

**Б. И. БОРДЕ**  
(Красноярск)

### **ТРАНЗИСТОРНЫЕ КОММУТАЦИОННЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ С ЦЕПЯМИ УПРАВЛЕНИЯ НА ТУННЕЛЬНЫХ ДИОДАХ\***

В статье приводятся схемы разработанных ключей с потенциально независимой цепью и переключателей с потенциально связанной цепью управления на туннельных диодах. Дается анализ их работы и выводятся формулы для определения пиковых токов туннельных диодов и параметров элементов цепи управления.

Быстродействующие ключи и переключатели применяются в аналого-цифровых преобразователях [1—4] для коммутации входных сигналов, аналоговых блоков и разрядных сопротивлений. Характеристики коммутационных элементов во многом определяют точность, быстродействие и структуру аналого-цифровых преобразователей.

Ключи для входных коммутаторов и переключателей аналоговых блоков обычно состоят из двух нормально или инверсно включенных полупроводниковых триодов, что частично компенсирует остаточные напряжения и позволяет коммутировать сигналы обеих полярностей. Цепи управления подобных ключей [2] целесообразно строить потенциально независимыми, с пассивным [4, 5] или активным [2, 6, 7] запирающим триодом. Для последних необходимы более сложные источники биполярного напряжения, ускоряющие процесс переключения и позволяющие коммутировать большие по значению напряжения обеих полярностей. Быстродействие источников, управляемых динамическими элементами, ограничивается частотой следования импульсов и инерционностью фильтра; уменьшение инерционности фильтра ниже определенного значения нецелесообразно из-за возрастания пульсаций на выходе открытого ключа [7].

Одновременное уменьшение времени переключения и пульсаций на выходе ключа можно получить, используя в качестве источника управляющего напряжения быстродействующий триггер с автономным источником питания [2, 7]. Источник управляющего напряжения на туннельных диодах [7] отличается от транзисторного [2] простотой и малым временем переключения.

Элементы, коммутирующие разрядные сопротивления в цифро-аналоговых преобразователях, должны отличаться быстродействием, простотой и постоянством тока управления, протекающего через прецизи-

\* Материал доложен на VII Всесоюзной конференции по автоматическому контролю и методам электрических измерений в сентябре 1965 г. в Новосибирске.

онные источники питания. Широко применяемые транзисторные переключатели с потенциальным управлением и насыщением открытых триодов характеризуются простотой и малым временем переключения. Однако они имеют следующие недостатки: перепады управляющих уровней должны превосходить разность потенциалов коммутируемых шин (в случае равенства требуются специальные источники смещения), что затрудняет построение цифро-аналоговых преобразователей с использованием унифицированных дискретных транзисторных элементов вычислительных систем; суммарный ток управления переключателями, протекающий через прецизионные источники питания, зависит от преобразования кода, что увеличивает погрешность цифро-аналогового преобразования. Переключатели тока на транзисторах [8] отличаются высоким быстродействием, но из-за большей сложности применяются значительно реже диодных [3, 9].

Выход триггера на туннельном диоде из-за разброса характеристик диодов непосредственно используется в качестве разрядного источника напряжения только в цифро-аналоговых преобразователях низкой точности [10, 11]. Применение триггера на туннельном диоде в качестве цепи управления транзисторного ключа [11] позволяет использовать хорошие коммутационные характеристики транзисторов и упростить устройство управления преобразователя. Однако для построения цифро-аналоговых преобразователей по точным параллельным схемам [12] необходимы переключатели, цепи управления которых при постоянстве тока питания можно подключать к коммутируемым шинам.

В данной работе приводятся схемы разработанных ключей с потенциально независимой (не имеющей гальванической связи) цепью и переключателей с потенциально связанной цепью управления на транзисторах и туннельных диодах. Дается анализ их работы и выводятся формулы для расчета пиковых токов туннельных диодов и пределов изменения напряжения питания.

### Ключи и переключатели с потенциально независимыми цепями управления

Схема ключа на двух однотипных инверсно включенных триодах приведена на рис. 1. Известно, что при нормальном включении остаточное напряжение больше, чем при инверсном. Однако, как показали исследования, сопротивление открытого ключа при нормальном включении меньше по сравнению с инверсным в среднем на 30%. Схемы двухтриодных переключателей для случая, когда потенциал второй шины положителен относительно первой и  $U_{ш1} \leq U_i \leq U_{ш2}$ , приведены в таблице. В таблице  $Z_i$  — сопротивление нагрузки переключателя, например разрядное сопротивление в цифро-аналоговых преобразователях.

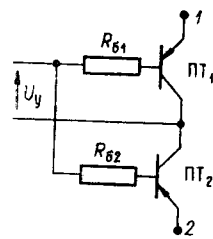


Рис. 1. Схема ключа на двух однотипных инверсно включенных триодах.

Входы ключей и переключателей (см. рис. 1 и схемы 1—6 таблицы) соединяются с потенциально не связанными источниками управляющего напряжения (рис. 2, а и б), содержащими автономный источник питания с фильтром, туннельные диоды и импульсный трансформатор с диодно-трансформаторными схемами совпадения на входе. Переключение туннельных диодов осуществляется в цепи постоянного тока; постоянная времени фильтра не связана с быстро-

действием ключей и может быть выбрана достаточно большой. Частота напряжения питания тоже не влияет на скорость переключения и может выбираться в диапазоне, дающем минимум помех. Ключи (см. рис. 1) и переключатели (см. таблицу, схемы 3—6) могут управляться как источниками биполярного напряжения (см. рис. 2, б), так и однополярного

Схемы включения триодов						
	1	2	3	4	5	6

(см. рис. 2, а); переключатели (см. таблицу, схемы 1, 2) на триодах различной проводимости — только источниками биполярного напряжения.

При управлении однополярным источником открытому триоду соответствует состояние высокого напряжения (рис. 3, а, вторая восходящая ветвь) туннельного диода ДТ<sub>1</sub>, закрытому триоду — состояние низкого напряжения (см. рис. 3, а, первая восходящая ветвь). Для работоспособности схемы (см. рис. 2, а) необходимо, чтобы ток туннельного диода в состоянии низкого напряжения (ключ разомкнут) был меньше пикового  $I_{д1}$  (см. рис. 3, а, точка 1) и больше минимального  $I_{д2}$  (см. рис. 3, а, точка 2) в состоянии высокого напряжения. Кроме того, напряжение

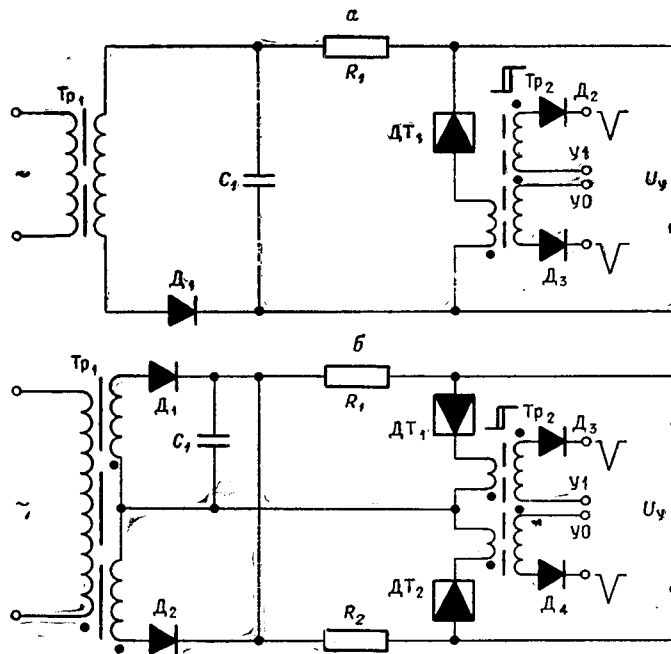


Рис. 2. Схемы источников управляющего напряжения:  
а — с однополярным управляющим напряжением; б — с биполярным управляющим напряжением.

максимума тока диода  $U_{д1}$  должно быть меньше напряжения открытия триода  $U_{б0}$  (входные характеристики насыщенных триодов П11 приведены на рис. 3, б), а напряжение минимума  $U_{д2}$  — больше  $U_{б0}$ . Напряжение открытия триода  $U_{б0}$  соответствует предельно допустимому току утечки закрытого триода (ключ разомкнут). Результаты экспериментов показали, что возможна совместная работа германиевых туннель-

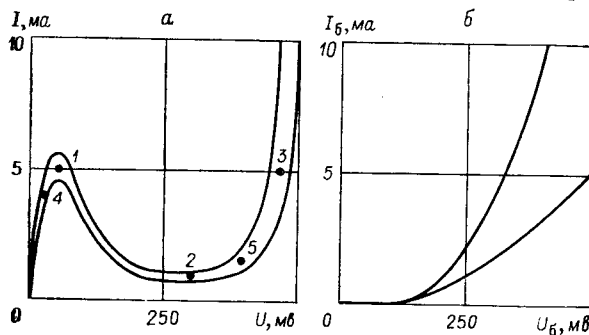


Рис. 3. Границы разброса:  
а — характеристики германиевых туннельных диодов;  
б — входные характеристики триодов П11.

ных диодов ( $U_{д1} < 60$  мв и  $U_{д2} \approx 300$  мв) с германиевыми триодами ( $U_{б0} \approx 50$  мв) и арсенид-галлиевых туннельных диодов ( $U_{д1} < 180$  мв и  $U_{д2} \approx 600$  мв) с кремниевыми триодами. Если считать рабочие точки туннельных диодов смещенными относительно точек максимума 1 и минимума 2 и допустить некоторый отбор диодов, то возможна совместная работа арсенид-галлиевых туннельных ди-

одов и германиевых триодов. Из-за малой величины управляющего напряжения (не более 450 мв для германиевых и 1 в для арсенид-галлиевых диодов) в расчетах необходимо учитывать входную характеристику триода, которая определяется в режиме насыщенного ключа (напряжение коллектор — эмиттер составляет единицы милливольт (см. рис. 3, б)). Существенная нелинейность и разброс характеристик триодов и туннельных диодов, отсутствие простых аналитических выражений, описывающих их характеристики, приводят к необходимости графического расчета или к расчету линеаризованных в рабочей области цепей. Графические методы удобны для анализа режимов работы, но не подходят для выбора элементов. В связи с этим на основе линеаризации были выведены простые расчетные формулы для выбора тока максимума (пикового тока) туннельных диодов и определения допустимых пределов изменения напряжения питания.

С учетом условий работоспособности, считая известными напряжение холостого хода  $U_{гх}$  и выходное сопротивление  $R_r$  автономного источника питания, получим:

$$\frac{U_{гх}}{R_1 + R_r} < I_{д1}; \quad \frac{U_{гх} - U_{д2}}{R_1 + R_r} - k I_{бн} < I_{д2}, \quad (1)$$

где  $k=1$  для схем таблицы и  $k=2$  для схемы рис. 1.

Подставив вместо тока минимума его выражение через нормируемые параметры диодов — ток максимума  $I_{д1}$  и отношение токов минимума и максимума  $n$  —

$$I_{д2} = \frac{I_{д1}}{n}, \quad (2)$$

получим

$$I_{д1} > \frac{n}{n-1} \left( \frac{U_{д2}}{R_1 + R_r} + k I_{бн} \right). \quad (3)$$

Выбрав ближайший больший по току туннельный диод, удовлетворяющий условию (3), найдем допустимые пределы изменения напряжения автономного источника питания:

$$U_{гх} > \left( k I_0 + \frac{I_{п1}}{n} \right) (R_1 + R_r) + U_{д2};$$

$$U_{гх} < I_{д1} (R_1 + R_r),$$
(4)

причем для их расширения желателен больший пиковый ток. Для реальных схем нужно учесть возможные отклонения параметров элементов от номинальных и изменение напряжения питания, поэтому рабочую точку диода в состоянии низкого напряжения необходимо выбирать ниже точки 1 (см. рис. 3, а), например в точке 4, а в состоянии высокого напряжения — выше точки 2, например в точке 5. Нужно учесть также разброс пиковых токов диодов ( $\pm \delta I_{д1}$ ). С учетом смещения рабочих точек и разброса выражение (3) может быть представлено в виде

$$I_{д1} > \frac{n}{n(1 - \delta I_{д1} - \delta I_{д4} - \delta I_{д5}) - 1} \left( \frac{\bar{U}_{д5}}{R_1 + R_r} + k \bar{I}_0 \right),$$
(5)

где

$$\delta I_{д4} = \frac{I_{д1} - I_{д1}}{I_{д1}}; \quad \delta I_{д5} = \frac{I_{д5} - I_{д2}}{I_{д1}}$$

(черта над буквой означает наибольшее значение параметра). Расчет необходимо проводить для нормальной и предельных рабочих температур, причем при наибольшем значении температуры имеет место худшее сочетание параметров из-за убывания тока максимума и возрастания тока минимума туннельных диодов (уменьшение  $n$ ); для германиевых диодов убывание  $U_{д5}$  порядка  $-1$  мВ/°С частично компенсируется таким же изменением характеристик триодов.

Для ключа (см. рис. 1) с кремниевыми сплавными триодами П104 и туннельными диодами ЗИ301 значение пикового тока (5)  $I_{д1}$  больше 4,2 ма при следующих значениях параметров:  $R_1 = 1$  ком;  $R_r = 0,1$  ком; номинальный ток управления  $I_{бн} = 1$  ма;  $n = 8$ ;  $U_{д0} = (900 \pm 50)$  ма; динамическое сопротивление второй восходящей ветви  $R_{д} = 50$  ом;  $\delta I_{д1} = \pm 10\%$  и  $\delta I_{д4} = \delta I_{д5} = 10\%$ . Для диода с пиковым значением тока 5 ма допустимые изменения напряжения питания  $U_{гх}$  будут равны  $(4,5 \pm 0,5)$  в.

Рассмотрим источник биполярного управляющего напряжения (см. рис. 2, б), который представляет собой мост, состоящий из туннельных диодов ДТ<sub>1</sub>, ДТ<sub>2</sub> и сопротивлений  $R_1$ ,  $R_2$ . При подаче импульса  $U$  1 диод ДТ<sub>1</sub> перейдет в состояние низкого напряжения, а ДТ<sub>2</sub> — в состояние высокого напряжения; при этом управляющее напряжение будет отрицательно и триоды  $p-n-p$  ключей и переключателей окажутся открытыми (соответствующий ключ замкнут). Подача импульса  $U$  0 вызывает изменение состояния диодов ДТ<sub>1</sub>, ДТ<sub>2</sub>; управляющее напряжение становится положительным, и триоды  $n-p-n$  (см. рис. 1, ключ на  $p-n-p$  триодах разомкнут) открываются. Ввиду малой величины напряжений туннельных диодов на первой восходящей ветви управляющее напряжение по сравнению с напряжением в схеме ключа рис. 2, а уменьшается незначительно, но процесс переключения ускоряется. При этом допустимое обратное напряжение триодов опреде-

ляется для схемы включения с общей базой. До прихода управляющих импульсов при включении питания оба туннельных диода будут находиться в состоянии низкого напряжения, а триоды окажутся закрытыми (ключи разомкнуты).

Аналогично расчету ключа с источником однополярного управляющего напряжения получим условия сохранения состояния для симметричной мостовой схемы:

$$I_{д1} > \frac{U_{гк}}{R_1 + R_r} + 2I_6; \quad I_{д2} < \frac{U_{гк} - U_{д2}}{R_2 + R_r} - 2I_6; \quad (6)$$

после преобразований

$$I_{д1} > \frac{n}{n-1} \left( \frac{U_{д2}}{R_1 + R_r} + 4I_{6н} \right), \quad (7)$$

или с учетом разброса характеристик диодов и смещения рабочих точек

$$I_{д1} > \frac{n}{n(1 - \delta I_{д1} - \delta I_{д4} - \delta I_{д5}) - 1} \left( \frac{U_{д5}}{R_1 + R_r} + 4I_{6н} \right). \quad (8)$$

Таким образом, если выбрать сопротивления  $R_1$  и  $R_2$  равными, то требуемый пиковый ток туннельных диодов возрастает почти вдвое по сравнению с требуемым пиковым током туннельных диодов источника однополярного управляющего напряжения. Такое построение моста целесообразно для переключателей на триодах  $p-n-p$  и  $n-p-n$  (см. таблицу, схемы 1, 2), когда источник управляющего напряжения в каждом из состояний нагружается током только одного триода. Для ключа на двух однотипных триодах (см. рис. 1) сопротивления  $R_1$  и  $R_2$  желательно выбирать такими, чтобы рабочая точка первого диода при отключенных триодах находилась на первой восходящей ветви с током  $I_{д4}$ , а рабочая точка второго диода — на второй восходящей ветви с током  $I_{д5}$ . Тогда

$$I_{д1} > \frac{n}{n-1} \left[ \frac{U_{д5}}{R_1 + R_r} + U_{гк} \frac{R_2 - R_1}{(R_1 + R_r)(R_2 + R_r)} + 4I_{6н} \right], \quad (9)$$

и пиковый ток за счет  $R_1 > R_2$  снижается почти вдвое. Переключатели (см. таблицу, схема 1) на триодах П15 и П11 с номинальным током управления 1 ма и германиевых туннельных диодах с пиковым током 5 ма надежно работают в диапазоне температур 20—60°С. Общее добавочное сопротивление в базовой цепи равно 200 ом;  $R_1 = R_2 = 1$  ком. Расчетные отклонения напряжения питания при нормальной температуре без учета разброса элементов составляют  $\pm 23\%$ , с учетом разброса элементов  $\pm 15\%$ , а экспериментально определенные —  $\pm 15\%$ .

В рассматриваемых ключах и переключателях открытые триоды работают при одинаковых направлениях (положительным считается ток, втекающий в электрод) токов управления и переключения [13], поэтому рабочую точку триода целесообразно выбирать в области оптимального управления [13], в которой остаточное напряжение минимально и изменения токов управления окажут наименьшее влияние на остаточное напряжение открытого ключа. Источники однополярного управляющего напряжения имеет смысл использовать при управлении ключами коммутаторов сигналов низкого уровня, так как при исполь-

зовании этих источников снижаются остаточные токи закрытых триодов; для коммутации сигналов высокого уровня более пригодны биполярные источники, так как одним из основных требований к ключам является высокое допустимое напряжение, прикладываемое к ключу в разомкнутом состоянии. При использовании в одном переключателе двух управляющих источников (см. таблицу, схемы 3—6) вторичные обмотки трансформаторов  $Tr_2$  следует располагать на одном сердечнике, аналогично можно расположить обмотки трансформатора питания  $Tr_1$ . В общем случае цепи управления синхронно работающих ключей можно переключать, используя один импульсный трансформатор за счет увеличения количества вторичных обмоток.

В связи с малым временем переключения туннельных диодов имеет смысл форсировать переключение триодов импульсами установки и сброса, включив вторичные обмотки импульсного трансформатора последовательно с сопротивлениями  $R_1$  и  $R_2$ . Однако из-за шунтирования туннельными диодами цепей из триодов и добавочных сопротивлений эффект форсирования мал, причем требуемые амплитуды импульсов переключения резко возрастают. В качестве сердечника  $Tr_2$  можно использовать ферриты с прямоугольной петлей гистерезиса (в нашем случае кольца  $3 \times 2 \times 1$  из феррита марки ВТ5).

#### Переключатели с цепью управления на туннельных диодах при питании их от коммутируемых шин

Схемы переключателей приведены на рис. 4, *а* и *б* для положительной разности потенциалов первой и второй шин. Триоды включены инверсно для уменьшения остаточного напряжения открытого ключа (возможно и нормальное их включение). Направления токов управления и переключения одинаковы, и так же, как прежде, рабочую точку триодов имеет смысл выбрать в области оптимального управления [13]. Коду 1 соответствует высокое напряжение туннельного диода  $ДТ_1$  и

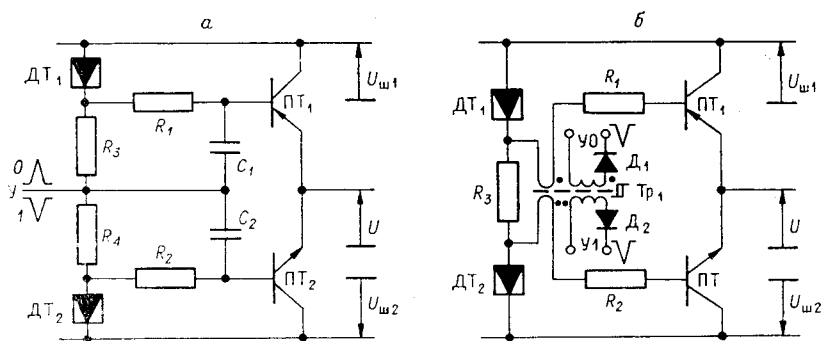


Рис. 4. Схемы переключателей с питанием цепи управления от коммутируемых шин.

низкое напряжение туннельного диода  $ДТ_2$ ; триод  $ПТ_1$  открыт,  $ПТ_2$  закрыт, и выход переключателя через открытый триод  $ПТ_1$  соединен с первой шиной. Установка кода 1 и 0 первого переключателя (см. рис. 4, *а*) производится положительными и отрицательными импульсами или путем кратковременного подключения входа переключателя (общая точка сопротивлений  $R_3, R_4$ ) ко второй (первой) шине с помощью триодов, управляемых диодно-трансформаторными клапанами. Если можно обес-

печить достаточно большую амплитуду управляющих импульсов, то форсирующие конденсаторы лучше заменить нормально закрытыми диодами. Заметим, что вход такого переключателя возможно подключить к выходу подобного же переключателя. Особенностью переключателя (см. рис. 4, а) является возможность работы в режиме счетного триггера при кратковременном подключении (меньшем времени переключения триодов) входа к выходу. Второй вариант переключателя (см. рис. 4, б) содержит меньше деталей и управляется переключением ферритового сердечника (на кольце ВТ5 3×2×1) с прямоугольной петлей гистерезиса. Преимуществом переключателей (см. рис. 4, а и б) является постоянство тока питания цепи управления от коммутируемых шин благодаря малому изменению (порядка 50—100 мв) суммарного напряжения туннельных диодов ДТ<sub>1</sub>, ДТ<sub>2</sub> при переключении.

Малое время переключения туннельных диодов позволяет рассчитывать переходный процесс, учитывая только транзисторные цепи, пренебрегая временем переключения диодов ДТ<sub>1</sub>, ДТ<sub>2</sub>. Рассмотрим статический режим работы переключателей (см. рис. 4, а и б), который характеризуется однополярным управляющим напряжением. Базовый ток открытого триода смещает рабочую точку туннельного диода в состоянии высокого напряжения в сторону минимума характеристики, поэтому ток диода в состоянии низкого напряжения лучше выбирать близким к пиковому (см. рис. 3, а, точка 4). Аналогично предыдущему получим выражения для пикового тока диодов

$$I_{д1} > \frac{n}{n(1 - \delta I_{д1} - \delta I_{д4} - \delta I_{д5}) - 1} \left( \frac{U_{д5}}{R_3} + I_{бн} \right) \quad (10)$$

и сопротивления  $R_3$  (см. рис. 4, б):

$$R_3 \geq \frac{U_{ш1} - U_{ш2} - U_{д5}}{I_{д1}(1 - \delta I_{д1} - \delta I_{д4})}; \quad R_3 \leq \frac{U_{ш1} - U_{ш2} - U_{д5}}{I_{д1} \left( \delta I_{д5} + \frac{1}{n} \right) + I_{б}} \quad (11)$$

Сопротивления  $R_3$  и  $R_4$  (см. рис. 4, а) равны половине вычисленного  $R_3$  (см. рис. 4, б). Базовые сопротивления  $R_1$  и  $R_2$  выбираются с учетом реальных характеристик туннельных диодов и транзисторов аналогично предыдущему.

Для переключателя на инверсно включенных германиевых триодах П11, П15 с номинальным током управления 2 ма и германиевых туннельных диодах для нормальной температуры при разбросе пиковых токов, равном  $\delta I_{д1} = 10\%$  и  $\delta I_{д4} = \delta I_{д5} = 10\%$ , получим  $I_{д1} > 4,6$  ма. При использовании туннельных диодов с пиковым током 5 ма для разности потенциалов второй и первой шин 10 в возможные значения сопротивления  $R_3$  будут лежать в диапазоне 2,4—2,7 ком. В исследуемых переключателях значения сопротивлений имели следующие значения:  $R_3 = 2,6$  ком (см. рис. 4, б);  $R_3 = R_4 = 1,3$  ком (см. рис. 4, а). Переключатели рис. 4, а и б могут коммутировать значительную нагрузку, если ток управления увеличить за счет применения туннельных диодов с большим пиковым током или установки усилительных триодов в цепи управления.

Сочетание дрейфовых транзисторов и туннельных диодов в разрядных переключателях тока цифро-аналоговых преобразователей [8] повышает быстродействие и сокращает количество триодов с четырех до двух. Роль триггера выполняет пара туннельных диодов, выход которой подключается к базе вспомогательного триода, а база ключевого трио-



да — к источнику стабильного напряжения или к шине «земля». По погрешности цифро-аналогового преобразования из-за неидеальности разрядных источников тока (0,5—1%) и времени переключения ( $10^{-8}$  сек для дрейфовых триодов) подобные элементы занимают промежуточное положение между насыщенными транзисторными разрядными элементами и триггерами на туннельных диодах.

### Выводы

Построение цепи управления в виде триггера на туннельных диодах значительно упрощает ее по сравнению с аналогичной цепью управления на транзисторах [2] и позволяет сократить время переключения. Предлагаются схемы однополярного и биполярного источников управляющих напряжений. Выведены расчетные формулы для определения пиковых токов туннельных диодов и пределов изменения напряжений питания с учетом разброса параметров элементов.

Переключатели с цепью управления на туннельных диодах, питаемой от коммутируемых шин, отличаются постоянством тока цепи управления и допускают совместную работу с потенциальными и импульсными дискретными элементами. Подобные переключатели могут коммутировать значительную нагрузку. Полученные формулы позволяют определить пиковый ток туннельных диодов и пределы значений сопротивлений цепи управления. Проведенные испытания ключей и переключателей подтвердили правильность расчетов.

### ЛИТЕРАТУРА

1. А. Н. Касперович, И. Ф. Клисторин, М. П. Цапенко. Автоматические цифровые электроизмерительные приборы.— *Автометрия*, 1965, № 1.
2. В. В. Ефименко, Б. В. Карпюк. Коммутатор на полупроводниковых триодах.— *Передовой научно-технический и производственный опыт*, № 31—63—574/8. М., ГОСИНТИ, 1965.
3. Г. М. Петров. Об использовании цифровых методов в системах управления, ввода и вывода данных аналоговых вычислительных машин.— В сб. «Комбинированные вычислительные машины». М., Изд-во АН СССР, 1962.
4. Э. И. Гитис, Е. Г. Пронин. Обобщенные характеристики многоканального полупроводникового преобразования напряжения в код с поразрядным кодированием.— *ИВУЗ, Приборостроение*, 1964, № 2.
5. Ю. П. Страшун, А. Я. Соколов. Преобразователь напряжение — код для устройства ввода и кодирования параметров управляющей вычислительной машины.— *Передовой научно-технический и производственный опыт*, № 5—65—192/5. М., ГОСИНТИ, 1965.
6. Е. С. Орешкин. Многоканальный преобразователь напряжения в код.— В сб. «Вычислительная математика и техника», вып. 1. Киев, Изд-во АН УССР, 1962.
7. Б. И. Борде. Оптимальные по точности транзисторные переключатели с динамическим управлением для цифро-аналоговых преобразователей.— Тезисы докладов и сообщений конференции по автоматическому контролю и методам электрических измерений. Новосибирск, 1964.
8. Т. М. Александриди, Е. А. Фатеева. Цифро-аналоговый преобразователь на транзисторах.— В сб. «Комбинированные вычислительные машины». М., Изд-во АН СССР, 1962.
9. Р. Р. Харченко, В. Н. Малиновский. Диодные ключевые схемы для измерительных цепей.— *Измерительная техника*, 1961, № 8.

10. K. Euler. Schaltprinzipien für Analog-Digital-Umwandler Hoher Bandbreite mit Tunnelnioden.— Frequenz, 1964, № 10.
11. R. A. Kaenel. High-Speed Analog-to-Digital Converters Utilizing Tunnel Diodes.— IRE Trans., 1961 EC-10, № 2.
12. К. А. Нетребенко. Цифровые автоматические компенсаторы. М., Госэнергоиздат, 1961.
13. Б. И. Борде. Расчет оптимальных режимов и точности работы транзисторных переключателей для цифро-аналоговых преобразователей.— Автоматический контроль и методы электрических измерений (Труды IV конференции, 1962 г.), т. I. Новосибирск, РИО СО АН СССР, 1964.

*Поступила в редакцию  
18 сентября 1965 г.,  
окончательный вариант —  
31 января 1966 г.*

---