

ГРАФИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ УСИЛИТЕЛЕЙ С КАТОДНОЙ СВЯЗЬЮ

И. А. СУСЛОВ

1. Введение

В последние годы широкое применение в радиоаппаратуре получили усилители с катодной связью. Они используются как резонансные усилители высокой частоты, усилители постоянного тока и низкой частоты, в качестве широкополосных усилителей, фазовых инверторов, ограничителей, дифференциальных усилителей и т. д.

На фиг. 1 изображен однотактный усилитель с катодной связью. Это двухкаскадный усилитель, в котором первый каскад является катодным повторителем, а второй—усилителем с заземленной сеткой. Элементом связи между каскадами служит общее катодное сопротивление R_k .

В имеющейся литературе [1; 2; 3] преобладают линейные методы анализа и расчета схем с катодной связью, основанные на представлении ламповых характеристик прямыми линиями. Если сопротивления анодной и катодной нагрузок постоянному току малы, т. е. последние образованы колебательными контурами, дросселями, трансформаторами и т. п., линейные методы дают достаточно точные результаты. Режим ламп в этом случае будет мало зависеть от сопротивлений нагрузок, и его можно выбрать так, чтобы работа происходила в линейной области, где параметры ламп близки к типовым, приводимым в справочниках. Однако большинство схем усилителей с катодной связью содержит активные R_k и R_a , а величины последних выбираются достаточно большими. При этом режим ламп устанавливается автоматически, их рабочие точки оказываются расположенными где-то на криволинейных участках ламповых характеристик, и значения ламповых параметров могут очень сильно отличаться от типовых.

Линейный метод не позволяет определять действительные значения параметров ламп в рабочих точках, поэтому приходится пользоваться табличными значениями. Это может привести к значительным ошибкам, особенно при больших R_k и отсутствии дополнительных положительных смещений на сетках. При положительных смещениях, еще не вызывающих сеточных токов, рабочие точки ламп L_1 и L_2 перемещаются в области более линейных участков характеристик, и данные линейного расчета оказываются более близкими к экспериментальным результатам. Однако опыт показывает, что точность формул линейного метода при больших R_k и R_a , применяемых в таких случаях, часто все-таки уступает точности ориентировочной оценки. Линейный метод не может дать удовлетворительного ответа на вопрос о максимальных амплитудах, усиливаемых без искажений, и о степени искажений.

Наиболее полное представление о свойствах усилителя с катодной связью можно получить из его динамической характеристики, т. е. зависимости выходного напряжения или тока в нагрузке от входного напряжения. Она позволяет найти коэффициент усиления, пороги ограничения,

искажения и т. д. Расчет усилителя можно свести к обоснованному выбору сопротивлений R_k и R_a и нахождению этой характеристики или отдельных ее элементов по семейству анодных характеристик и выбранным R_k и R_a .

Единственным расчетным методом, позволяющим найти динамическую характеристику, является графический метод. Он оперирует с действительными характеристиками ламп и потенциально может иметь точность одного порядка с точностью эксперимента.

В применении к усилителям с катодной связью графические методы менее всего разработаны. Это объясняется трудностью графического анализа рассматриваемых схем. Чтобы составить представление о них, можно провести сравнение с катодным повторителем или с усилителем с противосвязью за счет катодного сопротивления, где перед графическим расчетом стоят аналогичные задачи. Графическому расчету указанных схем посвящено значительное число работ. Все они так или иначе используют тот факт, что через лампу, анодное и катодное сопротивления в этих схемах протекает один и тот же ток—анодный ток лампы. В усилителе с катодной связью имеется две анодных цепи с общим участком—катодным сопротивлением R_k . Это сопротивление создает 100-процентную отрицательную обратную связь в первом каскаде и отрицательную обратную связь по току во втором, обеспечивает прямую связь первого каскада со вторым и положительную обратную связь второго каскада с первым. Благодаря такому переплетению связей разделение схемы с целью анализа на два каскада затруднительно, и методы, которыми пользуются при расчете усилителей с противосвязью за счет катодного сопротивления (в том числе катодных повторителей), здесь неприменимы. Видимо, трудности графического расчета усилителей с катодной связью объясняют как отсутствие в литературе работ, посвященных этому вопросу, так и имеющиеся в литературе указания о необходимости экспериментального определения параметров ламп для использования их в формулах линейного метода [4]. Последнее делает применение расчета совершенно неоправданным, так как эксперимент в помощь расчету оказывается в данном случае сложнее эксперимента вместо расчета.

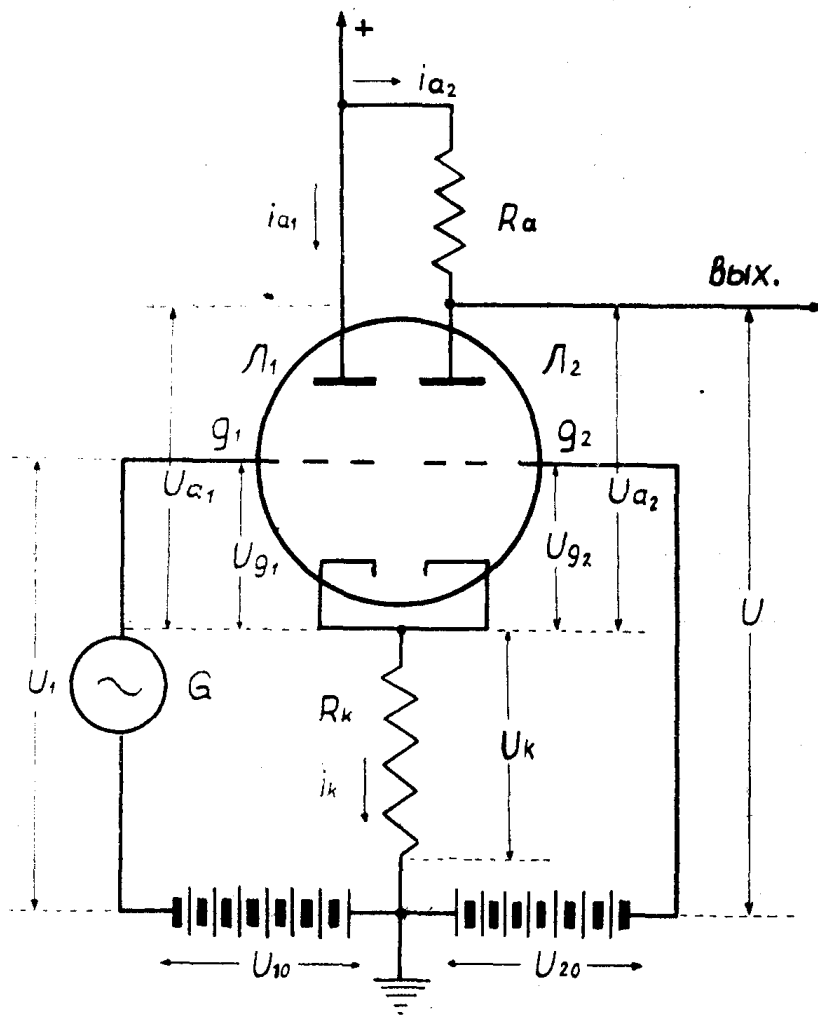
Нами предложено несколько графических методов расчета усилителей с катодной связью. Изложению одного из них посвящена настоящая статья.

2. Динамическая характеристика усилителя с катодной связью

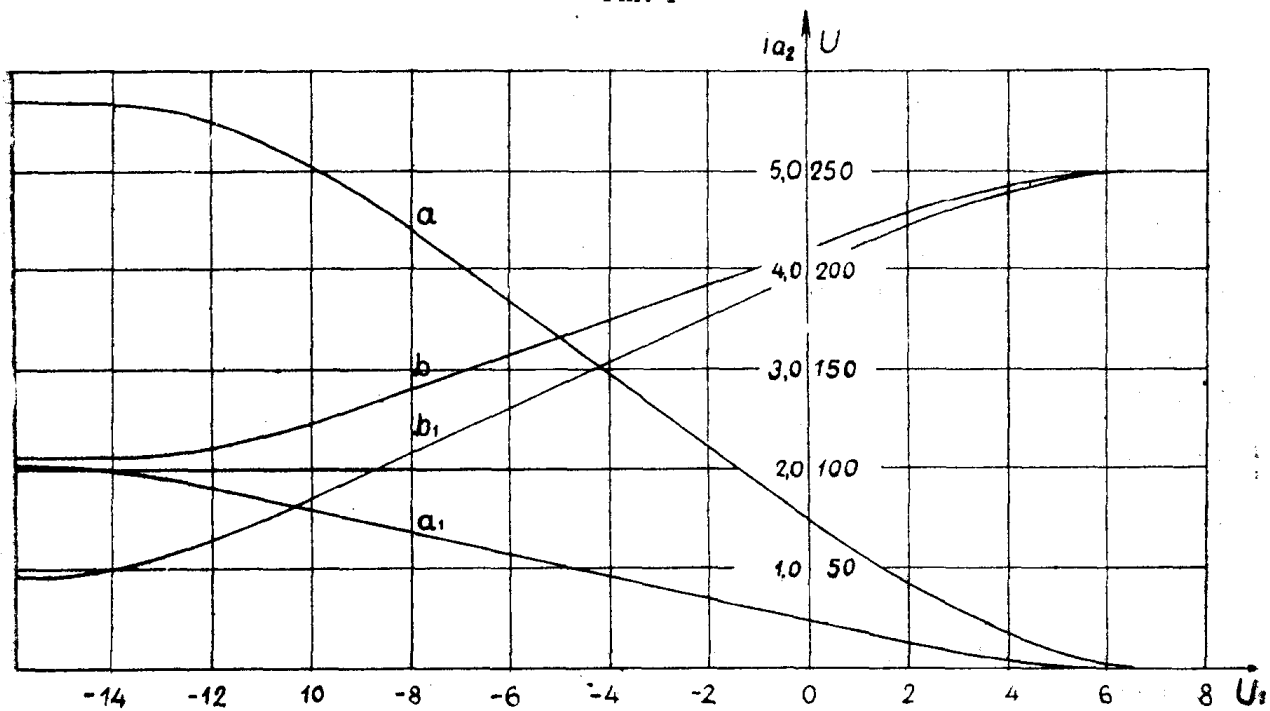
Сложность рассматриваемой схемы для анализа и невозможность¹⁾ разделить ее на два каскада заставляют рассматривать схему как единое целое и пользоваться результирующими характеристиками. Такой характеристикой может служить уже упоминавшаяся динамическая характеристика усилителя. Мы будем определять ее как зависимость анодного тока i_{a2} или напряжения u на выходе схемы от величины подаваемого на вход напряжения u_1 (см. фиг. 1). На фиг. 2 даны примеры таких характеристик усилителя на лампе 6Н8.

При больших отрицательных напряжениях u_1 первый триод L_1 оказывается запертым. Ток i_{a2} имеет при этом максимальную величину, которая определяется условиями равновесия этого тока с создаваемым им смещением на сетку второго триода L_2 . Он остается постоянным для всех значений u_1 , запирающих первый триод. Этому соответствует левый участок динамической характеристики, параллельный оси напряжений u_1 . При больших значениях u_1 первый триод открывается; его ток i_{a1} создает дополнительное отрицательное смещение на сетку второго триода, отчего

¹⁾ Имеется в виду задача графического расчета.



Фиг. 1



Фиг. 2

а) $i_{a2} = f(u_1)$ } $R_k = 5 \text{ ком}, R_a = 25 \text{ ком},$ а) $i_{a2} = f(u_1)$ } $R_k = 5 \text{ ком}, R_a = 100 \text{ ком}.$
 б) $u = F(u_1)$ } $u_0 = 29 \text{ в}$ б) $u = F(u_1)$ } $u_0 = 12 \text{ в}$

ток i_{a2} уменьшается. Так получают падающий, средний, участок динамической характеристики $i_{a2} = f(u_1)$ и поднимающийся участок характеристики $u = F(u_1)$. При некотором положительном напряжении u_1 ток i_{a1} создает на R_k падение напряжения, полностью запирающее правый триод. При этом и при еще больших u_1 ток второго триода равен нулю, а напряжение на выходе равно постоянной величине напряжения источника питания. Этому соответствует правый участок динамической характеристики, параллельный оси u_1 (характеристика $u = F(u_1)$) или совпадающий с нею (характеристика $i_{a2} = f(u_1)$).

Наклон характеристики $i_{a2} = f(u_1)$ определяет крутизну усилителя $\frac{di_{a2}}{du_1}$, а наклон характеристики $u = F(u_1)$ — коэффициент усиления.

3. Исходная система уравнений

Приступая к анализу усилителя, нужно прежде всего установить основные соотношения, связывающие токи и напряжения в отдельных элементах схемы. Введем для этого обозначения, указанные на фиг. 1. Легко получаем систему уравнений, очевидную из фигуры:

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

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

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

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

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

$$u = E - i_{a2} R_{a1}, \quad (6)$$

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

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

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

Последние два соотношения являются уравнениями анодных характеристик, которые будем считать тождественными для обоих триодов.¹⁾ Величины сопротивлений R_k и R_a , смещения u_{10} и u_{20} и напряжение источника анодного питания E будем предполагать известными. Действие паразитных емкостей, индуктивностей вводов и времени пролета электронов не учитываем.

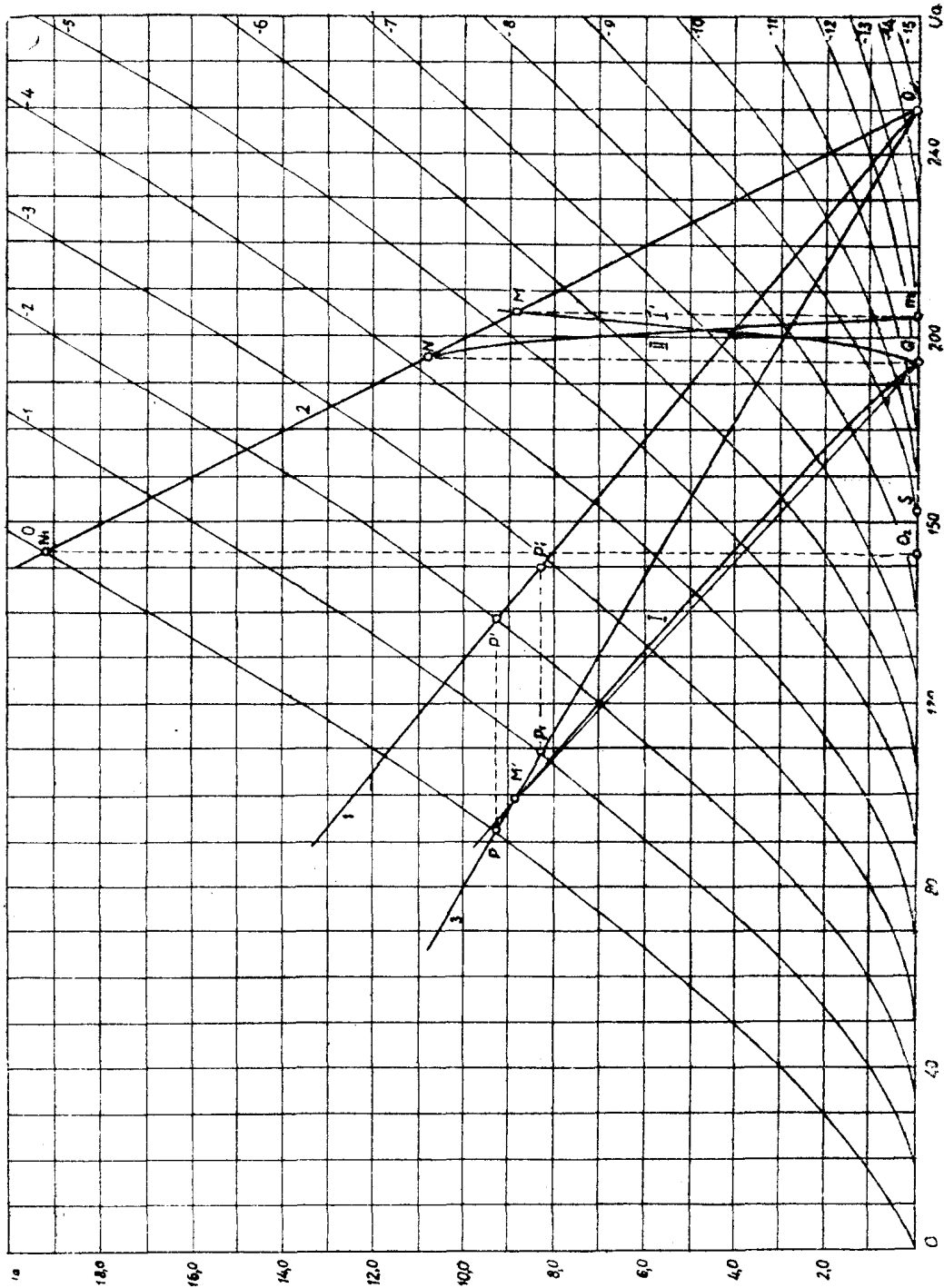
Мы имеем всего 9 уравнений с 10 неизвестными. Такая система позволяет найти соотношение между двумя из искомых величин. Например, можно получить зависимость $i_{a2} = f(u_1)$ или $u = F(u_1)$, т. е. динамические характеристики усилителя.

4. Графическое определение динамической характеристики

Динамическую характеристику $i_{a2} = f(u_1)$ можно получить из исходной системы уравнений (1)...(9) путем последовательного исключения всех переменных, не входящих в эту зависимость. Операцию исключения можно разбить на два этапа. Вначале будем полагать смещения u_{10} и u_{20} одинаковыми $u_{10} = u_{20} = u_0$. В частности, они могут быть равны нулю.

¹⁾ Это ограничение не обязательно.

Первый этап. На семействе анодных характеристик второго триода через точку $O' (E, 0)$ проводим прямую 1 (фиг. 3) под углом β , для кото-



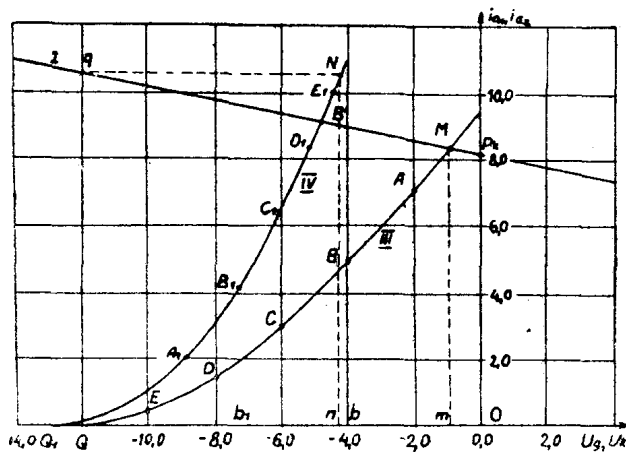
Фиг. 3

рого $\text{ctg } \beta = -R_a$. Она изобразит на чертеже уравнение (6). На каждой характеристике семейства отмечаем точку, лежащую левее прямой 1 на расстоянии $|u_{g2}| + u_0$ от нее, отсчитываемом параллельно горизонтальной оси и равном напряжению на сетке g_2 , при котором снята соответствующая анодная характеристика. Полученные таким образом точки определяют кривую I: $i_{a2} = \Phi_2(u_{a2})$. Они позволяют построить и кривую $i_{a2} = \Psi_2(-u_k) = \Psi_2(u_{g2} - u_0)$. Для этого, взяв $O' (E, 0)$ за начало координат, нанесем на чертеже точки с теми же ординатами, что и у полученных точек кривой $i_{a2} = \Phi_2(u_{a2})$, и с абсциссами, равными соответствующим зна-

числениям напряжения $u_{g2} = u_0$ (или $-u_k$). Соединив их плавной линией, получаем кривую $i_{a2} = \Psi_2(-u_k)$ (кривая I).

Из точки $O'(E, 0)$ проводим, далее, прямую 2 под углом β_1 , для которого $\text{ctg } \beta_1 = -R_k$ (нагрузочная прямая для сопротивления нагрузки, равного R_k). Она является графическим изображением уравнения (2) в системе координат $-u_k, i_k$, начало которой помещается в точке O' . Эта прямая пересекает кривую I в точке M (фиг. 3). В последней ток i_{a2} один, без тока i_{a1} , удовлетворяет уравнению (2) $u_k = i_k R_k$. Эта точка определяет, таким образом, ток i_{a2} и напряжение u_k при запертой первой лампе. При u_k , соответствующем точке Q отсечки тока i_{a2} , вторая лампа оказывается запертой, и в уравнении (2) катодный ток i_k равен току i_{a1} , величина которого определяется в данном случае длиной отрезка NQ. При незапертой второй лампе ток i_{a1} в зависимости от напряжения $u_{g2} = -u_k$, $i_{a1} = \Phi_{10}(-u_k)$ (кривая II) получается вычитанием ординат кривой I из соответствующих ординат прямой 2. Эта же кривая в системе координат u_a, i_{a1} в соответствии с уравнением (5) дает зависимость $i_{a1} = \Phi_{10}(E - u_k) = \Phi_1(u_{a1})^1$.

Точки пересечения кривой II с анодными характеристиками позволяют построить функцию $i_{a1} = \Omega_1(u_{g1})$, т. е. по току i_{a1} позволяют найти напряжение u_{g1} между сеткой и катодом первой лампы. Если этих точек получается мало, можно увеличить их число, отмечая на кривой II точки, соответствующие промежуточным значениям u_{g1} . Для этого горизонтально расположенную линейку перемещаем в такое положение, при котором



Фиг. 4

кривая II делит расстояние между двумя соседними характеристиками, отсчитываемое вдоль ребра линейки, пополам. Соответствующая точка кривой II будет при этом принадлежать промежуточной (средней по отношению к указанным соседним) характеристике.

Второй этап. На одном чертеже с семейством анодных характеристик или лучше отдельно, на миллиметровой бумаге, строим зависимости $i_{a2} = \Omega_2(u_{g2})$ и $i_{a1} = \Omega_1(u_{g1})$ (кривые III и IV на фиг. 4).

Для этого откладываем по оси напряжений значения u_g , относящиеся к анодным характеристикам, пересекаемым кривыми I и II, а по оси токов — ординаты точек пересечения (соответственно i_{a2} и i_{a1}). Через точку $O_k(u_0, 0)^2$ проводим нагрузочную прямую, соответствующую сопротивлению нагрузки, равному R_k (прямая 2).

Возьмем какую-либо точку кривой III, например, A (фиг. 4). Ее ордината A_a будет представлять собой ток i_{a2} , а абсцисса aO — напряжение u_{g2} . Отрезок AA' в соответствии с уравнением (1) изобразит анодный ток i_{a1} первого триода. Ток в катодном сопротивлении будет представлен отрезком aA' , а падение напряжения на нем u_k , которое согласно уравнению (4) можно выразить формулой $u_k = u_0 - u_{g2}$, будет равно длине от-

1) Функции $\Phi_{10}(E - u_k)$ и $\Phi_1(u_{a1})$ в случае рассматриваемой однокатодной схемы совпадают.

2) При больших u_0 — через точку $P_k \left(0, \frac{u_0}{R_k} \right)$.

резка aO_k . Координаты точки M пересечения прямой 2 с кривой III определяют максимальное напряжение u_{g2}^* между сеткой и катодом и максимальный анодный ток i_{a2}^* второго триода.

Сеточное напряжение и анодный ток первого триода (u_{g1}^* и i_{a1}^*) в момент запираания второй лампы определяются следующим образом. В точке Q отсечки тока i_{a2} восстанавливаем перпендикуляр к горизонтальной оси, который пересечет прямую 2 в точке q . Проведя через последнюю прямую параллельно горизонтальной оси до пересечения с кривой IV, найдем точку N , координаты которой представляют собой u_{g1}^* и i_{a1}^* . То же самое можно выполнить при помощи циркуля. Для этого нужно сделать раствор циркуля равным Qq и, переместив ножки, найти точку кривой IV с ординатой, равной раствору.

Чтобы получить динамическую характеристику усилителя, на кривой III между точкой M и точкой Q отсечки тока i_{a2} отмечаем несколько произвольно расположенных точек A, B, C, D и т. д., таких, чтобы они достаточно подробно передавали ход кривой. Для каждой из этих точек определяем ординату i_{a2} и расстояние по вертикали до прямой 2. Например, для точки B это будут отрезки Bb и BB' . На кривой IV находим точку B_1 с ординатой B_1b_1 , равной BB' . Расстояние между проекциями b и b_1 точек B и B_1 дает соответствующее значение усиливаемого напряжения u_1 . Действительно, отрезки b_1O и bO определяют напряжения u_{g1} и u_{g2} . Вычитая из уравнения (3) почленно уравнение (4) при $u_{10} = u_{20} = u_0$, убеждаемся, что $u_1 = u_{g1} - u_{g2} = Ob_1 - Ob = bb_1$. Так находится значение аргумента искомой функции $f(u_1)$ и одновременно — функции $i_{a1} = f_1(u_1)$. Значения самих функций определяются ординатами отмеченных на кривых III и IV точек (B и B_1). Аналогично получаем ряд других точек характеристик $i_{a2} = f(u_1)$ и $i_{a1} = f_1(u_1)$, соответствующих другим выбранным точкам кривой III. Операции второго этапа расчета можно выполнять с помощью циркуля, подобно тому, как это делалось при определении точки N (u_{g1}^* , i_{a1}^*). Отрицательное напряжение ограничения (нижний порог ограничения) определяется отрезком mQ_1 (фиг. 4), а положительное (верхний порог) — отрезком Qn .

5. Динамическая характеристика по напряжению на сетке второй лампы

Иногда в усилителе с катодной связью различные внешние напряжения прилагаются к сеткам обоих триодов, например, u_1 — к первой сетке и u_2 — ко второй. В таком виде схема используется, в частности, если требуется усиливать разность двух напряжений u_1 и u_2 независимо от их общего уровня (дифференциальные усилители).

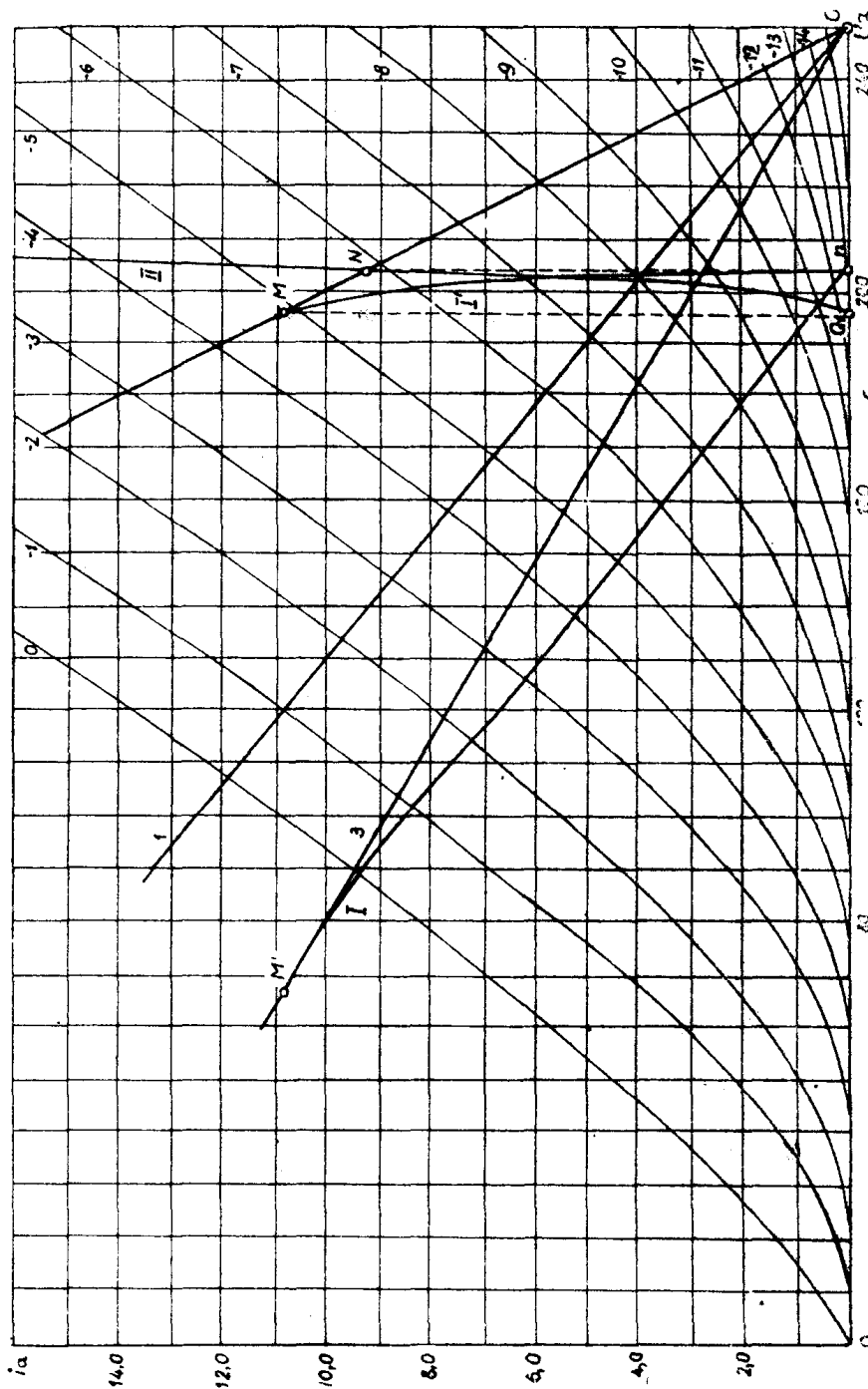
Мы рассмотрим сейчас более простой случай, когда внешнее напряжение воздействует только на сетку второй лампы, а первая сетка заземлена, случай, который вместе с ранее рассмотренным позволяет выполнить графический анализ схемы, находящейся под действием двух напряжений (u_1 и u_2), и который, кроме того, может иметь еще и самостоятельное значение. Он будет отличаться от ранее рассмотренного тем, что уравнения (3) и (4) исходной системы заменяются уравнениями:

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

$$u_2 + u_{20} = u_{g2} + u_k. \quad (4')$$

Динамическая характеристика $i_{a2} = \varphi(u_2)$ получается из исходной системы исключением всех переменных, кроме i_{a2} и u_2 . Графические операции такого исключения, аналогично предыдущему, можно разбить на два этапа.

Первый этап. На кривых семейства анодных характеристик первой лампы отмечаем точки, расположенные левее прямой $u_{a1} = E$ на расстояниях $u_{\kappa} = u_0 - u_{g1} = u_0 + |u_{g1}|$. Здесь u_0 — смещение на сетках, одинаковое для обеих ламп, а u_{g1} — сеточные напряжения, при которых сняты соот-



Фиг. 5

ветствующие характеристики. Соединяя эти точки плавной линией, находим кривую $i_{a1} = \Phi_{10}(E - u_{\kappa}) = \Phi_1(u_{a1})$ (фиг. 5, кривая II). Она представляет собой катодную характеристику при входном напряжении, равном u_0 .¹⁾

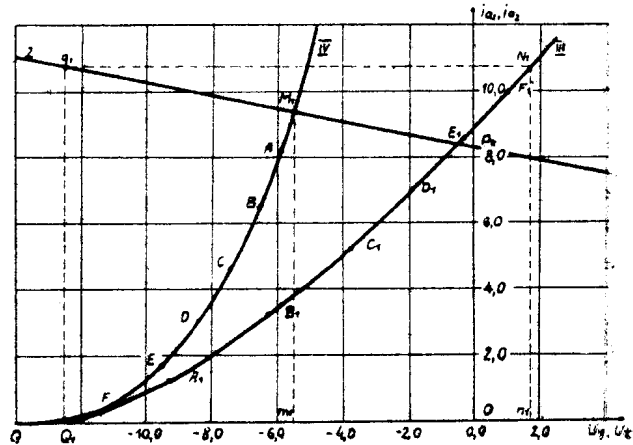
Через точку $O'(E, 0)$ проведем прямую 2 под углом, котангенс которого равен R_{κ} (уравнение (2), в системе координат $-u_{\kappa}, i_{\kappa}$, где точка $O'(E, 0)$ является началом). Точки N и M этой прямой соответствуют: первая — запертой второй лампе, а вторая — запертой первой. Между ними

¹⁾ Такие характеристики применяются в некоторых способах расчета катодных повторителей.

располагаются точки, относящиеся к рабочему участку динамической характеристики. Вычитая из ординат прямой 2 ординаты кривой II при одинаковых значениях u_k (в пределах указанного участка), получаем кривую $i_{a2} = \Psi_2(E - u_k)$ (кривая I). Из точки $O'(E, 0)$ проводим прямую 1 под углом β так, чтобы $\text{ctg } \beta = -R_a$. При нескольких произвольных значениях тока i_{a2} находим по кривой I относящиеся к ним значения u_k и откладываем их влево от точек прямой 1, соответствующих тем же значениям i_{a2} . Плавная кривая, проходящая через полученные таким образом точки, определит зависимость $i_{a2} = \Phi_2(u_{a2})$ (кривая I на фиг. 5).

Второй этап. По точкам пересечения кривых II и I с анодными характеристиками строим кривые $i_{a1} = \Omega_1(u_{g1})$ и $i_{a2} = \Omega_2(u_{g2})$, т. е. кривые IV и III. Дальнейшие операции будут аналогичными предыдущему случаю, только кривые III и IV меняются ролями.

Точка M_1 пересечения прямой 2 с кривой IV определит u_{g1}^* и i_{a1}^* — сеточное напряжение и анодный ток первого триода при запертом втором. Чтобы найти максимальное значение сеточного напряжения и анодного тока второго триода в пределах рабочего участка динамической характеристики, т. е. u_{g2}^* и i_{a2}^* , отмечаем точку q_1 прямой 2, для которой точка Q_1 отсечки тока i_{a1} является проекцией на ось напряжений. Точка N_1 кривой III, находящаяся на одном уровне с q_1 , имеет координаты u_{g2}^* , i_{a2}^* . Для более детального определения динамической характеристики разбиваем при помощи ряда точек A, B, C, D и т. д. теперь кривую IV (раньше разбивали кривую III) и точки A_1, B_1, C_1, D_1 и т. д. находим на кривой III (фиг. 6).



Фиг. 6

Абсциссы первых точек дадут значения u_{g1} , а абсциссы вторых — отвечающие им значения u_{g2} .

Напряжение u_2 при $u_{10} = u_{20} = u_0$ найдется как разность $u_2 = u_{g2} - u_{g1}$. Ординаты точек A, B, C, D ... и A_1, B_1, C_1, D_1 ... определяют соответственно ординаты i_{a1} и i_{a2} рассчитываемых характеристик

$$i_{a1} = \varphi_1(u) \quad \text{и} \quad i_{a2} = \varphi(u_2).$$

Отрицательное напряжение ограничения будет в данном случае равно длине отрезка m_1Q , а положительное — Q_1n_1 (фиг. 6).

6. Влияние постоянных смещений на динамические характеристики

Схема фиг. 1 может усиливать только при изменении входного напряжения u_1 в пределах наклонного участка динамической характеристики. За его пределами имеет место ограничение: выходное напряжение не меняется при изменении входного. При $u_{10} = u_{20} = 0$ протяженность наклонного участка, крутизна и размеры его линейной части получаются небольшими, так как обе сетки находятся под отрицательным потенциалом — u_{k0} относительно катода, сдвигающим рабочие точки ламп в область нижних, криволинейных и более пологих участков анодно-сеточных характеристик. Подача дополнительных положительных смещений от отдельных источни-

ков или при помощи делителей—от источника анодного питания позволяет ослабить действие отрицательного автоматического смещения на сетках, расширить наклонный участок, увеличить его крутизну и линейность.

Рассмотрим различные варианты подачи дополнительных смещений.

1. Усиливаемое напряжение и постоянное смещение приложены к одной и той же сетке. Очевидно, что форма динамической характеристики при этом не изменится; изменится только положение рабочей точки, которая будет сдвинута на величину смещения. Если, например, $u_{10} \neq 0$, то характеристика $i_{a2} = f(u_1)$ будет такой же, как и при $u_{10} = u_{20} = 0$, только начальная рабочая точка сместится на величину u_{10} . Подобное же влияние оказывает смещение u_{20} на характеристику $i_{a2} = \varphi(u_2)$. Расчет динамических характеристик выполняется в этом случае, как и при отсутствии смещений, только учитывается изменение положения рабочей точки.

2. На сетки обеих ламп поданы одинаковые смещения. Этот случай был основным при изложении предлагаемого метода.

3. На сетки g_1 и g_2 усилителя поданы неодинаковые смещения $u_{10} \neq u_{20}$. В этом случае характеристика $i_{a2} = f(u_1)$ будет такой же, как и при смещении u_{20} , поданном на обе сетки, только рабочая точка будет смещена на $u_{10} - u_{20}$. В самом деле, результат не изменится, если к обеим сеткам мы приложим одинаковые напряжения u_{20} и затем доведем смещение на сетку g_1 до величины u_{10} , приложив к ней еще дополнительное постоянное напряжение $u_{10} - u_{20}$. Первый шаг соответствует предыдущему случаю; он изменит размеры и крутизну наклонного участка динамической характеристики, а второй лишь приведет к перемещению рабочей точки на расстояние, равное $u_{10} - u_{20}$. Следовательно, при графическом определении динамической характеристики $i_{a2} = f(u_1)$ в данном случае следует поступать как и при наличии одинакового смещения u_{20} на обеих сетках, но рабочую точку на уже рассчитанной характеристике следует сместить на расстояние, равное $u_{10} - u_{20}$ вдоль оси напряжений.

Аналогично, характеристика $i_{a2} = \varphi(u_2)$ при неодинаковых смещениях будет такая же, как и при смещении u_{10} , поданном на обе сетки, лишь рабочая точка будет сдвинута на пей вдоль оси напряжений на расстояние, равное $u_{20} - u_{10}$.

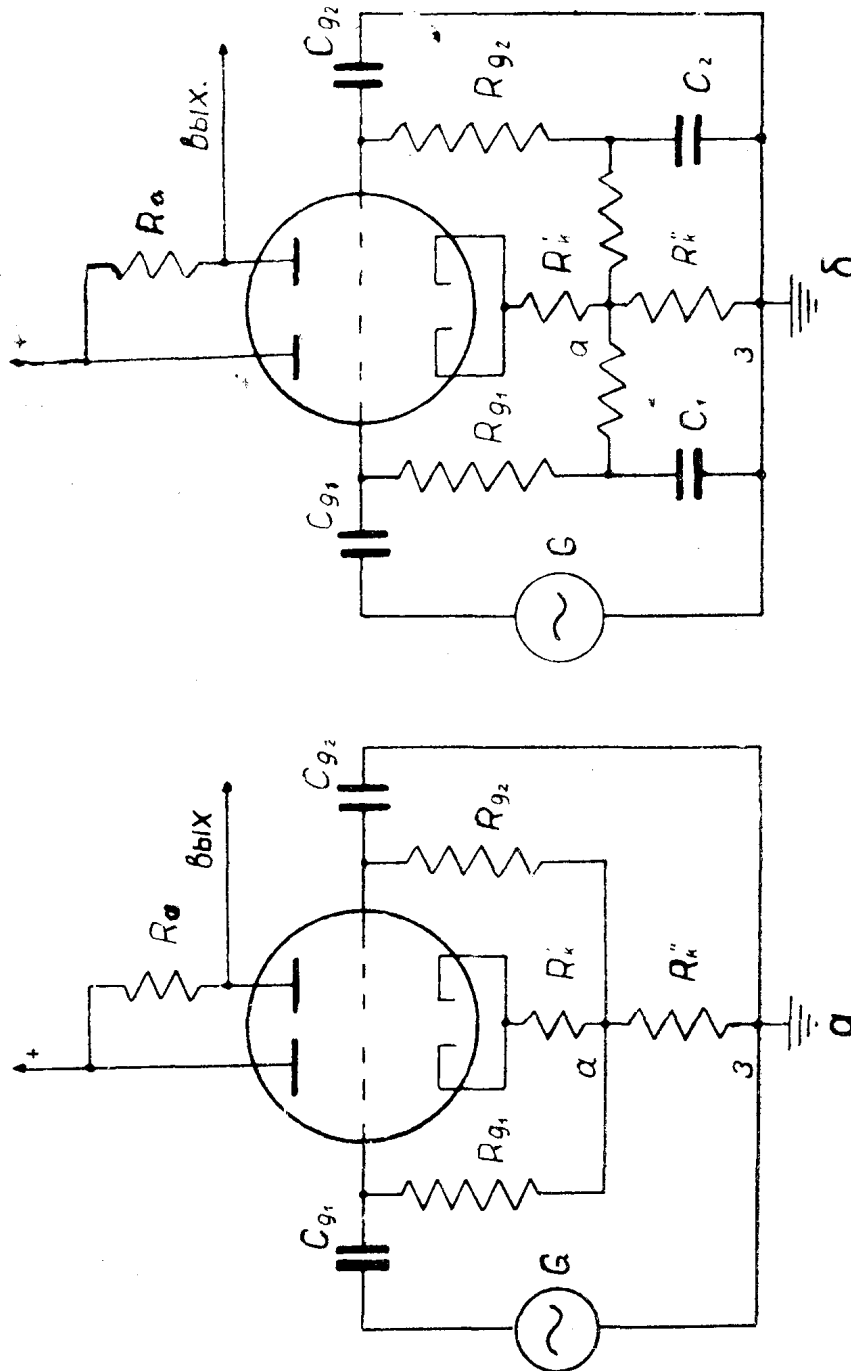
4. Смещение подано на одну сетку, а усиливаемое напряжение—на другую. Этот случай так же, как и 1 и 2, является частным по отношению к наиболее общему 3. Динамическая характеристика по усиливаемому напряжению будет такой же, как и при смещении, поданном на обе сетки, только рабочая точка будет сдвинута по оси напряжений на величину смещения, взятую с обратным знаком. Например, если $u_{10} = 0$ и $u_{20} \neq 0$, то характеристика $i_{a2} = f(u_1)$ будет такой же, как и при подаче смещения u_{20} на обе сетки, но рабочая точка будет сдвинута на $-u_{20}$.

7. Определение максимальных допустимых положительных смещений

Определим максимальные допустимые положительные смещения на сетках g_1 и g_2 , при которых в пределах наклонного участка динамической характеристики не появляются сеточные токи. Эти токи нежелательны потому, что при наличии больших сопротивлений в сеточных цепях, например, в схемах фиг. 7, описываемых ниже, они приводят к искажениям, а сеточный ток первой лампы, кроме того, всегда вызывает резкое уменьшение входного сопротивления усилителя.

Наклонный участок динамической характеристики заключен между порогами ограничения. Положительному напряжению ограничения соответствует максимальное для этого участка значение напряжения между

сеткой g_1 и катодом ($u_{g_1}^*$), а отрицательному—максимум тока i_{a_2} и максимальное напряжение между сеткой g_2 и катодом ($u_{g_2}^*$). Нужно, чтобы эти максимальные напряжения не были положительными или не превосходили, скажем,—1 вольт. Напряжения $u_{g_1}^*$ и $u_{g_2}^*$ обычно неодинаковы.



Фиг. 7

Это означает, что если одна из ламп в пределах наклонного участка используется полностью (напряжение на ее сетке достигает максимального допустимого значения и не превышает его), то другая или используется неполностью или перегружается. Так как второй случай недопустим, то приходится ограничиваться полным использованием только одной из ламп.

Смещение u_0 , при котором напряжение $u_{g_2}^*$ равно нулю, определяется легко. Для этого из точки $O'(E,0)$ проводим прямые 1 и 3 под углами β_1 и β_2 , для которых $\text{ctg}\beta_1 = -R_a$ и $\text{ctg}\beta_2 = -(R_a + R_k)$ (фиг. 3). Отметим точку P пересечения прямой 3 с анодной характеристикой $i_{a_2} = \theta(u_{a_2}, 0)$.

Расстояние от этой точки до прямой 1, измеренное по направлению, параллельному оси абсцисс, дает то положительное смещение u_0 , при котором напряжение u_{g2} не превосходит нуля.

Аналогично можно определить смещение u_0 , при котором u_{g2} не превосходит, например, -1 . С этой целью нужно измерить расстояние от точки P_1 пересечения прямой 3 с характеристикой $i_{a2} = \Theta(u_{a2}, -1)$ до точки P_1' , имеющей ту же ординату и лежащей на прямой 1. Напряжение u_{g^*1} в момент запирания второй лампы при найденном таким образом u_0 можно определить по положению точки N прямой 2, находящейся на одной вертикали с точкой Q отсечки тока i_{a2} . Для этого путем интерполяции нужно найти напряжение на сетке, соответствующее анодной характеристике, проходящей через эту точку. При R_k порядка тысячи ом и более сеточный ток с увеличением u_0 в однотактной схеме (фиг. 1) сначала появляется у второй лампы¹⁾. Поэтому отыскивать u_{g^*1} не обязательно. Если требуется найти смещение u_0 , при котором $u_{g^*1} = 0$, то проводим прямую 2 и отмечаем на ней точку N_1 пересечения с анодной характеристикой $i_{a1} = \Theta(u_{a1}, 0)$ (фиг. 3). Проекцию N_1 на ось абсцисс назовем Q_2 . Откладываем вправо от Q_2 отрезок Q_2S , равный напряжению u_g для этой точки (Q_2). Тогда SO' дает искомую величину смещения u_0 . Максимальное напряжение на сетке второй лампы (u_{g^*2}) может при этом оказаться положительным или отрицательным в зависимости от величины сопротивлений R_k и R_a .

8. Особенности расчета при уменьшенном автоматическом смещении

Подача на сетки усилителя дополнительных положительных смещений является не единственным способом, позволяющим ослабить действие отрицательного автоматического смещения $-u_{k0}$, уменьшающего крутизну динамической характеристики и ее линейность. В случае усиления переменных напряжений часто применяются схемы, в которых на обе сетки подается только часть постоянной составляющей $-u_{k0}$ напряжения, образующегося на катодном сопротивлении; в то же время переменная составляющая $-u_{k\sim}$ этого напряжения передается на обе сетки полностью. Примеры таких схем приведены на фиг. 7а 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 так, чтобы указанные сопротивления были гораздо больше сопротивления R_k , а конденсаторы представляли бы для переменных токов малые сопротивления.

Если точка a на фиг. 7а делит сопротивление R_k на R_k' и R_k'' , причем $R_k' = \alpha R_k$, то ее потенциал относительно катода равен $-\alpha(u_{k0} + u_{k\sim})$. Общий провод (точка z) будет иметь относительно a потенциал $-(1-\alpha)(u_{k0} + u_{k\sim})$. Разность потенциалов $-(1-\alpha)(u_{k0} + u_{k\sim})$ приложена к цепи, содержащей C_{g1} и R_{g1} , которая для постоянного тока имеет бесконечно большое сопротивление (сопротивление конденсатора C_{g1}), а для переменного тока представляет сопротивление, практически равное R_{g1} (если внутреннее сопротивление источника G усиливаемых колебаний много меньше R_{g1}). Поэтому постоянная часть $-(1-\alpha)u_{k0}$ этой разности потенциалов будет приложена к обкладкам конденсатора C_{g1} , а переменная $-(1-\alpha)u_{k\sim}$ — к сопротивлению R_{g1} . Между сеткой и катодом первого триода будет, следовательно, действовать напряжение обратной связи, равное сумме напряжений на R_k' и R_{g1} , т. е. равное $-(\alpha u_{k0} + u_{k\sim})$. Такое же напряжение будет приложено между сеткой и катодом второго триода, если цепь $C_{g2}R_{g2}$ подключена к той же точке a .

¹⁾ При малых R_k , напротив, сначала — у первой.

Схема фиг. 7б аналогична рассмотренной. Она удобнее, если источник усиленного напряжения имеет большое выходное сопротивление. В этой схеме на сопротивлениях R_1 и R_2 образуется такая же разность потенциалов $(1 - \alpha)u_{k0}$, как и на сопротивлении R_k . На двух других сопротивлениях в сеточных цепях (R_{g1} и R_{g2}) напряжение u_k не создает никаких разностей потенциалов. Первое из них является нагрузкой для источника усиленного напряжения.

Из описанных особенностей работы схем фиг. 7а и б нетрудно видеть, что последние сходны с рассмотренной ранее схемой, в которой на обе сетки поданы положительные смещения. В данном случае эти смещения нужно считать равными $(1 - \alpha)u_{k0}$. Поэтому графический расчет подобных схем выполняется так же, как и в случае подачи постоянных смещений от посторонних источников, и будет отличаться только необходимостью определения точек подключения сопротивлений R_{g1} и R_{g2} или R_1 и R_2 , позволяющих осуществить найденные расчетом (например, из условия отсутствия сеточных токов) или заданные постоянные смещения. Для этого нужно знать постоянную составляющую i_{k0} катодного тока i_k или создаваемое ею падение напряжения u_{k0} . Величина i_{k0} находится из динамической характеристики усилителя после выполнения графического расчета последней. Зная i_{k0} и напряжение смещения u_0 , нетрудно найти

$\alpha = \frac{R_k'}{R_k}$ из соотношения $u_0 = (1 - \alpha)R_k i_{k0}$ и определить таким образом положение точки a .

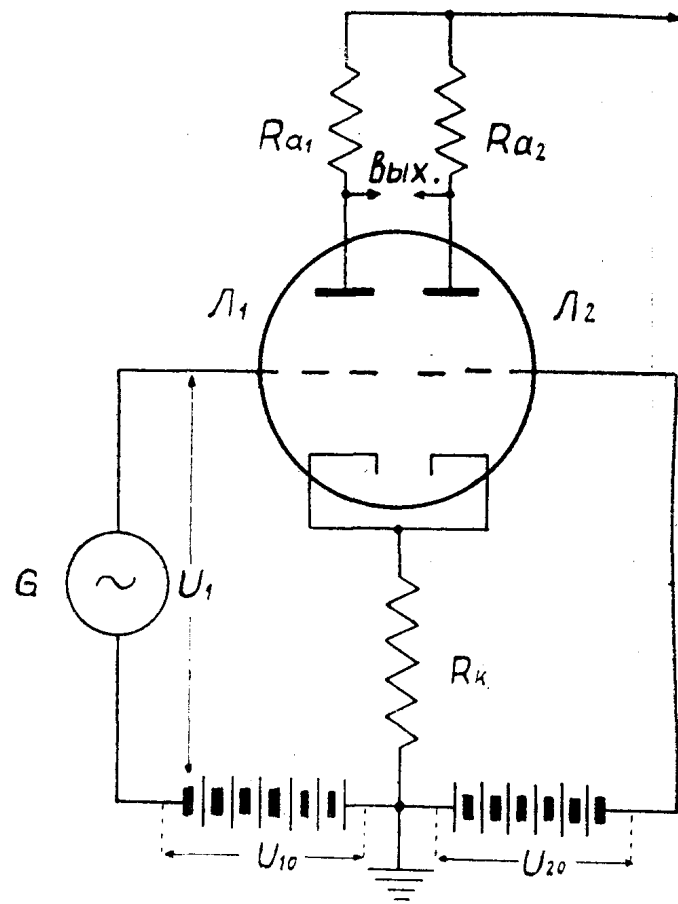
9. Двухтактная схема

Двухтактные усилители с катодной связью (фиг. 8) нашли широкое применение в качестве усилителей развертки в осциллографах, в качестве фазовых инверторов, дифференциальных усилителей и т. п. Они отличаются от однотактных тем, что у двухтактных усилителей первый каскад, так же как и второй, содержит анодную нагрузку. Это позволяет получить симметричный выход, если внешнюю нагрузку подключить между анодами.

Изложенный выше метод графического расчета усилителей с катодной связью применим и к двухтактным схемам. Остановимся на некоторых особенностях. Основная система уравнений отличается в данном случае только тем, что уравнение (5) заменяется уравнением:

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

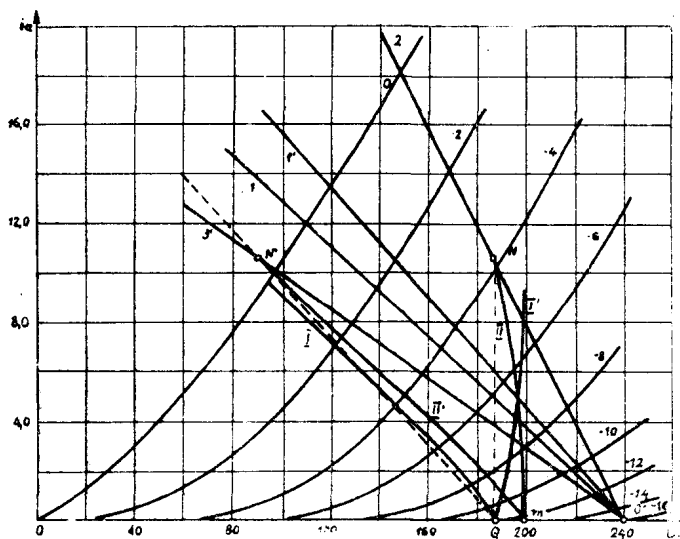
Так как выходное напряжение снимается с промежутка между анодами, то наибольшую ценность имеет динамическая характеристика $u_{a1} - u_{a2} =$



Фиг. 8

$= g(u_1)$. Ее легко получить, зная зависимости $i_{a2} = f(u_1)$ и $i_{a1} = f_1(u_1)$, из соотношения $g(u_1) = u_{a1} - u_{a2} = i_{a2}R_{a2} - i_{a1}R_{a1}$. Кривая $g(u_1)$ в области отрицательных значений u_1 располагается выше оси u_1 . Здесь она имеет горизонтальный участок, соответствующий напряжениям, запирающим первую лампу. При положительных значениях u_1 характеристика $g(u_1)$ проходит ниже оси напряжений и горизонтального участка не имеет, так как ток i_{a1} с ростом напряжения u_1 неизменно растет и ограничения не наступает.

При графическом расчете динамических характеристик $i_{a1} = f_1(u_1)$ и $i_{a2} = f(u_1)$ строятся кривые I, I' и II совершенно такие же, как и в случае однотактной схемы. Разница будет в том, что кривая II $i_{a1} = \Phi_{10}(E - u_k)$ не будет уже представлять зависимость тока i_{a1} от u_{a1} , так как $u_{a1} = E - i_{a1}R_{a1} - u_k$, а не $E - u_k$, как было в однотактной схеме. Чтобы найти эту зависимость, на кривой II выбираем несколько произвольных точек так, чтобы они достаточно хорошо передавали ход кривой. В координатных осях u_a, i_a отмечаем точки с такими же ординатами, лежащие левее прямой $i_a = \frac{E - u_a}{R_{a1}}$ (прямая I', фиг. 9) на расстояниях u_k , отсчитываемых параллельно горизонтальной оси. Здесь u_k представляют собой



Фиг. 9

абсциссы выбранных точек кривой II. Проведя плавную линию через найденные таким образом точки, получим кривую II' $i_{a1} = \Phi_1(u_{a1})$. Способ построения кривой II' показывает, что она представляет собой кривую II, перечерченную из прямоугольных координат u_a, i_a в косоугольные, для которых ось u_a является осью абсцисс, а прямая I' — осью ординат. Он напоминает построение кривой I по I' при расчете характеристики $i_{a2} = \varphi(u_2)$ (фиг. 5).

Второй этап расчета отличается только тем, что кривая IV строится по точкам пересечения с анодными характеристиками кривой II', а не кривой II. В заключение по полученным точкам зависимостей $i_{a1} = f_1(u_1)$ и $i_{a2} = f(u_1)$ строится динамическая характеристика $g(u_1) = i_{a2}R_{a2} - i_{a1}R_{a1}$.

Расчет динамической характеристики по напряжению на сетке второй лампы в случае двухтактной схемы вследствие ее симметрии ничем не отличается от описанного. Только лампы L_1 и L_2 меняются ролями.

Нахождение максимальных значений u_{g^*1} и u_{g^*2} , принимаемых сеточными напряжениями u_{g1} и u_{g2} в пределах рабочего участка динамической характеристики и связанное с ним определение наибольших смещений, при которых сеточные токи отсутствуют, имеет следующее отличие от случая однотактной схемы. Напряжение u_{g^*1} определяется не по положению точки N прямой 2, а по точке N' прямой 3' (линия нагрузки при сопротивлении, равном $R_{a1} + R_k$), имеющей ту же ординату. Чтобы найти эту точку, нужно из Q (фиг. 9) провести прямую, параллельную I', до пересечения ее с прямой 3'. Таким образом, положение точки N' в косоугольных координатах u_a, i_a определяется так же, как и положение точки N в прямоугольных координатах u_a, i_a . u_{g^*2} находится, как сеточное

напряжение, соответствующее анодной характеристике, проходящей через точку P пересечения кривой I с прямой 3.

Сопротивление R_{a1} чаще берут одного порядка или равным R_{a2} . При этом u_{g1}^* будет больше u_{g2}^* , и сеточный ток в пределах рабочего участка динамической характеристики появляется с увеличением положительного смещения $u_{10} = u_{20} = u_0$ сначала у первой лампы. В самом деле, вторая лампа запирается только при помощи смещения $-i_{a1}^* R_k$, первая же в результате совместного действия смещения $-i_{a2}^* R_k$ и отрицательного внешнего напряжения u_1

$$u_{отс2} = -i_{a1}^* R_k, \quad u_{отс1} = -i_{a2}^* R_k - u_1. \quad (10)$$

Здесь i_{a1}^* и i_{a2}^* токи, соответствующие напряжениям u_{g1}^* и u_{g2}^* , а $u_{отс1}$ и $u_{отс2}$ — напряжения отсечки анодного тока первой и второй ламп. Из графиков фиг. 9 нетрудно видеть, что $u_{отс1} \approx u_{отс2}$. Из уравнений (10) на основании этого приближенного равенства получим:

$$i_{a1}^* R_k \approx i_{a2}^* R_k + u_1.$$

Отбросив положительную величину u_1 , приходим к неравенству

$$i_{a1}^* > i_{a2}^*.$$

Приведенные рассуждения действительны как для однотактной, так и для двухтактной схемы. Поэтому ток i_{a1}^* для обеих схем будет больше тока i_{a2}^* . Точки $N'(u_{g1} = u_{g1}^*, i_{a1} = i_{a1}^*)$ и $P(u_{g2} = u_{g2}^*, i_{a2} = i_{a2}^*)$ лежат на одной прямой (при $R_{a1} = R_{a2}$) или на близких (при $R_{a1} < R_{a2}$),¹⁾ а так как для соответствующих им токов имеем $i_{a1}^* > i_{a2}^*$, то u_{g1}^* должно быть больше, чем u_{g2}^* . При однотактной схеме i_{a1}^* определяется точкой N , которая находится на прямой 2, имеющей значительно больший наклон к оси абсцисс, чем прямая 3', на которой лежит точка N' . В этом случае обычно $u_{g1}^* < u_{g2}^*$, т. е. при увеличении смещения u_0 сначала перегружается вторая лампа. Так как для двухтактных схем $u_{g1}^* > u_{g2}^*$, то достаточно добиться отсутствия сеточного тока для первой лампы.

Чтобы найти максимальное смещение u_0 , при котором отсутствуют сеточные токи, нужно точку N' поместить на анодную характеристику $u_g = \text{const} = 0$. Для этого проводим прямые 1' и 3' (фиг. 9). Из точки пересечения прямой 3' с анодной характеристикой $u_g = \text{const} = 0$ проводим прямую, параллельную 1'. Пусть она пересекается с осью абсцисс в точке Q . Определяем методом интерполяции напряжение u_g , соответствующее этой точке, и откладываем вправо от нее отрезок Qm , равный найденному $u_g = u_{готс1}$. Тогда mO' дает максимальное допустимое смещение u_0 .

Двухтактные усилители обычно имеют большие по величине сопротивления R_{a1} , R_{a2} и R_k . Это позволяет получить более линейную динамическую характеристику и добиться большей двухтактности выходного напряжения.

10. Упрощение метода

Чтобы найти динамическую характеристику, нам пришлось провести три прямые (1, 2, 3) и построить кривые I, I', II, III и IV. Графические

¹⁾ Анодные сопротивления R_{a1} и R_{a2} двухтактных схем обычно близки по величине.

операции получаются, как видим, достаточно сложными. Особенные неудобства представляет построение вспомогательных кривых. Однако изложенный метод допускает значительные упрощения. Оказывается, что кривые I и II (фиг. 3) мало отличаются от прямых линий и могут быть заменены ими. При этом кривая I также заменится прямой и останутся только кривые III и IV. Сохраним для прямых, заменяющих кривые I и II, обозначения, принятые нами для этих последних.

Графический расчет динамической характеристики однокатного усилителя будет теперь выполняться в следующем порядке. На семействе анодных характеристик проводим прямые 1 и 3. Если заранее выбрано постоянное смещение u_0 , находим точку P_0 анодной характеристики $u_g = \text{const} = 0$, лежащую левее прямой 1 на расстоянии u_0 , отсчитываемом в горизонтальном направлении. На нижних анодных характеристиках отмечаем 2—3 точки, как и при описанном ранее построении кривой I. Проведя через них плавную линию до пересечения с осью u_a , находим точку Q. Точки P_0 и Q определяют прямую 1. На ней отметим точку M' пересечения с прямой 3.

Если заданным является максимальное напряжение u_{g^*2} на сетке второго триода, сразу находим точку M' , как пересечение прямой 3 с анодной характеристикой $u_g = \text{const} = u_{g^*2}$. Прямая 1 определится теперь точками M' и Q. Последняя находится так же, как и в предыдущем случае. Проводим далее прямую 2 и отмечаем на ней точку N на одной вертикали с Q и точку M—на одном уровне с M' . Проекция M на ось u_a определяет точку m. Соединив N и m, получим прямую II. По точкам пересечения прямых I и II с анодными характеристиками строим кривые III и IV подобно тому, как это делалось раньше с помощью кривых I и II. Дальнейшие операции нахождения динамической характеристики при помощи кривых III и IV ничем не отличаются от ранее описанных.

Покажем, что ошибка, происходящая от „спрямления“ кривых I и II, будет очень небольшой. При переходе от точек кривых I и II к точкам соответствующих прямых (I и II), лежащих на тех же уровнях, напряжения u_{g1} и u_{g2} получают приращения Δu_{g1} и Δu_{g2} , в μ раз меньшие приращений анодных напряжений u_{a1} и u_{a2} . Так как токи i_{a1} и i_{a2} сохраняются при этом неизменными, то ордината i_{a2} приближенной динамической характеристики остается такой же, как и для точной. Чтобы найти изменение абсциссы, вычтем почленно из уравнения (3) уравнение (4). Это дает $u_1 = u_{g1} - u_{g2}$, и изменение u_1 можно представить в виде $\Delta u_1 = \Delta u_{g1} - \Delta u_{g2}$. Приращения Δu_{g1} и Δu_{g2} при указанном способе проведения прямых I и II положительны. Максимальные (в пределах наклонного участка динамической характеристики) значения Δu_{a1} и Δu_{g1} относятся к сравнительно большим токам i_{a1} ; им соответствуют небольшие значения i_{a2} и, как видно из фиг. 3,—максимальные приращения Δu_{a2} и Δu_{g2} . Вследствие этого разность приращений Δu_{g1} и Δu_{g2} , т. е. Δu_1 и максимальное смещение вдоль оси u_1 приближенной кривой относительно точной могут быть в несколько раз меньше, чем $\Delta u_{g \max} = \frac{\Delta u_{a \max}}{\mu}$. Так как динамическая харак-

теристика проходит наклонно к оси u_1 , то кратчайшее расстояние между обеими кривыми в том месте, где они разнятся больше всего, будет еще меньше.

В одном из примеров расчета, выполненном для сравнения, по „точному“ и по „приближенному“ методам (лампа 6Н8, $R_k = 5 \text{ ком}$ $R_a = 25 \text{ ком}$), $\Delta u_{a \max}$ было равно 2 в. Это соответствует

$$\Delta u_{g \max} = \frac{\Delta u_{a \max}}{\mu} = 0,1 \text{ в} \quad \text{и} \quad \Delta u_1 < 0,1 \text{ в.}$$

При масштабе по оси u_1 , равном $1 \text{ в } 1 \text{ см}$, нельзя было различить эти две кривые, так как ошибка при проведении кривых по точкам оказывается большей ошибки, обусловленной спрямлением вспомогательных кривых.

При расчете характеристики по напряжению на второй сетке прямая II строится подобно I предыдущего случая с той лишь разницей, что роль прямой 1 играет $u_a = E$, а прямой 3—прямая 2. Для построения прямой I' отмечаем точку M прямой 2, лежащую на одной вертикали с точкой Q, отсечки тока i_{a1} , и точку N пересечения прямых II и 2 (фиг. 5). Проекцию N на ось u_a обозначим n . Точки M и n определяют прямую I', а n и точка M' прямой 3, лежащая на одном уровне с M.—прямую I. По точкам пересечения прямых II и I с анодными характеристиками строим кривые III и IV. Дальнейший расчет будет аналогичен описанному в параграфе 5.

В случае двухтактного усилителя прямая I строится так же, как в случае одноктактного. Для получения прямой II' из точки Q встречи I с осью напряжений проводим прямую, параллельную I' до пересечения с 3' в точке N'. Отмечаем точку M' пересечения I и 3 и лежащую с ней на одном уровне точку M прямой 2. Соединив ее проекцию m на ось абсцисс с точкой N', получаем прямую II'. По точкам пересечения прямых I и II' с анодными характеристиками строим кривые III и IV. Дальнейший расчет—такой же, как и в случае одноктактной схемы. Расчет характеристики по напряжению на сетке второго триода вследствие симметрии схемы будет аналогичным только что рассмотренному.

11. Экспериментальная проверка

Проверка предложенного графического метода расчета производилась следующим образом. Лампы 6Н8 и 6Н9 на несколько дней были поставлены на „тренировку“, чтобы исключить влияние „дрейфа“, который особенно заметен в первые часы работы новой лампы. Затем были сняты семейства анодных характеристик отдельно для каждого триода каждой лампы. Напряжения на сетках менялись при этом через 1 в (для лампы 6Н9—через $0,5 \text{ в}$), а на анодах—через 10 в . Вольтметр, измеряющий напряжение источника анодного питания, имел цену делений 2 в , миллиамперметр в анодной цепи— $0,1 \text{ ма}$, вольтметр в сеточной цепи— $0,1 \text{ в}$. Напряжение накала было $6,3 \text{ в}$. Анодные характеристики были вычерчены на миллиметровой бумаге с масштабом по оси u_a , равным 10 в/см , а по оси i_a — 1 ма в 1 см . Были рассчитаны динамические характеристики одноктактного и двухтактного усилителей при различных значениях входящих в них сопротивлений и различных постоянных смещениях. Кривые II и II' (или соответствующие им прямые) строились на семействе анодных характеристик первого триода лампы, а кривая I (или прямая I)—на семействе второго; кривые III и IV выполнялись на отдельном чертеже. Это делалось для того, чтобы устранить возможную ошибку, которая могла бы появиться при неучете имеющейся (хотя и небольшой) разницы в характеристиках двух триодов лампы. Экспериментальное определение динамических характеристик было выполнено с помощью тех же приборов, что и снятие анодных характеристик.

Оказалось, что при соблюдении указанных выше условий („тренированные“ лампы, использование в расчете характеристик обоих триодов, использование при экспериментальной проверке тех же приборов, что и при снятии анодных характеристик) экспериментально найденные динамические характеристики в точности совпадают с рассчитанными. Ошибка графического расчета оказывается одного порядка с ошибкой отсчета по приборам при экспериментальной проверке.

12. Заключение

Экспериментальная проверка показала, что динамические характеристики усилителя с катодной связью при помощи описанного метода могут быть рассчитаны с большой точностью. Этот метод позволяет решать задачи, где требуется знание всей динамической характеристики, а не отдельных лишь ее элементов (например, крутизны усилителя или коэффициента усиления), позволяет выполнить точный расчет там, где аналитические методы могут давать ошибку в 100—200 % и более (определение порогов ограничения, определение коэффициента усиления при больших R_k и отсутствии положительных смещений). Он дополняет имеющиеся аналитические методы и существенно расширяет возможности расчета усилителей с катодной связью.

Благодаря наличию глубоких противосвязей влияние разброса параметров ламп на динамические характеристики усилителя значительно уменьшается. Это оправдывает применение точных методов расчета. Изложенный метод может быть с успехом применен и в таких ответственных случаях, как использование рассматриваемых схем в счетно-решающих устройствах, где требуется большая точность и где применяются специально подобранные экземпляры ламп с малым разбросом параметров.

Упрощения, описанные в параграфе 10, практически не снижают точности метода, поэтому ими всегда нужно пользоваться. В таком виде предлагаемый метод оказывается лишь немногим сложнее графических методов, применяемых при расчете катодных повторителей, усилителей с заземленной сеткой и т. п., хотя сама схема значительно сложнее.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ризкин А. А. Основы теории усилительных схем, изд. „Советское радио“, М., 1951.
 2. Ламповые усилители, т. II, изд. „Советское радио“, М. 1951.
 3. Паккл О. С. Генераторы развертки, Госэнергоиздат, 1948.
 4. Sulzer P. G. Схема с катодной связью, обладающая отрицательным сопротивлением. PIRE, № 8, Август, 1948.
-