

ЭЛЕКТРОННЫЙ КОММУТАТОР

В. К. ЖУКОВ

(Представлена научным семинаром факультета автоматики и вычислительной техники)

Измерение малых приращений емкостей и индуктивностей можно производить с высокой точностью генераторными схемами, используя метод автоматического замещения [3], сущность которого заключается в поочередном подключении контролируемой и эталонной индуктивностей (или емкостей) к измерительному генератору. Реализация этого метода возможна при наличии коммутатора, удовлетворяющего следующим условиям: так как переключение производится в потенциальных цепях генератора (по напряжению высокой частоты), ключ коммутатора должен быть слабо связан с точками нулевого потенциала, то есть должен иметь большое активное и реактивное сопротивление связи с «землей» генератора на частотах в десятки мегагерц; прямое сопротивление ключа коммутатора оказывается включенным последовательно в колебательный контур генератора, поэтому, чтобы не вносить в него значительное затухание, это сопротивление должно быть малым; для надежного отключения коммутируемого элемента обратное сопротивление ключа должно быть большим. Этим требованиям лучше всего будет удовлетворять электромеханический коммутатор на базе электродвигателя. Однако он имеет низкую частоту переключения, большие габариты и ненадежен в работе.

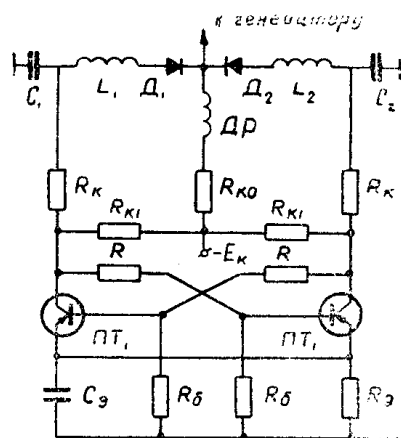


Рис. 1. Принципиальная схема коммутатора.

В качестве ключей коммутатора используются точечные полупроводниковые диоды D_1 и D_2 , имеющие малое дифференциальное сопротивление в открытом состоянии. Из диодов, выпускаемых отечественной промышленностью, в этом отношении лучшими являются диоды Д11 и Д13. На рис. 2 представлены вольтамперные характеристики отобранных диодов типа Д13 при температуре 20°C и 60°C . При постоянном токе через диоды 50 ма и $T=20^\circ\text{C}$ они имеют дифференциальное сопротивление менее 2 ом. Изменение температуры на 40°C вызывает уменьшение сопротивления $r_{пр-1}$ диода D_1 на (0,12) ом, а сопротивле-

ния $r_{пр.2}$ диода D_2 на (0,11) ом, разность же $r_{пр.1} - r_{пр.2}$ изменяется не более чем на 0,01 ом. Последнее обстоятельство особенно важно в данном случае, так как оно означает, что температурные зависимости диодов будут слабо влиять на разность частот пакетов, вырабатываемых генератором. В закрытом состоянии диод представляет большое активное сопротивление, зашунтированное емкостью р—п-перехода, которая для диодов Д13 не превышает 1 пф.

Коммутирующие диоды включены в коллекторные цепи триггера. Когда триод ПТ₁ открыт, к диоду D_1 приложено напряжение в прямом направлении, поэтому он также находится в открытом состоянии. Индуктивность L_1 через малое сопротивление открытого диода подключается к контуру генератора. В это время другой триод ПТ₂ находится в закрытом состоянии и на диод D_2 подается запирающее напряжение. Индуктивность L_2 подключается к контуру генератора через большое сопротивление закрытого диода, поэтому оно практически не влияет на частоту генератора.

Для получения напряжения запирающих диоды используются сопротивления $R_{к0}$ и $R_{к1}$. Когда один триод открыт, например ПТ₁, а другой закрыт, падение напряжения на сопротивлении $R_{к0}$, создаваемое коллекторным током открытого триода, превышает падение напряжения на сопротивлении $R_{к1}$, вызванное током базы открытого триода. В результате диод D_2 оказывается запертым. Открывание триода ПТ₂ и закрывание ПТ₁, сопровождается, соответственно, отпиранием D_2 и запирающим D_1 . Высокочастотный дроссель D_p служит для развязки цепей генератора и триггера с целью исключения влияния последнего на частоту генерируемых колебаний.

Чтобы цепь открытого ключа не шунтировала источник запирающего напряжения закрытого ключа, используются конденсаторы C_1 и C_2 .

Для получения основных расчетных соотношений рассмотрим эквивалентную схему триггера, представленную на рис. 3. Предположим, что триод ПТ₁ открыт, а ПТ₂ закрыт. Для получения стабильного режима работы триггера необходимо добиваться состояния насыщения открытого триода. Потенциалы коллектора и базы насыщенного триода мало отличаются от потенциала эмиттера, поэтому триод можно рассматривать как точку с единым потенциалом всех электродов. За-

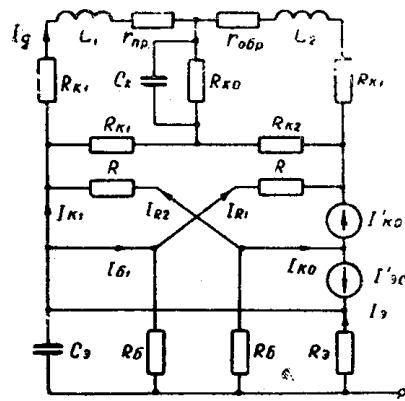


Рис. 3. Эквивалентная схема коммутатора.

крытый триод заменен двумя генераторами тока $I'_{к0}$ и $I'_{э}$. В [1] показано, что ток базы закрытого триода $I_б = I_{к0}$, где $I_{к0}$ температурный ток коллекторного перехода.

Триод ПТ₂ будет надежно заперт при условии, если потенциал базы положителен относительно эмиттера, т. е. $U_{бэ} \geq 0$. Полагая $I_{к1} \approx I_{э1} \gg I_{к0}$ и $I_{к1} \gg I_{R1}$ из эквивалентной схемы триггера можно получить

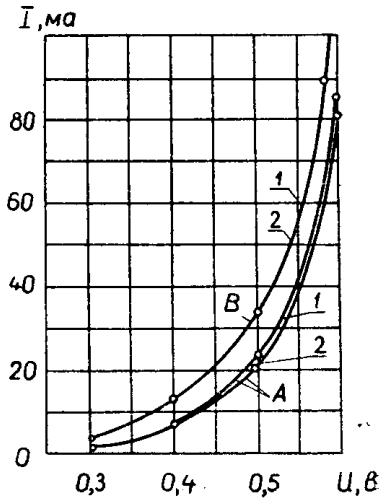


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики диодов: А — при 20°C, В — при 60°C.

$$(I_{k0} + I_{R2}) \cdot R_6 + I_{R2} \cdot R = I_{k1} \cdot R_3. \quad (1)$$

Коллекторный ток триода в режиме насыщения

$$I_{k1} = \frac{E_k}{R_3 + R_{кэ}}, \quad (2)$$

где через $R_{кэ}$ обозначено эквивалентное сопротивление коллекторной нагрузки, равное

$$R_{кэ} = \frac{(R_k + R_{к0})R_{к1}}{R_k + R_{к0} + R_{к1}}. \quad (3)$$

Прямое сопротивление диода $r_{пр} \ll R_k$, поэтому оно не учитывается при определении $R_{кэ}$.

Из выражения (1) с учетом (2) находим

$$U_{62} = I_{R2} \cdot R = R \frac{E_k \cdot R_3 - I_{k0} \cdot R_6 (R_3 + R_{кэ})}{R_3 + R_{кэ}}. \quad (4)$$

Для выполнения условия $U_{62} \gg 0$ необходимо, чтобы числитель выражения (4) был больше нуля, откуда получаем условие запираания триода

$$R_3 > \frac{R_6 \cdot R_{кэ} \cdot I_{k0}}{E_k - I_{k0} \cdot R}. \quad (5)$$

Открытый триод будет находиться в состоянии насыщения в случае, если его базовый ток

$$I_6 \geq \frac{E_k}{\beta(R_{кэ} + R_3)}. \quad (6)$$

Из эквивалентной схемы триггера следует

$$R_3(I_{k1} + I_{61}) + R \cdot I_{R1} + R_{к1}(I_{R1} + I'_{к0}) = E_k \quad (7)$$

и

$$I_{R1} = I_{61} + \frac{R_3(I_{k1} + I_{61})}{R_6}. \quad (8)$$

Полагая $I_{k1} \gg I_{61}$ и $I_{k1} = \beta \cdot I_{61}$ из уравнений (7) и (8) после преобразований получаем

$$I_{61} = \frac{E_k}{\beta \cdot R_3 + R + R_{к1}}. \quad (9)$$

Триод будет находиться в режиме насыщения, если полученное выражение для I_6 превышает величину $E_k / \beta(R_3 + R_{кэ})$, что выполняется, когда

$$R \ll \beta \cdot R_{кэ} - R_{к1}. \quad (10)$$

Это и будет условие насыщения открытого триода.

В момент опрокидывания триггера оба коммутирующих диода открыты. Напряжение на конденсаторе C_k во время регенеративной стадии не успевает измениться, поэтому эквивалентное сопротивление коллекторной нагрузки каждого триода равно

$$R'_{кэ} = R_k || R_{к1} = \frac{R_k \cdot R_{к1}}{R_k + R_{к1}}. \quad (11)$$

Величина $R'_{кэ}$ меньше $R_{кэ}$, определяемого выражением (3), в силу чего выполнение условий надежного запираания закрытого триода (5)

и насыщения открытого (10) может оказаться недостаточным для обеспечения неустойчивого состояния триггера, когда оба триода работают в активной области характеристик. Чтобы этого не случилось необходимо обеспечить коэффициент усиления схемы по току „К“ больше 1 (триггер состоит из 2-х каскадного усилителя, выход которого соединен со входом). Можно показать, что $\kappa = \frac{\beta \cdot R_k \parallel R_{k1}}{R + R_k \parallel R_{k1}}$

откуда неустойчивость состояний, соответствующих активной области триодов, будет иметь место при $R < \beta \cdot R_k \parallel R_{k1}$.

Выражение (13) дает несколько меньшую величину для R , чем выражение (10), поэтому в расчете необходимо пользоваться формулой (13).

Выше отмечалось, что когда один из коммутирующих диодов открыт, на другой должно подаваться запирающее напряжение. Это требование выполняется обеспечением определенного соотношения между сопротивлениями R_{k0} и R_{k1} , при котором $I_d \cdot R_{k0} > I_0 \cdot R_{k1}$ (для состояния схемы, изображенного на рис. 3). Используя выражение (2) и зависимость $I_{b1} = S \cdot I_{k1} / \beta$, где S — коэффициент насыщения триода, последнее неравенство можно преобразовать к виду

$$\beta \cdot R_{k0} > S \cdot (R_{k0} + R_k) + S \cdot R_{k1}. \quad (14)$$

Сопротивление $R_{k0} + R_k$ находится из условия обеспечения максимально-допустимого тока через открытый диод при заданном напряжении E_k , что делается с целью получения малого прямого сопротивления диода. Величина сопротивления R_{k1} должна быть значительно больше $R_{k0} + R_k$, так как в противном случае значительная часть коллекторного тока открытого триода ответвляется в R_{k1} , а если учесть, что ток через диод должен быть значительным (50 ÷ 70) ма, то становится ясным, что уменьшение R_{k1} ведет к большим коллекторным токам и к необходимости использовать мощные триоды. Однако слишком большая величина R_{k1} также нежелательна, потому что для выполнения условия запирающего диодов (14) потребуется увеличивать R_{k0} , что при неизменном токе через открытый диод связано с увеличением E_k . Можно рекомендовать значения R_{k1} равное (5 ÷ 10) · ($R_{k0} + R_k$).

Если обозначить $R_{k1} = K (R_{k0} + R_k)$, то условие (14) можно записать как

$$R_{k0} > S \frac{1 + K}{\beta} (R_{k0} + R_k), \quad (15)$$

С помощью последнего выражения, задавшись величиной коэффициента насыщения S и величиной $K = 5 \div 10$, предварительно определив $R_{k0} + R_k = E_k / I_d$, можно легко найти R_{k0} , R_k , R_{k1} соответствующие устойчивой работе триггера и обеспечивающие подачу запирающего напряжения на диоды.

Описанная схема коммутатора была применена для коммутации датчиков в приборе для измерения диаметра тонких проволок. Испытания показали, что она успешно может использоваться для переключения элементов контура в генераторе.

ЛИТЕРАТУРА

1. С. М. Герасимов, И. Н. Никулин, В. Н. Яковлев. Расчет полупроводниковых усилителей и генераторов. Гостехиздат, УССР, 1961.
2. Б. Н. Кононов. Симметричные триггеры на плоскостных полупроводниковых триодах. Госэнергоиздат, 1960.
3. В. К. Жуков, В. Э. Дрейзин, М. С. Ройтман, И. Г. Лещенко. Измерительные схемы для контроля диаметра тонких проволок методом вихревых токов (статья печатается в настоящем сборнике).