

## ПРОМЕЖУТОЧНЫЙ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЙ УСИЛИТЕЛЬ КЛАССА Д ДЛЯ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРУЕМЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ С МАГНИТНЫМИ УСИЛИТЕЛЯМИ

В. А. СЕВАСТЬЯНОВ, А. П. ИНЕШИН, А. И. ЕСИН

(Рекомендовано научным семинаром электромеханического факультета  
Томского политехнического института)

В настоящее время накоплен значительный опыт по внедрению и эксплуатации промежуточных полупроводниковых усилителей главным образом для схем электромашинной автоматики [1, 2].

С наилучшей стороны зарекомендовали себя полупроводниковые усилители с преобразованием сигнала, так называемые «усилители переменного тока», отличающиеся высокой эксплуатационной надежностью. Возникновение практически любой неисправности в таком усилителе приводит к прекращению усиления сигнала несущей частоты и к нулевому выходу, а следовательно, и к остановке привода.

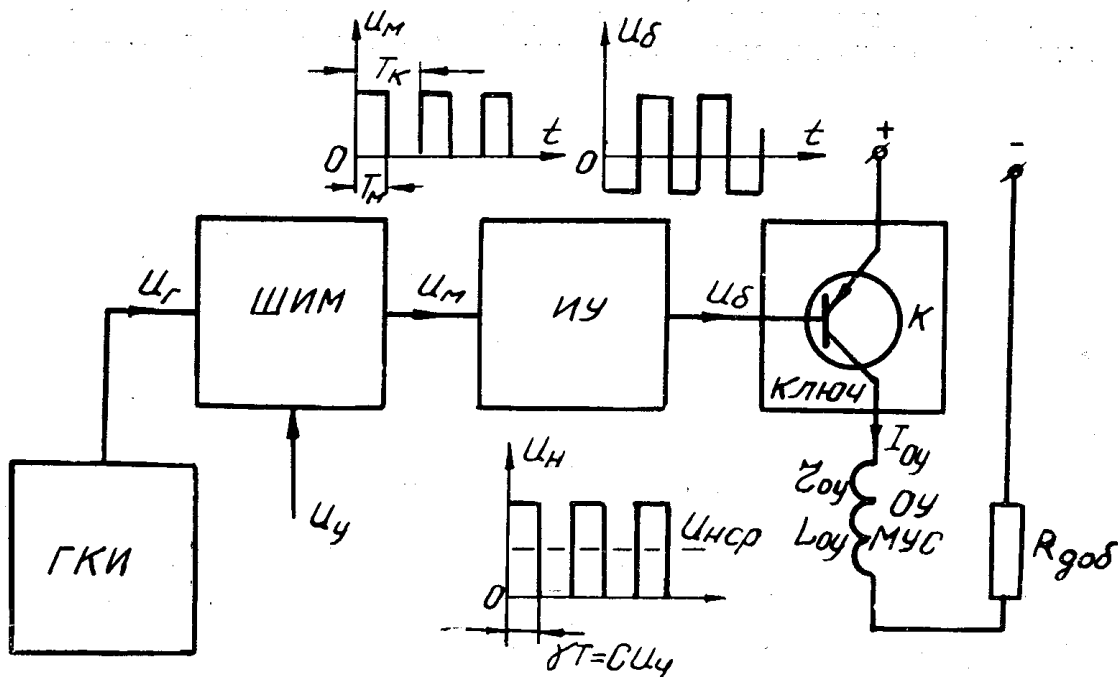


Рис. 1. Блок-схема усилителя класса Д.

Данная статья посвящена особенностям разработки, исследованию и вопросам эксплуатации более мощных ППУ класса Д, работающих на цепи управления силового магнитного усилителя с самонасыщением (МУС).

Принцип действия усилителя класса Д поясняется блок-схемой рис. 1. Генератор коммутирующих импульсов (ГКИ), роль которого, в частности, может выполнять источник напряжения 50 гц, вырабатывает симметричные прямоугольные импульсы напряжения частотой  $f_k$ , поступающие на широтно-импульсный модулятор — ШИМ. Последний преобразует напряжение управления на входе усилителя в относительную длительность импульсов  $\gamma = \frac{T_{II}}{T_k}$ , где  $T_{II}$  — продолжительность импульса, а  $T_k = \frac{1}{f_k}$  — период повторения. Эти импульсы усили-

ваются и преобразуются по форме импульсным усилителем — ИУ. Выходное напряжение ИУ прямоугольной формы и относительной длительности  $\gamma$  управляет работой выходного каскада усилителя — полупроводникового ключа — К в цепи нагрузки — обмотки управления МУС. Для снижения постоянной времени ОУ последовательно с ней включается добавочное сопротивление  $R_{доп} \gg r_{оу}$ , поэтому

$$T_{cy} = \frac{L_{оу}}{r_{оу}} \gg T'_{cy} = \frac{L_{оу}}{r_{оу} + R_{доп}}$$

Модулятор длительности ШИМ входит в промежуточный полупроводниковый усилитель как самостоятельное звено, работает на промежуточный импульсный усилитель и выполняет функции преобразования и усиления управляющего сигнала  $U_y$ . Основным требованиям, предъявляемым к этому звену (обеспечение основного усиления по напряжению и помехоустойчивость), удовлетворяет схема ШИМ, принцип работы которой поясняется рис. 2.

Источником коммутирующего напряжения  $U_k$  является сеть (50 гц, 30 в), откуда сигнал подается через ограничительное сопротивление  $R_5$  на кремниевый стабилитрон  $\sigma_1$  (типа Д 813). Кремниевый

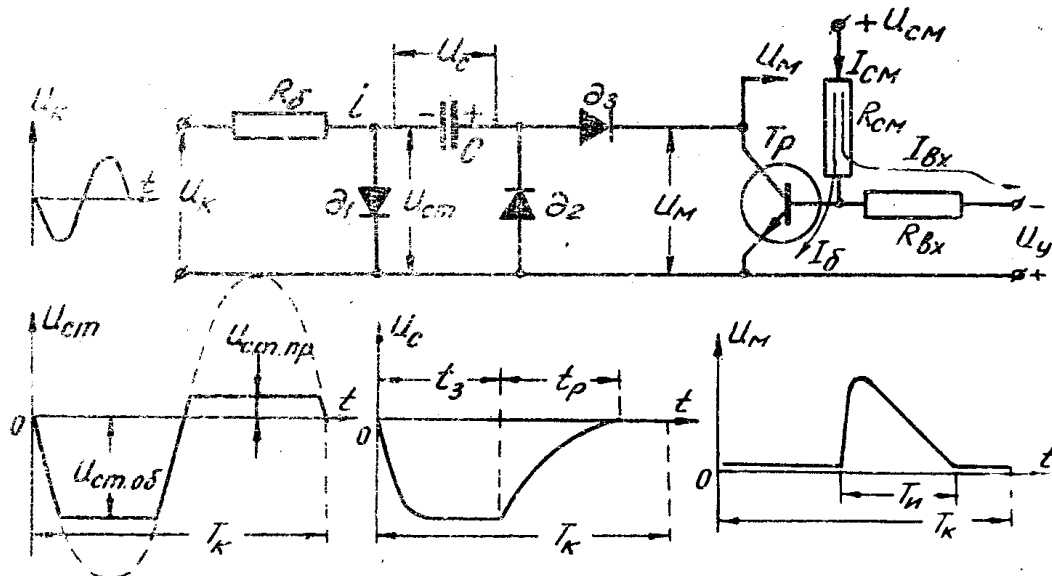


Рис. 2. Принципиальная схема широтно-импульсного модулятора ШИМ.

стабилитрон, обладая несимметричной характеристикой, несимметрично ограничивает синусоидальное напряжение коммутации и используется как «пробиваемое» сопротивление (типа ключа), управляющее процессами заряда-разряда конденсатора «С».

Процесс заряда конденсатора «С» происходит в отрицательный полупериод коммутирующего напряжения по цепи: источник  $U_k$  — диод  $d_2$  (Д2Е) — емкость «С» — сопротивление  $R_6$ . Напряжение на емкости при заряде достигает величины обратного пробивного напряжения  $U_{ст.об}$  кремниевого стабилитрона (порядка 13в). Постоянная времени этой цепи выбирается из условия обеспечения полного заряда емкости за время полупериода коммутирующего напряжения и равна:

$$T_3 = C(R_6 + R_{d2}) \approx CR_6 = \frac{T_k}{8}.$$

Процесс разряда емкости «С» в положительный полупериод коммутирующего напряжения происходит по цепи: заряженная емкость «С», являющаяся источником напряжения, — диод  $d_3$  (Д2Е) — коллекторная цепь полупроводникового триода  $T_p$  (П9) — кремниевый стабилитрон  $d_1$ , «пробитый» коммутирующим напряжением в прямом направлении. Постоянная времени цепи разряда емкости «С» равна:

$$T_{раз} = C(R_{ст-пр} + R_{d3} + R_T) \approx CR_T$$

и определяется в основном эквивалентным сопротивлением  $R_T$  коллекторного перехода триода  $T_p$ , управляемого напряжением входного сигнала  $U_y$ . Ввиду большого внутреннего сопротивления триода разряд емкости линеаризуется, ток при разряде почти не меняется и определяется выражением:

$$i_p = B I_6,$$

где  $I_6$  — ток базы,  $B$  — коэффициент усиления триода.

При отсутствии управляющего напряжения на входе модулятора ( $U_y = 0$ ) полупроводниковый триод введен в режим насыщения по цепи базы  $R_m$  источником тока смещения (+)  $U_{с.1}$ . Сопротивление перехода коллектор—эмиттер в режиме насыщения мало (десятки ом) и постоянная времени цепи разряда в основном определяется сопротивлениями диодов  $d_1$  и  $d_3$  в проводящем направлении. Поэтому разряд емкости «С» протекает за малое время, а выходное напряжение модулятора  $U_m$  минимально по амплитуде и длительности.

При наличии управляющего напряжения на входе модулятора соответствующей полярности ( $U_y < 0$ ) происходит перераспределение токов входной цепи модулятора: входной ток  $I_{вх}$  увеличивается, ток базы  $I_6$  триода уменьшается. Полупроводниковый триод выводится из режима насыщения в режим усиления. Разряд емкости проходит с постоянным током  $i_p$ , обратно пропорциональным величине управляющего сигнала

$$i_p = B I_6 = \frac{K_1 B}{U_y}.$$

и протекает за определенное время, пропорциональное управляющему сигналу

$$T_n = K_2 U_y$$

Здесь  $K_1$  и  $K_2$  коэффициенты пропорциональности. На коллекторе триода  $T_p$  появляются импульсы выходного напряжения острой конечной фор-

мы, амплитуда  $U_m$  и длительность  $T_n$  которого пропорциональны величине  $U_y$ .

Относительная длительность выходного импульса  $\gamma$  изменяется в пределах от 0 до 0,6 (причем  $\gamma_{\max} = 0,6 > 0,5$ ), так как максимально возможная продолжительность времени разряда  $T_{\text{им}} > \frac{T_k}{2}$  заряда ввиду несимметричной характеристики кремниевого стабилитрона (рис. 2).

Начальное смещение триода, определяемое сопротивлением  $R_{\text{см}}$ , выбирается из условия ввода его в режим насыщения с учетом шунтирующего действия цепи источника управляющего сигнала. Поэтому  $\gamma = f(U_y)$  имеет зону нечувствительности по сигналу управления, необходимую для вывода триода из режима насыщения в режим усиления (рис. 3).

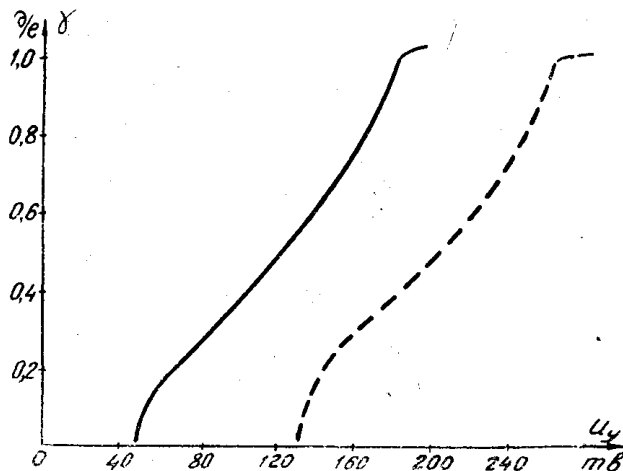


Рис. 3. Характеристики модулятора для двух случаев настройки.

При обрыве входной цепи усилителя ( $I_{\text{вх}} = 0$ ) ток базы  $I_b$  возрастает и полупроводниковый триод вводится в режим глубокого насыщения, что приводит к надежному запирающему действию всего тракта усиления полупроводникового и магнитного усилителя. Режим насыщения триода модулятора определяет также улучшенную помехозащищенность входной цепи усилителя.

В промежутки времени разряда емкости  $C$  осуществляется воздействие входного сигнала с наложенной помехой на процесс ШИМ. На остальное время ШИМ как бы самоотключается от источника входного сигнала и помехи. Основная помеха передается на вход ШИМ цепью электромагнитной коррекции [4] и представляет собой трансформированное в обмотке коррекции выходное напряжение ППУ, работающего в ключевом режиме. Путем включения в цепь коррекции настроенного фильтра удастся добиться выполнения условия синфазности ШИМ и напряжения помехи на его входе. При этом воздействие суммарного входного напряжения на ШИМ происходит лишь в промежутки времени, совпадающие со значением основной полезной части управляющего сигнала постоянного тока, а периодическая помеха на ШИМ влияния не оказывает [3].

Полная схема широтно-импульсного модулятора, приведенная на рис. 4, отличается от рассмотренной принципиальной схемы (рис. 2) наличием второй аналогичной цепи управления зарядом-разрядом емкости  $C$ . Коммутирующее напряжение, управляющее работой этой цепи,

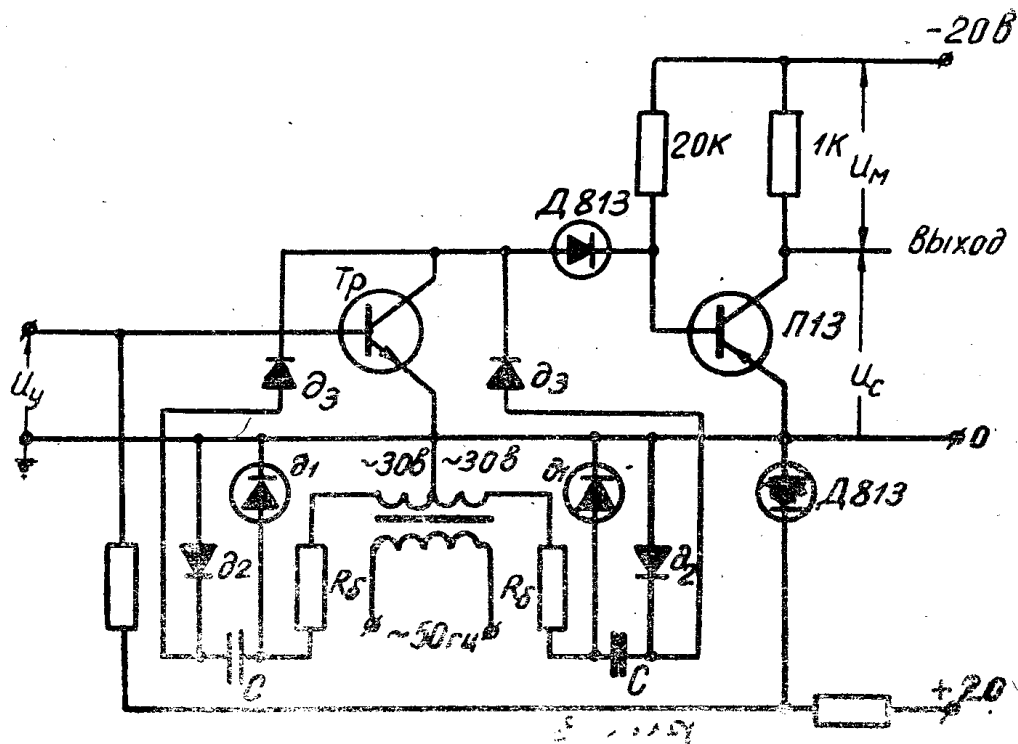


Рис. 4. Полная схема модулятора длительности — ШИМ.

сдвигает на полупериод процессы заряда-разряда емкости по сравнению с первой цепью. Этим обуславливается поочередная разрядка обоих конденсаторов на общее управляемое входным сигналом сопротивление  $R_T$  — полупроводниковый триод. Напряжение на полупроводниковом триоде представляет собой серию импульсов, следующих с удвоенной частотой  $2f_k = 100$  гц и  $\tau$ , изменяющейся от 0 до 1 в зависимости от величины управляющего напряжения  $U_y$  (рис. 5). Это напряжение подается через разделительный кремниевый стабилитрон на выходной каскад модулятора, собранный по обычной схеме включения полупроводникового триода (типа П-13) с общим эмиттером. При отсутствии входного сигнала  $U_y$  выходной каскад модулятора выведен в состояние насыщения цепью смещения базы. При наличии на входе модулятора управляющего сигнала на базу триода выходного каскада поступают положительные импульсы напряжения, выводящие триод в состояние отсечки на время своей длительности. На выходе модулятора образуется серия импульсов отрицательной полярности примерно прямоугольной формы, относительная длительность которых изменяется в зависимости от  $U_y$  от 0 до 1 (рис. 5). Характеристика модулятора примерно линейная и обладает регулируемой зоной нечувствительности, крутизна характеристики модулятора составляет

$$K = \frac{\Delta \tau}{\Delta U_y} = 0,01 \frac{1}{\text{мВ}}$$

и достаточна для обеспечения величины диапазона регулирования скорости электропривода порядка 200:1 без применения дополнительных каскадов усиления по напряжению.

На рис. 6 представлена схема выходного каскада, ее основной отличительной особенностью является то, что при отсутствии управляющего сигнала на входе усилителя ( $U_y = 0$ ) выходной полупроводнико-

вый ключ открыт (находится в режиме насыщения). Кроме этого, «нормально открытое» состояние выходного триода позволяет совместить функции управления и смещения на одной и той же ОУ силового МУС.

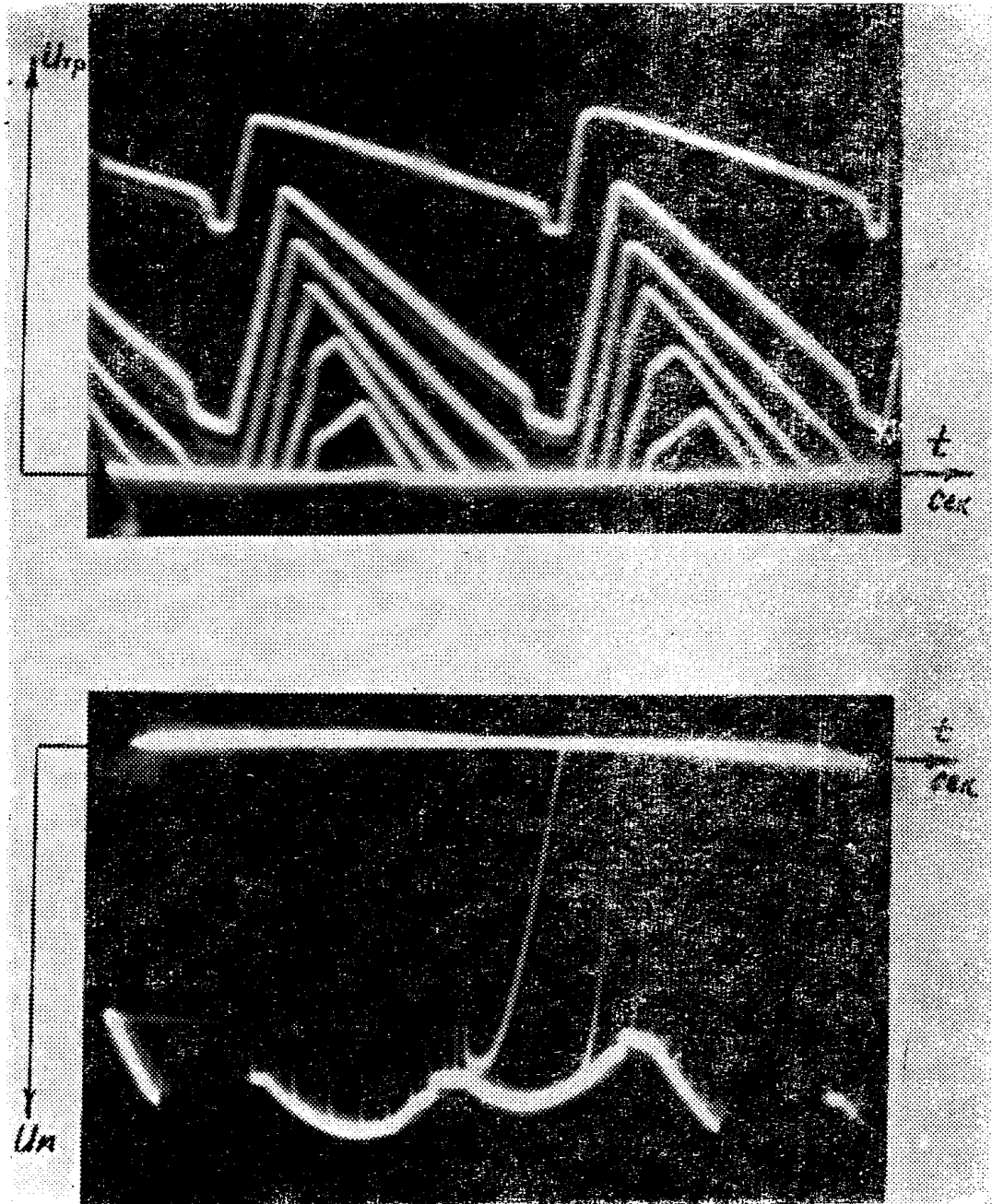


Рис. 5. Осциллограммы работы широтно-импульсного модулятора

Схема состоит из двух каскадов усиления на полупроводниковых триодах (типа П-13 и П4В), коллекторные цепи запитываются напряжением ( $-20$  в) отрицательной полярности. Первый предварительный каскад по схеме с общим эмиттером на маломощном триоде П13 служит для усиления и инвертирования управляющего импульсного сигнала  $U_c$ , при отсутствии которого триод находится в состоянии отсечки

(выключен) путем пассивного запираания от насыщенного выходного триода модулятора.

Второй, собственно выходной каскад усиления мощности (ключ) выполнен на триоде типа П4В по схеме с общим эмиттером и нормаль-

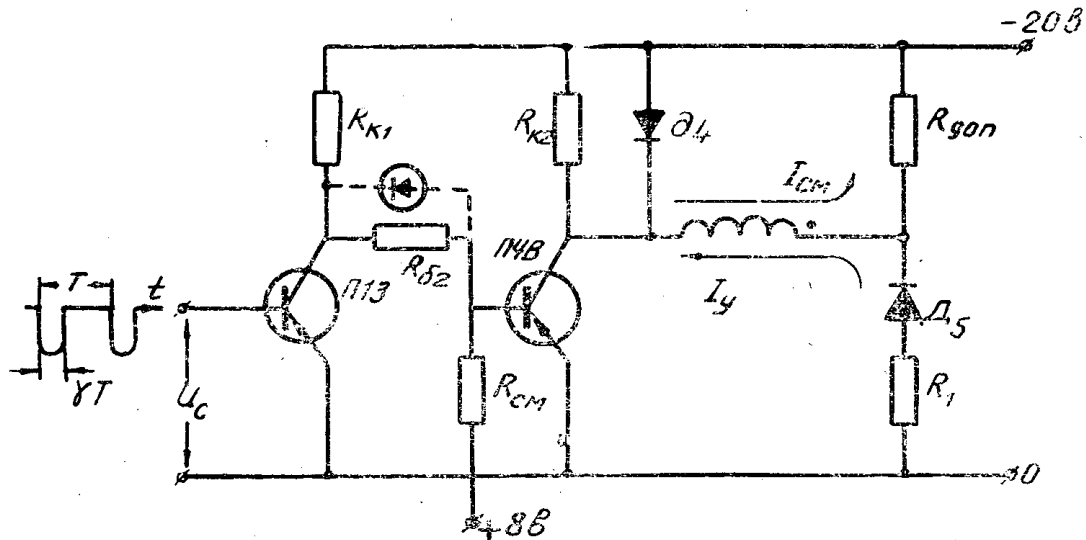


Рис. 6. Принципиальная схема выходного каскада полупроводникового усилителя класса Д.

но (при отсутствии управляющего сигнала) открыт — находится в режиме насыщения. Выходной триод образует управляемое плечо моста, состоящего, с одной стороны, из выходного триода и его коллекторного сопротивления  $R_{к2}$ , с другой стороны, из омического делителя на сопротивлениях  $R_{доп}$  и  $R_1$ . Большая часть коллекторного тока насыщенного выходного триода, протекая по ОУ и дополнительному сопротивлению  $R_{доп}$ , образует ток смещения  $I_{см}$  МУС.

Входной управляющий сигнал подается с выхода модулятора в виде серии импульсов отрицательной полярности также с частотой  $2f_k = 100$  гц. Первый триод при наличии импульсов управления открывается, переходя в режим насыщения, а выходной триод запирается, переходя в режим отсечки под действием источника напряжения положительной полярности в базовом делителе  $R_{б2} - R_{см}$ . При больших управляющих сигналах  $\gamma \rightarrow 1$ , ток ОУ падает до 0 и затем реверсируется, полностью открывая силовой МУС.

Полупроводниковый диод  $d_4$  (типа Д7В) защищает выходной триод от коллекторных перенапряжений.

Возникающее при включении силовой цепи МУС импульсное перенапряжение, имеющее полярность «+» на начале ОУ, замыкается в разрядном контуре: ОУ —  $R_{доп}$  — открывающийся диод  $d_4$ . Полупроводниковый диод  $d_5$  (типа Д7Ж) при этом препятствует прохождению импульса перенапряжения в другие цепи ППУ, отключая контур его прохождения.

В реальных приводах с МУС на вход ППУ поступает спектр помех двух явно выраженных частот: преобладающей в большинстве случаев помехи промышленной частоты  $f_n = f_k = 50$  гц и частоты ШИМ — 100 гц.

На осциллограмме рис. 7 б показано прохождение помехи  $f_n = 50$  гц через ШИМ. Так как  $f_n = \frac{100}{2}$ , то для одного импульса ШИМ она действует как положительная обратная связь, а для другого — как

отрицательная. На осциллограмме четко видны указанные пары импульсов, один из которых расширен пропорционально сигналу  $\Delta U_y + \Delta U_n$ , другой сужен пропорционально сигналу  $\Delta U_y - \Delta U_n$ . При этом средняя величина  $\gamma$  за два периода коммутации остается примерно той же. Поэтому влияние  $f_n = 50$  гц. при работе усилителя на линейной части характеристики (вход—выход) на работу привода с МУС не сказывается. При выходе усилителя в зону насыщения это действие сводится в основном к снижению коэффициента усиления ППУ. Теоретически наиболее опасными являются помехи, частоты которых близки к таковой внутренней коммутации ППУ класса Д. На осциллограмме рис. 7 а показано прохождение искусственно созданной помехи частоты  $f'_n = 95$  гц через ШИМ. В этом случае на выходе усилителя образуются низкочастотные биения, обрабатываемые исполнительным электродвигателем рис. 7а пунктиром). В реальных же системах приводов появление таких помех маловероятно. На осцил-

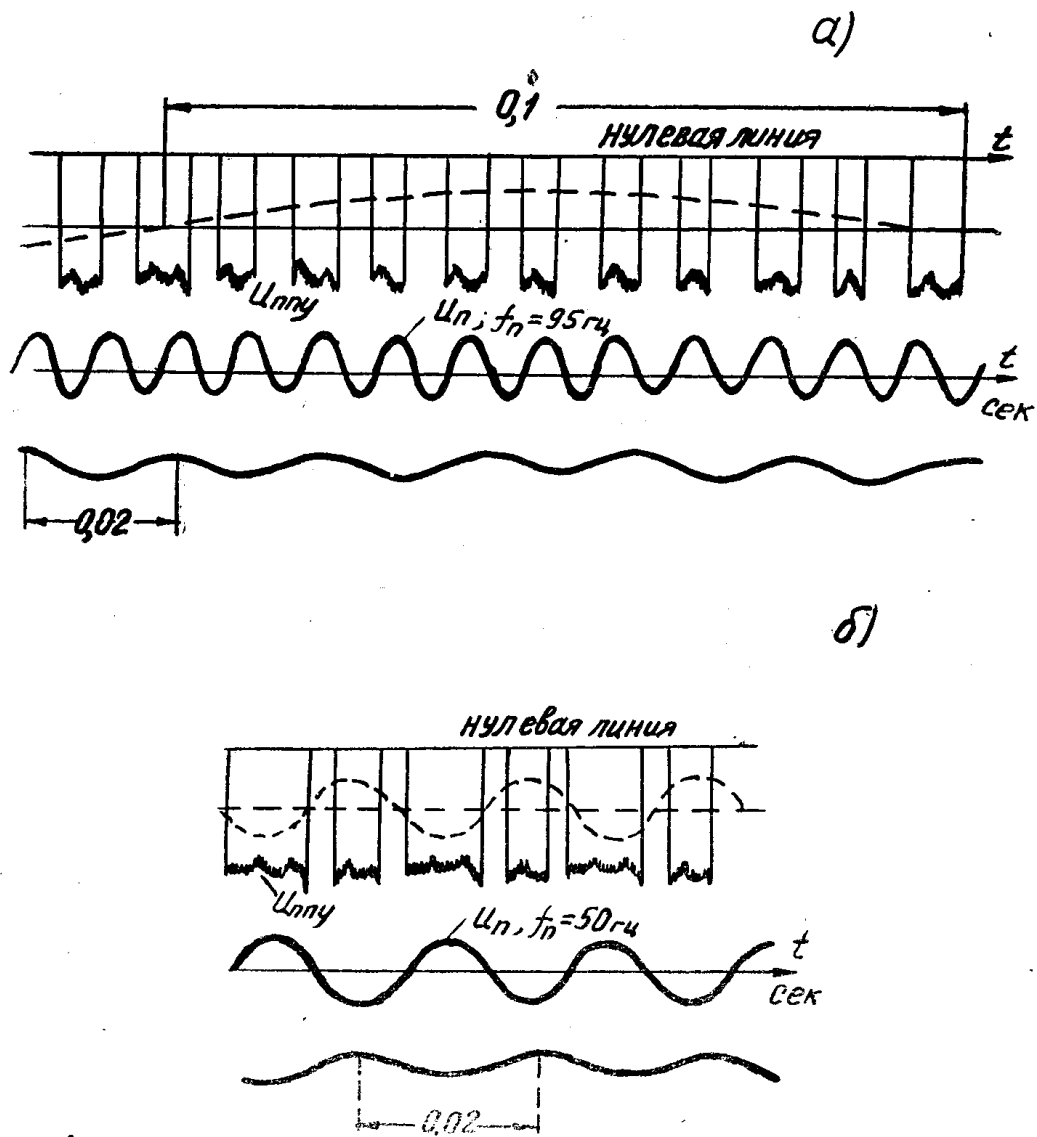


Рис. 7. Осциллограмма прохождения сигнала помехи через усилитель класса Д.

- а—напряжение помехи частотой 95 гц;
- б—напряжение помехи частотой 50 гц.



лограммах под нулевой линией изображены импульсы выходного напряжения  $U_{\text{вых}}$  усилителя и помеха  $U_{\text{ш}}$  с частотой  $f_{\text{ш}}$ . Внизу осциллограмм приведены отметки времени с  $T=0,02$  сек.

Выходные импульсы усилителя дополнительно промодулированы по амплитуде с частотой 300 гц. пульсирующим выходным напряжением выпрямителя.

Рассмотренный ППУ был изготовлен и исследован в отраслевой лаборатории Ульяновского политехнического института и на УЗТС.

### Выводы

1. Полупроводниковый усилитель класса Д отличается высокой надежностью и повышенной выходная мощность, что необходимо при согласовании ППУ с МУС.

2. Разработанный вариант схемы широтно-импульсного модулятора при соответствующей настройке фильтра в цепи коррекции обладает удовлетворительной помехозащищенностью.

3. Положительные результаты, полученные при испытании усилителя класса Д в заводских условиях, позволяют рекомендовать его для использования в качестве предварительного каскада усиления электропривода тяжелых станков.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Сборник 1 «Регулируемые электроприводы и бесконтактная автоматика в машиностроении», МДНТП им. Ф. Э. Дзержинского, 1962.

2. Ленинградский ДНТП, Т. А. Глазенко. «Полупроводниковые усилители класса Д для систем электромашинной автоматики на постоянном токе», Ленинград, 1963.

3. Я. З. Цыпкин. «Теория импульсных систем», Физмат, 1958.

4. М. А. Розенблат. «Магнитные усилители», Госэнергоиздат, 1960.