 - q_{к.з}$.

Используя приведенную схему распределения вероятностей, нетрудно определить полную ошибку. Для каждого состояния в отдельности ошибка вычисляется по формуле полной вероятности:

$$P(a) = \sum_{i=1}^n \bar{P}(H_i) P(a/H_i), \quad (1)$$

где $P(a)$ — вероятность события a , под которым в данном случае будем понимать ошибку в соответствующем состоянии;

$P(H_i)$ — вероятность i -ой гипотезы;

$P(a/H_i)$ — условная вероятность события a при выполнении i -ой гипотезы.

В нашем случае получаем

$$q'_0 = (1 - q_{об}) q_0 + q_{об} (1 - q_{к.з}) \approx q_0 + q_{об}, \quad (2)$$

где через q'_0 обозначена ошибка при наличии возбуждения.

Ошибка при отсутствии возбуждения

$$q'_{к.з} = q_{к.з}. \quad (3)$$

Полученные выражения (2) и (3) показывают, каким образом учитывается отказ типа «обрыв обмотки» для одноконтактного реле.

Методика вычисления полной ошибки, приведенная в работе [1] для схем, составленных из одноконтактных реле, очевидно, не изменится. Ошибки же при наличии и отсутствии возбуждения примут значения q'_0 и $q'_{к.з}$ соответственно. Формально это соответствует некоторому эквивалентному реле с ошибками, определяемыми (2) и (3).

При использовании двухконтактных реле мы уже не можем столь просто интерпретировать обрыв обмотки. Это связано с тем, что методика расчета надежности, приведенная в [1] и [2], справедлива лишь при условии, что различные контакты статистически независимы и состояния последних при последующем возбуждении также независимы. Это справедливо только для контактов различных реле, либо, как уже указывалось, для контактов многоконтактного реле с абсолютно надежной обмоткой. При использовании двухконтактных реле необходимо учитывать вероятность обрыва обмотки при попарной зависимости контактов, т. е. обрыв обмотки реле с определенной вероятностью влияет сразу на оба контакта. В этом случае применение метода, предложенного в работе [2], крайне затруднительно, так как получаются весьма сложные выражения уже при расчете надежности элементарной четверки (схема составлена из двух двухконтактных реле).

Описанный ниже метод основан на изложенном нами методе и представляет его дальнейшее развитие.

Рассмотрим двухконтактное реле. Как и раньше, для одного реле имеется два состояния: реле возбуждено и реле не возбуждено.

Состояние I — реле возбуждено

Гипотеза A_1 — обмотка реле целая; гипотеза A_2 — обмотка реле оборвана.

$P(A_1) = 1 - q_{об}$ — вероятность гипотезы A_1 ,

$P(A_2) = q_{об}$ — вероятность гипотезы A_2 .

При выполнении гипотезы A_1 каждый из контактов может быть замкнут с вероятностью $1 - q_0$ и разомкнут с вероятностью q_0 . При выполнении гипотезы A_2 каждый из контактов может быть замкнут с вероятностью $q_{к.з}$ и разомкнут с вероятностью $1 - q_{к.з}$.

Состояние II — возбуждение отсутствует

При отсутствии возбуждения состояние обмотки не влияет на состояние контактов. Контакты статистически независимы, и каждый контакт

может быть замкнут с вероятностью $q_{к.з}$ и разомкнут с вероятностью $1 - q_{к.з}$. Попарная зависимость контактов здесь еще не сказывается; она будет учитываться при анализе релейно-контактной схемы в целом.

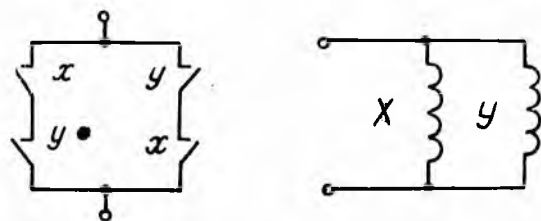


Рис. 1. Элементарная четверка.

При отсутствии возбуждения состояние обмотки не влияет на состояние контактов. Контакты статистически независимы, и каждый контакт может быть замкнут с вероятностью $q_{к.з}$ и разомкнут с вероятностью $1 - q_{к.з}$. Попарная зависимость контактов здесь еще не сказывается; она будет учитываться при анализе релейно-контактной схемы в целом.

Проиллюстрируем применение предлагаемого метода на контактных схемах. Рассмотрим элементарную контактную четверку («двойную двойку»). Включение обмоток и контактов показано на рис. 1. Обмотки обоих реле соединены параллельно, а контакты одного и того же реле обозначены одинаковой буквой.

Для любой резервированной контактной группы, как и ранее, будем различать два состояния: I — система в целом возбуждена, II — система

в целом не возбуждена. Оба состояния, очевидно, события несовместные, поэтому имеет смысл искать ошибку для каждого из них, а затем уже общую ошибку как сумму ошибок отдельных состояний.

Рассмотрим состояние I, когда система в целом возбуждена. В этом состоянии возможно выполнение нескольких гипотез, а именно:

гипотеза H_1 — обмотки обоих реле целые;

гипотеза H_2 — обмотка реле x оборвана; обмотка реле y целая;

гипотеза H_3 — обмотка реле x целая; обмотка реле y оборвана;

гипотеза H_4 — обмотка обоих реле оборвана.

Нетрудно заметить, что при одинаковых реле гипотезы H_2 и H_3 равновероятны.

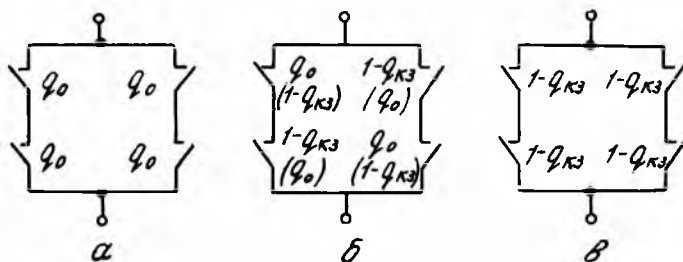


Рис. 2. Схема распределения вероятностей ошибок отдельных контактов в элементарной четверке в возбужденном состоянии:

a — гипотеза H_1 ; b — гипотеза H_2 или H_3 ; v — гипотеза H_4 .

При заданной вероятности обрыва обмотки, равной $q_{об}$, вероятности гипотез соответственно равны

$$P(H_1) = (1 - q_{об})^2; \quad (4)$$

$$P(H_2) = P(H_3) = q_{об} (1 - q_{об});$$

$$P(H_4) = q_{об}^2.$$

Эти гипотезы представляют полную группу событий, а потому справедливо следующее очевидное соотношение:

$$\sum_{i=1}^4 P(H_i) = 1. \quad (5)$$

Вероятность ошибки при всех возбужденных реле легко найти по формуле полной вероятности (1):

$$P(a) = \sum_{i=1}^4 P(H_i) P(a/H_i), \quad (5a)$$

где под событием a следует понимать ошибку при возбуждении, т. е. отсутствие замыкания всей системы. Входящие в выражение (1) условные вероятности $P(a/H_i)$ легко определим при помощи схемы распределения вероятностей ошибок, приведенной на рис. 2.

Если вероятность ошибки (обрыва) одного контакта в системе (рис. 2, a) равна q_0 , то, очевидно, вероятность ошибки всей системы определяется следующим выражением:

$$P(a/H_i) = [1 - (1 - q_0)^2]^2 = 4q_0^2 - 4q_0^3 + q_0^4. \quad (6)$$

Аналогично

$$P(a/H_2) = P(a/H_3) = [1 - (1 - q_0)q_{к.з}]^2 = (1 - q_{к.з} + q_0q_{к.з})^2;$$

$$P(a/H_4) = (1 - q_{к.з}^2)^2.$$

Подставляя известные величины выражений (4) и (6) в выражение 5 (а) получим ошибку при возбуждении:

$$P(a) = (1 - q_{об})^2 (4q_0^2 - 4q_0^3 + q_0^4) +$$

$$+ 2q_{об}(1 - q_{об})(1 - q_{к.з} + q_0q_{к.з}) + q_{об}^2(1 - q_{к.з}^2)^2. \quad (7)$$

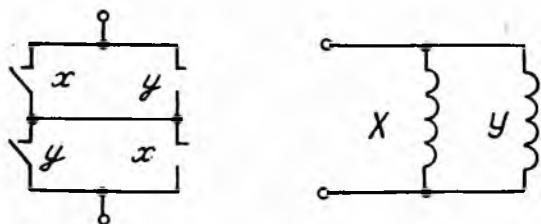


Рис. 3. Элементарная четвертка дуальная четверке, изображенной на рис. 1.

Рассмотрим состояние, при котором возбуждение отсутствует. Как уже указывалось, в этом случае состояние обмоток влияет на состояние контактов отдельных реле, а также всей системы в целом и, следовательно, каждый контакт может быть замкнут с вероятностью $q_{к.з}$ и разомкнут с вероятностью $1 - q_{к.з}$. Если вероятность замыкания каждого контакта равна $q_{к.з}$, то вероятность замыкания всей системы в целом

$$P(b) = 1 - (1 - q_{к.з}^2)^2 = 2q_{к.з}^2 - q_{к.з}^4, \quad (8)$$

где ошибка системы при отсутствии возбуждения (7) и (8).

Получаем вероятность появления полной ошибки:

$$Q_{ош} = P(a) + P(b).$$

Вероятность безотказной работы имеет вид

$$P_{\Sigma} = 1 - Q_{ош}.$$

Отбрасывая в выражениях (7) и (8) величины более высокого порядка малости по сравнению с q_0^2 (q_0 , $q_{к.з}$, $q_{об}$ — величины одного порядка малости), получим упрощенные формулы:

$$P(a) \approx 4q_0^2 + 2q_{об} - 4q_{об}q_{к.з} + q_{об}^2; \quad (9)$$

$$P(b) \approx 2q_{к.з}^2;$$

$$Q_{ош} = P(a) + P(b) \approx 4q_0^2 + 2q_{об} - 4q_{об}q_{к.з} + q_{об}^2 + 2q_{к.з}^2.$$

На рис. 3 изображен еще один вид элементарной четверки. Эта четверка дуальна первой. Необходимо выяснить, какая из двух дуальных схем более надежна. С этой целью вычислим полную ошибку для схемы, приведенной на рис. 3. Схема распределения вероятностей ошибок для этого случая показана на рис. 4.

Распределение вероятностей гипотез в данном случае не изменится, поэтому

$$\begin{aligned} P(H_1) &= (1 - q_{об})^2; \\ P(H_2) &= P(H_3) = q_{об}(1 - q_{об}); \\ P(H_4) &= q_{об}^2. \end{aligned} \quad (10)$$

Аналогично предыдущему для условных вероятностей получим

$$\begin{aligned} P(a/H_1) &= 1 - (1 - q_0^2)^2 = 2q_0^2 - q_0^4; \\ P(a/H_2) &= P(a/H_3) = 1 - [1 - q_0(1 - q_{к.з})]^2 = 1 - (1 - q_0 + q_0q_{к.з})^2; \\ P(a/H_4) &= 1 - [1 - (1 - q_{к.з})^2]^2 = 1 - (2q_{к.з} - q_{к.з}^2)^2; \end{aligned} \quad (11)$$

$$P(a) = (1 - q_{об})^2 (2q_0^2 - q_0^4) + 2q_{об}(1 - q_{об})[1 - (q_0 + q_0q_{к.з})^2] + q_{об}^2 [1 - (2q_{к.з} - q_{к.з}^2)^2]; \quad (12)$$

$$P(b) = [1 - (1 - q_{к.з})^2]^2 = 4q_{к.з}^2 - 4q_{к.з}^3 + q_{к.з}^4. \quad (13)$$

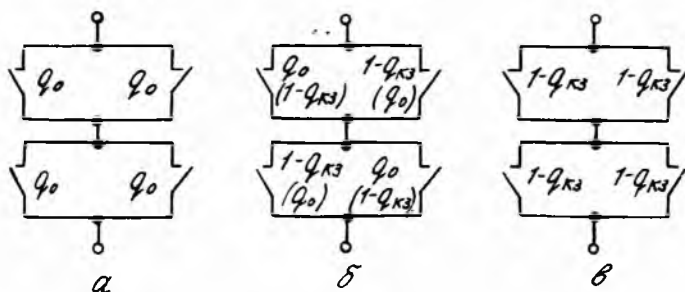


Рис. 4. Схема распределения вероятностей ошибок отдельных контактов для дуальной четверки:

a — гипотеза H_1 ; *б* — гипотеза H_2 или H_3 ; *в* — гипотеза H_4 .

Отбрасываем члены высшего порядка малости по сравнению с q_0^2 . Это приводит к следующим приближенным выражениям:

$$P(a) \approx 2q_0^2 + 4q_{об}q_0 + q_{об}^2; \quad (14)$$

$$P(b) \approx 4q_{к.з}^2;$$

$$Q_{ош} \approx 2q_0^2 + 4q_{об}q_0 + q_{об}^2 + 4q_{к.з}^2.$$

Сравнивая выражения (9) и (14), видим, что схема, изображенная на рис. 1, более склонна к ошибке типа «обрыв», а схема, приведенная на рис. 3, — к ошибке типа «короткое замыкание», причем влияние обмотки на увеличение ошибки в первой схеме большее. Поэтому при равных q_0 и $q_{к.з}$ вторая схема предпочтительнее.

Расчет вероятностей ошибок для схем, составленных из m -контактных реле, не вызывает особых затруднений. Такие схемы, очевидно, будут содержать m контактов.

При наличии реле в возбужденном состоянии можно выполнить $n + 1$ гипотез (ни одного обрыва, обрыв одной обмотки... обрыв всех обмоток). Поэтому выражение для вычисления ошибки при возбужденном состоянии примет вид

$$P(a) = \sum_{i=1}^{n+1} P(H_i) P(a/H_i). \quad (15)$$

Вероятности $P(H_i)$ для симметричных схем определяем по следующей формуле:

$$P(H_i) = C_n^{i-1} (1 - q_{006})^{n-i+1} q_{006}^{i-1}, \quad (16)$$

где C_n^{i-1} — число сочетаний из n элементов по $i - 1$.

Приведенное выражение справедливо только для схем, настроенных симметричным образом, т. е. когда все входящие в схему реле эквивалентны. Условные вероятности $P(a/H_i)$ для каждой конкретной структуры вычисляются по схеме распределения вероятностей ошибок между отдельными контактами, составляемой подобно схеме, показанной на рис. 2.

В заключение отметим, что изложенная методика расчета надежности резервированных релейно-контактных групп может быть применена не только для симметричных схем. Однако при отсутствии симметрии выражения (15) и (16) окажутся несправедливыми, так как количество гипотез в выражении (16) будет больше, чем $n + 1$. В этом случае предложенная нами методика несколько усложняется, но это несущественно, поскольку при синтезировании резервированных контактных групп применение несимметричных структур вряд ли целесообразно.

ЛИТЕРАТУРА

1. E. Moore, C. Shannon. Reliable circuits using less reliable relays, Journal of the Franklin Institute, № 3 (1956), 191, № 4, 281.
2. И. А. Лыков. Основы надежности радиоэлектронной аппаратуры. Изд. АРТА им. Говорова, г. Харьков, 1963.
3. Е. С. Вентцель. Теория вероятностей. Изд-во «Наука», 1964.