АКАДЕМИЯ НАУК СССР
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
АВТОМЕТРИЯ

№ 1 1970

УДК 681.142.642.7+621.374.325.4

К. Г. БОРИСОВ, В. И. КОРНЕЙЧУК,
Л. С. СИТНИКОВ, Л. Л. УТЯКОВ

(Киев)

О НАДЕЖНОСТИ ФАЗОИМПУЛЬСНЫХ МНОГОУСТОЙЧИВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Несмотря на эффективность применения многоустойчивых элементов в цифровой технике, практически важная проблема их надежности до настоящего времени почти не освещена.

В статье рассмотрены вопросы надежности фазоимпульсных многоустойчивых элементов (ЭФМ) и показаны технические решения, позволяющие существенно увеличить их надежность при постепенных отказах. Термин «надежность» здесь и дальше используется в узком смысле (как безотказность [1]) и оценивается вероятностью безотказной работы.

Поскольку фазоимпульсные элементы допускают значительное число принципиально различных схемных реализаций, оценки надежности будем производить на примере хорошо зарекомендовавшей себя ячейки [2], принципиальная схема и временные диаграммы работы которой приведены на рис. 1, *а* — *в*. Ячейка представляет собой релаксационный

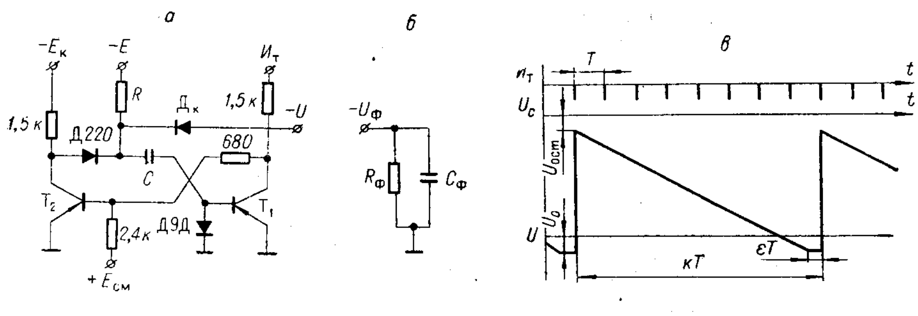


Рис. 1.

синхронизированный генератор, работающий в режиме деления частоты следования импульсов $И_т$, поступающих на вход синхронизации. Транзистор T_1 нормально открыт током заряда накопительного конденсатора C, протекающим через переход эмиттер — база, в результате чего синхроимпульсы не проходят на разрядный транзистор T_2. При достижении напряжением U_C на накопительном конденсаторе величины, достаточной для открывания диода $Д_к$, на анод которого подается опорное напряжение U, ток заряда прекращается, транзистор T_1 закрывается и очередной синхроимпульс запускает разрядный транзистор. Величина U_C при заряде конденсатора C может быть представлена в виде

$$U_C = \frac{E R_i - U_{\text{ост}} (R + R_i)}{R + R_i} \left(1 - e^{-\frac{R + R_i}{R R_i C} t}\right),$$

где R_i — сопротивление утечки конденсатора C; $U_{\text{ост}}$ — остаточное напряжение на конденсаторе.

Пренебрегая величиной $U_{\text{ост}} \ll E$ и учитывая, что $R_i \gg R$, получим

$$U_C \approx E\,(1 - e^{-\frac{t}{RC}}).$$

Условия работы ячейки с заданным числом k устойчивых состояний (см. рис. 1, в) можно записать в виде

$$E\,(1 - e^{-\frac{T(k - \varepsilon)}{RC}}) = U + U_{\text{д}}\ (0 < \varepsilon < 1),$$

где $U_{\text{д}}$ — падение напряжения на диоде $Д_{\text{к}}$. Учитывая, что $E \gg U \gg U_{\text{д}}$, указанные два условия могут быть сведены к соотношению

$$k > \frac{URC}{ET} > k + 1. \qquad (1)$$

Для оценки надежности ЭФМ предположим, что внезапные отказы и отказы, вызванные постепенными отклонениями параметров, статистически независимы. В этом случае надежность $P(t, k)$ ЭФМ с числом k устойчивых состояний можно представить как

$$P(t, k) = P_1(t, k) P_2(t, k), \qquad (2)$$

где P_1 и P_2 — надежности ЭФМ при внезапных и постепенных отказах. Так как количество компонентов схемы не зависит от числа устойчивых состояний, в первом приближении можно считать, что надежность P_1 также не зависит от k. Надежность P_2 при постепенных отказах равна вероятности того, что m-мерный вектор $\vec{A}(t)$, определяющий работоспособность ЭФМ, находится в заданной m-мерной области $D(k)$, т. е.

$$P_2(t, k) = P\,\{\vec{A}(t) \in D(k)\},$$

где $\vec{A}(t) = (A_1(t), A_2(t), \ldots, A_m(t))$; $A_i(t) = \varphi_j(a_1(t), a_2(t), \ldots, a_n(t)) \times (j = 1, 2, \ldots, m)$; $a_i(t)\ (i = 1, 2, \ldots, n)$ — параметры компонентов схемы ЭФМ; n — число компонентов.

Из приведенных выше условий работоспособности ЭФМ следует, что в данном случае $A(t) \approx \frac{URC}{ET}$, а область $D(k)$ является одномерной и определяется из неравенства (1), т. е.

$$k - 1 < A(t) < k. \qquad (3)$$

Начальное значение величины $A(t)$ обозначим $A_0 = A(0)$; тогда при $A_0 \neq 0$

$$P_2(t, k) = P\{A_0(1 - \mu(k)) < A(t) < A_0(1 + \mu(k))\} =$$

$$= P\left\{\left|\frac{A(t) - A_0}{A_0}\right| < \mu(k)\right\},$$

где $A_0(1-\mu(k))$ и $A_0(1+\mu(k))$ — границы допустимых значений величины $A(t)$.

Изменения параметров $a_i(t)$ во времени в первом приближении можно представить [3] в виде

$$a_i(t) = (a_{i0} \pm \Delta a_{i0})(1 + X_i t),$$

где X_i — случайная величина с плотностью распределения $f_i(x)$, а Δa_{i0} обусловливается погрешностью в установке параметра $a_i(t)$ и его изменениями под влиянием допустимых колебаний температуры и других физических факторов внешней среды. Поскольку $\Delta a_{i0} \ll a_{i0}$ и $X_i t \ll 1$, то

$$A(t) = \varphi(a_1(t), a_2(t), \ldots, a_n(t)) \approx A_0 + \sum_{i=1}^{n} (a_{i0} X_i t \pm \Delta a_{i0}) B_i,$$

где $$A_0 = \varphi(a_{10}, a_{20}, \ldots, a_{n0}), \quad B_i = \frac{\partial \varphi(a_{10}, a_{20}, \ldots, a_{n0})}{\partial a_i};$$

отсюда

$$P_2(t, k) = P\left\{ |Y| < \frac{\mu(k) - \Delta A}{t} \right\}, \tag{4}$$

где $$Y = \sum_{i=1}^{n} \frac{a_{i0} B_i}{A_0} X_i; \quad \Delta A = \sum_{i=1}^{n} \left| \frac{B_i \Delta a_{i0}}{A_0} \right|.$$ В нашем случае

$$A(0) = \frac{U_0 R_0 C_0}{E_0 T_0}; \quad Y = X_U + X_R + X_C - X_E - X_T;$$

$$\Delta A = \frac{\Delta U_0}{U_0} + \frac{\Delta R_0}{R_0} + \frac{\Delta C_0}{C_0} + \frac{\Delta E_0}{E_0} + \frac{\Delta T_0}{T_0}. \tag{5}$$

Пусть плотность $f(y)$ распределения случайной величины Y является четной функцией. Тогда для обеспечения максимума вероятности безотказной работы необходимо выбрать рабочую точку в центре области $D(k)$, т. е.

$$\frac{U_0 R_0 C_0}{E_0 T_0} = \frac{2k-1}{2},$$

откуда

$$\mu(k) = \frac{1}{2k-1}, \tag{6}$$

где U_0, R_0, C_0, E_0 и T_0 — значения параметров U, R, C, E и T при $t=0$; ΔU_0, ΔR_0, ΔC_0, ΔE_0 и ΔT_0 — погрешности в установке соответствующих параметров и допуски на их изменение под воздействием колебаний температуры и других дестабилизирующих факторов; X_U, X_R, X_C, X_E, X_T — коэффициенты стабильности соответствующих параметров.

Из выражения (4) следует [4], что при заданном t существует максимально допустимое для ЭФМ число k_m состояний, для которого еще выполняется условие

$$P_2(t, k_m) > 0,$$

но уже

$$P_2(t, k_m + 1) = 0.$$

С учетом (4) последнее выражение приводит к неравенству

$$\mu(k_m + 1) - \Delta A \leqslant 0, \tag{7}$$

из которого вытекает, что значение k_m следует определить, как целую часть корня уравнения $\mu(k) - \Delta A = 0$.

Если каждый из членов суммы в выражении (5) имеет порядок 0,01, то из (6) и (7) вытекает, что максимально допустимое число k состояний ЭФМ равно примерно десяти.

Интересно отметить, что в ряде случаев внезапные отказы оказывают преобладающее влияние на общую надежность. Действительно, примем надежность при постепенных отказах какого-либо узла a равной единице. Пусть интенсивность внезапных отказов узлов a и b равны соответственно λ_a и λ_b, причем $\lambda_a > \lambda_b$; тогда

$$r(t) = \frac{P_b(t)}{P_a(t)} = \frac{P_{1b}(t)}{P_{1a}(t)} P_{2b}(t) = e^{\lambda t} P_{2b}(t), \tag{8}$$

где $\lambda = \lambda_a - \lambda_b > 0$. Для десятичного ЭФМ (узел b) в соответствии с выражениями (4), (6) имеем

$$P_{2b}(t) = P\left\{|Y| < \frac{1 - 19\,\Delta A}{19t}\right\} = \int_{-\alpha}^{+\alpha} f(y)\,dy, \tag{9}$$

где

$$\alpha = \frac{1 - 19\,\Delta A}{19t}.$$

Если $f(y)$ непрерывна в точке $y=0$ и $\alpha(0) \neq 0$, то на основании теоремы о среднем из (8) и (9) получаем $r(t) = e^{\lambda t}\, 2\alpha f(\xi)$, где $|\xi| < \alpha$ и при $t \to \infty$ $\xi \to 0$.

Так как $f(0) \neq 0$, то найдется такое число $\delta \neq 0$, для которого $f(\xi) \geqslant \delta$, т. е. $r(t) \geqslant e^{\lambda t}\, 2\alpha\delta$.

Следовательно, при $t \to \infty$ $r(t) \to \infty$. Это означает, что начиная с некоторого значения t_0 P_b будет больше P_a. При малых значениях t соответствие между P_b и P_a сильно зависит от λ, ΔA и $f(y)$.

На рис. 2 показаны графики функции $r(t)$ в предположении, что случайная величина Y распределена по нормальному закону с дисперсией σ^2 и средним значением $M(Y) = 0$. Как видно из рис. 2, фазоимпульсные многоустойчивые элементы на основе емкостного накопителя могут иметь большую надежность, чем с тем же числом устойчивых со-

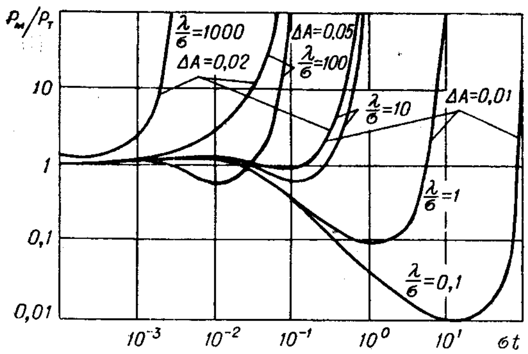


Рис. 2.

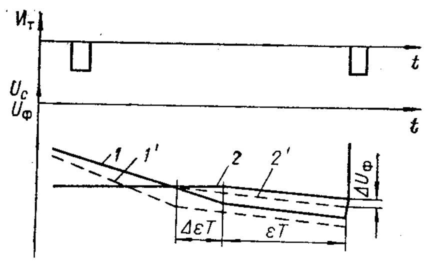


Рис. 3.

стояний устройства на двоичных триггерах, при условии, что использованы высокостабильные компоненты, а их начальные параметры соответствуют номинальным значениям. Однако на практике указанные условия неприемлемы при организации промышленного выпуска ЭФМ небольшой стоимости, пригодных для массового использования.

В связи с этим в последние годы авторами велась интенсивная работа по увеличению схемной надежности многоустойчивых элементов и, в первую очередь, по устранению критичности ЭФМ к нестабильности параметров схемы.

Одно из наиболее радикальных решений поставленной задачи заключается во введении в схему ЭФМ цепи автоподстройки [5], в результате чего любые влияния дестабилизирующих факторов компенсируются изменением величины управляемого сигнала, например напряжения компарации, на выходе цепи автоподстройки. В простейшем случае указанная цепь представляет собой фильтр нижних частот с большой постоянной времени, подключаемый к фазоимпульсному элементу с емкостным накопителем вместо внешнего источника напряжения компарации. Для элемента памяти на рис. 1, *а* режим автоподстройки может быть введен путем подключения к аноду диода $Д_к$ RC-цепи, изображенной на рис. 1, *б*.

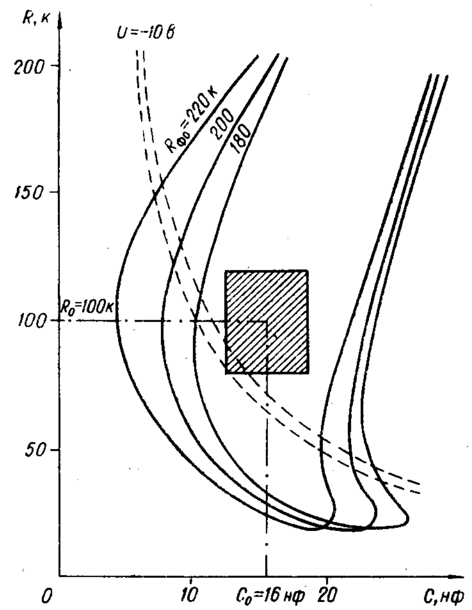
Рассмотрим на примере изменения величины емкости C механизм действия автоподстройки. В данном случае напряжение на конденсаторе C (линия *1* на рис. 3) после достижения величины, достаточной для открывания диода $Д_к$, не остается неизменным, а продолжает возрастать в течение времени εT одновременно с напряжением на конденсаторе фильтра $C_ф$ (линия *2*), но крутизна изменения, а следовательно, и ток базы транзистора T_1 уменьшаются в $\frac{C + C_ф}{C}$ раз. При $C_ф \gg C$ практически весь ток от источника через сопротивление R идет на заряд конденсатора фильтра, вследствие чего элемент срабатывает точно так же, как и в рассмотренном ранее случае без цепи автоподстройки. Если параметры схемы остаются без изменений, то работе элемента с коэффициентом деления k соответствует такое среднее значение напряжения $U_ф$ на конденсаторе $C_ф$, что величины его приращений при заряде емкости за время εT и при разряде за время $(k - \varepsilon)T$ равны. Предположим, что под влиянием каких-либо причин величина емкости C уменьшилась. Это приводит к увеличению крутизны нарастания напряжения на конденсаторе C (линия *1'*), диод открывается раньше, и, следовательно, время заряда конденсатора $C_ф$ возрастает на величину $\Delta\varepsilon T$, что приводит к увеличению среднего значения напряжения $U_ф$ на величину $\Delta U_ф$. В итоге к моменту очередного срабатывания элемента влияние изменения емкости C оказывается скомпенсированным за счет увеличения напряжения компарации $U_ф$. Аналогично процесс увеличения емкости C приводит к уменьшению среднего значения $U_ф$. Очевидно, что процесс компенсации будет иметь место при изменении любых других параметров (R, $R_ф$, T, E и др.) в случае, если скорость этих изменений будет меньше критической, определяемой постоянной времени $\tau_ф = R_ф C_ф$.

Условия работы ячейки с цепью автоподстройки могут быть описаны теми же формулами, что и для ячейки по рис. 1, *а*, если вместо величины U подставить значение $U_ф$, определяемое из равенства величин приращений напряжений на конденсаторе $C_ф$ при заряде и разряде, т. е.

$$\frac{E\,T\,(k - \varepsilon)}{R\,C} = \frac{\varepsilon R_ф E}{\varepsilon R_ф + k R} + U_д;\ 0 < \varepsilon < 1.$$

Как видно из аналитической записи, основными параметрами схемы, определяющими требуемый режим работы, являются величины накопительной емкости C и сопротивлений R и $R_ф$.

На рис. 4 представлены области устойчивой работы десятичного



элемента памяти по схеме рис. 1 (в качестве диода $Д_к$ использован диод типа Д220, транзисторы T_1 и T_2 типа П416Б, номинальные значения напряжений $E_к$, E и $E_{см}$ соответственно —12,5 *в;* —100 *в* и +1,5 *в*, номинальная частота синхронизирующих импульсов — 100 *кгц*, $C_ф$= =1 *мкф*) в плоскости параметров R и C при различных значениях $R_ф$. Для сравнения штриховой линией показана область устойчивой работы ЭФМ без автоподстройки. Границы заштрихованной прямоугольной области соответствуют уходу параметров от номинальных значений на ±20%. Как видно из рисунка, введение автоподстройки расширяет область устойчивой работы ЭФМ в 10—15 раз.

Рис. 4.

ЛИТЕРАТУРА

1. Надежность технических систем и изделий. Терминология.— Сборник рекомендуемых терминов, вып. 67 а. «Наука», 1965.
2. К. Г. Борисов, В. И. Корнейчук, Л. С. Ситников, А. Г. Скорик, Л. Л. Утяков. Электронная клавишная суммирующая машина.— В сб. «Механизация и автоматизация управления». Киев, УкрНИИНТИ, 1968, № 3.
3. Г. В. Дружинин. Надежность устройств автоматики. М.— Л., «Энергия», 1964.
4. В. И. Корнейчук. Надежность и оптимальное число состояний многоустойчивых элементов.— Автоматика и вычислительная техника (Рига), 1968, № 5.
5. Л. С. Ситников, Л. Л. Утяков, С. Е. Токовенко. Метод стабилизации коэффициента деления фазоимпульсных многоустойчивых схем.— Автоматика и телемеханика, 1969, № 7.

Поступила в редакцию
15 октября 1968 г.,
окончательный вариант —
30 июля 1969 г.