

В. М. КИРПИЧНИКОВ, В. В. КОВАЛЕВ

(Свердловск)

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЯ ТОКА ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ «АНАЛОГ — КОД»

В системах централизованного контроля и автоматического управления с цифровыми управляющими машинами для ввода аналоговой информации широко применяются аналого-цифровые преобразователи (АЦП).

При решении задач контроля и управления в реальном времени одной из важнейших проблем является повышение быстродействия АЦП. Уменьшить время преобразования можно за счет уменьшения времени поразрядного уравнивания, которое определяется длительностью переходных процессов в переключателе тока преобразователя «код — аналог», включенного в цепь обратной связи [1], и в нуль-органе АЦП. Точный количественный анализ переходных процессов в сложных схемах, какими являются переключатели стабилизированного тока, оказывается довольно трудоемким процессом. Для облегчения решения этой задачи использовано цифровое математическое моделирование.

В работе рассмотрен ламповый вариант переключателя стабилизированного тока универсального АЦП, предназначенного для включения между аналоговой и цифровой вычислительной машинами.

Большинство аналоговых вычислительных машин (АВМ) работают в диапазоне ± 100 в, поэтому преобразователь «код — аналог» должен иметь на выходе аналогичные напряжения. Естественно, что для работы в столь широком диапазоне изменения выходного напряжения ламповый вариант схемы является наиболее предпочтительным.

На рис. 1 представлена схема переключателя стабилизированного тока. Переключатель тока собран на лампе L_1 , а стабилизатор тока — на двойном триоде L_2 . В исходном состоянии левая половина L_1 открыта, правая — закрыта и $E_2 > E_1$. Необходимая величина установившегося тока подбирается при помощи потенциометра R . Сопротивление R_1 имитирует в первом приближении цепочку сопротивлений, на которой получается взвешенное по двоичному закону эталонное напряжение. Управляющий положительный сигнал поступает на сетку правой половины L_1 .

Анализ переходных процессов производится при помощи многовариантного численного решения системы алгебро-дифференциальных уравнений, описывающих динамику схемы замещения рис. 1. В связи с трудностями, возникающими при моделировании функций двух пере-

менных характеристики триода на аналоговых вычислительных машинах, расчеты выполнены на цифровой вычислительной машине (ЦВМ). Для ввода характеристик триода в уравнение составлена подпрограмма ку-

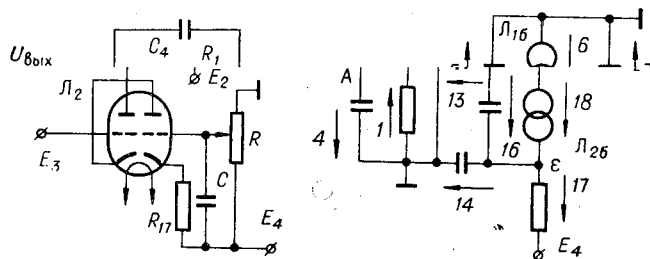


Рис. 1. Принципиальная схема и схема замещения переключателя тока:

$\Lambda_{1,2}$ — 6Н6П; $R_1=2$ ком; $R_{17}=8$ ком; $U_{\text{ВХ}}=80$ в; $E_1=-200$ в; $E_2=-240$ в; $E_3=-300$ в; $E_4=-600$ в; $C_4=0,01$ мкф; $R_{10}=100$ ком.

сочно-линейной аппроксимации выражения для анодного тока $i_a = \psi(U_c, U_a)$, представленного семейством анодно-сеточных характеристик. Каждая характеристика заменена тремя прямолинейными отрезками.

При составлении математической модели лампа замещается генератором тока. Для удобства приняты следующие обозначения:

$$C_4 = C_n + C_{\text{ас, 1a}} + C_m = 33 \text{ пф};$$

$$C_5 = C_{\text{ак, 26}} + C_{\text{ск, 1a}} + 2C_{\text{кп, 1}} + C_{\text{са, 2a}} + C_m = 33 \text{ пф};$$

$$C_{13} = C_{\text{ск, 2a}} + C_{\text{кп, 2a}} + C_{\text{са, 26}} + C_m = 20 \text{ пф};$$

$$C_{14} = C_{\text{ск, 26}} + C_{\text{кп, 26}} + C_m = 33 \text{ пф};$$

$$C_7 = C_2 = C_{12} = C_{16} = C_{\text{ак}} = 2 \text{ пф};$$

$$C_8 = C_{\text{ск}} = 4,5 \text{ пф},$$

где C_n — емкость нагрузки; C_m — емкость монтажа; $C_{\text{ак, } i}$ — емкость «анод — катод» i -го триода; $C_{\text{ск, } i}$ — емкость «сетка — катод» i -го триода; $C_{\text{са, } i}$ — емкость «сетка — анод» i -го триода; $C_{\text{кп, } i}$ — емкость «катод — подогреватель» i -го триода.

Математическая модель содержит систему из пяти дифференциальных уравнений (по количеству узлов в схеме замещения) относительно напряжений:

$$\begin{cases} \frac{d U_A}{dt} = \frac{1}{C_4} i_4; & \frac{d U_B}{dt} = \frac{1}{C_5} i_5; & \frac{d U_C}{dt} = \frac{1}{C_7} i_7; \\ \frac{d U_D}{dt} = \frac{1}{C_{13}} i_{13}; & \frac{d U_E}{dt} = \frac{1}{C_{14}} i_{14} \end{cases} \quad (1)$$

и системы алгебраических уравнений для токов, составленных с использованием законов Кирхгофа [2]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{i_7}{C_7} + \frac{i_9}{C_9} = \frac{d U_{\text{вх}}}{dt}; \quad i_1 + i_2 - i_3 - i_4 = 0; \\ \frac{i_5}{C_5} + \frac{i_8}{C_8} - \frac{i_7}{C_7} = 0; \quad i_3 - i_2 + i_6 + i_8 - i_5 - i_{12} - i_{15} = 0; \\ \frac{i_3}{C_5} - \frac{i_2}{C_2} - \frac{i_4}{C_4} = 0; \quad i_9 - i_{10} - i_7 - i_8 = 0; \\ \frac{i_5}{C_5} - \frac{i_{12}}{C_{12}} - \frac{i_{13}}{C_{13}} = 0; \quad i_{15} + i_{12} - i_{13} - i_{16} - i_{18} = 0; \\ \frac{i_{13}}{C_{13}} - \frac{i_{16}}{C_{16}} - \frac{i_{14}}{C_{14}} = 0; \quad i_{16} + i_{18} - i_{14} - i_{17} = 0, \end{array} \right. \quad (2)$$

где $i_1 = \frac{U_A}{R_1}$; $i_{17} = \frac{U_E - E_4}{R_{17}}$; $i_{3, 6, 15, 18} = f(U_{\text{ак}}, U_{\text{ск}})$;

$$i_{10} = \frac{U_C - E_2}{R_{10}}; \quad U_{\text{вх}} = U(1 - e^{-t/\tau}).$$

После ряда преобразований система уравнений (2) принимает вид

$$\left\{ \begin{array}{l} i_4 + i_5 + \frac{C_7 + C_9}{C_7} i_7 + i_{13} + i_{14} + i_{17} - i_1 - i_6 - i_{10} - C_9 \frac{d U_{\text{вх}}}{dt} = 0; \\ i_4 + \frac{C_8 + C_5}{C_5} i_5 - \frac{C_8}{C_7} i_7 + i_{13} + i_{14} + i_{17} - i_1 - i_6 = 0; \\ \frac{C_4 + C_2}{C_4} i_4 + \frac{C_2}{C_5} i_5 + i_1 - i_3 = 0; \\ \frac{C_{12}}{C_5} i_5 - \frac{C_{12} + C_{13}}{C_{13}} i_{13} - i_{14} + i_{15} - i_{17} = 0; \\ \frac{C_{16}}{C_{13}} i_{13} - \frac{C_{16} + C_{14}}{C_{14}} i_{14} + i_{18} - i_{17} = 0. \end{array} \right. \quad (3)$$

Решение уравнений (1), (3) выполнено на ЦВМ «Урал-2». Дифференциальные уравнения решены по стандартной подпрограмме методом Рунге — Кутты по трехточечной схеме. Время расчета одного варианта составляет 8—12 мин.

На описанной математической модели проведены параметрические исследования. В частности, выявлено влияние постоянной времени τ , постоянной времени входных цепей $\tau_d = C_9 R_{10}$, сопротивления R_{17} , емкости C_m на динамику схемы.

В режиме, принятом за номинальный (кривая 2 рис. 2), выходное напряжение изменяется до уровня 0,999 от полного падения напряжения за время 0,44 мксек. Уменьшение τ несущественно влияет на скорость нарастания выходного напряжения и практически не изменяет времени переходного процесса. Увеличение τ свыше определенного критического значения вызывает появление выброса на зависимости $U_{\text{вых}}(t)$ (кривая 3 рис. 2) и приводит к значительному увеличению времени переходного процесса. Это явление объясняется неблагоприятным перераспределением токов между параллельными ветвями емкостно-лампового делителя, состоящего из L_{1a} , R_1 и C_2 , C_4 .

Для номинального режима при открывании ключа отрицательным фронтом управляющего импульса установление выходного напряжения до 0,999 своего значения происходит за 0,48 мксек.

Изменение постоянной времени τ_d в пределах от $0,5 \tau_d$ до $5 \tau_d$ не оказывает влияния на форму кривой выходного напряжения.

Изменение величины R_{17} на $\pm 50\%$ тоже не влияет на $U_{\text{вых}}$. Поскольку R_{17} определяет коэффициент стабилизации тока, но не влияет на динамику переключателя тока, его величину можно выбирать только из соображений получения максимального коэффициента стабилизации по уравнениям статики.

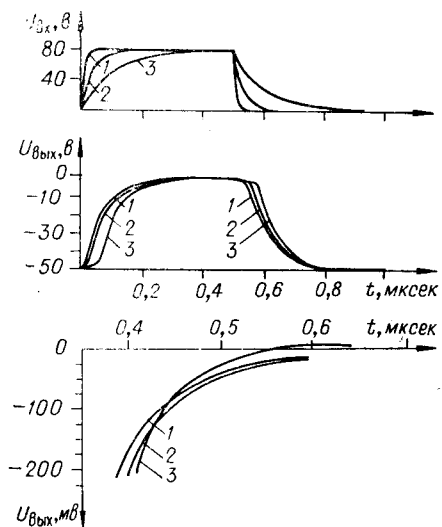


Рис. 2. Зависимости входного и выходного напряжений от времени при различных постоянных времени входного напряжения:

1 — $\tau = 0,1 \cdot 10^{-7}$ сек; 2 — $\tau = 0,33 \cdot 10^{-7}$ сек;
3 — $\tau = 0,1 \cdot 10^{-6}$ сек.

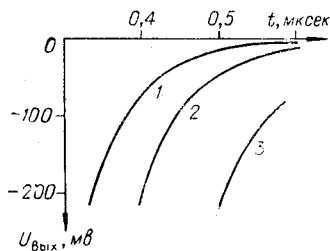


Рис. 3. Зависимости выходного напряжения от времени, характеризующие влияние монтажных емкостей при $\tau = 0,33 \cdot 10^{-7}$ сек:

1 — $C_M = 0,5 C_{M, \text{ном}}$; 2 — $C_M = C_{M, \text{ном}}$; 3 — $C_M = 2 C_{M, \text{ном}}$.

Уменьшение монтажных емкостей схем по сравнению с номинальным значением в два раза незначительно снижает время переходного процесса (рис. 3), а увеличение в два раза существенно увеличивает время записывания переключателя тока. Расчетные зависимости хорошо совпали с экспериментальными при параметрах, указанных на рис. 1.

ВЫВОДЫ

Предложена методика исследования динамики переключателя тока. Аналогичным образом может выполняться исследование транзисторных переключателей. Выявлено влияние основных параметров схемы на ее динамику. Доказано существование «номинальных» значений исследованных параметров. Максимальный коэффициент стабилизирующей схемы следует рассчитывать без учета динамики схемы. Результаты анализа схемы переключателя указывают на возможность построения АЦП с быстродействием до 100 тысяч преобразований в секунду.

ЛИТЕРАТУРА

1. Э. И. Гитис. Преобразователи информации для электронных цифровых вычислительных устройств. М., Госэнергоиздат, 1961.
2. И. П. Норенков, Б. И. Белов, П. В. Нестеров. Цифровое моделирование схем ЭЦВМ.— Сб. «Вычислительная техника», вып. 5. Под ред. Б. В. Анисимова. М., «Машиностроение», 1966.

Поступила в редакцию
14 июня 1967 г.,
окончательный вариант —
13 ноября 1967 г.