О НЕКОТОРЫХ ОСОБЕННОСТЯХ РАБОТЫ ТРАНЗИСТОРНОГО КЛЮЧА В РЕЖИМЕ ПРЕДЕЛЬНОГО БЫСТРОДЕЙСТВИЯ

Л. А. Полосухина
Харьков

В различных устройствах автоматики и вычислительной техники иногда требуется коммутация постоянного напряжения с частотой до сотен килогерц и минимальными остаточными напряжениями на коммутируемых элементах. Для этих целей наиболее пригодны диффузионные транзисторы, в которых, по справочным данным, время включения и выключения лежит в пределах 1—2 *мксек*, а остаточные напряжения можно свести к нулю. Однако на практике из-за больших сопротивлений нагрузки сказывается влияние разрядной и диффузионной составляющих емкости переходов и поэтому паспортные данные транзисторов по быстродействию без принятия специальных мер реализовать не удается.

В настоящей статье на основе рассмотрения математических зависимостей, характеризующих переходные процессы транзистора, предлагается способ получения предельного быстродействия транзисторного насыщенного ключа на диффузионных транзисторах для схем «общий эмиттер нормальное включение» и «общий эмиттер инверсное включение».

В работах [1—2] показано, что при открывании транзисторного ключа стадия формирования фронта характеризуется временем задержки $t_з$ и длительностью фронта $t_{фр}$. При значительных открывающих токах величина $t_з \ll t_{фр}$ и в расчетах ее можно не учитывать; тогда

$$t_{фр} \sim 0{,}8\,(\tau_{TN} + C_к R_к)\,\frac{I_н}{I_{б1}}, \qquad (1)$$

где τ_{TN} — среднее время пролета носителей;

$C_к$ — усредненная емкость коллекторного перехода;

$I_н$ — ток насыщения;

$R_к$ — сопротивление нагрузки.

Для схемы ОЭ-И τ_{TN} следует заменить на τ_{TI}. Методы экспериментального определения τ_{TN}, τ_{TI}, $C_к$ приведены в [2]. Очевидно [1], что минимальную длительность фронта можно получить, выбрав $I_{б1}$ максимально допустимым для рассматриваемого типа транзисторов. Для открытого состояния транзистора в установившемся режиме при условии получения минимальных остаточных напряжений требуются значительно меньшие управляющие токи $I_{б1ст}$. Поэтому в момент открывания в цепь базы следует подавать форсирующий импульс длительностью $t_{фр}$, а затем поддерживать значение, полученное из расчета статического режима. Практически при $\frac{I_{б1}}{I_{б1ст}} \sim 2—3$ длительность фронта при выключении не превышает 1,2—1,5 τ_{TN}. Методы формирования форсирующих импульсов известны; например, в ключах с гальванической связью для этих целей служит ускоряющая емкость в цепи базы. При выключении таким простым способом не удается уменьшить длительность переходного процесса ключа.

Предлагаемые ниже практические рекомендации позволяют путем некоторого изменения включения сопротивления нагрузки добиться длительности переходного процесса даже меньшей, чем справочная.

При размыкании ключа общее время выключения, как показано в работах [1—2], определяется суммой времени рассасывания и длительности среза выходного импульса. При выходе транзистора из глубокого насыщения время рассасывания

$$t_р \sim \tau_н \ln\left(1 + \frac{I_{б1ст}}{|I_{б2}|}\right), \qquad (2)$$

где $\tau_н$ — длительность накопления;

$I_{б1ст}$ — открывающий ток в статике;

$I_{б2}$ — закрывающий ток в момент выключения.

Как следует из соотношения (2), для уменьшения $t_р$ на время рассасывания в цепь базы целесообразно подавать форсирующий импульс, противоположный по полярности $I_{б1}$ и максимально допустимый для применяемых транзисторов. В практических схемах при размыкании ключа достаточно просто реализуется соотношение

$$|I_{б2}| \geqslant 2 \div 3\,|I_{б1ст}|. \qquad (3)$$

При этом время рассасывания $t_р \sim 0{,}05 \div 0{,}02$ *мксек*. К концу стадии рассасывания, если выполняется условие $I_{б2} > |I_н|\left(1 + \frac{\beta_I}{\beta_N}\right)$ для схемы

ОЭ-Н и $I_{б2} > |I_н|\left(1+\frac{\beta_N}{\beta_I}\right)$ для схемы ОЭ-И, оба перехода смещаются в область отсечки и токи коллектора и эмиттера без учета тепловых токов определяются следующим образом:

$$I_к(t'') \sim \frac{\beta_N}{\beta_I+\beta_N} I_{б2} e^{-\frac{t''}{\tau_{от.\,э}}} \text{ для схемы ОЭ-Н,} \quad (4)$$

$$I_к(t'') \sim \frac{\beta_I}{\beta_I+\beta_N} I_{б2} e^{-\frac{t''}{\tau_{от.\,э}}} \text{ для схемы ОЭ-И,} \quad (5)$$

где t'' — время с момента формирования длительности среза;

$$\tau_{от.\,э} = \tau_{от} + C_к R_к;$$

$\tau_{от}$ — постоянная отсечки, составляющая примерно 0,1 *мксек* для диффузионных транзисторов;

$R_к$ — сопротивление нагрузки;

$C_к = (C_{кр} + C_{кд})$ для схемы ОЭ-Н,

$C_к = (C_{эр} + C_{эд})$ для схемы ОЭ-И;

$C_{кр} = 2C_{к.\,диф}$ — разрядная емкость коллекторного перехода;

$C_{эр} = 2C_{э.\,диф}$ — разрядная емкость эмиттерного перехода;

$C_{кд}$, $C_{эд}$ — диффузионные емкости коллекторного и эмиттерного переходов:

$$C_{кд} \sim A_1 I_н; \quad C_{эд} \sim A_2 I_н.$$

Здесь

$$A_1 = 0{,}5\frac{\tau_{\beta N}}{I_к r_к}; \quad A_2 = 0{,}5\frac{\tau_{\beta I}}{I_к r_к},$$

где $I_к$, $r_к$ — ток коллектора и его сопротивление, при которых определяют $\tau_{\beta N}$, $\tau_{\beta I}$;

$I_н$ — ток насыщения.

Данные для определения коэффициентов A_1 и A_2, $C_{э.\,диф}$ и $C_{к.\,диф}$ приводятся в справочниках.

Анализируя выражения (4) и (5), можно сделать следующие выводы.

1. При формировании среза t'' величина и полярность коммутируемого напряжения непосредственно не влияют на его длительность.

2. Так как $I_{б2} \gg I_н$ и $\beta_I \leqslant 0{,}1\beta_N$, то в момент начала формирования среза при $t'' = 0$ в схеме ОЭ-Н формируется выброс тока, превышающий ток насыщения в 5—10 раз; в схеме же ОЭ-И этот выброс отсутствует. Поэтому в схемах быстродействующих ключей следует применять только инверсное включение, а управляющий ток формировать таким образом, чтобы к концу стадии рассасывания

$$I_{б2} \sim 1{,}1\text{—}1{,}2|I_н|\left(1+\frac{\beta_N}{\beta_I}\right).$$

При этом после стадии рассасывания транзистор сразу заходит в область отсечки, а амплитуда выброса еще незначительно превышает рабочий ток в открытом состоянии.

3. Длительность формирования среза в основном определяется постоянной времени $\tau_{от.\,э}$, которая равна произведению суммарной емкости коллекторного перехода на сопротивление нагрузки. В плоскостных транзисторах существенную роль играет диффузионная составляющая суммарной емкости [1]. Так как ее величина прямо пропорциональна току насыщения, то, очевидно, для уменьшения длительности среза следует уменьшить $I_н$; с другой стороны, для этой же цели необходимо умень-

шить и $R_к$. В обычных рабочих схемах оба эти требования выполнить невозможно, поэтому предлагается, задавшись определенным током насыщения, кратковременно уменьшить сопротивление нагрузки в момент начала формирования среза. Это можно сделать различными способами, например, подключив параллельно нагрузке дополнительный дрейфовый транзистор, открывать его коротким импульсом, подаваемым в цепь его базы в момент начала формирования среза основного ключа. При этом не следует опасаться короткого замыкания источника коммутируемого напряжения, так как в момент размыкания через нагрузку протекает только базовый ток. Таким способом в практических схемах длительность среза можно уменьшить до 2—3 *мксек*. Выражения (4) и (5) являются решением простейшего дифференциального уравнения вида $i' = -i\frac{1}{RC}$ с начальным условием $i_{t=0} = \frac{\beta_I}{\beta_I + \beta_N} I_{б2}$, где $t = 0$ соответствует началу формирования среза и переходу транзистора в область отсечки, а эквивалентная схема представляет собой параллельно соединенные емкость $C_к$ и сопротивление нагрузки. Из подобной схемы вытекает очевидность того, что на этапе формирования среза длительность запирания не зависит от коммутируемого напряжения, а определяется только $C_к R_к$. От постороннего источника э. д. с. можно создать ток, противоположно направленный току разряда и изменяющийся так, чтобы за время среза потенциал между точками соединения $C_к$ и $R_к$ был равен нулю. Этим способом теоретически можно исключить длительность среза из общего времени выключения. Расчет методом контурных токов показывает, что указанный эффект достигается при введении компенсационной э. д. с.

$$E_{комп} \sim \frac{\beta_I}{\beta_I + \beta_N} I_{б2} e^{-\frac{t}{\tau_{от.\ э}}} (R_к + R_i),$$

где R_i — внутреннее сопротивление источника.

Введение дополнительной э. д. с. несложно: можно использовать предварительно заряженную емкость или подключить на момент формирования среза обмотку трансформатора.

В разработанных схемах ключей на транзисторах типа МП-20, 1ТМ115 токи насыщения изменялись от 0,1 до 3 *ма*, коммутируемое напряжение — от 5 до 30 *в*, величина сопротивлений нагрузки лежала в пределах 300—10 *ком*. За счет шунтирования нагрузки и введения компенсационной э. д. с. удалось получить длительность среза 1—1,5 *мксек* независимо от параметров ключа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Т. М. Агаханян. Электронные ключи и нелинейные импульсные усилители. Изд-во «Сов. радио», М., 1966.

2. Т. М. Агаханян. Переходный процесс в полупроводниковом ключе при его запирании. Сб. «Полупроводниковые приборы и их применение», вып. 10. Изд-во «Сов. радио», 1963.

О ПРИМЕНЕНИИ МЕТОДА РАСПОЗНАВАНИЯ ОБРАЗОВ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ФЛОТАЦИИ УГЛЕЙ

В. И. Салыга, И. Б. Сироджа

Харьков

Повышение требований к эффективности систем автоматического управления, сложность новых объектов автоматизации и изменчивость их характеристик вызывает необходимость применения методов адапта-