ИЗВЕСТИЯ
ТОМСКОГО ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА имени С. М. КИРОВА
Том 105 1960 г.

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}, усиливаемого напряжения u_1, выходных напряжений $u_{вых1}$ и $u_{вых2}$), 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 однотактного каскада

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

$$i_k = i_{a1} + i_{a2}, \tag{1}$$

$$u_k = i_k R_k, \tag{2}$$

$$u_1 + u_{10} = u_{g1} + u_k \tag{3}$$

$$u_{20} = u_{g2} + u_k, \tag{4}$$

$$u_{a1} = E_a - u_k, \tag{5}$$

$$u_{вых} = E_a - i_{a1} R_a, \tag{6}$$

$$u_{a2} = u_{вых} - u_k, \tag{7}$$

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

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

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.

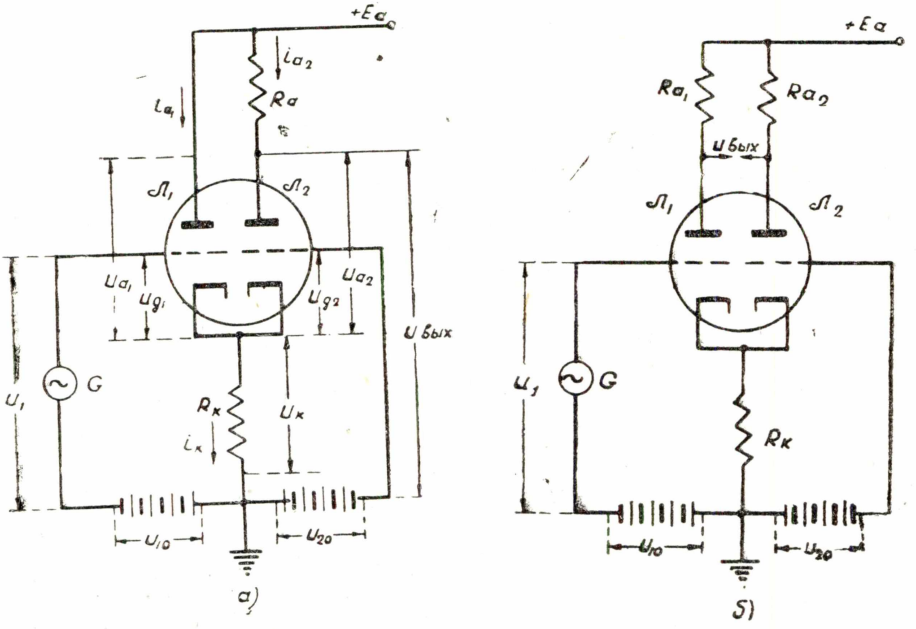

Рис. 1.

Динамическую характеристику $i_{a2}=f(u_1)$ [или $u_{вых}=F(u_1)$] 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 I. Она мало отличается [1] от кривой $i_{a2}=\Phi_2(u_{a2})$. На прямой I фиксируем точки A,B,C и т. д. пересечения с анодными характеристиками.

Отметим точку M пересечения I с 2 и лежащую на одном уровне с ней точку M' прямой 3. Соединим M' с Q прямой I'. Эта прямая мало отличается [1] от кривой $i_{a2}=\Psi_2(-u_k)$, если за начало координат взять точку $O'(E_a,0)$. На I' 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 II, 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... дают значения токов i_{a2} и i_{a1}. Соответствующие им напряжения u_1 на основании уравнений (3) и (4) определяются разностью

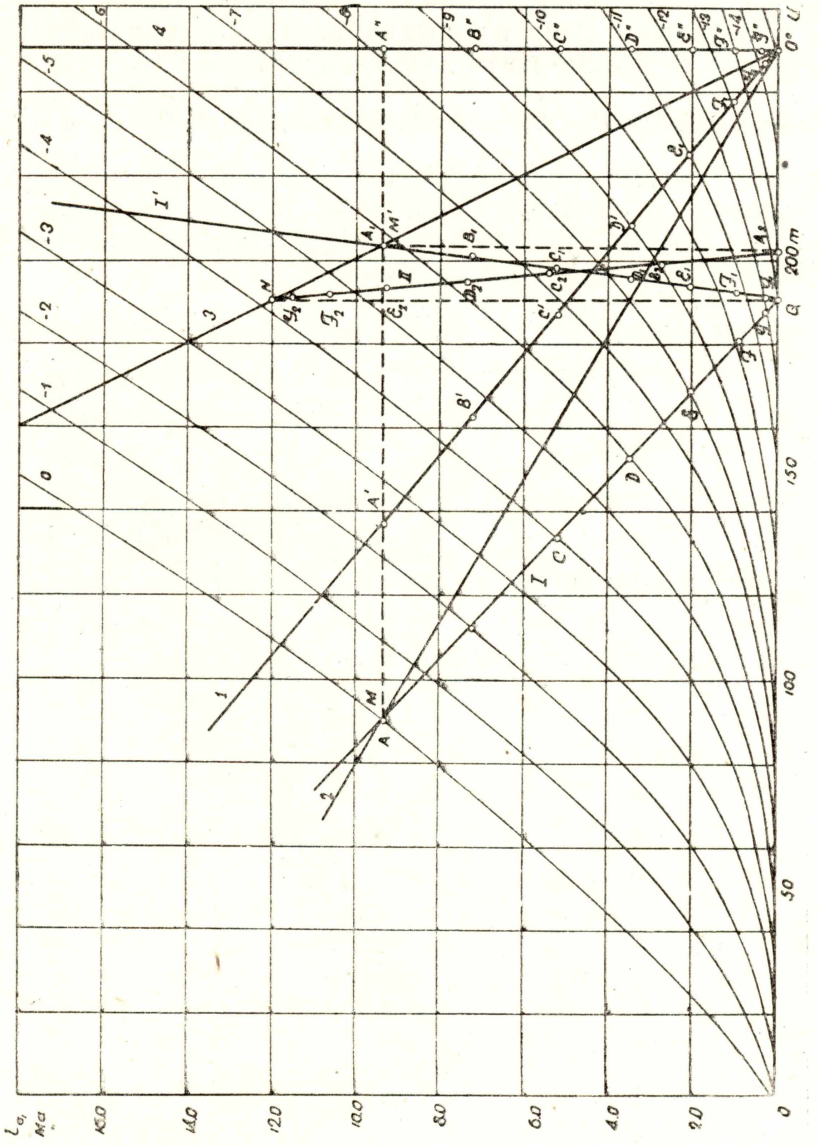

Рис. 2.

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

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 $u_{вых}$ 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 $u_{вых}$, которые также целесообразно записать в таблицу. Взяв из последней $u_{вых}$ и соответствующие им значения u_1, можно вычертить характеристику $u_{вых}=F(u_1)$.

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

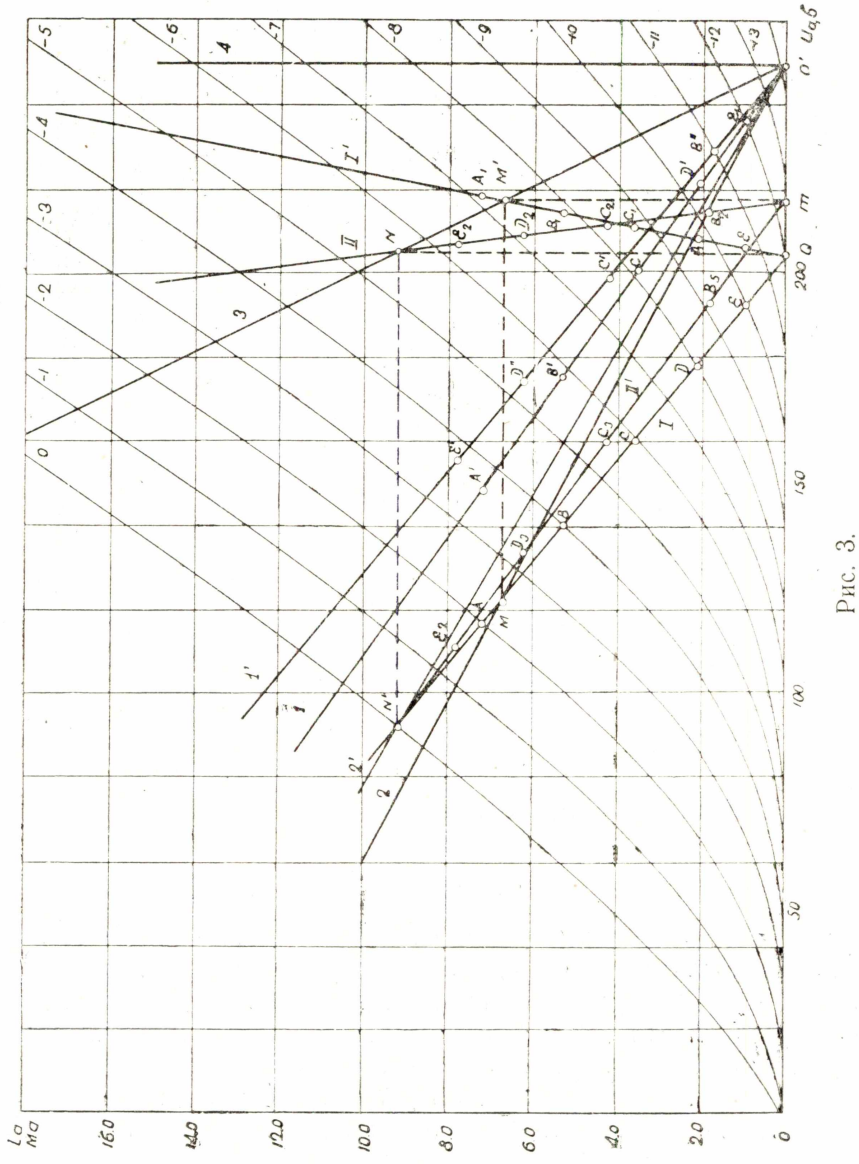

Рис. 3.

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

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

При графическом расчете динамических характеристик строятся прямые I, I' и II, совершенно такие же, как и в случае однотактной 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 $R_{a1}+R_к$ (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'... и A'',B'',C'',..., лежащие на одинаковых уровнях с A,B,C,... и A_3,B_3,C_3... Расстояния от этих точек до вертикальной прямой 4 определяют выходные напряжения $u_{вых2}$ и $u_{вых1}$ соответственно.

По точкам A,B,C... A_3,B_3,C_3... 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 $u_{вых1}$ и $u_{вых2}$, найденными по точкам A',B',C'... и A'',B'',C''... Данные таблицы позволяют вычертить кривую $u_{вых1}-u_{вых2}=g(u_1)$—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 $u_{0макс}$ то значение u_0, при котором появляется сеточный ток на одной из границ рабочего участка динамической характеристики. Как показано в [1], при однотактной схеме $u_{0макс}$ будет соответствовать появление сеточного тока у второй лампы в момент запирания первой, а при двухтактной—сеточного тока первой лампы при запирании второй.

Графический метод позволяет легко определить $u_{0макс}$. В случае однотактной 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 запирания 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 $u_{0макс}$ 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 $u_g = u_{gотс}$, соответствующее этой точке, и откладываем вправо от Q отрезок Qm, равный найденному напряжению $u_{gотс}$. Тогда mO' даст максимальное допустимое смещение $u_{0макс}$, которое необходимо подать на обе сетки.

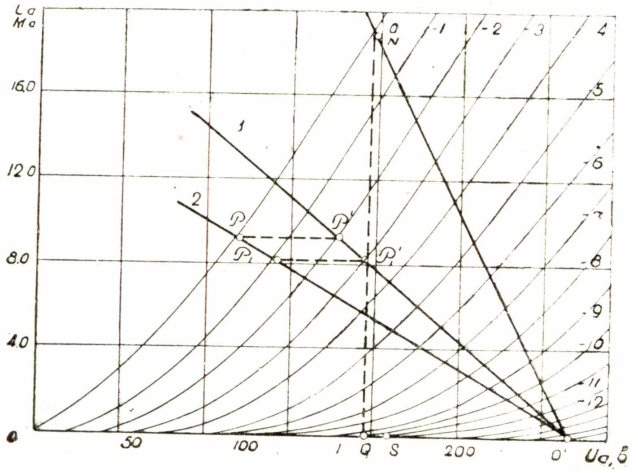

Рис. 4.

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 $u_{20} = u_{0макс}$, а на первой — $u_{0макс} + u_{1p}$.

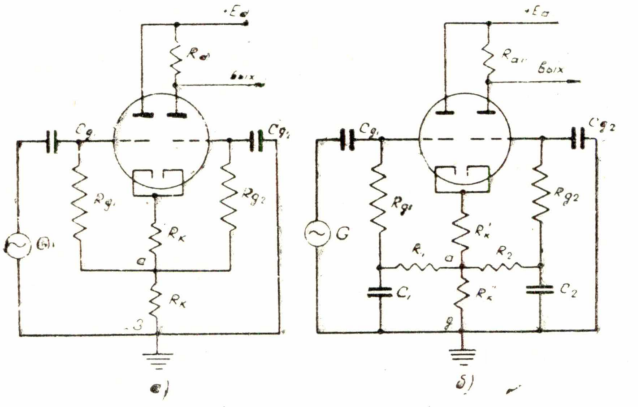

Рис. 5.

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 $i_{a2}=f(u_1)$ (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

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

Аналогично для первой лампы имеем

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

или

$$u_{1p}=-i_{kp}R_{k2}. \text{ [1]} \tag{12'}$$

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. Алябьевой [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. Суслов 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

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

$$u_{1p}=i_{kp}R_{k2} \tag{12''}$$