АКАДЕМИЯ НАУК СССР
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
АВТОМЕТРИЯ

№ 5 1970

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРОМЕЖУТОЧНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

УДК 681.20.019.3

Я. В. МИГДАЛЬСКИЙ
(Варшава)

НАДЕЖНОСТЬ МНОГОЭЛЕМЕНТНОГО ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЯ СО СЛОЖНОЙ СТРУКТУРОЙ

Переключатели, работа которых состоит в замыкании и размыкании цепи, обладают сравнительно невысокой надежностью, но широко применяются в измерительных информационных системах, системах автоматики и т. д. В зависимости от практического выполнения различаем контактные и бесконтактные переключатели.

Для определения надежности упомянутых переключателей будем условно их обозначать, как показано на рис. 1. Рассмотрим один произвольно выбранный полный цикл их работы.

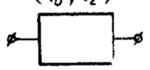


Рис. 1. Условное обозначение переключателя.

Если событие A (правильная работа переключателя) наступает с вероятностью

$$0 \leqslant p = P(A) \leqslant 1, \tag{1}$$

тогда надежность переключателя в единичном цикле работы равна p.

Может, однако, случиться, что возбужденный переключатель останется в рассматриваемом цикле работы разомкнутым. Такое событие (обозначим его символом A_0) характеризует дефектное действие переключателя вследствие обрыва, а вероятность его:

$$0 \leqslant q_0 = P(A_0) \leqslant 1. \tag{2}$$

Переключатель может также потерять свойство переключения из-за короткого замыкания (тогда появляется отказ типа «замыкание»). Наступает это, когда переключатель остается в целом цикле работы замкнутым несмотря на то, что произошло снятие возбуждающего сигнала. Вероятность такого события (обозначим его символом A_z) равна

$$0 \leqslant q_z = P(A_z) \leqslant 1. \tag{3}$$

Если рассмотренные повреждения имеют необратимый характер, то надежность переключателя в одном цикле работы можно вычислить так:

$$P(A) = 1 - P(A_0) - P(A_z); \tag{4}$$

$$p = 1 - q_0 - q_z = 1 - (q_0 + q_z). \tag{5}$$

Соответственно для полной вероятности отказа переключателя имеем

$$q = P(A_0 \cup A_z) = P(A_0) + P(A_z). \tag{6}$$

где

$$0 \leqslant q = q_0 + q_z \leqslant 1. \tag{7}$$

Как следует из (5), надежность одноэлементного переключателя однозначно определяется парой чисел $< q_0, q_z >$. Далее увидим, что вычисление надежности многоэлементного переключателя возможно только тогда, когда его элементы будут однозначно заданы с помощью пары чисел $< q_{0i}, q_{zi} >$, где $i=1, 2, \ldots$.

Рассмотрим теперь возможность увеличения начальной надежности переключателя благодаря введению добавочных переключающих элементов.

В результате расширения одноэлементного переключателя получаем многоэлементный переключатель с надежностью

$$R = 1 - Q = 1 - Q_0 - Q_z, \tag{8}$$

где

$$0 \leqslant R = P(A) \leqslant 1; \tag{9}$$

$$0 \leqslant Q_0 = P(A_0) \leqslant 1; \tag{10}$$

$$0 \leqslant Q_z = P(A_z) \leqslant 1; \tag{11}$$

$$Q = P(A_0 \cup A_z) = P(A_0) + P(A_z); \tag{12}$$

$$0 \leqslant Q = Q_0 + Q_z \leqslant 1. \tag{13}$$

Надежность R-многоэлементного переключателя однозначно определяется парой чисел $<Q_0, Q_z>$.

Пусть имеем переключатель, состоящий из n элементов с параметрами $<q_{0i}, q_{zi}>$, $i=1, 2, \ldots, n$. Наша задача состоит в том, чтобы определить параметры $<Q_0, Q_z>$ переключателя через параметры его элементов.

Для решения этой задачи введем следующие обозначения событий: A_{0i} — обрыв i-го элемента переключателя; A_{zi} — замыкание i-го элемента переключателя.

Вероятности событий $\bar{A}_{0i}$ и $\bar{A}_{zi}$, противоположных событиям A_{0i} и A_{zi}, равны:

$$P(\bar{A}_{0i}) = 1 - P(A_{0i}) = 1 - q_{0i}; \tag{14}$$

$$P(\bar{A}_{zi}) = 1 - P(A_{zi}) = 1 - q_{zi}. \tag{15}$$

Для событий A_0, A_{0i} и $\bar{A}_{0i}$, а также A_z, A_{zi} и $\bar{A}_{zi}$ можно записать следующие равенства:

$$A_0 = (A_{0i} \cup \bar{A}_{0i}) \cap A_0 = (A_{0i} \cap A_0) \cup (\bar{A}_{0i} \cap A_0); \tag{16}$$

$$A_z = (A_{zi} \cup \bar{A}_{zi}) \cap A_z = (A_{zi} \cap A_z) \cup (\bar{A}_{zi} \cap A_z). \tag{17}$$

В справедливости равенства (16) и (17) можно наглядно убедиться, рассматривая рис. 2. События $(A_{0i} \cap A_0)$ и $(\bar{A}_{0i} \cap A_0)$, а также $(A_{zi} \cap A_z)$ и $(\bar{A}_{zi} \cap A_z)$ не могут появиться одновременно, поэтому их можно считать несовместными. Тогда

$$Q_0 = P(A_0) = P(A_{0i}) P(A_0/A_{0i}) + P(\bar{A}_{0i}) P(A_0/\bar{A}_{0i}); \tag{18}$$

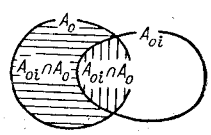


Рис. 2. Графическое представление равенства (16).

$$Q_z = P(A_z) = P(A_{zi})\, P(A_z/A_{zi}) + P(\bar{A}_{zi})\, P(A_z/\bar{A}_{zi}). \qquad (19)$$

Учитывая введенные раньше обозначения, формулы (18) и (19) можно дать в виде:

$$Q_0 = q_{0i}\, P(A_0/A_{0i}) + (1 - q_{0i})\, P(A_0/\bar{A}_{0i}); \qquad (20)$$

$$Q_z = q_{zi}\, P(A_z/A_{zi}) + (1 - q_{zi})\, P(A_z/\bar{A}_{zi}). \qquad (21)$$

Поэтому вероятность отказа n-элементного переключателя определяется уравнением

$$Q = Q_0 + Q_z = q_{0i}\, P(A_0/A_{0i}) + (1 - q_{0i}) \times$$
$$\times P(A_0/\bar{A}_{0i}) + q_{zi}\, P(A_z/A_{zi}) + (1 - q_{zi})\, P(A_z/\bar{A}_{zi}). \qquad (22)$$

Формулы (18)—(22) являются искомыми формулами. Полученным аналитическим зависимостям (20)—(22) можно дать простую геометрическую интерпретацию (рис. 3). Многократно применяя формулы (20) и (21), можно определить надежность переключателя с произвольной структурой.

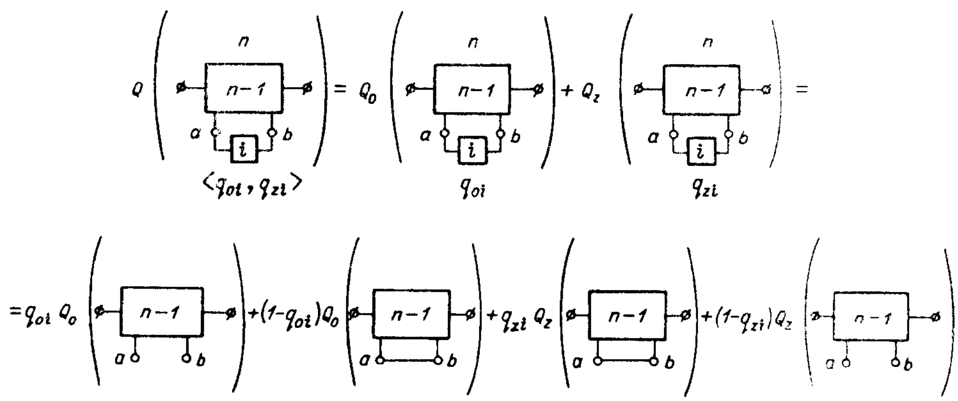


Рис. 3. Геометрическая интерпретация зависимостей (20) — (22).

Таким образом, надежность переключателя можно записать следующим образом:

$$R = 1 - [q_{0i}\, P(A_0/A_{0i}) + (1 - q_{0i})\, P(A_0/\bar{A}_{0i})] -$$
$$- [q_{zi}\, P(A_z/A_{zi}) + (1 - q_{zi})\, P(A_z/\bar{A}_{zi})]. \qquad (23)$$

В частном случае, когда $q_{0i} = 0$, $i = 1, 2, \ldots, n$, получаем

$$R = R(q_{0i}, q_{zi}/q_{0i} = 0) = 1 - [q_{zi}\, P(A_z/A_{zi}) + (1 - q_{zi})\, P(A_z/\bar{A}_{zi})]. \qquad (24)$$

Соответственно для $q_{zi} = 0$, $i = 1, 2, \ldots, n$, имеем

$$R = R(q_{0i}, q_{zi}/q_{zi} = 0) = 1 - [q_{0i} P(A_0/A_{0i}) + (1 - q_{0i})\, P(A_0/\bar{A}_{0i})]. \qquad (25)$$

Сравнивая зависимости (23)—(25), получим

$$R = R(q_{0i}, q_{zi}) = R(q_{0i}, q_{zi}/q_{0i} = 0) + R(q_{0i}, q_{zi}/q_{zi} = 0) - 1, \qquad (26)$$

где $\qquad i = 1, 2, \ldots, n.$

Пример. Определим надежность переключателя, представленного на рис. 4, *а*, *б*, зная его параметры $<q_{0i},\ q_{zi}>$, $i=1, 2, \ldots, 5$. Переключатель характеризуется тем, что замыкания элементов *2* и *3* зависимы.

Пользуясь формулами (20) и (21), как это указано на рис. 5 и 6, найдем соответственно:

$$Q_0 = q_{01}(q_{02} + q_{05} - q_{02}q_{05}) \times (q_{03} + q_{04} - q_{03}q_{04}) + (1 - q_{01})(q_{02}q_{03} + q_{04}q_{05} - q_{02}q_{03}q_{04}q_{05}); \tag{27}$$

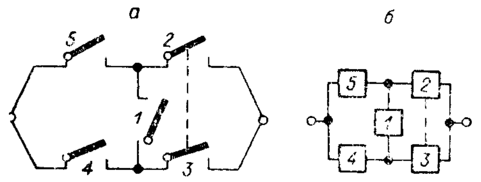


Рис. 4. Переключатель с мостовой структурой:
а — скелетная схема; *б* — схема для расчета надежности.

$$Q_z = q_{z1}(q_{z2} + q_{z3} - q_{z2}q_{z3})(q_{z4} + q_{z5} - q_{z4}q_{z5}) + (1 - q_{z1}) \times [q_{z2}(q_{z4} + q_{z5} - q_{z4}q_{z5}) + (1 - q_{z2})q_{z3}q_{z4}]. \tag{28}$$

Для $q_{0i} = q_0$ и $q_{zi} = q_z$, $i=1, 2, \ldots, 5$, определим:

$$Q_0 = 2q_0^2 + 2q_0^3 - 5q_0^4 + 2q_0^5; \tag{29}$$

$$Q_z = 3q_z^2 - q_z^3 - 2q_z^4 + q_z^5. \tag{30}$$

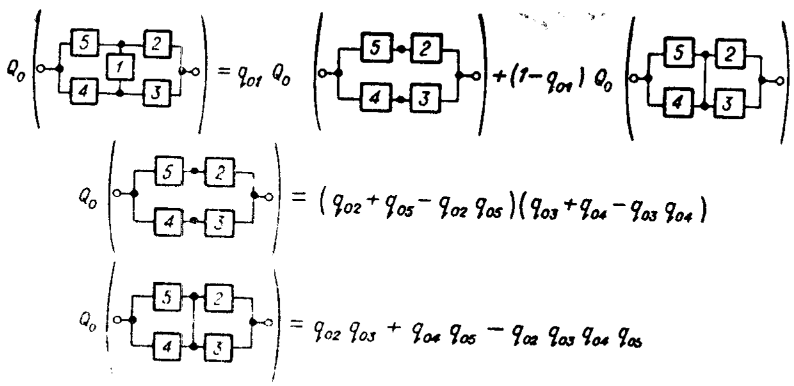


Рис. 5. Метод определения вероятности переключателя Q_0.

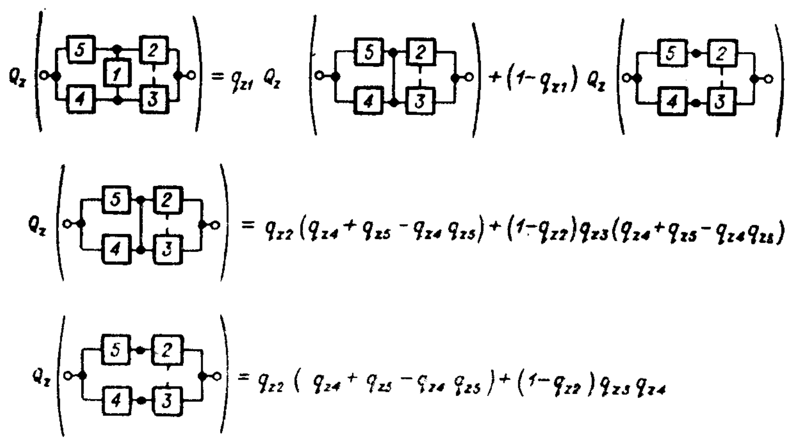
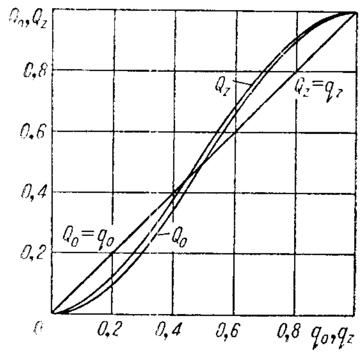


Рис. 6. Метод определения вероятности переключателя Q_z.

На основании выражений (29) и (30) построены графики зависимостей $Q_0 = f(q_0)$ и $Q_z = \varphi(q_z)$ (рис. 7). Из графиков видно, для каких значений $< q_0, q_z >$ имеем выигрыш в надежности рассматриваемого переключателя в сравнении с одноэлементным.



В случае независимых повреждений элементов переключателя (также от короткого замыкания)

$$Q_{zn} = 2q_z^2 + 2q_z^3 - 5q_z^4 + 2q_z^5. \qquad (31)$$

Сравнивая (30) и (31), получим $Q_z > Q_{zn}$. Это означает, что применение элементов с независимыми повреждениями увеличивает надежность переключателя.

Рис. 7. График зависимостей $Q_0 = f(q_0)$ и $Q_z = \varphi(q_z)$.

Поступила в редакцию
15 марта 1970 г.