

## ГРАФИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК УСИЛИТЕЛЕЙ С КАТОДНОЙ СВЯЗЬЮ НА ТРИОДАХ

И. А. СУСЛОВ

(Представлено научным семинаром радиотехнического факультета)

Ранее был описан [1] метод графического расчета динамических характеристик усилителя с катодной связью, дающий точность, сравнимую с точностью при экспериментальном определении этих характеристик. Однако расчеты по этому методу осложняются использованием двух вспомогательных кривых, вычерчиваемых отдельно, помимо построений, выполняемых на семействе анодных характеристик.

В [2] приведен другой метод, предложенный Г. Н. Алябьевой. Операции графического расчета ограничены здесь построениями на анодных характеристиках, но сопровождаются вычислениями целого ряда величин (тока первой лампы  $i_{a1}$ , усиленного напряжения  $u_1$ , выходных напряжений  $u_{\text{вых1}}$  и  $u_{\text{вых2}}$ ), что повышает трудоемкость расчетов.

Настоящая статья посвящена изложению упрощенного варианта метода [1], позволяющего свести до минимума вычисления и обойтись без построения вспомогательных кривых.

### Расчет динамической характеристики однокатодного каскада

Работа однокатодного усилителя с катодной связью (рис. 1а) описывается следующей системой уравнений, очевидной из рисунка.

$$i_k = i_{a1} + i_{a2}, \quad (1)$$

$$u_k = i_k R_k, \quad (2)$$

$$u_1 + u_{10} = u_{g1} + u_k \quad (3)$$

$$u_{20} = u_{g2} + u_k, \quad (4)$$

$$u_{a1} = E_a - u_k, \quad (5)$$

$$u_{\text{вых}} = E_a - i_{a1} R_a, \quad (6)$$

$$u_{a2} = u_{\text{вых}} - u_k, \quad (7)$$

$$i_{a1} = \Theta(u_{a1}, u_{g1}). \quad (8)$$

$$i_{a2} = \Theta(u_{a2}, u_{g2}). \quad (9)$$

Соотношения (8) и (9) являются уравнениями анодных характеристик, которые будем считать тождественными для обоих триодов. Сопротивления  $R_k$  и  $R_a$ , смещения  $u_{10}$  и  $u_{20}$  и напряжение источника анодного питания  $E_a$  будем предполагать известными.

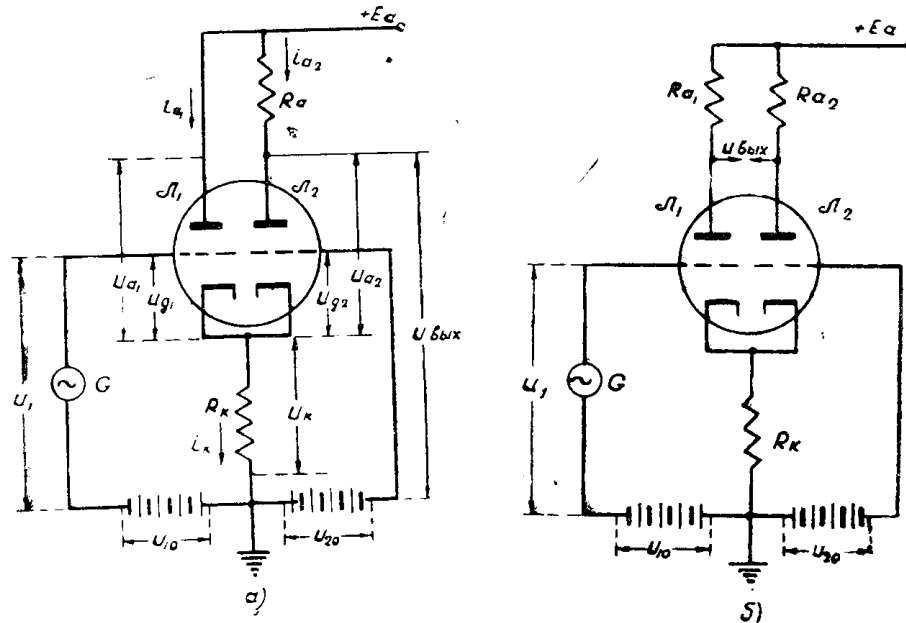


Рис. 1.

Динамическую характеристику  $i_{a2} = f(u_1)$  [или  $u_{\text{вых}} = F(u_1)$ ] можно найти из системы уравнений (1—9) путем последовательного исключения всех переменных, не входящих в эту зависимость. Операцию исключения выполним с помощью графических методов. Вначале будем полагать смещения  $u_{10}$  и  $u_{20}$  одинаковыми  $u_{10} = u_{20} = u_0$ . На семействе анодных характеристик триода через точку  $O'(E_a, 0)$  проведем прямые 1, 2 и 3 — нагрузочные прямые для сопротивлений нагрузок  $R_a$ ,  $R_a + R_k$  и  $R_k$  соответственно (рис. 2). На характеристике  $u_g = 0$  отмечаем точку  $A$ , лежащую левее прямой 1 на расстоянии  $u_0$  от нее, отсчитываемом параллельно горизонтальной оси. Влево от точки  $O'(E_a, 0)$  откладываем отрезок  $O'Q$ , равный  $|u_{g2}| + u_0$ , где  $u_{g2}$  — напряжение  $u_g$ , соответствующее статической характеристике, проходящей через точку  $Q$ . Соединим  $A$  и  $Q$  прямой 1. Она мало отличается [1] от кривой  $i_{a2} = \Phi_2(u_{a2})$ . На прямой 1 фиксируем точки  $A, B, C$  и т. д. пересечения с анодными характеристиками.

Отметим точку  $M$  пересечения 1 с 2 и лежащую на одном уровне с ней точку  $M'$  прямой 3. Соединим  $M'$  с  $Q$  прямой 1'. Эта прямая мало отличается [1] от кривой  $i_{a2} = \Psi_2(-u_k)$ , если за начало координат взять точку  $O'(E_a, 0)$ . На 1' отмечаем точки  $A_1, B_1, C_1$  и т. д., лежащие на одинаковых уровнях с  $A, B, C$  и т. д.

Обозначим через  $N$  точку прямой 3, лежащую на одной вертикали с  $Q$ , а через  $m$  — проекцию  $M'$  на горизонтальную ось. Прямая 11, соединяющая  $N$  и  $m$ , является [1] приближенным изображением зависимости  $i_{a1} = \Phi_1(u_{a1})$ . На ней отмечаем точки  $A_2, B_2, C_2$  и т. д., имеющие одинаковые абсциссы с  $A_1, B_1, C_1$  и т. д.

Ординаты  $A, B, C$  и т. д. и  $A_2, B_2, C_2, \dots$  дают значения токов  $i_{a2}$  и  $i_{a1}$ . Соответствующие им напряжения  $u_1$  на основании уравнений (3) и (4) определяются разностью

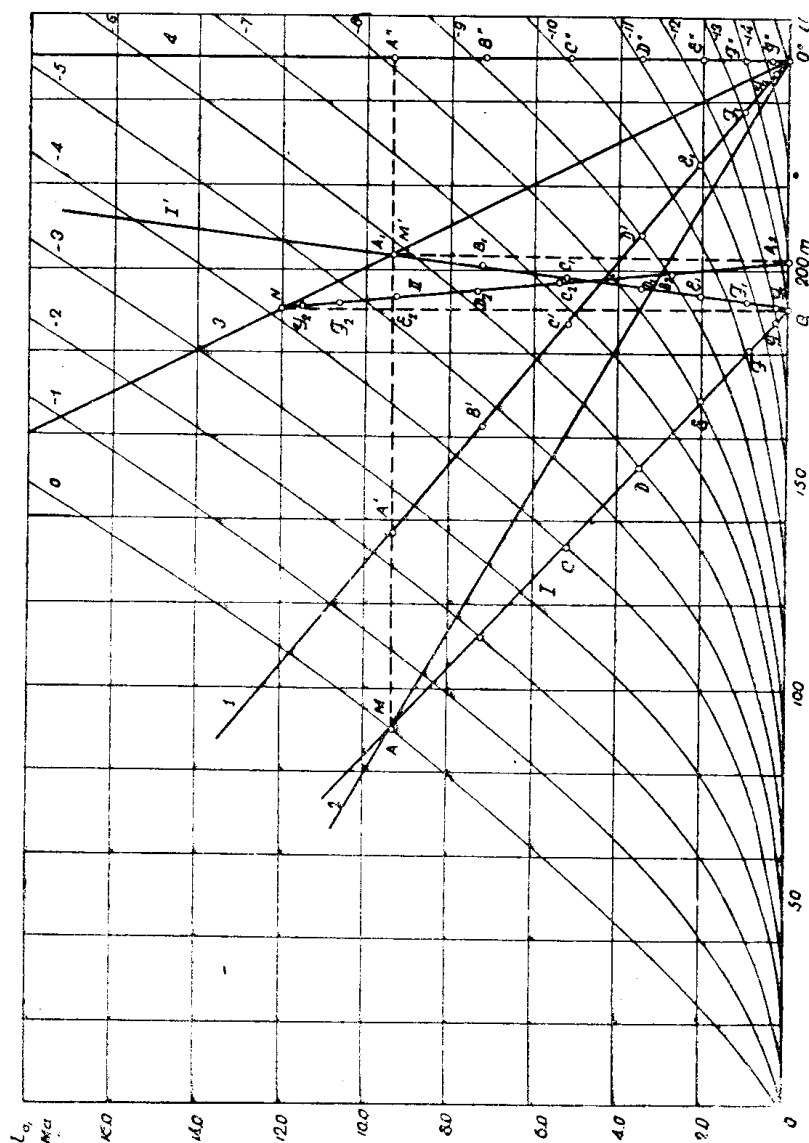


Рис. 2.

$$u_1 = u_{g1} - u_{g2}. \quad (10)$$

Здесь  $u_{g2}$  — сеточные напряжения, относящиеся к точкам  $A, B, C$  и т. д. прямой 1. Их можно непосредственно прочесть на характеристиках, проходящих через эти точки. Точки  $A_2, B_2, C_2$  и т. д., как правило, не лежат на характеристиках. Соответствующие им напряжения  $u_{g1}$  находятся с помощью интерполяции. Отрезок горизонтальной прямой, проведенный, например, через точку  $B_2$  и заключенный между двумя соседними характеристиками семейства, делится этой точкой на части, пропорциональные разностям между напряжениями, относящимися к соседним характеристикам, и напряжением для данной точки ( $B_2$ ).

Найденные значения  $u_{g2}$  и  $u_{g1}$  и значения соответствующих им токов  $i_{a2}$  и  $i_{a1}$  удобно записывать в форме таблицы. По ней легко можно построить динамическую характеристику  $i_{a2} = f(u_1)$  и зависимость  $i_{a1} = f_1(u_1)$ .

Для определения напряжения  $u_{\text{вых}}$  на выходе усилителя отметим на уровнях  $A, B, C$  и т. д. точки  $A', B', C'$  и т. д. прямой 1' и точки  $A'', B'', C''$  и т. д. на перпендикуляре 4 к оси напряжений, проведенном через точку  $O'$ . Отрезки  $A'A'', B'B'', C'C''$  и т. д. определяют значения выходного напряжения  $u_{\text{вых}}$ , которые также целесообразно записать в таблицу. Взяв из последней  $u_{\text{вых}}$  и соответствующие им значения  $u_1$ , можно вычертить характеристику  $u_{\text{вых}} = F(u_1)$ .

### Расчет динамических характеристик двухтактного каскада

Основная система уравнений для токов и напряжений в двухтактном каскаде с катодной связью (рис. 1 б) отличается от соответствующей системы уравнений однотактного каскада только тем, что уравнение (5) заменяется уравнением

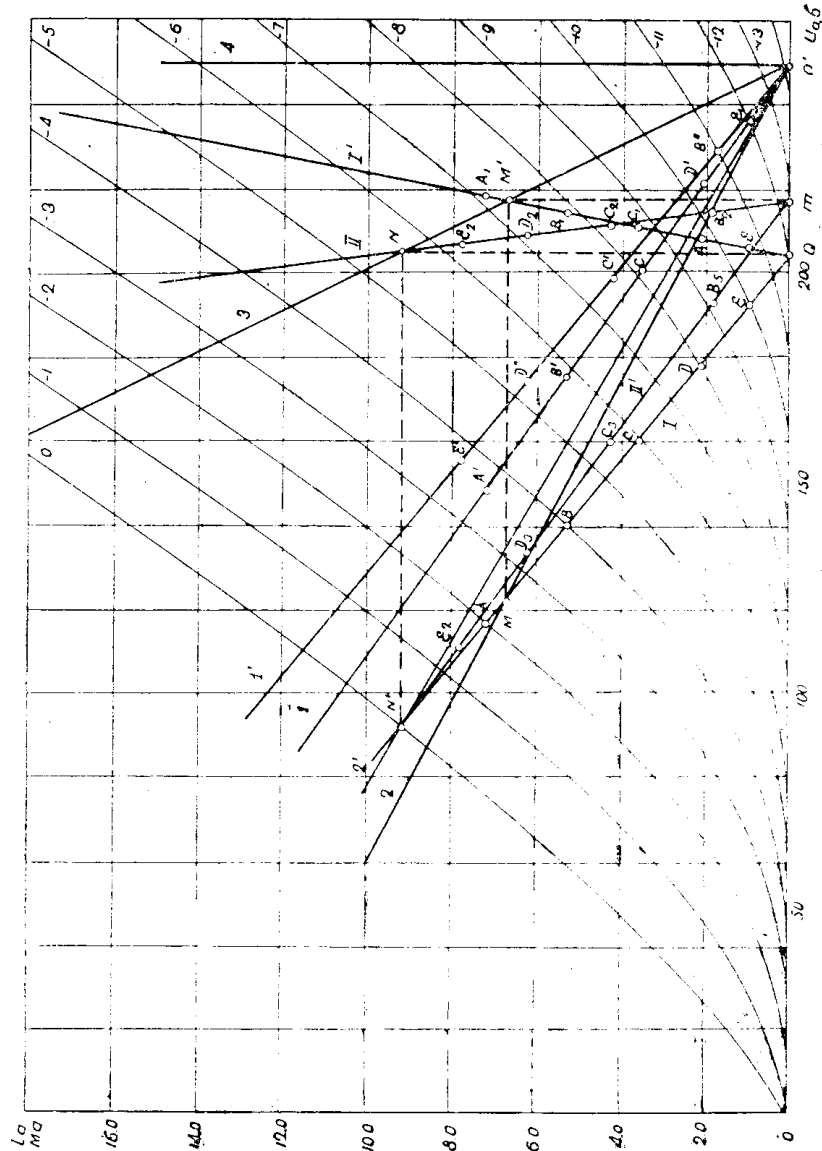


Рис. 3.

$$u_{a1} = E_a - i_{a1} R_{a1} - u_k. \quad (5')$$

Так как выходное напряжение в двухтактной схеме снимается с промежутка между анодами, наибольшую ценность имеет характеристика  $u_{\text{вых}} = u_{\text{вых1}} - u_{\text{вых2}} = u_{a1} - u_{a2} = g(u_1)$ .

При графическом расчете динамических характеристик строятся прямые  $I$ ,  $I'$  и  $II$ , совершенно такие же, как и в случае однокатодной схемы. Прямая  $II$  не будет, однако, представлять теперь зависимость тока  $i_{a1}$  от  $u_{a1}$ , так как  $u_{a1}$  определяется теперь уравнением (5'), а не (5). Чтобы найти графическое изображение зависимости  $i_{a1} = \Phi_1(u_{a1})$ , проводим из точки  $O'$  прямую  $2'$ , соответствующую нагрузке  $R_{a1} + R_k$  (рис. 3). На ней отмечаем точку  $N'$ , лежащую на одном уровне с точкой  $N$  прямой  $II$ . Соединив  $N'$  с  $m$ , получаем прямую  $II'$ , которая является приближенным выражением зависимости  $i_{a1} = \Phi_1(u_{a1})$ . На прямой  $II'$  отмечаем точки  $A_3, B_3, C_3$  и т. д., лежащие на одинаковых уровнях с  $A_2, B_2, C_2$  и т. д. прямой  $II$ . Интерполяцией можно найти сеточные напряжения  $u_{g1}$  для характеристик, проходящих через эти точки, а ординаты точек дают соответствующие значения  $i_{a1}$ .

На нагрузочных прямых  $1$  и  $1'$  (для анодных сопротивлений  $R_{a2}$  и  $R_{a1}$ ) отмечаем точки  $A', B', C' \dots$  и  $A'', B'', C'', \dots$ , лежащие на одинаковых уровнях с  $A, B, C, \dots$  и  $A_3, B_3, C_3 \dots$ . Расстояния от этих точек до вертикальной прямой  $4$  определяют выходные напряжения  $u_{\text{вых}2}$  и  $u_{\text{вых}1}$  соответственно.

По точкам  $A, B, C \dots A_3, B_3, C_3 \dots$  можно составить таблицу связанных между собой значений  $u_{g2}$ ,  $i_{a2}$ ,  $u_{g1}$  и  $i_{a1}$ . Ее можно дополнить вычисленными значениями  $u_1 = u_{g1} - u_2$  и значениями  $u_{\text{вых}1}$  и  $u_{\text{вых}2}$ , найденными по точкам  $A', B', C' \dots$  и  $A'', B'', C'' \dots$ . Данные таблицы позволяют вычертить кривую  $u_{\text{вых}1} - u_{\text{вых}2} = g(u_1)$  — динамическую характеристику.

#### Расчет режима каскада с катодной связью

В усилителях с катодной связью обычно применяются сравнительно большие  $R_k$ , позволяющие получать достаточно сильную связь между каскадами. Однако при больших  $R_k$  рабочие точки ламп смещаются в области нижних участков анодных характеристик, крутизны ламп и коэффициент усиления уменьшаются, раствор динамической характеристики сокращается. Это заставляет применять дополнительные положительные смещения  $u_{10}$  и  $u_{20}$ , позволяющие обеспечить наиболее выгодный режим для ламп усилителя. Величины этих смещений ограничены появлением сеточных токов при изменении усиливаемого напряжения в пределах рабочего участка динамической характеристики, т. е. участка, на протяжении которого ни одна из ламп не заперта.

Обозначим через  $u_{0\text{макс}}$  то значение  $u_0$ , при котором появляется сеточный ток на одной из границ рабочего участка динамической характеристики. Как показано в [1], при однокатодной схеме  $u_{0\text{макс}}$  будет соответствовать появлению сеточного тока у второй лампы в момент запирающей первой, а при двухтактной — сеточного тока первой лампы при запирающей второй.

Графический метод позволяет легко определить  $u_{0\text{макс}}$ . В случае однокатодной схемы для этого необходимо отметить точку  $P$  пересечения прямой  $2$  с анодной характеристикой  $u_g = \text{const} = 0$  (рис. 4). Расстояние от этой точки до прямой  $1$ , измеренное по горизонтальному направлению, дает то смещение  $u_0$ , при котором  $u_{g2}$  не превосходит нуля в момент запирающей первой лампы. Аналогично можно найти смещение  $u_0$ , при котором  $u_{g2}$  не превосходит, например,  $1$  в. С этой целью нужно измерить расстояние от точки  $P_1$  пересечения прямой  $2$  с характеристикой  $u_g = \text{const} = -1$  в до точки  $P'_1$ , имеющей ту же ординату и лежащей на прямой  $1$  (рис. 4).

При определении максимального допустимого смещения  $u_{\text{макс}}$  в случае двухтактной схемы нужно точку  $N'$  (рис. 3) поместить на анодную характеристику  $u_g = \text{const} = 0$ . Для этого проводим прямую  $2'$ , отмечаем точку  $N'$  пересечения прямой  $2'$  с характеристикой  $u_g = \text{const} = 0$  и лежащую на том же уровне точку  $N$  прямой 3. Проектируя точку  $N$  на ось напряжений, получим точку  $Q$ . Методом интерполяции определяем напряжение  $u_g = u_{g\text{отс}}$ , соответствующее этой точке, и откладываем вправо от  $Q$  отрезок  $Qm$ , равный найденному напряжению  $u_{g\text{отс}}$ . Тогда  $mO'$  даст максимальное допустимое смещение  $u_{\text{макс}}$ , которое необходимо подать на обе сетки.

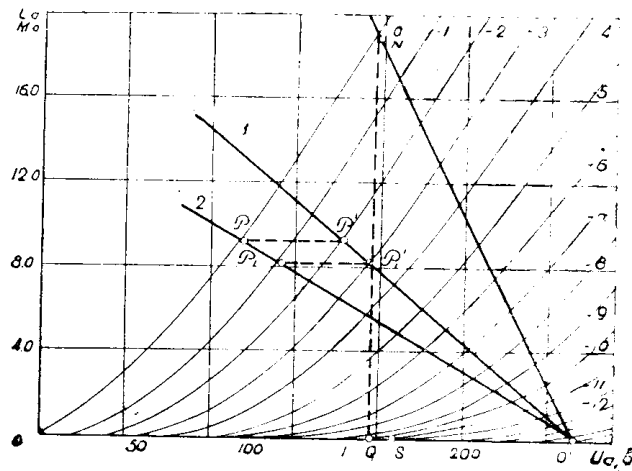


Рис. 4.

На динамической характеристике, полученной описанным методом расчета, необходимо выбрать положение рабочей точки. Последняя в зависимости от характера усиливаемых сигналов (симметричные сигналы, положительные или отрицательные импульсы) должна лежать в середине рабочего участка, в его верхней или нижней области. Пусть необходимому положению рабочей точки на характеристике, рассчитанной в предположении, что  $u_{10} = u_{20} = u_0$ , соответствует абсцисса  $u_1 = u_{1p}$ . Тогда для того, чтобы обеспечить необходимый режим, смещение на сетке второй лампы нужно взять равным  $u_{20} = u_{\text{макс}}$ , а на первой —  $u_{\text{макс}} + u_{1p}$ .

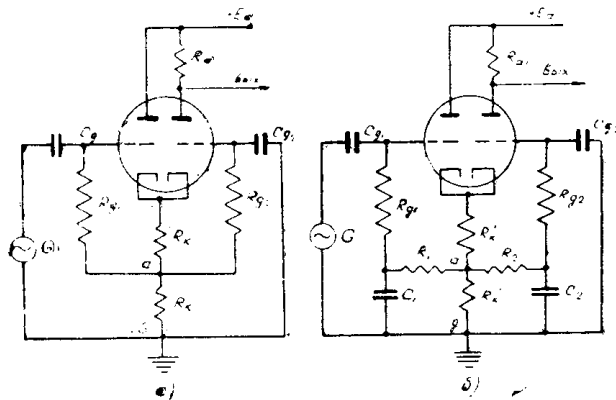


Рис. 5.

В случае усиления переменных напряжений вместо подачи дополнительных смещений от отдельных источников или от делителей часто применяются схемы рис. 5 а и б. Здесь емкости  $C_{g1}$ ,  $C_{g2}$ ,  $C_1$  и  $C_2$

и сопротивления  $R_{g1}$ ,  $R_{g2}$ ,  $R_1$  и  $R_2$  выбираются достаточно большими. Описанный расчет необходимо в этом случае дополнить определением величин сопротивлений  $R_{k1}$ ,  $R_{k2}$ ,  $R_{k3}$  (рис. 5 а и б), обеспечивающих выбранный режим. После того, как определены смещения  $u_{20} = u_{0\text{макс}}$  и  $u_{10} = u_{0\text{макс}} + u_{1p}$ , по характеристикам  $i_{a1} = f_1(u_1)$  и  $i_{a2} = f_2(u_1)$  (или по данным соответствующей таблицы) находим  $i_{a1p}$  и  $i_{a2p}$ , относящиеся к выбранной рабочей точке  $u_{1p}$ , и подсчитываем  $i_{kp} = i_{a1p} + i_{a2p}$ . Обозначим  $R_{k1} + R_{k2} + R_{k3} = R_k$ . К сетке второй лампы приложено только смещение, создаваемое током  $i_{kp}$  на сопротивлении  $R_{k1}$ . Смещение  $i_{kp}(R_{k2} + R_{k3})$  на сопротивлениях  $R_{k2}$  и  $R_{k3}$  задерживается конденсатором  $C_{g2}$ . В схемах рис. 1 при тех же нагрузках  $R_k$  и  $R_a$  и одинаковом режиме действие соответствующей части катодного смещения компенсируется положительным смещением  $u_{0\text{макс}}$ . Мы поэтому можем написать

$$u_{0\text{макс}} = i_{kp}(R_{k2} + R_{k3}) = i_{kp}(R_k - R_{k1}). \quad (11)$$

Аналогично для первой лампы имеем

$$u_{0\text{макс}} + u_{1p} = i_{kp} R_{k3} \quad (12)$$

или

$$u_{1p} = -i_{kp} R_{k2}. \quad (12')$$

Из уравнений (11) и (12') можно найти  $R_{k1}$  и  $R_{k2}$ , а затем

$$R_{k3} = R_k - R_{k1} - R_{k2}.$$

### Заключение

Предлагаемый метод позволяет обойтись без вспомогательных кривых III и IV, используемых в [1]. Перед методом Г. Н. Алябевой [2] он имеет то преимущество, что вычислительная часть занимает в нем гораздо меньшее место и ограничена только определением входного напряжения по формуле (10) и выходного напряжения (в случае двухтактной схемы) по формуле

$$u_{\text{вых}} = u_{\text{вых1}} - u_{\text{вых2}}.$$

Метод может быть использован при расчете усилителей и ограничителей с катодной связью.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Суслев И. А., Графический расчет усилителей с катодной связью, Известия ТПИ, т. 73, 1952.
2. Булгаков А. А., Электронные устройства автоматического управления, изд. 2, Госэнергоиздат, 1958.

1) Предполагается, что  $u_{1p} < 0$ . При  $u_{1p} > 0$  меняются положения отводов от сопротивления  $R_k$  к сеткам ламп (рис. 5 а и б) и уравнения (11) и (12') заменяются уравнениями

$$u_{0\text{макс}} = i_{kp} R_{k3}, \quad (11')$$

$$u_{1p} = i_{kp} R_{k2} \quad (12'')$$