



ПРИМЕНЕНИЕ ЭВП И ГРП В АППАРАТУРЕ

УДК 621.3.019

В. В. Кривцов, В. И. Гуревич

К расчету оптимального по надежности числа последовательно соединенных элементов РЭА

Описан метод оптимизации числа последовательно соединенных элементов радиоэлектронной аппаратуры, включаемых на неизменное напряжение. Приведен пример практической реализации метода.

Одним из методов повышения надежности работы цепочки последовательно соединенных элементов, включаемой на неизменное напряжение постоянного или переменного тока, является использование схемной избыточности [1], т. е. увеличение числа приборов в цепи с целью снижения их коэффициента нагрузки. Очевидно, что уменьшение коэффициента нагрузки отдельного элемента цепочки ведет к увеличению вероятности его безотказной работы. В рассматриваемом случае уменьшение коэффициента нагрузки обусловливается увеличением числа элементов в последовательном соединении, что снижает вероятность безотказной работы цепочки в целом.

Таким образом, возникает задача определения такого числа последовательно соединенных элементов, при котором вероятность безотказной работы устройства будет максимальной, т. е. модули изменения вероятности безотказной работы соответственно от снижения коэффициента нагрузки отдельного прибора и увеличения их числа в последовательном соединении будут равны друг другу. По сути сформулированная задача является задачей оптимального нагруженного резервирования, однако формального ее решения в данной постановке нами не было выявлено, хотя общие подходы имеются в ряде работ [1—3].

Как известно, под отказом элемента в электротехнике и электронике понимают, как правило, его пробой (короткое замыкание) или обрыв*. Если для отдельного элемента вероятность отказов в виде пробоев обозначить q_{ni} , а вероятность отказов в виде обрывов q_{oi} , то общая вероятность отказа q_i определится как $q_i = q_{ni} + q_{oi}$, а схема замещения цепочки, содержащей N последовательно соединенных элементов, может быть представлена в виде, изображенном на рис. 1.

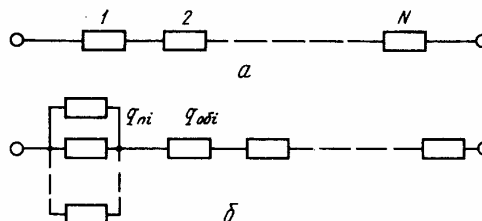


Рис. 1. Схема замещения (б) последовательной цепочки элементов (а), имеющих два вида отказов

Считая вероятности отказов отдельных элементов равными друг другу, можно записать выражение для общей вероятности соответственно параллельной и последовательной частей схемы замещения:

$$q_n = (q_{ni})^N;$$

$$q_o = 1 - (1 - q_{oi})^N.$$

Тогда вероятность отказов всей цепочки будет

$$q = (q_{ni})^N + 1 - (1 - q_{oi})^N,$$

а вероятность безотказной работы

* Рассмотрение «деградационных» отказов, связанных с изменением параметров приборов во времени, не входит в задачу настоящего исследования.

$$P = 1 - q = (1 - q_{oi})^N - q_{ni}^N = P_{oi}^N - (1 - P_{ni})^N, \quad (1)$$

где P_{oi} и P_{ni} — вероятность отсутствия соответственно обрыва и пробоя отдельного элемента.

Абстрагируясь от периода приработки прибора и считая интенсивность отказов λ_i неизменяющейся во времени, можно утверждать [4—6], что λ_i зависит от коэффициента нагрузки прибора K_n и средней температуры Θ . Анализ априорной информации [1, 5, 6] показал, что для основных видов приборов, используемых в электротехнике и электронике (резисторы, конденсаторы, диоды, тиристоры, транзисторы), такая зависимость в общем виде может быть аппроксимирована выражением

$$\lambda_i = \frac{\lambda'_o}{AA'} \exp(BK_n + B'\Theta), \quad (2)$$

где λ'_o — средняя* интенсивность отказов для приборов определенного вида и типа; Θ — средняя температура работы приборов определенного вида и типа; A , B и A' , B' — эмпирические коэффициенты, характеризующие зависимость интенсивности отказов приборов определенного вида и типа соответственно от коэффициента нагрузки ($B > 1$) и температуры ($B' > 1$).

Для упрощения дальнейшего анализа, с учетом того, что зависимость от температуры в данном случае не влияет на поиск оптимального N , представим выражение (2) в виде

$$\lambda_i = \frac{\lambda}{A} e^{BK_n}, \quad (3)$$

где

$$\lambda = \frac{\lambda'_o}{A'} e^{B'\Theta}$$

Исходя из сформулированной задачи, коэффициент нагрузки отдельного элемента цепочки можно определить следующим образом:

$$K_n = \frac{U_n}{U_{ni}N} = U'N^{-1}, \quad (4)$$

где U_n — напряжение, прикладываемое к цепочке последовательно соединенных элементов; U_{ni} — номинальное напряжение отдельного элемента цепочки.

С учетом (3) формула (4) примет вид

$$\lambda_i = \frac{\lambda}{A} \exp(BU'N^{-1}). \quad (5)$$

Следует заметить, что соотношение указанных типов отказов электронных и электротехнических приборов зависит от вида прибора. Действительно, для ключевых полупроводниковых приборов, например, наиболее вероятным отказом является пробой, для резисторов — обрыв и т. д. Так как оба вида отказов исключают друг друга, то в общем случае:

$$\lambda_{ni} = C\lambda'_{oi}; \quad \lambda_{oi} = (1 - C)\lambda'_{oi}, \quad (6)$$

где λ_{ni} , λ_{oi} — интенсивность соответственно пробоев и обрывов для отдельного элемента; C — коэффициент пропорциональности, $C < 1$. На основании (6) можно получить выражения

$$\lambda_{ni} = \frac{C}{1 - C} \lambda_{oi}; \quad (7)$$

$$\lambda_{oi} = \frac{1 - C}{C} \lambda_{ni} \quad (8)$$

и использовать их в зависимости от того, какой вид отказа подразумевается при увеличении коэффициента нагрузки.

Предположим, что имеется цепочка из N последовательно соединенных элементов, интенсивность отказов которых в функции коэффициента нагрузки известна. Тогда вероятность безотказной работы всей цепочки в соответствии с выражениями (1), (3), (5) и (8) будет иметь вид

$$P = \exp\left(-\frac{1 - C}{C} \frac{\lambda}{A} e^{BU'N} tN\right) - \left[1 - \exp\left(-\frac{\lambda}{A} e^{BU'N} t\right)\right]^N. \quad (9)$$

Для нахождения максимума функции (9) продифференцируем ее по N :

$$\begin{aligned} \frac{\partial P}{\partial N} &= \exp\left(-\frac{1 - C}{C} \frac{\lambda}{A} e^{BU'N} tN\right) \frac{(C - 1)\lambda t}{CA} \times \\ &\times \left(e^{BU'N} - \frac{1}{N} e^{BU'N}\right) + \frac{1}{N} \frac{\lambda}{A} t \times \\ &\times \left[1 - \exp\left(-\frac{\lambda}{A} e^{BU'N} t\right)\right]^{N-1} \times \\ &\times \exp\left(-\frac{\lambda}{A} + e^{BU'N}\right) \exp\left(\frac{BU'}{N}\right). \end{aligned}$$

После ряда последовательных преобразований получим

$$\frac{\partial P}{\partial N} = XY, \quad (10)$$

где

$$X = -\frac{\lambda}{A} t \frac{1}{N} \exp\left[\frac{BU'}{N} \left(1 - \frac{\lambda}{A} t\right)\right];$$

* Отдельные авторы приводят зависимости с учетом максимальной, а не средней интенсивности отказов λ_{\max} .

$$Y = \frac{1-C}{C} (N-1) \exp \times \\ \times \left[-\frac{\lambda}{A} t e^{BU'/N} \frac{1-C}{C} (N-1) \right] - \\ - \left[1 - \exp \left(-\frac{\lambda}{A} t e^{BU'/N} \right) \right]^{N-1}.$$

Условие существования экстремума функции можно сформулировать следующим образом: функция имеет экстремум, если модуль ее производной в окрестности критической точки тоже имеет экстремум (минимум), т. е.

$$\lim_{N \rightarrow N_{\text{опт}}} \left| \frac{\partial P}{\partial N} \right| \rightarrow \min. \quad (11)$$

Анализ выражения (10) с точки зрения условия (11) показал, что множитель Y представляет собой функцию, монотонно возрастающую относительно N , и, следовательно, принципиально не может сводить к минимуму (10). Множитель X неоднозначно зависит от N , и, таким образом, именно он определяет условие (11). Поэтому дифференцируя X по N

$$\frac{\partial X}{\partial N} = \frac{\lambda t}{AN^2} e^{\frac{BU'}{N}} \left(1 - \frac{\lambda}{A} t \right) \left[1 + \frac{BU'}{N} \left(1 - \frac{\lambda}{A} t \right) \right]$$

и приравнявая полученное выражение к нулю, находим $N_{\text{опт}}$:

$$N_{\text{опт}} = U' B \left(1 + \frac{\lambda}{A} t \right). \quad (12)$$

Покажем справедливость полученного выражения на примере оптимизации числа последовательно соединенных тиристоров в стационарном режиме их работы [5], при котором в отличие от циклического и перегрузочного режимов и режима импульсного циклирования подразумевается, что надежность отдельного прибора определяется его средней температурой и коэффициентом нагрузки.

В качестве исходных принимаем следующие данные:

1. Зависимость интенсивности отказов от коэффициента нагрузки по напряжению [7]

$$\lambda = \frac{\lambda_{\text{max ти}}}{8,196} e^{2,179 K_n},$$

где $\lambda_{\text{max ти}}$ — максимальная интенсивность отказов для определенного типа тиристоров.

2. Соотношение отказов по видам (пробой и обрывы) соответственно [4, 8] 90 и 10%.

3. Интенсивность отказов конкретного типа тиристоров (на примере Т132-25-18 [5, 8]):

$$\lambda_{\tau} = 1,6 \cdot 10^{-6} \frac{1}{4}; \quad t = 10^4 \cdot 4.$$

На основании приведенных данных вероятность безотказной работы цепочки тиристоров Т132-25-18 равна

$$P_{\tau} = \exp \left[-0,0002 N \exp \left(2,179 \frac{U'}{N} \right) \right] - \\ - \left\{ \left[1 - \exp \left[-0,003 \exp \left(2,179 \frac{U'}{N} \right) \right] \right] \right\}^N, \quad (13)$$

а их оптимальное число при превышении напряжения источника питания (напряжение одного прибора), например в 5 раз, составит

$$N_{\text{опт}} = 5 \cdot 2,179 \left(1 + \frac{1,6 \cdot 10^{-6}}{8,196} 10^4 \right) = 11.$$

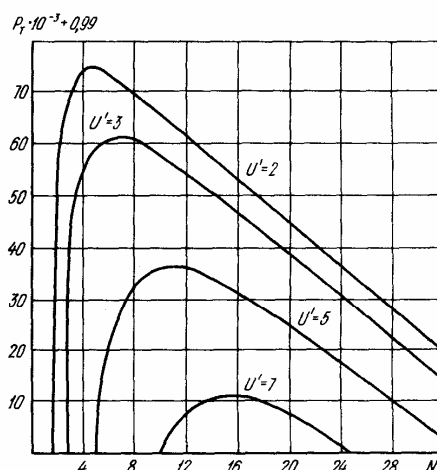


Рис. 2. Относительное значение вероятности безотказной работы тиристоров Т132-25-18 от их числа в последовательном соединении при различных кратностях напряжения источника питания

На рис. 2 приведена графическая интерпретация выражения (13) при различных значениях соотношения напряжений источника питания и отдельного тиристора (следует помнить, что ординаты экстремумов относительны, т. е. не учитывают влияния температуры).

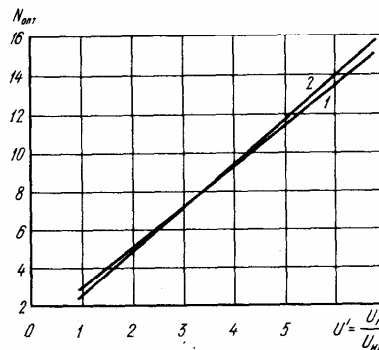


Рис. 3. Зависимость оптимального по надежности числа последовательно соединенных тиристоров типа Т132-25-18 от кратности напряжения источника питания:

1 — построенная по абсциссам экстремумов P_{τ} ; 2 — построенная по формуле (12)

Зависимость абсцисс ($N_{\text{опт}}$) экстремумов P_T от соотношения U_n/U_c , построенная на основании данных рис. 2, а также аналогичная зависимость, выполненная на основании (12), показаны на рис. 3. Как видно из рисунка, обе зависимости хорошо согласуются друг с другом.

Таким образом, выражение (12) достаточно просто и в то же время нетривиально связывает оптимальное число последовательно включаемых приборов с их характеристиками, что позволяет определить такое их количество, при котором надежность всей цепочки будет максимальной.

ЛИТЕРАТУРА

1. Широков А. Н. Основы надежности эксплуатации электронной аппаратуры. — Минск: Наука и техника. — 1975. — 175 с.

2. Базовский И. Надежность. Теория и практика. — М.: Мир. — 1965. — 373 с.

3. Сотсков Б. С. Основы теории и расчета надежности элементов и устройств автоматики и вычислительной техники. — М.: Высшая школа. — 1970. — 270 с.

4. Бардин В. М. Надежность силовых полупроводниковых приборов. — М.: Энергия. — 1978. — 96 с.

5. Григорьев А. М., Погасий Е. Ф. Оценка эксплуатационной надежности силовых полупроводниковых приборов // Труды ВЭИ. — 1980. — Вып. 90. — С. 125 — 134.

6. Григорьев А. М., Баранчикова О. В., Шпер В. Л. Влияние статистического разброса параметров силовых полупроводниковых приборов на их надежность // Труды ВЭИ. — 1980. — Вып. 90. — С. 135—144.

7. Замятин В. Я., Кондратьев Б. В., Петухов В. М. Мощные полупроводниковые приборы. Тиристоры. — М.: Радио и связь. — 1988. — 576 с.

8. Гуревич В. И., Савченко П. И. Надежность геркотронов и системы управления на их основе: Совершенствование оборудования сельскохозяйственных предприятий и аграрных комплексов. — М.: 1982. С. 78—79.

Статья поступила в сентябре 1990 г.