

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОРОГОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ ВЫПРЯМЛЕНИЯ ТОКОВ АСИММЕТРИЧНОЙ ФОРМЫ

Для преобразования переменного тока в постоянный (выпрямления) обычно используются различные выпрямители: вакуумные и полупроводниковые диоды, электромеханические контактные элементы (коллекторы, реле) и т. д. Они получили всеобщее признание и широко используются в различных областях электротехники и электроники.

В ряде случаев для выпрямления переменного тока оказывается целесообразнее применять пороговые элементы. К ним относятся два или несколько встречно-включенных кремниевых стабилитронов, параллельно-соединенные кремниевые диоды и некоторые другие элементы, позволяющие получить «ограничение снизу» [1].

Подобные пороговые выпрямители (ПВ) обладают рядом особых свойств, которые и обуславливают их применение. ПВ могут быть использованы в цепях переменного или импульсного тока, форма которых несимметрична относительно осей координат. Такой ток получается при прохождении последовательности треугольных, трапецеидальных, экспоненциальных и различных других импульсов через реактивные элементы: трансформатор или емкость (рис. 1).

Постоянная составляющая этого сложного по спектральному составу тока равна нулю.

Принцип действия ПВ можно пояснить, рассматривая рис. 1 а.

При включении в цепь, на которую воздействует импульсное напряжение треугольной формы, порогового элемента с порогом ограничения снизу равным h , баланс положительных и отрицательных токов за период нарушается. В цепи появляется постоянная составляющая тока, пропорциональная разности площадей АВС и ДЕKL.

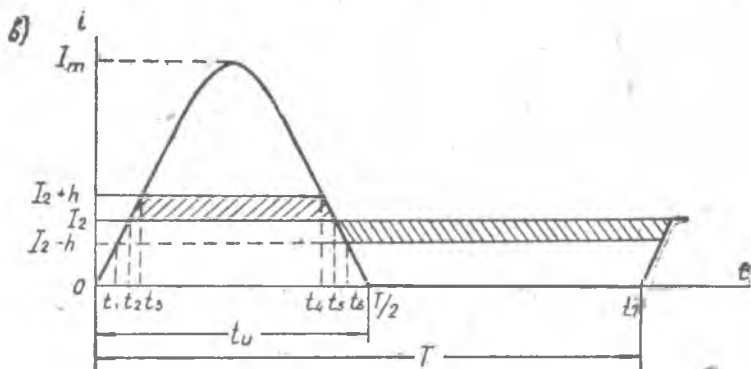
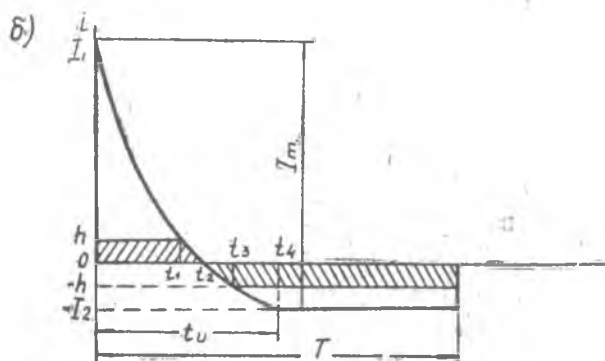
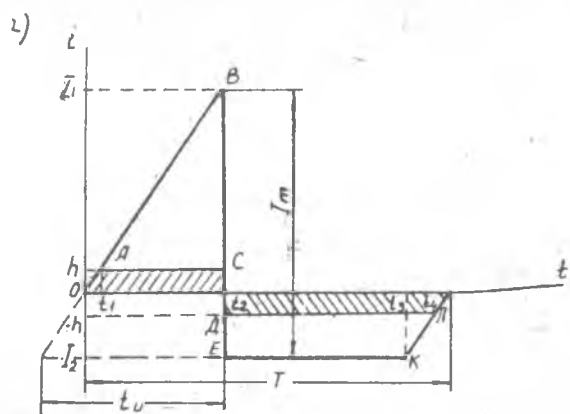


Рис. 1.

Если относительно выбранной системы координат (i, t) периодическая функция $i = f_1(t) \geq 0$ описывает закон изменения амплитуды импульсного тока одного направления, а $i = f_2(t) \leq 0$ — другого, то в стационарном режиме, исходя из условия равенства нулю среднего тока за период, всегда можно записать следующие равенства:

$$I_m = (I_1) + (I_2); \quad (1)$$

$$\frac{1}{T_0} \int f_1(t) dt = \frac{1}{T_0} \int f_2(t) dt. \quad (2)$$

Здесь I_m — сумма абсолютных значений амплитуд положительного и отрицательного импульсов.

Уравнение (2) выражает условие равенства нулю среднего тока за период T .

Уравнения (1) и (2) позволяют аналитически определить величины I_1 , I_2 и, если известна, — I_m . Заметим, что I_m определить опытным путем значительно проще, чем I_1 и I_2 . Зная величину порога ограничения снизу h , можно найти величину среднего тока I_0 в нагрузке, как отношение разности оставшихся после ограничения площадей положительного и отрицательного импульсов. Аналитически это можно записать так:

$$I_0 = \frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_2} f_1(t) dt - \frac{1}{T} \int_{t_3}^{t_4} f_2(t) dt, \quad (3)$$

где пределы интегрирования t_1 , t_2 , t_3 , t_4 определяются из уравнений:

$$\left. \begin{aligned} h &= f(t_1) = f_1(t_2) \\ -h &= f_2(t_3) = f_2(t_4) \end{aligned} \right\} 0 \leq t \leq T \quad (4)$$

Изложенная методика позволяет определить величину среднего тока за период, если известен закон изменения амплитуды импульсов.

Рассмотрим несколько конкретных последовательностей импульсов, распространенных на практике, и выведем формулу среднего тока, используя вышеизложенную методику.

1. Импульсный ток треугольной формы (рис. 1, а).

Постоянная составляющая выпрямленного тока за период или среднее значение тока I_0 определится согласно выражению (3) как отношение абсолютной разности площадей ABC и DEKL к периоду следования импульсов:

$$I_0 = \frac{1}{T} \left[(I_1 - h) \left(\frac{t_2 - t_1}{2} \right) - (I_2 - h) \left(\frac{t_3 + t_5}{2} - t_2 \right) \right]. \quad (5)$$

Все обозначения приведены на рис. 1, а и не требуют пояснения. Исходя из условия равенства площадей положительного и отрицательного импульсов за период

$$\frac{I_1 \cdot t_2}{2} = I_2 (I - t_4) - I_2 \frac{T - t_3}{2}.$$

и учитывая, что

$$i = \frac{I_m}{t_u} \cdot f \quad \text{при } nT \leq f \leq (nT + fu), \quad (6)$$

получим:

$$I_1 = I_m \left(1 - \frac{f_u}{2T}\right), \quad (7)$$

$$I_2 = I_m \cdot \frac{f_u}{2T}. \quad (8)$$

Подставляя уравнения (6), (7), (8) в (5) * и преобразуя полученное выражение, получим формулу для среднего тока:

$$T_0 = \frac{I_m t_u}{2T} \left[a^2 - b^2 - \frac{2b(T - t_u)}{t_u} \right], \quad (9)$$

где $a = 1 - \frac{t_u}{2T} - \frac{h}{I_m} = \frac{1}{I_m} (I_1 - h)$,

$$b = \frac{t_u}{2T} - \frac{h}{I_m} = \frac{1}{I_m} (I_2 - h);$$

В частном случае, когда $h \geq I_2$, формула (9) приобретает вид:

$$I_0 = \frac{I_m t_u a^2}{2T} = \frac{t_u (I_1 - h)^2}{2T I_m} \quad (10)$$

Следует отметить, что несмотря на то, что вывод формулы (6) был сделан для конкретной формы треугольных импульсов с угловым коэффициентом равным $\frac{I_m}{t_u}$ (рис. 1, а), выражение для I_0 справедливо для любой другой формы треугольных импульсов. Необходимым условием при этом является выполнение неравенства $(T - t_u) > 0$.

Этот факт следует из известной теоремы о равенстве площадей треугольников, имеющих одинаковые основания и высоту.

2. Последовательность экспоненциальных импульсов (рис. 1 в). Будем считать, что амплитуда экспоненциальных импульсов изменяется в диапазоне $I_m \leq i \leq 0, 1 I_m$. Закон изменения тока имеет вид

$$i = I_m e^{-\alpha t},$$

где α — показатель затухания экспонента, определяющий длительность импульса t_u .

Среднее значение выпрямленного тока

$$I_0 = \frac{1}{T} \left[\frac{I_m}{\alpha} (1 - e^{-\alpha t}) - (I_2 + h) t_1 - (T - t_3)(I_2 - h) + \right. \\ \left. + \frac{I_m}{\alpha} (e^{-\alpha t_3} - e^{-\alpha t_4}) \right]. \quad (11)$$

Уравнение (2) в данном случае запишется следующим образом:

$$\frac{I}{\alpha} (1 - e^{-\alpha t_2}) - I_2 t_2 = I_2 (T - t_2) - \frac{I_m}{\alpha} (e^{-\alpha t_3} - e^{-\alpha t_4}). \quad (12)$$

Учитывая, что $I_2 = I_m e^{-\alpha t_2}$ и $0,1 I_m = I_m e^{-\alpha t_1}$, получим из уравнения (12) выражение для величины амплитуды отрицательного импульса

$$I_2 = \frac{0,9 I_m}{\alpha T} \quad (13)$$

Принимая во внимание, что $I_2 + h = I_m e^{-\alpha t}$, $I_2 - h = I_m e^{-\alpha t_1}$, и подставляя (13) в (11) имеем окончательно:

$$I_0 = \frac{I_m}{\alpha T} \left[0,9 - c \left(1 + \ln \frac{1}{c} - d \left(T \alpha - \ln \frac{1}{d} - 1 \right) \right) \right], \quad (14)$$

где $c = \frac{0,9}{\alpha T} + \frac{h}{I_m}$; $d = \frac{0,9}{\alpha T} - \frac{h}{I_m}$;

В частном случае, при $h \geq I_2$

$$I_0 = \frac{I_m}{\alpha T} \left[1 - c \left(1 + \ln \frac{1}{c} \right) \right]. \quad (15)$$

3. Последовательность однополупериодных синусоидальных импульсов (рис. 1 в).

Для упрощения вывода формулы среднего тока систему координат $i, \omega t$ выберем так, как это показано на рис. 1 в. Закон изменения тока в принятой системе координат имеет вид

$$\begin{aligned} i &= I_m \sin \omega t \quad \text{при } nT < t < nT + \pi \\ i &= 0 \quad \text{при } nT + \pi < t < (n+1)T. \end{aligned}$$

Запишем условие (2) в виде:

$$\int_{t_1}^{t_2} I_m \sin \omega t dt - I_2 \left(\frac{T}{2} - 2t_2 \right) = I_2 \left(\frac{T}{2} - 2t_1 \right) - 2 \int_0^{t_1} I_m \sin \omega t dt.$$

Решая это уравнение относительно величины I_2 , получим:

$$I_2 = \frac{2I_m}{\omega T}. \quad (16)$$

Используя очевидные соотношения:

$$\begin{aligned} \int_0^{t_1} I_m \sin \omega t dt &= \frac{1}{\omega} (I_m - \sqrt{I_m^2 - (I_2 - h)^2}); \\ \int_{t_1}^{t_2} I_m \sin \omega t dt &= \frac{1}{\omega} (I_m - \sqrt{I_m^2 - (I_2 + h)^2}). \end{aligned}$$

получим согласно уравнению (2) формулу для среднего тока I_0 , которая после незначительных преобразований имеет вид

$$\begin{aligned} I_0 = \frac{2I_m}{\omega T} \left[\sqrt{1 - \left(\frac{I_2 + h}{I_m} \right)^2} - \frac{I_2 + h}{I_m} \cdot \left(\frac{T\omega}{2} - 2t_3\omega \right) - \frac{I_2 - h}{T_m} \left(\frac{\omega T}{4} - \omega t_1 \right) + \right. \\ \left. + \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{I_2 - h}{I_m} \right)^2} \right) \right], \quad (17) \end{aligned}$$

где моменты времени t_1 и t_3 для главных значений обратных тригонометрических функций определяются по формулам:

$$t_1 = \frac{1}{\omega} \arcsin \frac{I_2 - h}{I_m};$$

$$t_3 = \frac{1}{\omega} \arcsin \frac{I_2 + h}{I_m};$$

При $h \geq T_2$ формула среднего тока записывается несколько проще:

$$I_0 = \frac{2I_m}{\omega T} \left[\sqrt{1 - \left(\frac{I_2 + h}{I_m} \right)^2} - \frac{I_2 + h}{I_m} \left(\frac{T\omega}{4} - \omega t_3 \right) \right]. \quad (18)$$

Анализ выражений (3), (9), (14) и (16) позволит сделать следующие выводы в отношении величины выпрямленного среднего тока.

Средний ток в значительной мере зависит от произведения разности амплитуд положительного и отрицательного импульсов на разность их длительностей.

Для треугольных импульсов эта зависимость пропорциональна, а для экспоненциальных и синусоидальных импульсов пропорциональность нарушается при больших диапазонах изменения амплитуды I_m .

Оптимальной формой импульсов с точки зрения получения наибольшей величины выпрямленного среднего тока являются экспоненциальные импульсы.

Особенностью ПВ является наличие зоны нечувствительности, равной по абсолютной величине $2h$. Коэффициент выпрямления у ПВ ниже, чем у обычных вентильных элементов. Кроме того, ПВ

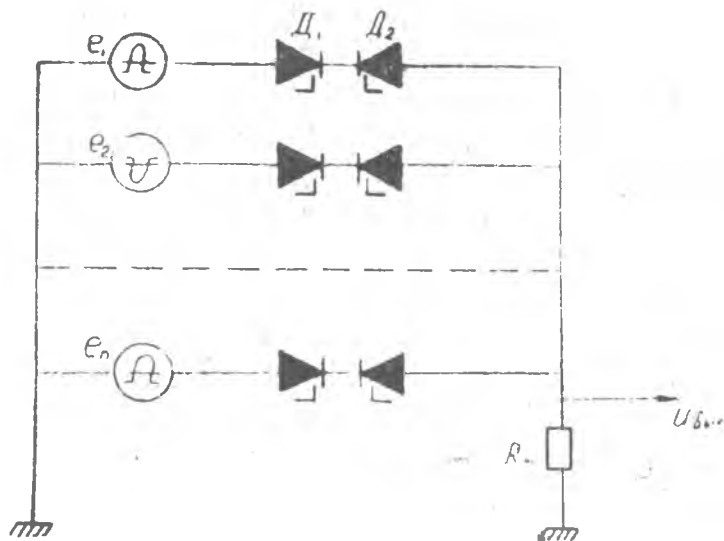


Рис. 2.

можно использовать только в цепях, где действуют импульсные ЭДС. Специальной формой (рис. 1) эти особенности и определяют область применения ПВ, а именно: цепи управления и сигнализации в автоматических системах, информационно-измерительные сети и т. д., то есть, где энергетические соображения не играют решающего значения. Использование кремниевых стабилитронов делает ПВ достаточно простыми и надежными.

Рассмотрим на конкретном примере практическое использование ПВ. На рис. 2 показана схема сумматора для импульсов различной полярности с использованием ПВ на кремниевых стабилитронах D_1 и D_2 .

Он отличается тем, что при $U_{ст} > U_{вых}$, где $U_{ст}$ — напряжение стабилизации, источники входных сигналов $e_1, e_2, \dots, e_n$ практически не имеют гальванических связей, так как сопротивление связи равно обратному сопротивлению кремниевых стабилитронов, которое составляет 10^{10} ом [2]. Этого нельзя добиться применением одних вентилях средств. Для развязки цепей в таких случаях, как правило, используются дополнительные каскады, которые усложняют схему.

Экспериментальная проверка приведенных формул для величины среднего тока ПВ подтверждает их достоверность. На рис. 3 показаны графики зависимостей $I_0 = f(I_m)$ для схемы (рис. 2) одного из каналов сумматора с пороговыми элементами, выполненных на кремниевых стабилитронах типа Д818. Входное напряже-

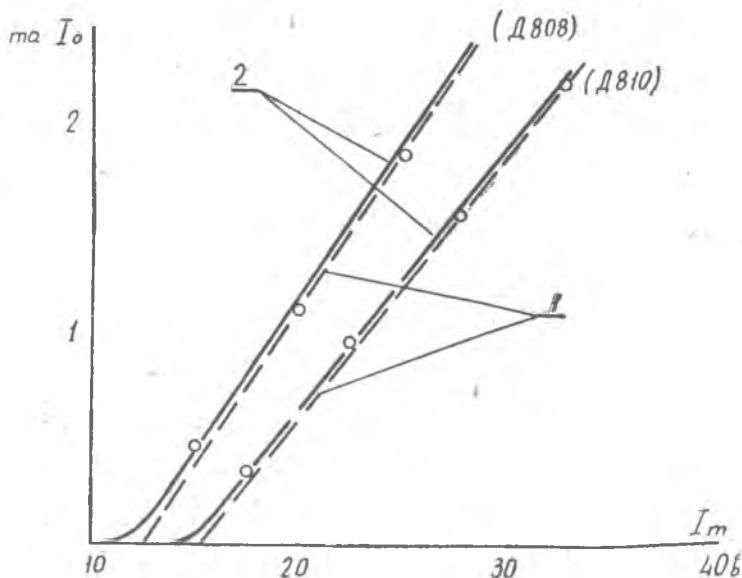


Рис. 3.

ние $e = E_m \sin \omega t$ через выпрямитель подавалось на первичную обмотку трансформатора. Со вторичной обмотки напряжение в виде однополупериодных синусоидальных импульсов подавалось на ПВ и далее на активную нагрузку $R_A = 1 \text{ ком}$.

Средний выпрямленный ток измерялся магнитоэлектрическим прибором типа М252.

Расчетное значение среднего тока рассчитывалось по формуле (6).

Теоретическая (1) и экспериментальная (2) кривые не отличаются более чем на 5%. Различие вызвано в основном инструментальными погрешностями.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. М. Мишин. Нелинейные формирователи на плоскостных диодах. Радиотехника, № 8, 1964.

2. Г. М. Веденеев, В. Е. Вершинин. Кремниевые стабилитроны. М.-Л. ГЭИ, 1961.