

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРОМЕЖУТОЧНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

УДК 621.373.5 : 621.318.57

И. Г. СЕМЕНЕНКО

(Киев)

АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТЕЙ ВРЕМЯЗАДАЮЩИХ УСТРОЙСТВ С ИНТЕГРИРУЮЩЕЙ ЕМКОСТЬЮ

Времязадающие устройства с интегрирующей емкостью находят самое широкое применение в измерительной технике и автоматике. Этим устройствам посвящен целый ряд исследований, например [1—3]. Тем не менее удобные аналитические выражения для количественной оценки погрешности от утечки времязадающего конденсатора и погрешности от элементов схемы, характеризующихся неизменным током утечки, в литературе отсутствуют.

Попыткой восполнить указанный пробел и является данная работа. Кроме того, анализ ведется не только для схем с убывающим в течение выдержки времени током через конденсатор, но также и для схем с постоянным и даже нарастающим током. Как будет показано, эти схемы, особенно последняя, имеют принципиальное преимущество.

Схема времязадающего устройства в общем виде показана на рис. 1. Она содержит емкость C , генератор «зарядного» тока I и пороговый элемент Π с нестабильностью срабатывания по напряжению ΔU . На схеме также показаны сопротивление утечки R_y и генератор тока утечки I_y . Будем считать, что R_y и I_y не зависят от напряжения на конденсаторе U_C .

Погрешности выдержки времени зависят от дестабилизирующих факторов, характеризуемых значениями ΔU , R_y и I_y , от конструктивных параметров — величин выдержки времени T и емкости C и от выбранного режима работы, определяемого напряжениями: U_n — начального, U_k — конечного и U_m — максимально возможного перепада на емкости. Соотношение этих напряжений можно выразить через коэффициенты $k = \frac{U_k - U_n}{U_m}$ и $n = -\frac{U_n}{U_m}$. При $n \leq 0$ получаем схемы с зарядом емкости, при $n \geq k$ — с разрядом и при $0 < n < k$ — с перезарядом.

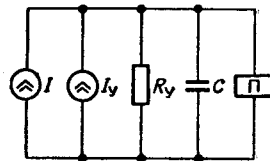


Рис. 1.

При изменении напряжения срабатывания порогового элемента на величину ΔU на такую же величину изменится напряжение U_k , в результате чего появится относительная погрешность выдержки времени δ_n . При малых значениях ΔU

$$\delta_n = \frac{\Delta T}{T} = \frac{\Delta U}{T} \frac{dT}{dU_k}$$

Эта формула приводится к следующему виду:

$$\delta_n = \frac{\Delta U}{U_m} \varphi(k), \quad (1)$$

где $\varphi(k)$ — функция, зависящая только от k . Из (1) видно, что существенным методом уменьшения погрешности является увеличение U_m , что достигается обычно увеличением напряжения питания. В схемах, использующих перезаряд конденсатора, можно при том же напряжении питания увеличить U_m в два раза.

Найдем выражение $\varphi(k)$ для различных зависимостей $I = f(U_c)$.

А. Наибольшее распространение получили схемы, у которых ток I и напряжение U_c связаны следующей зависимостью [1, 2]:

$$I = \frac{E - U_c}{R}, \quad (2)$$

где E — постоянное напряжение; R — времязадающее сопротивление. Для этих схем $U_m = E - U_n$, а выдержка времени в нормальных условиях составляет

$$T = RC \ln \frac{1}{1 - k}. \quad (3)$$

Отсюда получаем [2], что

$$\varphi(k) = \frac{1}{(1 - k) \ln \frac{1}{1 - k}}. \quad (4)$$

Характерной особенностью этой зависимости (рис. 2, кривая 1) является наличие пологого участка в области, близкой к оптимальному значению $k = 0,63$, что позволяет изменять k в широких пределах без значительного увеличения погрешности δ_n .

Б. Реже встречаются схемы [3], у которых

$$i = i_0. \quad (5)$$

Из формулы выдержки времени

$$T = \frac{(U_k - U_n) C}{I_0}$$

находим следующее выражение для $\varphi(k)$ (см. рис. 2, кривая 2):

$$\varphi(k) = \frac{1}{k}. \quad (6)$$

Сравнив выражения (4) и (6), можно заключить, что при одинаковой нестабильности порогового устройства погрешность δ_n меньше при постоянном «зарядном» токе.

В. До настоящего времени не нашли распространения схемы, у которых ток I увеличивается в течение выдержки времени. Пример такой схемы приведен на рис. 3. Для нее

$$I = \frac{(E + U_C)(a + 1)}{R}, \quad (7)$$

где a — коэффициент усиления усилителя постоянного тока (УПТ). Учитывая, что для данного случая $U_M = E + U_C$, а выдержка времени определяется выражением (3), находим

$$\varphi(k) = \frac{1}{\ln \frac{1}{1-k}}. \quad (8)$$

Как видно из рис. 2 (кривая 3), данная схема имеет минимальную чувствительность к уходу напряжения срабатывания порогового устройства. С увеличением k погрешность δ_n падает и теоретически может быть сведена к нулю. Однако из-за несовершенства усилителей постоянного тока практически получить $k=1$ невозможно, но даже при $k=0,9$ имеем в два раза меньшую погрешность, чем в предыдущем случае.

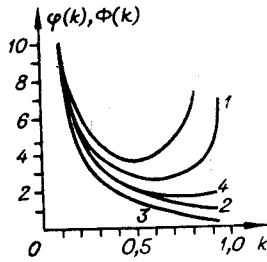


Рис. 2.

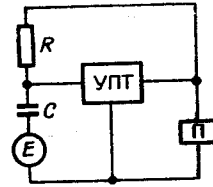


Рис. 3.

ВЛИЯНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ УТЕЧКИ

Под сопротивлением утечки R_y будем понимать как внутреннее сопротивление утечки конденсатора, так и сопротивление утечки внешних устройств, подключенных параллельно ему. Пусть в схеме рис. 1 $I_y = 0$; тогда формула выдержки времени в общем виде может быть представлена следующим образом:

$$T = C \int_{U_n}^{U_k} \frac{dU_C}{f(U_C) - \frac{U_C}{R_y}}.$$

Разложив выражение под интегралом в степенной ряд, получим

$$T = C \sum_{i=0}^{\infty} \frac{1}{R_y^i} \int_{U_n}^{U_k} \frac{U_C^i dU_C}{[f(U_C)]^{i+1}}.$$

Отсюда найдем относительную погрешность выдержки времени δ_y , обусловленную изменением сопротивления утечки от ∞ до R_y :

$$\delta_y = \frac{T_y - T}{T} = \sum_{i=1}^{\infty} m^i F_i(k, n), \quad (9)$$

$$\text{где } m = \frac{T}{R_y C}; \quad F_i = \frac{\int_{U_n}^{U_k} \frac{U_c^i d U_c}{[f(U_c)]^{i+1}}}{\left[\int_{U_n}^{U_k} \frac{d U_c}{f(U_c)} \right]^{i+1}} \quad \text{— функция, зависящая от } k \text{ и } n.$$

При малых значениях m можно использовать только первый член выражения (9)

$$\delta_y = m F_1(k, n). \quad (10)$$

Теперь можно сделать следующие выводы: 1) погрешность δ_y пропорциональна выдержке времени T ; 2) так как для заданного конденсатора гарантируемое значение $R_y C$ есть величина постоянная, то при отсутствии внешней утечки погрешность δ_y зависит от выбранного типа конденсатора, а не от величины его емкости; 3) если R_y — внешнее сопротивление, то погрешность δ_y обратно пропорциональна величине емкости C .

Значения k и n могут быть выбраны таким образом, что

$$F_1(k, n) = 0. \quad (11)$$

В этом случае при малых m

$$\delta_y = m^2 F_2(k, n). \quad (12)$$

Перейдем к анализу влияния сопротивления утечки для конкретных зависимостей $I = f(U_c)$. В качестве критерия примем значение функций $F_1(k, n)$ и $F_2(k, n)$. При заданном m , чем меньше значение этих функций, тем меньше относительная погрешность δ_y .

А. Когда справедливо (2), из (10) получаем

$$F_1(k, n) = \frac{\frac{(1-n)k}{1-k} - \ln \frac{1}{1-k}}{\ln^2 \frac{1}{1-k}}. \quad (13)$$

На рис. 4 представлены зависимости (13) для $n=0$ (кривая 1), $n=1$ (кривая 2) и $n=k$ (кривая 3). Характерной особенностью кривой 1, как и рассматриваемой ниже кривой 8, по сравнению с остальными кривыми, является увеличение абсолютного значения $F_1(k, n)$ с ростом k . Приравняв числитель равенства (13) к нулю, получим n , при котором выполняется условие (11):

$$n = 1 - \frac{1-k}{k} \ln \frac{1}{1-k}.$$

Для данного случая

$$F_2(k, n) = \frac{(2-k) \ln \frac{1}{1-k} - 2k}{2k \ln^2 \frac{1}{1-k}}. \quad (14)$$

Как видно из рис. 5 (кривая 1), уменьшение погрешности δ_y при перезаряде связано не только с квадратом величины m , но и с малым значением $F_2(k, n)$. Необходимо отметить, что значения $F_2(k, n)$ в формуле (14) при практических значениях k мало зависят от его величины.

Б. Если ток через конденсатор определяется равенством (5), то

$$F_1(k, n) = \frac{2k - n}{2k}. \quad (15)$$

Зависимость (15) для $n=0$, $n=1$ и $n=k$ представлена на рис. 4 кривыми 4, 5 и 6. Кривая 2 на рис. 5 соответствует $n=0,5$, при котором $F_1(k, n)=0$, а

$$F_2(k, n) = 0,083. \quad (16)$$

Сравнив зависимости (13) и (15), (14) и (16), видим, что схемы с постоянным током имеют преимущество только при заряде ($n=0$) конденсатора.

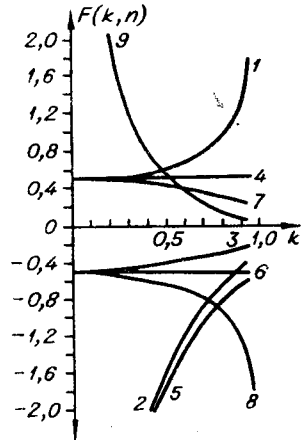


Рис. 4.

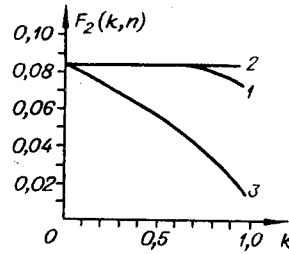


Рис. 5.

В. При токе через конденсатор, определяемом выражением (7),

$$F_1(k, n) = \frac{\ln \frac{1}{1-k} - \frac{k(1-k+n)}{1-k}}{\ln^2 \frac{1}{1-k}}. \quad (17)$$

Зависимость (17) представлена на рис. 4 кривыми 7 для $n=0$ и 8 для $n=k$, которые симметричны соответственно кривым 3 и 1 относительно оси абсцисс.

Г. Рассмотрим схему с перезарядом конденсатора (рис. 6), в которой разрядный ток изменяется по закону (2), причем $n=k$, а зарядный ток — по закону (7). На рис. 6 полярность напряжения на конденсаторе указана в исходном состоянии. Если коэффициенты k на участке разряда и заряда равны и коэффициент усиления $a=2$, то $F_1(k, n)=0$, а

$$F_2(k, n) = \frac{2 \ln \frac{1}{1-k} - k(2+k)}{8 \ln^3 \frac{1}{1-k}}. \quad (18)$$

Как видно из рис. 5 (см. кривую 3), при любом значении k получаем наименьшую погрешность δ_y .

Д. Особый интерес представляют схемы, у которых ток I через конденсатор меняет полярность в течение выдержки времени. Для построения таких схем требуются два пороговых элемента, один из которых яв-

ляется вспомогательным (Π_B) для переключения схемы с заряда на разряд, второй (Π_H) — исполнительным. Некоторое усложнение схемы при этом компенсируется отсутствием предварительного, а при необходимости и окончательного заряда емкости. Но наиболее важным достоинством таких схем является возможность компенсации влияния не только сопротивления утечки R_y , но и тока утечки I_y . Рассмотрим

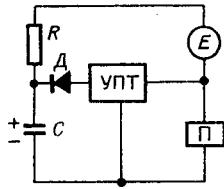


Рис. 6.

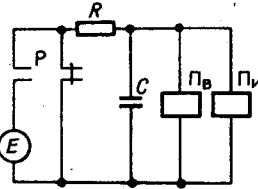


Рис. 7.

только одну схему (рис. 7) последовательного заряда — разряда конденсатора через одно и то же сопротивление R . Переключение с заряда на разряд производится с помощью контактов P , управляемых пороговым элементом Π_B . Пусть на участке заряда емкости $k=k_1$, $n=0$, а при разряде $k=k_2$, $n=1$. В этом случае $F_1(k, n) = 0$, если

$$\frac{k_1}{1-k_1} \ln \frac{1}{1-k_1} = \ln \frac{1}{1-k_2}. \quad (19)$$

При выполнении этого условия

$$F_2(k, n) = \frac{1-k_1}{2k_1}. \quad (20)$$

Графически зависимость (20) дана на рис. 4 кривой 9. Возможно построение схем с изменением полярности тока I , у которых значение $F_2(k, n)$ не уступает приведенным на рис. 5.

ВЛИЯНИЕ ПОСТОЯННОГО ТОКА УТЕЧКИ

Пусть в течение выдержки времени имеется постоянный по величине и направлению ток утечки I_y . Тогда при $R_y = \infty$ формула для определения выдержки времени будет иметь вид

$$T_y = C \int_{U_H}^{U_K} \frac{dU_C}{f(U_C) - I_y}$$

После разложения в степенной ряд получим

$$T_y = C \sum_{i=0}^{\infty} I_y^i \int_{U_H}^{U_K} \frac{dU_C}{[f(U_C)]^{i+1}}$$

Отсюда найдем выражение для относительной погрешности δ_y , обусловленной изменением тока утечки от 0 до I_y :

$$\delta_y = \frac{T_y - T}{T} = \sum_{i=1}^{\infty} I_y^i \Phi_i(k), \quad (21)$$

где

$$l = \frac{T I_y}{C U_m}; \quad \Phi_1(k) = \frac{U_m^l \int_{U_H}^{U_K} \frac{d U_C}{[f(U_C)]^{l+1}}}{\left[\int_{U_H}^{U_K} \frac{d U_C}{f(U_C)} \right]^{l+1}}.$$

При малых l можно ограничиться только первым членом выражения (21):

$$\delta_y = l \Phi_1(k). \quad (22)$$

Из (22) видно, что в первом приближении погрешность δ_y пропорциональна выдержке времени T и обратно пропорциональна емкости C и напряжению U_m . Если ток I в течение выдержки времени меняет свою полярность, то коэффициенты k на участках заряда и разряда емкости могут быть выбраны так, что $\Phi_1(k) = 0$. В этом случае для малых значений l

$$\delta_y = l^2 \Phi_2(k). \quad (23)$$

Рассмотрим, как зависят $\Phi_1(k)$ и $\Phi_2(k)$, а следовательно, и погрешность δ_y от коэффициента k .

А. Если ток I определяется равенствами (2) или (7), а напряжение на конденсаторе изменяется плавно, то

$$\Phi_1(k) = \frac{k}{(1-k) \ln^2 \frac{1}{1-k}}. \quad (24)$$

Зависимость (24) имеет пологий участок в области, близкой к оптимальному значению k , что хорошо видно из рис. 2 (кривая 4). При постоянном токе I (5)

$$\Phi_1(k) = \frac{1}{k}. \quad (25)$$

Эта зависимость совпадает с выражением (6).

Б. Из схем с компенсацией тока утечки I_y остановимся только на рассматриваемой нами в п. Д предыдущего раздела. Для данного случая $\Phi_1(k) = 0$, если

$$k_2 = \frac{k_1^2}{k_1^2 - k_1 + 1}. \quad (26)$$

Решим совместно уравнения (19) и (26). При $k_1 = 0,64$ и $k_2 = 0,53$ получим одновременную компенсацию влияния сопротивления утечки и тока утечки I_y . В этом случае

$$\Phi_2(k) = \frac{1}{(1-k_1)^2 \ln \frac{1-k_1+k_1^2}{(1-k_1)^2}}. \quad (27)$$

Графически зависимость (27) представлена на рис. 2 кривой 5.

В качестве примера рассмотрим возможность формирования интервалов времени порядка 10 мин. Применим конденсатор, у которого

$R_y C = 5000$ сек. Для выдержки времени $T = 10$ мин $m = 0,12$. Для схемы, приведенной в [1], находим, что для любых значений $k F_1(k, n) > 0,5$ (см. рис. 4, кривая 1). Следовательно, относительная погрешность δ_y больше 6%. Применив же схему с перезарядом емкости [2], при выполнении условия (11) из (12) и (14) находим, что для любых значений k погрешность δ_y меньше 0,12%. Аналогично нетрудно показать, что для реальных значений токов утечки I_y выдержка времени 10 мин в схеме с компенсацией (см. рис. 7) может быть получена также с погрешностью, меньшей 1%.

ВЫВОДЫ

Получены формулы и графики, которые позволяют определить погрешности в зависимости от дестабилизирующих факторов, конструктивных параметров и выбранного режима работы.

Показано, что наиболее перспективны схемы с нарастающим зарядным током.

Предложены времязадающие устройства (см. рис. 6 и 7), позволяющие существенно уменьшить погрешности, вызванные утечками.

ЛИТЕРАТУРА

1. Р. А. Липман. Полупроводниковые реле. М.—Л., Госэнергоиздат, 1963.
2. Е. И. Малаховский. Исследование стабильности реле времени с электрическим контуром RC .—Электричество, 1965, № 8.
3. З. П. Важенина. Фантастические генераторы. М., «Советское радио», 1965.

*Поступила в редакцию
4 ноября 1968 г.,
окончательный вариант —
12 июня 1969 г.*