

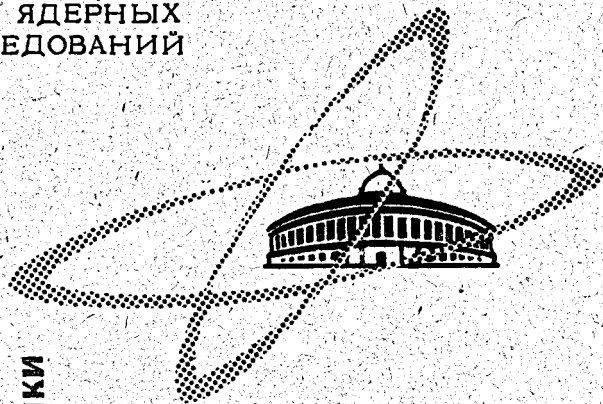
Л2840-СЗ44.3

11/x-69

Г-288  
ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

11 - 4588

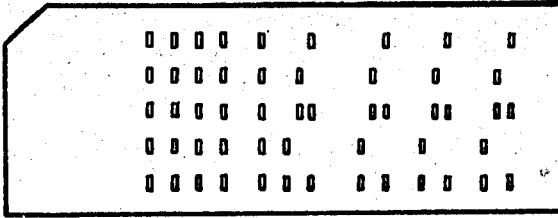


ЛАБОРАТОРИЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ  
И АВТОМАТИЗАЦИИ

Ю.М.Грашин, В.И.Дворецкий, А.И.Родионов,  
О.А.Тюриков

ПРОГРАММА АРПП-1  
ДЛЯ ПОЛНОСТЬЮ АВТОМАТИЧЕСКОГО РАСЧЕТА  
ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ  
В ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ СХЕМАХ НА ЭВМ

1969



11 - 4588

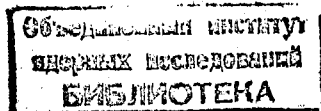
7933/1 нр.

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ  
ЛВТА

Ю.М.Грашин, В.И.Дворецкий, А.И.Родионов,  
О.А.Тюриков

ПРОГРАММА АРПП-1  
ДЛЯ ПОЛНОСТЬЮ АВТОМАТИЧЕСКОГО РАСЧЕТА  
ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ  
В ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ СХЕМАХ НА ЭВМ

Направлено в журнал "Передовой научно-технический  
и производственный опыт"



В связи с возрастающим объемом и сложностью радиоэлектронной аппаратуры, применяемой в науке и технике, становится актуальной задача автоматизации проектирования электронных схем. В последние годы в этой области ведутся интенсивные работы /1,2,3,4/. Одним из аспектов проблемы является автоматизация расчета переходных процессов в электрических цепях с помощью ЭВМ.

Расчет переходного процесса в схеме сводится к решению системы дифференциальных уравнений, описывающих эту схему и внешнее воздействие на нее. Для схем, содержащих линейные элементы с сосредоточенными параметрами, всегда можно найти выражение переходной характеристики в виде явной функции от времени и начальных условий /5/. Однако для сложных схем общность такого выражения практически теряет ценность из-за своей громоздкости. В этом случае может оказаться выгоднее применять численные методы интегрирования системы дифференциальных уравнений (с помощью ЭВМ).

Численное интегрирование можно осуществить двумя путями:

- 1) приведением исходных уравнений, описывающих схему, к системе уравнений первой степени, разрешенных относительно производных функций (метод Рунге-Кутты и др. /6,7/ );
- 2) нахождением операторного выражения переходной характеристики схемы в виде рациональной дроби /8,9/ .

Однако система дифференциальных уравнений, составленная для схемы непосредственно по законам Кирхгофа (см. рис. 1а), в общем случае может оказаться алгебраически неразрешимой

относительно своих вторых производных, т.е. алгебраически не приводится к виду, изображенному на рис. 1б. Пример такой неразрешимости показан на рис. 2. Это затрудняет формализацию расчета переходных характеристик с применением численного интегрирования первого типа (метод Рунге-Кутты и др.). Формализация расчета по второму пути, по-видимому, встретится с аналогичной трудностью при отыскании операторного выражения искомой переходной характеристики.

Для линейных, физически осуществимых электронных схем с сосредоточенными параметрами авторами сформулирован и математически обоснован метод и алгоритм анализа структуры схемы и получения системы уравнений, всегда разрешимых относительно своих вторых производных, что позволило полностью формализовать расчет переходных процессов. На основе этого метода разработана рабочая программа АРПП-1 для полностью автоматического численного расчета переходных процессов в произвольных электрических цепях, состоящих из линейных элементов с сосредоточенными параметрами, включая управляемые элементы, обратные связи и взаимные индуктивности.

Данная программа использовалась для расчета переходных характеристик схем на ЭВМ М-20 и БЭСМ-4. Участие инженера при работе с этой программой сведено к минимуму. Расчет производится следующим образом. В исследуемой эквивалентной схеме произвольно нумеруются все точки (узлы) соединений элементов между собой, и в соответствии с этой нумерацией переписываются все параметры элементов схемы.

Параметры  $C, R, L$  заносятся в таблицы в виде групп из 3 чисел (номинал и номера двух точек, между которыми включен данный элемент).

Управляемые элементы и магнитные связи заносятся в таблицы в виде групп из пяти чисел. На рис. 4 приведен пример заполнения числового материала для схемы рис. 3.

При использовании одного куба оперативной памяти программа может обработать: максимальное число точек в рассчитываемой схеме - 25, максимальное число емкостей - 325, сопротивлений - 325, индуктивностей - 325, магнитных связей - 250.

Сигнал внешнего воздействия на схему принципиально может быть произвольно заданной функцией времени. В данной программе реализовано два вида входного сигнала:

1. Единичная ступенька тока.

2. Ток вида

$$J(t) = 1 - (1 + ct)e^{-ct}, \text{ где } c = \frac{3,36}{T_H}.$$

Ниже приводятся примеры расчета переходных характеристик ряда схем, где во всех случаях входным сигналом является ступенька тока.

Переходная характеристика схемы высокоэффективной коррекции фронта /рис.5/ полностью совпадает с аналитическим расчетом ее в работе /10/. На рис.6 /"а" и "б"/ - схема и переходные характеристики линии задержки, где можно отметить малую величину выброса на вершине переходной характеристики.

Интересно отметить, что переходная характеристика катодного повторителя, как это следует из операторного выражения ее, может иметь колебательный характер даже без

учета паразитных индуктивностей и времени пролета электронов в лампе. Машинный расчет показал, что эти колебания могут быть довольно большими /см. рис.7/.

Расчет переходной характеристики двухкаскадного усилителя на транзисторах /см. рис.8/ соответствует результатам аналитического анализа этой схемы, проведенного в работе /II/. При расчете на машине использовалась эквивалентная схема транзистора /линейное приближение/, изображенная на рис. 9.

Расчет широкополосного усилителя, описанного в работе /10/, проведен с вариацией всех элементов схемы на  $\pm 10\%$ . Переходная характеристика при этом изменяется в пределах ширины линии на графике /см. рис. 10, 11/

В процессе эксплуатации этой программы не было замечено случаев существенных погрешностей машинного расчета. Тем не менее вопрос о погрешностях требует дополнительного исследования.

В заключение необходимо отметить простоту подготовки, удобство использования и возможность быстро получать результаты вычислений по описанной программе.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Электроника (обзор), том 39, № 19, 1966 г.
2. Электроника (обзор), том 40, № 3, 1967 г.
3. ТИИЭР, том 55, № II, 1967 г.
4. В.П.Сигорский и др. Алгоритмы анализа и синтеза электронных схем. Известия высших учебных заведений, том XI, № II, 1968 г.
5. Д.Сансоне. Обыкновенные дифференциальные уравнения. Том II. Издательство иностранной литературы, Москва, 1953 г.
6. Б.П.Демидович, И.А.Марон, Э.З.Шувалова. Численные методы анализа. Издательство "Наука", Москва, 1967 г.
7. Библиотека стандартных программ под общей редакцией М.Н. Шура-Бура, Москва, 1961 г.
8. А.И.Петренко. К определению обратного преобразования Лапласа без разложения схемной функции на множители. Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника, том XI, № II, 1968 г.
9. Н.С.Кочанов. Основы синтеза линейных электрических цепей во временной области. Издательство "Связь", 1967 г.
10. Ю.М.Грашин. Методика некоторых экспериментов с мезонными пучками синхроциклотрона ОИЯИ, диссертация, 1965 г.
11. Ю.А.Волков. Исследование транзисторных импульсных усилителей в области малых времен и способов повышения их добротности. Диссертация, 1964 г.

Рукопись поступила в издательский отдел

7 июля 1969 г.

а) Уравнения, получаемые методом узловых потенциалов

$$\sum_{j=1}^n c_{ij} \ddot{u}_j + \sum_{j=1}^n g_{ij} \dot{u}_j + \sum_{j=1}^n d_{ij} u_j = 0$$

где  $i = 1, 2 \dots n$  ;

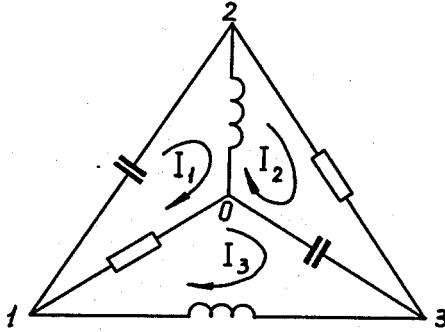
б) Уравнения, разрешенные относительно вторых производных

$$\ddot{u}_i = \sum_{j=1}^n g_{ij}^* \dot{u}_j + \sum_{j=1}^n d_{ij}^* u_j ;$$

$$\dot{u}_i = X_i ; \quad i = 1, 2 \dots n.$$

Рис. I.





Уравнения, получаемые методом:

1) узловых потенциалов

$$\begin{aligned}
 C_{12} \cdot \ddot{U}_1 - C_{12} \cdot \ddot{U}_2 + 0 \cdot \ddot{U}_3 &= -\frac{1}{R_{01}} \cdot \dot{U}_1 - \frac{1}{L_{13}} U_1 + \frac{1}{L_{13}} U_3 \\
 0 \cdot \ddot{U}_1 + 0 \cdot \ddot{U}_2 + C_{30} \cdot \ddot{U}_3 &= \frac{1}{R_{23}} \dot{U}_2 - \frac{1}{R_{23}} \dot{U}_3 + \frac{1}{L_{13}} U_1 - \frac{1}{L_{13}} U_3 \\
 -C_{12} \cdot \ddot{U}_1 + C_{12} \cdot \ddot{U}_2 + 0 \cdot \ddot{U}_3 &= -\frac{1}{R_{23}} \dot{U}_2 + \frac{1}{R_{23}} \dot{U}_3 - \frac{1}{L_{20}} U_2
 \end{aligned}$$

2) контурных токов

$$\begin{aligned}
 L_{02} \cdot \ddot{I}_1 - L_{02} \cdot \ddot{I}_2 + 0 \cdot \ddot{I}_3 &= -R_{01} \dot{I}_1 + R_{01} \dot{I}_3 - \frac{1}{C_{12}} I_1 \\
 0 \cdot \ddot{I}_1 + 0 \cdot \ddot{I}_2 - L_{13} \cdot \ddot{I}_3 &= R_{01} \dot{I}_1 - R_{01} \dot{I}_3 + \frac{1}{C_{30}} I_2 - \frac{1}{C_{30}} I_3 \\
 -L_{02} \cdot \ddot{I}_1 + L_{02} \cdot \ddot{I}_2 + 0 \cdot \ddot{I}_3 &= -R_{23} \dot{I}_2 - \frac{1}{C_{03}} I_2 + \frac{1}{C_{03}} I_3
 \end{aligned}$$

Определитель матрицы коэффициентов при вторых производных в обоих случаях равен нулю.

Рис. 2.

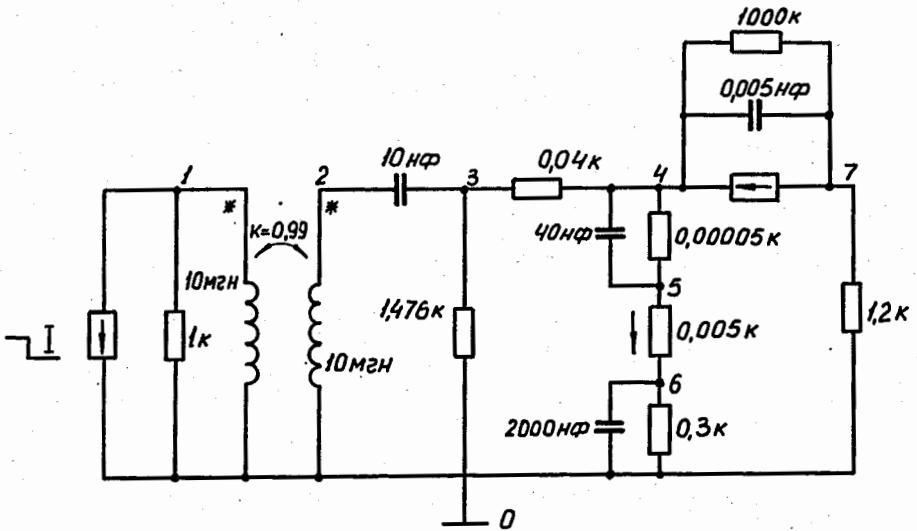
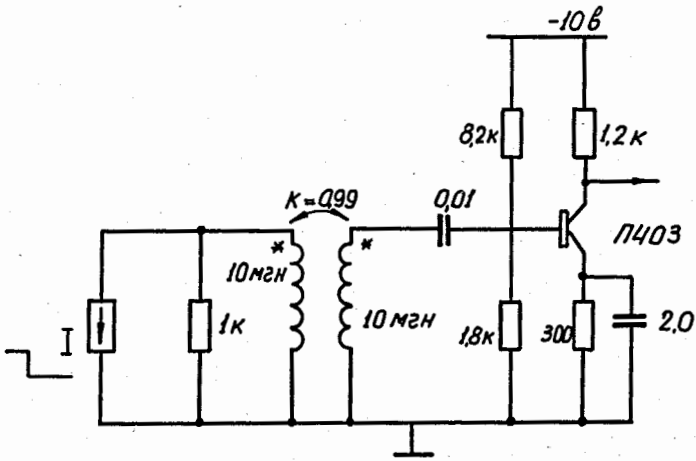


Рис. 3.

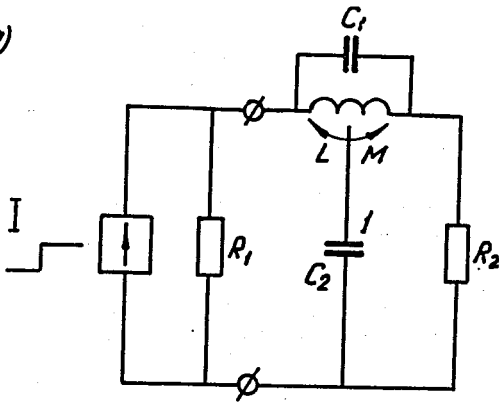
7	колич. узлов	1	$R_{10}$	10	$L_{10}$
4	" емкостей	1		1	
8	" сопротив-й	0		0	
2	" индуктив-й	1,476	$R_{30}$	10	$L_{20}$
1	" магн. связей	3		2	
1	" упр-х элем-в	0		0	
1	N узла $6 \times 1$	0,04		0,99	
0	" $6 \times 2$	3		1	
1	форма тока $6 \times 1$	4		0	
0	" $6 \times 2$	$5 \cdot 10^{-5}$	$R_{45}$	2	
-1	ампл-да тока $6 \times 1$	4		0	
0	" $6 \times 2$	5			
20	параметр $p_{i1}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$R_{56}$	0,998	
0	" $p_{i2}$	5		4	
$10^{-4}$	Нач. шаг интегр-я	6		7	
10	t решения	0,3	$R_{60}$	5	
0,2	шаг печати	6		4	
10	$C_{23}$	0			
2		$10^3$			
3		4	$R_{47}$		
40	$C_{45}$	7			
4		1,2	$R_{70}$		
5		7			
$2 \cdot 10^3$	$C_{60}$	0			
6					
0					
$5 \cdot 10^{-3}$	$C_{47}$				
4					
7					

Магн. связь

Транзистор

Рис. 4.

а)



$$R_1 = 1 \text{ МОМ}$$

$$R_2 = 150 \text{ Ом}$$

$$C_1 = 1.2 \text{ пФ}$$

$$C_2 = 13 \text{ пФ}$$

$$L = 0.292 \text{ мкГн}$$

$$M = 0.046 \text{ мкГн}$$

б)

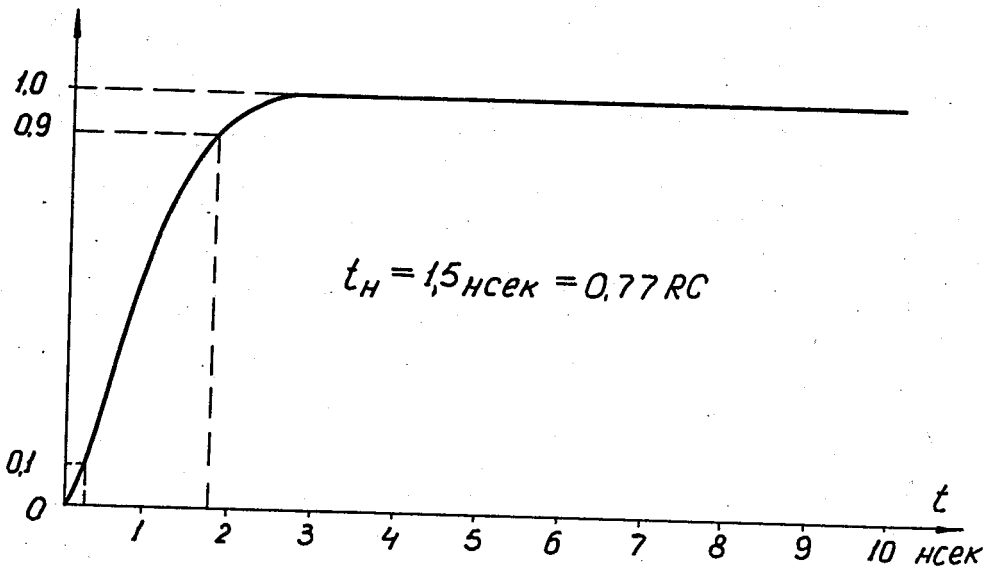
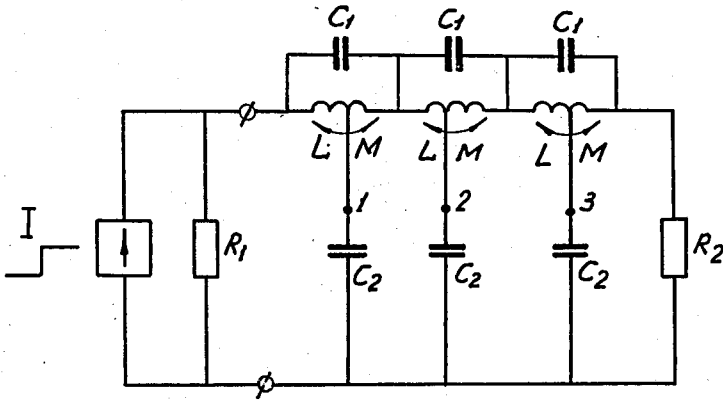


Рис. 5.

а)



- $R_1 = 1 \text{ МОМ}$
- $R_2 = 150 \text{ Ом}$
- $C_1 = 1,2 \text{ пФ}$
- $C_2 = 13 \text{ пФ}$
- $L = 0,292 \text{ мкГн}$
- $M = 0,046 \text{ мкГн}$

б)

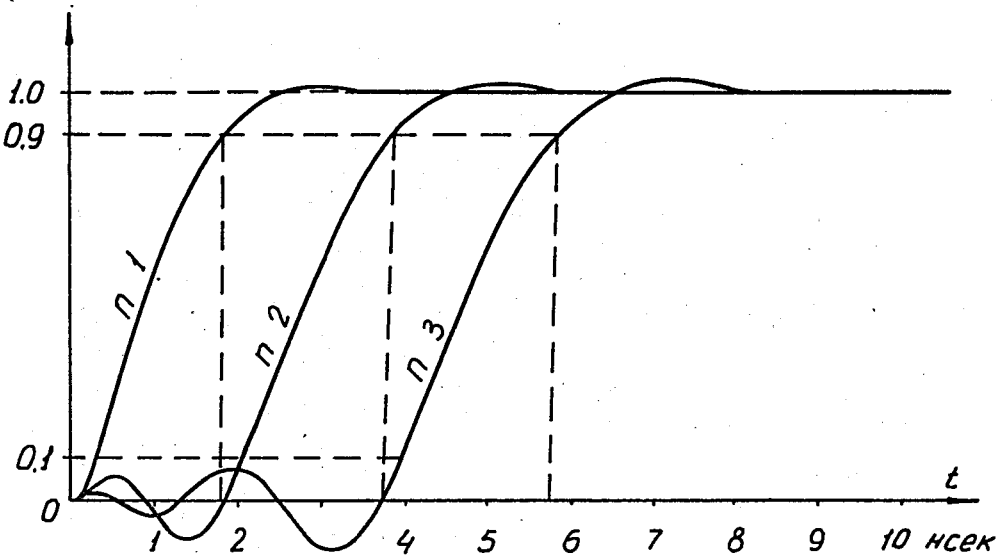
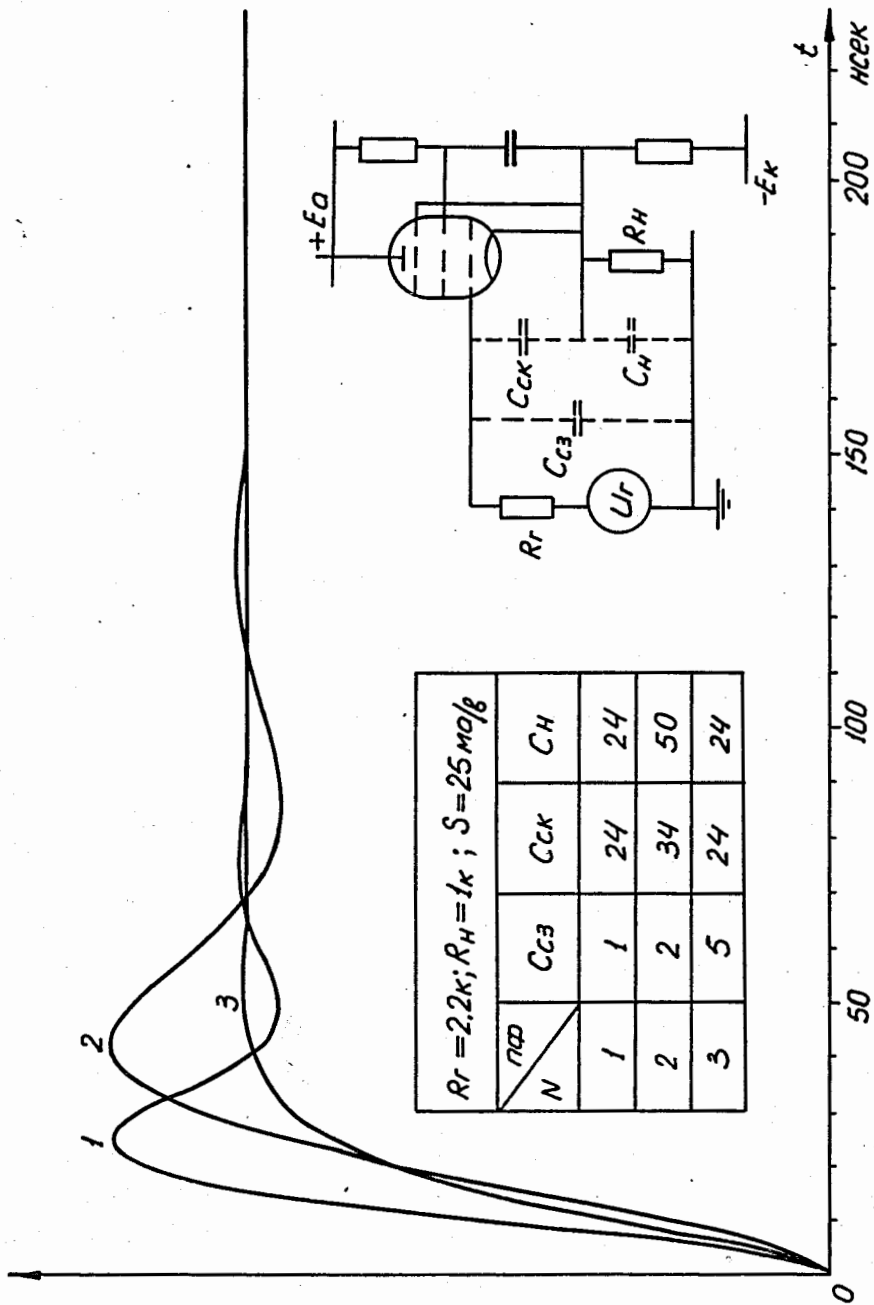


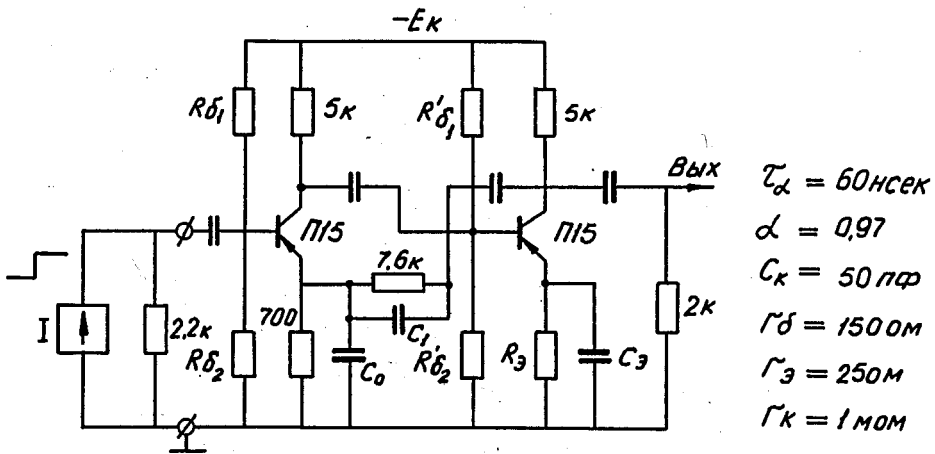
Рис. 6.



$R_r = 2.2 \text{ к}; R_H = 1 \text{ к}; S = 25 \text{ мА/л}$

N	пд		
	$C_{сз}$	$C_{ск}$	$C_H$
1	1	24	24
2	2	34	50
3	5	24	24

Рис. 7. Переходная характеристика катодного повторителя.



δ)

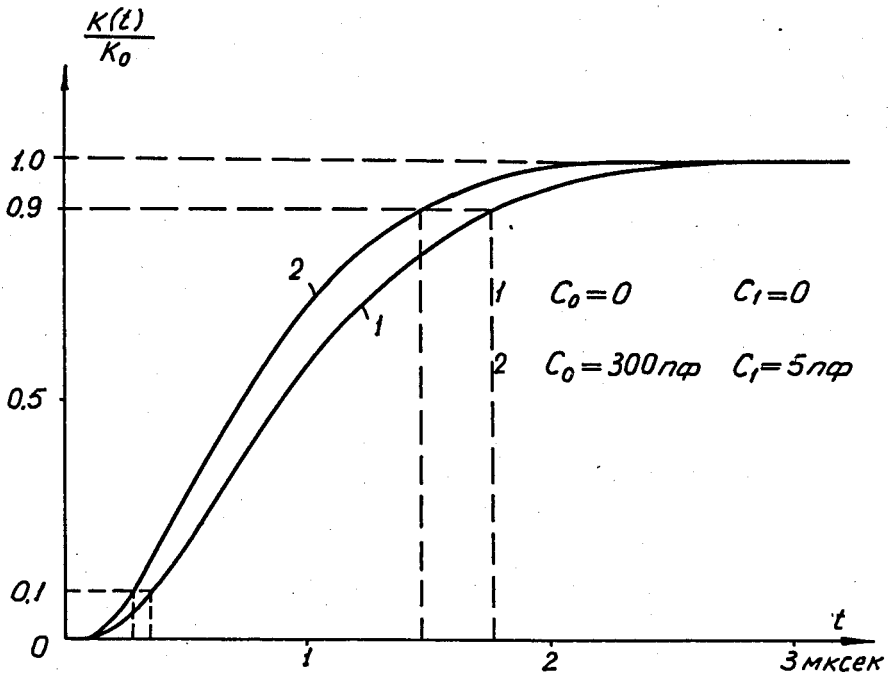


Рис. 8.

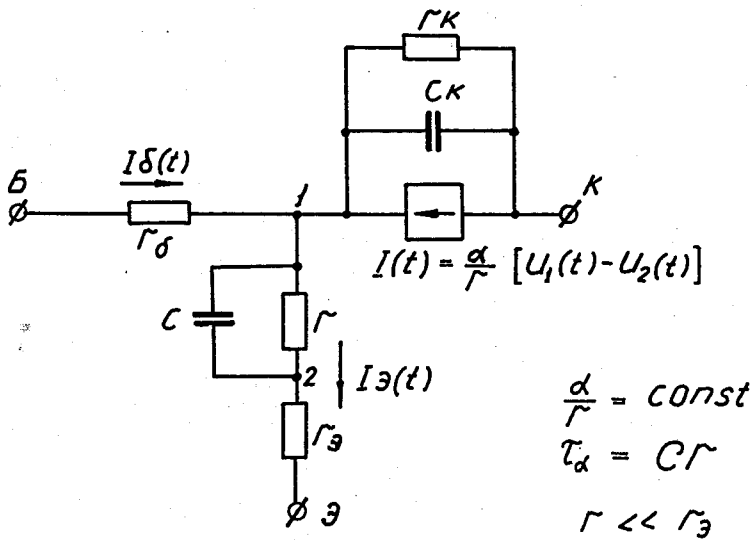


Рис. 9.



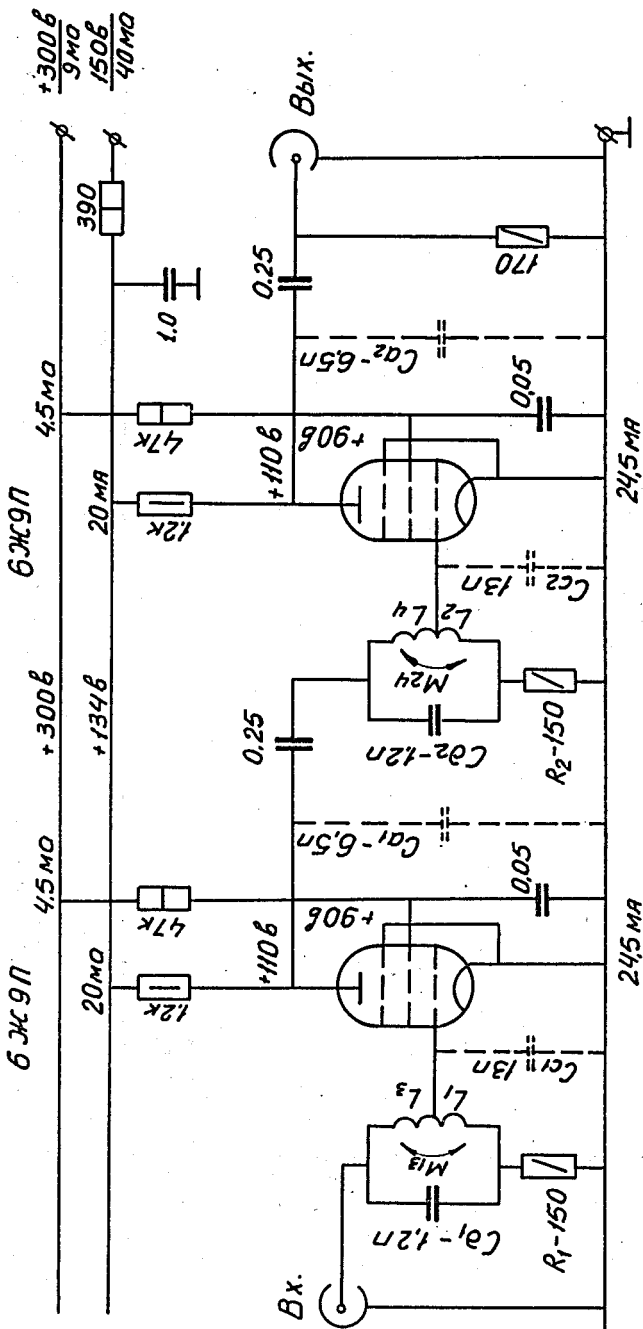


Рис. 10. Принципиальная схема усилителя. Собственное время нарастания фронта - 3,6 нсек. (Выброс - 1%).

Коэффициент усиления - 8

$L_1 = L_2 = L_3 = L_4 = 0,1$  мкГн.

$M_{13} = M_{24} = 0,046$  мкГн.

(Паразитные емкости  $C_{c1}$ ,  $C_{c2}$ ,  $C_{a1}$ ,  $C_{a2}$  включают емкости монтажа).

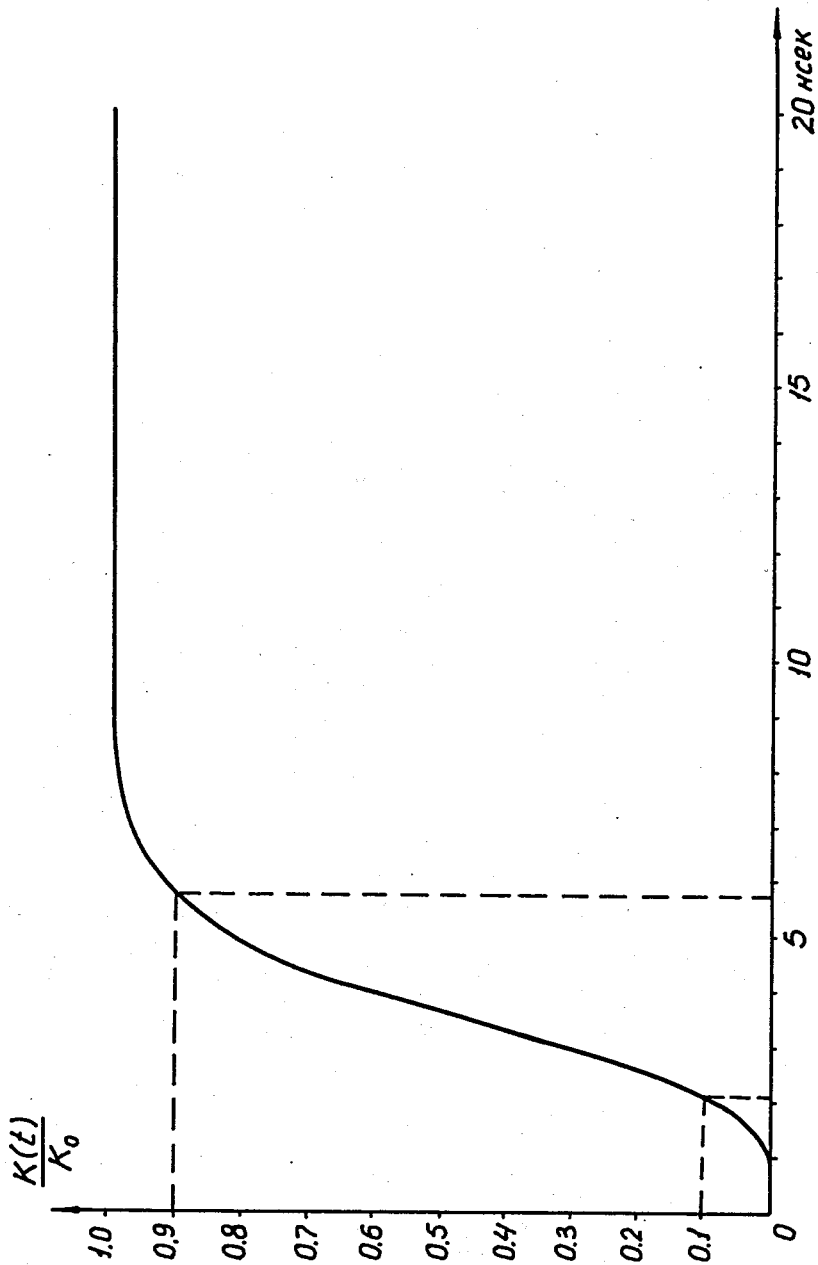


Рис. 11. Переходная характеристика усилителя. Время нарастания фронта - 3,6 нсек.