

В. М. КИРПИЧНИКОВ, В. В. КОВАЛЕВ
 (Свердловск)

**К ИССЛЕДОВАНИЮ ДИНАМИКИ
 ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ «КОД — НАПРЯЖЕНИЕ»
 НА ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЯХ ТОКА**

В настоящей работе исследуются динамические свойства переключателей стабилизированного тока (ПТ) на полевых транзисторах и цифро-аналогового преобразователя (ЦАП), построенного на их основе. Как отмечается в [1], динамические свойства ПТ можно охарактеризовать тремя параметрами: временем переключения t_n ; временем реакции t_p , под которым понимается время установления номинального тока ПТ при изменении напряжения в точке подключения под влиянием соседних разрядов ЦАП; параметром, определяемым степенью прохождения управляющего сигнала на выход ПТ. В исходном состоянии ток от стабилизатора тока (СТ) течет через ключ K_1 в нагрузку Z_n ; ключ K_2 закрыт (рис. 1). Если на вход подать положительное управляющее напряжение $U_{вх}$, то K_2 откроется, перепад напряжения U_1 закроет K_1 и на выходе получится положительный перепад напряжения. При снятии входного напряжения ключи вернуться в исходное состояние и сформируют отрицательный фронт $U_{вых}$.

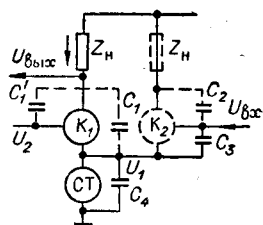


Рис. 1. Структурная схема переключателя тока.

Если постоянная времени управляющего сигнала $\tau_{вх}$ много меньше τ_n , то форма $U_{вых}$ в основном определяется параметрами нагрузки. Общее время формирования положительного фронта можно разделить на две составляющие: время задержки t_3^+ , которое равно отрезку времени с момента подачи управляющего воздействия до полного закрывания ключа K_1 , и время установления $U_{вых}$ ПТ с постоянной τ_n (рис. 2).

Временная задержка t_3^+ в основном определяется параметрами управляющих сигналов и в меньшей степени элементами схемы ПТ, так как в большинстве схем ключ работает в режиме эмиттерного и истокового (для транзисторов) или катодного (для вакуумных триодов) повторителей. Благодаря низкому выходному сопротивлению такие схемы хорошо работают на емкостную нагрузку и передают фронты в режиме открывания без искажений в широком диапазоне частот.

При запираении K_2 временная задержка t_3^- может значительно превышать t_3^+ , так как при этом ключ K_2 закрыт и происходит линейный

разряд емкости C_4 постоянным током стабилизатора i_c ;

$$t_3 \approx \frac{(U_{\text{вх max}} - U_{0K_2}) C_4}{i_c},$$

где $U_{\text{вх max}}$ — максимальная амплитуда управляющего напряжения; U_{0K_2} — напряжение отсечки элемента K_2 ; C_4 — суммарная паразитная емкость, определяемая конкретной схемой. После завершения III этапа выходное напряжение устанавливается с постоянной τ_n .

Прохождение управляющего сигнала в аналоговую схему суммирования характеризует связь входного зажима ПТ с выходом. Влияние этой связи проявляется двояко: во-первых, происходит ускорение или замедление процесса установления $U_{\text{вых}}$ ПТ в результате частичного наложения управляющего и выходного сигналов, во-вторых, возникает ошибка в $U_{\text{вых}}$ при поступлении на вход ПТ помехи с амплитудой, недостаточной для переключения ПТ.

Рассмотрим влияние помехи, проходящей на вход ПТ. Если K_1 закрыт и i_c поступает в цепь сброса, то помеха проходит через схему K_2 с коэффициентом передачи k_2 и поступает на выход через делитель $C_1 R_H C_H$ с коэффициентом передачи:

$$k_d = \frac{j \omega C_1 R_H}{1 + j \omega R_H (C_1 + C_H)}.$$

Для упрощения анализа в случае открытого K_1 сделаем ряд допущений: напряжение помехи не выводит элементы из линейного режима; изменение $U_{\text{вых}}$ незначительно и не оказывает влияния на режим ключа; изменения напряжения U_1 не влияют на режим СТ и последний считается идеальным; влияние C_1 невелико по сравнению с другими эффектами. С учетом этих упрощений эквивалентная схема ПТ принимает вид схемы рис. 1, за исключением элементов, изображенных штриховыми линиями. Процессы в схеме описываются системой уравнений:

$$\begin{cases} i_1 = S(U_2 - U_0 - U_1); & i_2 = \text{const}; \\ i_1 + i_3 - i_2 - i_4 = 0; & \frac{d U_{\text{вх}}}{d t} - \frac{i_3}{C_3} - \frac{i_4}{C_4} = 0, \end{cases}$$

где S — крутизна характеристики усиления ключа; U_0 — напряжение отсечки. После преобразований для начальных условий $U_1(0) = 0$ и $S(U_2 - U_0) = i_2$ получим

$$\frac{d U_1}{d t} + \frac{S}{C_3 + C_4} U_1 = \frac{C_3}{C_3 + C_4} \frac{d U_{\text{вх}}}{d t}.$$

Решением этого уравнения для экспоненциального $U_{\text{вх}}$ с постоянной времени установления $\tau_{\text{вх}}$ является

$$U_1 = \frac{C_3 |U_{\text{вх}}|}{S \tau_{\text{вх}} - C_3 - C_4} \left(e^{-\frac{t}{\tau_{\text{вх}}}} - e^{-\frac{t S}{C_3 + C_4}} \right). \quad (1)$$

В схеме ПТ с правым проходным ключом при оценке действия помехи необходимо определить разность между $U_{\text{вх}}$ и изменением U_1 . Для

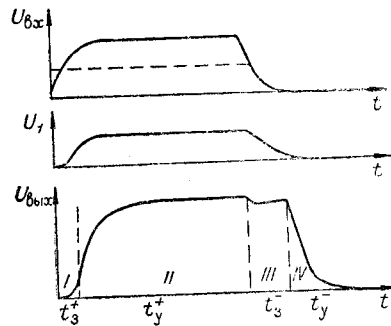


Рис. 2. Переходные процессы в ПТ.

этого воспользуемся схемой рис. 1, но вместо фиксированного напряжения U_2 подадим $U_{вх}$, соединив точку подключения U_2 с входным зажимом. Изменение тока, протекающего через ключ K_2 , пропорционально

$$\Delta = (U_{вх} - U_1) = \frac{C_4 |U_{вх}|}{S \tau_{вх} - C_3 - C_4} \left(e^{-\frac{t}{C_3 + C_4}} - e^{-\frac{t}{\tau_{вх}}} \right). \quad (2)$$

Сравнивая (2) для правой схемы с (1) для левой, найдем

$$\frac{\Delta_{п}}{\Delta_{л}} = \frac{C_4}{C_3}.$$

Так как обычно $C_4 \gg C_3$, то на выходе правой схемы помеха значительно выше.

При закрытом K_2 и подключении нагрузки к его выходу уровень помехи определяется коэффициентом передачи делителя $C_2 R_{н} C_{п}$ (см. рис. 1)

$$K_{д} = \frac{j \omega C_2 R_{н}}{1 + j \omega R_{н} (C_{п} + C_2)}.$$

Действие помехи на первую схему в активном режиме можно значительно снизить, если подавать на K_2 не фиксированное напряжение U_2 , а напряжение, пропорциональное $U_{вх}$:

$$U_{к} = \frac{C_3}{C_3 + C_4} U_{вх}.$$

На рис. 3 приводятся экспериментальные осциллограммы переходных процессов в конкретной схеме ПТ при различных значениях $U_{к}$.

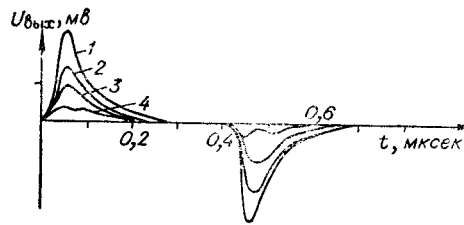


Рис. 3. Переходные процессы в ПТ с компенсацией:

$R_{н} = 3,5 \text{ ком}$; $C_{п} = 20 \text{ пф}$; 1 — без компенсации; 2 — $U_{к} = 0,1 U_{вх}$; 3 — $U_{к} = 0,15 U_{вх}$; 4 — $U_{к} = 0,3 U_{вх}$.

Очевидно, что введение $U_{к}$ при увеличении помехозащищенности схемы потребует для надежного переключения некоторого увеличения амплитуды входного сигнала.

При подключении нагрузки к выходу K_1 в режиме переключения изменение $U_{вх}$ на II этапе (см. рис. 2) происходит синфазно с $U_{вых}$ и процесс переключения ускоряется. На IV этапе происходит процесс, аналогичный действию помехи и описываемый формулой (1): K_2 закрыт и $U_{вх}$ воздействует на K_1 через емкость C_3 . При некоторых значениях C_3 это приводит к значительному увеличению тока K_1 и выбросу $U_{вых}$, уменьшить который можно, улучшая форму $U_{вх}$ (короткий фронт и вершину без спада) или увеличивая емкость C_4 , что, однако, ухудшает другие параметры переключателя.

При подключении схемы суммирования к выходу K_2 на IV этапе $U_{вх}$ и $U_{вых}$ изменяются в противофазе и происходит замедление процесса установления $U_{вых}$.

На II этапе переключения происходит процесс, аналогичный описываемому формулой (2). В момент открывания K_2 ток значительно превышает номинальное значение, что приводит к выбросу в $U_{вых}$.

При анализе структурных схем ПТ сделан ряд упрощений. Ниже приводятся результаты цифрового моделирования переходных процессов в ПТ на полевых транзисторах ТН-1.

Для анализа электронных схем на цифровой вычислительной машине (ЦВМ) необходимо иметь схемы замещения активных элементов. Строго говоря, канал полевого транзистора и переход затвора необходимо представлять в виде линий RC с распределенными параметрами, но это в значительной степени усложнит последующие расчеты. Для практических расчетов схем, аналогичных ПТ, можно использовать схему замещения, описанную в [2, 3]. Вольт-амперные характеристики аппроксимируются двумя отрезками прямых в триодной и пентодной областях. Величина выходного тока генератора тока вычисляется как функция напряжений на затворе U_3 и стоке $U_{с.п}$ из следующих соотношений, записанных с использованием [4]:

$$I = \{k_1 U_{с.п} U_{с.п} \operatorname{sg}(U_{с.п} - U_{с.п}) + [k_1 U_{с.п}^2 + k_2(U_{с.п} - U_{с.п})] \times \operatorname{sg}(U_{с.п} - U_c)\} \operatorname{sg}(U_{з.о} - U_3),$$

где K_1 и K_2 — коэффициенты, определяемые из характеристик конкретных приборов; $U_{с.п} = U_3 - U_{з.о}$; $U_{з.о}$ — напряжение на затворе в режиме отсечки.

Схема замещения полевого триода [2, 3] аналогична схеме замещения вакуумного триода, которая использована при расчетах в [5]; отличие заключается в отсутствии емкости катод — подогреватель.

На ЦВМ исследована математическая модель, описывающая переходные процессы в схеме замещения ПТ, приведенной на рис. 4. Систему уравнений в матричной форме запишем в виде

$$\begin{pmatrix} (C_1 + C_H) & -C_4 & 0 & 0 & 0 \\ (C_1 + C_5)(C_1 + C_2 + C_4 + C_5 + C_6) & -C_2 & -C_6 & -(C_1 + C_5) & 0 \\ 0 & -C_2 & (C_2 + C_3) & 0 & 0 \\ 0 & -C_3 & 0 & (C_6 + C_7 + C_8 + C_9) & -C_7 \\ 0 & -C_5 & 0 & C_7 & (C_5 + C_7 + C'_H) \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ U_4 \\ U_5 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Psi_1 + i_{15} - \frac{U_1}{R_H} \\ \Psi_2 + \Psi_3 - \Psi_1 \\ \frac{U_3 - E_1}{R_1} - \Psi_3 \\ C_1 \frac{d U_{вх}}{d t} - \frac{U_4 - E_2}{R_2} \\ \frac{U_5}{R_H} - \Psi_2 \end{pmatrix}$$

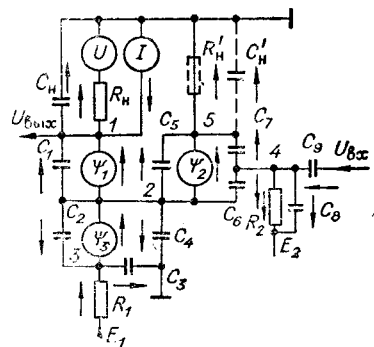


Рис. 4. Схема замещения ПТ на полевых триодах:

$E_1 = 25$ в; $R_H = R'_H = 5$ ком; $R_1 = 5,4$ ком;
 $R_2 = 300$ ком; $C_{1,2,5,8} = 0,3$ пф;
 $C_{H1} = C_{H2} = 6$ пф; $C_3 = 5$ пф; $C_6 = 3$ пф;
 $C_7 = 1$ пф; $C_9 = 1000$ пф.

Проанализированы две модификации ПТ: в первой эквивалент нагрузки подключается к выходу генератора тока Ψ_1 , во второй — к выходу Ψ_2 .

Таблица 1

| Выход | $\tau_{вх}$, мксек | $i_c = 1,0 \text{ ма}$ | | $i_c = 0,6 \text{ ма}$ | | $i_c = 0,35 \text{ ма}$ | |
|--------|---------------------|------------------------|---------|------------------------|---------|-------------------------|---------|
| | | t_y^- | t_y^+ | t_y^- | t_y^+ | t_y^- | t_y^+ |
| Левый | 0,025 | 0,245 | 0,225 | 0,220 | 0,275 | 0,170* | 0,460 |
| | 0,0125 | 0,230 | 0,275 | 0,220 | 0,340 | 0,190* | 0,500 |
| | 0,00625 | 0,225 | 0,280 | 0,210 | 0,340 | 0,200 | 0,510 |
| Правый | 0,025 | 0,290 | 0,285* | 0,300 | 0,380* | 0,320 | 0,46* |
| | 0,0125 | 0,270 | 0,250* | 0,290 | 0,320* | 0,320 | 0,42* |
| | 0,00625 | 0,270 | 0,25 | 0,280 | 0,280* | 0,320 | 0,39* |

В табл. 1 приведены зависимости времени установления t_y^- и спада t_y^+ выходного напряжения от постоянной установления $\tau_{вх}$ входного экспоненциального сигнала для трех значений тока стабилизации (величина тока задается изменением E_1). Время установления напряжения $U_{вых}$ до уровня 0,001 практически не зависит от $\tau_{вх}$ и величины i_c . Изменение t_y с уменьшением i_c , а следовательно, величины $U_{вых}$ объясняется относительным увеличением эффекта прохождения $U_{вх}$ при закрытом ключе. В первой схеме этот эффект проявляется в уменьшении t_y^- с появлением выброса в 1,5 мв при $i_c = 0,352 \text{ ма}$ (звездочкой помечены данные, полученные из кривых переходных процессов, имеющих выброс) и в затягивании t_y во второй схеме.

Увеличение t_y^+ при уменьшении i_c в первой схеме объясняется увеличением времени t_3^- при открывании Ψ_1 (см. рис. 2). Во второй схеме ток в первый момент значительно превышает номинальный, поэтому во всех случаях в $U_{вых}$ имеются выбросы. Увеличение тока пропорционально $\Delta = \Delta U_a - \Delta U_n$ и должно быть, согласно (2), максимально при $\tau_{вх} = 0,00625 \text{ мксек}$. Однако ввиду комплексности нагрузки $\Delta U_{вых \max}$ наблюдается при $\tau_{вх} = 0,025 \text{ мксек}$.

Помехозащищенность схем исследовалась путем «подачи» на вход схемы замещения экспоненциальных импульсов с различными постоянными времени $\tau_{вх}$ и амплитудой, недостаточной для переключения. На рис. 5 сплошными линиями даны кривые максимальной погрешности $\Delta U_{вых}$ для первой схемы, штриховыми — для второй. Кривые 2—4, 6—8 соответствуют случаю, когда ток поступает в нагрузку, 9—12 — в цепь сброса. Для сравнения приведены кривые максимальной погрешности 1 и 5, рассчитанные по формулам (1) и (2) с учетом емкости нагрузки. Расхождение в 20—25% для второй схемы (кривая 1) объясняется тем, что при выводе (2) не учитывалось влияние емкости C_7 (см. рис. 4). Отличие в напряжениях на общих истоках составляет не более 1—3%. Расчетные значения погрешности хорошо совпадают с экспериментальными.

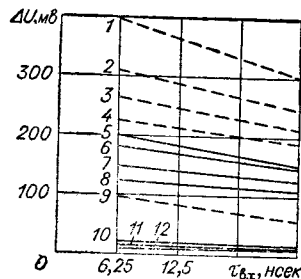


Рис. 5. Напряжение помехи на выходе ПТ:

$U_{вх} = 1 \text{ в}$; 1, 2, 5, 6, 10 — $i_c = 1 \text{ ма}$; 3, 7, 11 — $i_c = 0,6 \text{ ма}$; 4, 8, 12 — $i_c = 0,35 \text{ ма}$; 9 — для всех значений тока.

Для определения реакции схемы ПТ на изменение напряжения на его зажимах применимы два способа: напряжение в точке подключения можно изменять с помощью генераторов напряжения U или тока I (см. рис. 4). Оба метода дают идентичные результаты.

В табл. 2 приводятся значения t_y номинального значения тока при изменении узлового напряжения на 1 в для трех значений i_c . В скобках приведены значения $\Delta t = t_y - t_{y,э}$, где $t_{y,э}$ — время установления экспоненциального сигнала с $\tau = R_n(C_n + C_1)$ до уровня 0,999 для соответствующих значений i_c .

Таблица 2

| $i_c, \text{ ма}$ | $t_y, \text{ мксек}$ | | |
|-------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|
| | $C_4 = 3 \text{ пф}$ | $C_4 = 6 \text{ пф}$ | $C_4 = 12 \text{ пф}$ |
| 1,0 | 0,175 (0,008) | 0,190 (0,023) | 0,225 (0,058) |
| 0,6 | 0,195 (0,015) | 0,220 (0,040) | 0,290 (0,110) |
| 0,35 | 0,250 (0,048) | 0,330 (0,128) | 0,460 (0,258) |

Табл. 3 иллюстрирует зависимость t_y от величины перепада узлового напряжения ($i_c = 0,35 \text{ ма}$). Для сравнения приведены значения t_y экспоненциального сигнала соответствующей амплитуды.

Определяющее влияние на время реакции оказывает емкость C_4 ; влияние остальных элементов стабилизатора тока незначительно. Аналогичный вывод сделан при исследовании более сложного переключателя в [5] и подтвержден экспериментально (в действующей схеме ЦАП сопротивление R_1 в ПТ шунтируется добавочной емкостью). На

Таблица 3

| $\Delta U, \text{ в}$ | $t_y, \text{ мксек}$ | $t_э, \text{ мксек}$ | $\Delta t, \text{ мксек}$ |
|-----------------------|----------------------|----------------------|---------------------------|
| 0,5 | 0,30 | 0,18 | 0,12 |
| 1,0 | 0,33 | 0,202 | 0,128 |
| 1,5 | 0,36 | 0,214 | 0,148 |
| 2,0 | 0,38 | 0,230 | 0,150 |

рис. 6 приведена зависимость t_y в функции R_n . Продолжив графики до пересечения с осью ординат, можно получить значение реакции собственно ПТ.

Значительное действие на форму $U_{\text{вых}}$ оказывает емкость C_6 . Если C_6 сравнима с C_4 или больше ее, то при открывании транзистора Ψ_1 происходит значительное увеличение выходного тока ПТ с появлением выброса в выходном напряжении.

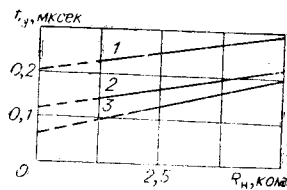


Рис. 6. Зависимость времени реакции от сопротивления нагрузки:

1 — $C_4 = 12 \text{ пф}$; 2 — $C_4 = 6 \text{ пф}$;
3 — $C_4 = 3 \text{ пф}$; $i_c = 0,6 \text{ ма}$;
 $\Delta U = 1 \text{ в}$.

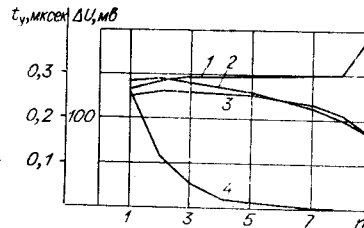


Рис. 7. Зависимость времени установления и напряжения помехи от номера разряда в девятиразрядном ЦАП.

При $U_{\text{вых}}=5\text{ в}$ и $\tau_{\text{вх}}=0,025\text{ мксек}$ выбросы достигают $2,22\text{ в}$ ($C_9=24\text{ пф}$), $0,8\text{ в}$ (12 пф), $0,15\text{ в}$ (6 пф), $0,0015\text{ в}$ (3 пф). При этом время установления $U_{\text{вых}}$ с точностью $0,999$ происходит соответственно за $0,43\text{ мксек}$, $0,40\text{ мксек}$, $0,31\text{ мксек}$, $0,19\text{ мксек}$. При $C_9=1,5\text{ пф}$ выброс отсутствует и $t_y=0,25\text{ мксек}$.

С использованием схемы замещения ПТ (см. рис. 4) построена модель девятиразрядного преобразователя с суммированием токов на матрице сопротивлений $R-2R$ и проведены исследования на быстродействие и помехоустойчивость такой схемы. Отдельные результаты приведены на рис. 7.

Кривые 2 и 3 иллюстрируют зависимость t_y^- и t_y^+ от номера разряда в схеме с подключением нагрузки к левым выходам ПТ, причем $U_{\text{вх}}$ считается установившимся, если его величина отличается от идеального на половину веса младшего разряда. Величины емкостей и сопротивлений аналогичны значениям, принятым в схеме рис. 4; $C_{\text{узл1}}=6\text{ пф}$, $C_{\text{узл2-9}}=3\text{ пф}$. Величины сопротивлений $R-2R$ равны соответственно $7,5$ и 15 ком .

Зависимость изменения напряжения в точках подключения ПТ и на выходе преобразователя при действии на входах ПТ помехи амплитудой 1 в и с $\tau=0,025\text{ мксек}$ иллюстрируется кривыми 1 и 4 соответственно. Погрешность в $U_{\text{вых}}$ при одновременном воздействии помехи на входы всех разрядов составляет 228 мв , что меньше суммы $\Delta U_{\text{вых } i}$, так как моменты времени, соответствующие $\Delta U_{\text{вых } \text{max}}$, сдвигаются по отношению к первому разряду в сторону увеличения. Зависимость $\Delta U_{\text{вых}}$ от амплитуды помехи линейная, если под воздействием помехи ПТ остается в неизменном состоянии (закрытом или открытом).

Выводы

В ПТ основное влияние на динамику оказывают емкости C_4 и C_6 . Уменьшение C_4 повышает быстродействие схемы, однако увеличение отношения C_6/C_4 может привести к значительным искажениям $U_{\text{вых}}$ и ухудшению быстродействия.

Если постоянная времени установления $U_{\text{вх}}$ в 2—5 раз меньше постоянной установления $U_{\text{вых}}$, то время установления определяется параметрами суммирующей схемы, емкостями в точках подключения ПТ и C_n .

В схеме суммирования с переключателями тока на полевых транзисторах вполне достижимо быстродействие порядка 2 млн. преобразований в секунду при 10—11 двоичных разрядах.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. А. Аладжиков, В. М. Кирпичников, В. В. Ковалев. Исследование математических моделей одного класса цифро-аналоговых преобразователей.— Тезисы докладов III Всесоюзной конференции по аналоговой технике. М., 1969.
2. И. П. Степаненко. Основы теории транзисторов и транзисторных схем. М., «Энергия», 1967.
3. Л. Севин. Полевые транзисторы. М., «Советское радио», 1968.
4. В. М. Кирпичников, Г. И. Михайловский. Применение пороговых функций для описания и анализа аналого-цифровых схем.— В сб. «Теория аналоговых и комбинированных вычислительных машин». М., «Наука», 1969.
5. В. М. Кирпичников, В. В. Ковалев. Исследование динамики переключателя тока преобразователя «аналог — код». — Автометрия, 1968, № 5.

Поступила в редакцию
28 января 1970 г.
окончательный вариант —
28 мая 1970 г.