

ГРАФОАНАЛИТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ АНАЛИЗА ЦЕПЕЙ С НЕЛИНЕЙНЫМИ ТРЕХПОЛЮСНИКАМИ

Г. С. Соловьев

Владивосток

Основная задача анализа нелинейной электрической цепи заключается в нахождении токов и напряжений, определяющих режим нелинейного элемента. Для схемы, содержащей нелинейный трехполюсник, число искомым величин равно шести (три тока и три напряжения), четыре из которых будут независимыми. Следовательно, задача сводится к определению двух токов и двух напряжений.

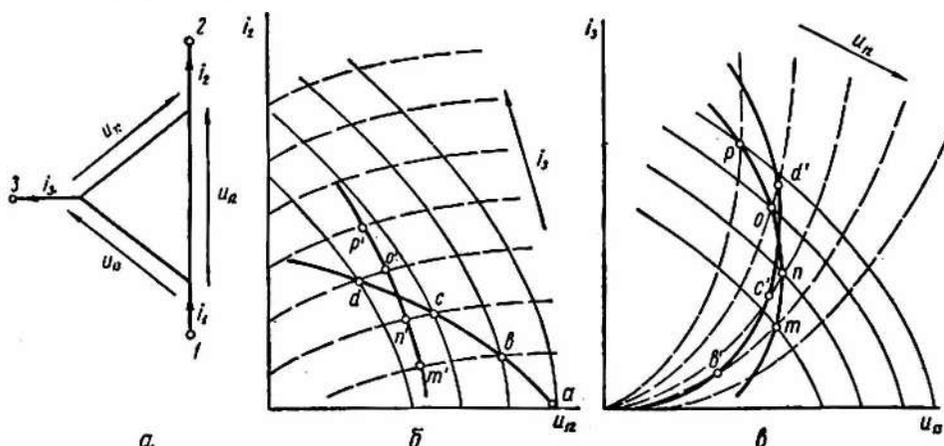


Рис. 1. Определение рабочей точки нелинейного трехполюсника.

Считая i_2 ; i_3 ; u_{12} ; u_{13} независимыми величинами нелинейного трехполюсника (рис. 1, а), можно записать для него уравнения в виде

$$\begin{aligned} f(i_2; u_{12}; i_3) &= 0; \\ f(i_3; u_{13}; u_{12}) &= 0. \end{aligned}$$

Каждое из этих уравнений может быть задано графически — вольт-амперными характеристиками (ВАХ):

$$\begin{aligned} \varphi_1(i_2; u_{12})_{i_3} &= 0; \\ \varphi_2(i_3; u_{13})_{u_2} &= 0. \end{aligned}$$

Следует отметить, что для трехполюсника в общем случае можно привести 36 пар ВАХ, однако нет необходимости рассматривать каждую из них, так как любую пару ВАХ можно перестроить и получить нужное нам семейство. Такое преобразование всегда можно осуществить, применяя методику, рассмотренную в работе [1].

Чтобы определить четыре неизвестные величины (u_{12} ; u_{13} ; i_2 ; i_3 для нашего случая), необходимы четыре уравнения. ВАХ дают нам два уравнения, а остальные получаем из схемы.

Выделив независимые контуры, составляем для них на основании законов Ома и Кирхгофа уравнения таким образом, чтобы в них вошли электрические величины, которые содержатся в ВАХ. Полученная таким образом система уравнений

$$\begin{aligned} \varphi_1(i_2; u_{12})i_3 &= 0; \\ \psi_1(i_2; i_3; u_{12}) &= E; \\ \varphi_2(i_3; u_{13})u_{11} &= 0; \\ \psi_2(i_3; u_{13}; u_{12}) &= E. \end{aligned} \quad (1)$$

где φ_1 и φ_2 — ВАХ;

ψ_1 и ψ_2 — уравнения, полученные из схем, решаются графически. Алгоритм решения системы (1) ясен из схемы (2)

$$\left. \begin{aligned} \varphi_1(i_2; u_{12})i_3 = 0 \\ \psi_1(i_2; i_3; u_{12}) = E \\ \varphi_2(i_3; u_{13})u_{11} = 0 \\ \psi_2(i_3; u_{13}; u_{12}) = E \end{aligned} \right\} \begin{array}{l} \xrightarrow{\text{I}} u_{12} = \xi_1(i_2) \leftarrow \frac{I_2}{U_{13}} \\ \xrightarrow{\text{II}} u_{12} = \xi_2(i_3) \leftarrow \frac{I_3 U_{12}}{U_{13}} \\ \xrightarrow{\text{III}} u_{12} = \xi_3(i_3) \\ \xrightarrow{\text{IV}} u_{13} = \xi_4(i_3) \leftarrow \frac{I_3 U_{12}}{U_{13}} \end{array} \quad (2)$$

где I_2 ; I_3 ; U_{12} ; U_{13} — токи и напряжения трехполюсника в рабочей точке; I; II; III — последовательность операций.

Рассмотрим алгоритм (2) по операциям.

1. Полученное из схемы уравнение

$$E = \psi_1(i_2; i_3; u_{12})$$

в силу линейности для мгновенных значений токов и напряжений можно представить в виде

$$E = su_{12} + \gamma i_2 + \nu i_3, \quad (3)$$

где γ и ν — коэффициенты, имеющие размерность проводимости; s — безразмерный коэффициент.

Решаем его графически в семействе

$$\varphi_1(i_2; u_{12})i_3 = 0.$$

Подставляя в уравнение (3) значение тока i_3 , равное $i_3^{(k)}$, где $i_3^{(k)}$ — фиксированное значение тока i_3 для одной из характеристик семейства, получим

$$E' = su_{12} + \gamma i_2,$$

где

$$E' = E - \nu i_3^{(k)}.$$

Это соотношение представляет собой уравнение равновесия напряжений для цепи с последовательным соединением нелинейного и линейного двухполюсника. Расчет таких цепей нам известен. Решая для остальных токов i_3 семейства $\varphi_1(i_2; u_{12})i_3 = 0$ (рис. 1, б) и отмечая точки возможных решений (а; б; в; г) уравнения (3), построим зависимость $u_{12} = \xi_1(i_2)$ — динамическую линию на нагрузке семейства $\varphi_1(i_2; u_{12})i_3 = 0$. Динамическая линия нагрузки дает возможность получить зависимость $u_{13} = \xi_2(i_3)$, так как каждому значению i_3 соответствует строго определенное значение u_{12} .

II. Полученное из схемы уравнение $E = \psi_2(i_3; u_{13}; u_{12})$ решаем в семействе $\varphi_2(i_3; u_{13})u_{12} = 0$ (рис. 1, в) и по аналогии с предыдущим получим зависимости $u_{13} = \xi_4(i_3)$ — динамическую линию нагрузки семейства и $u_{12} = \xi_3(i_3)$.

III. Совмещаем $u_{12} = \xi_2(i_3)$ и $u_{12} = \xi_3(i_3)$ в любом из семейств. Здесь возможны три случая:

1. Кривые $u_{12} = \xi_2(i_3)$ и $u_{12} = \xi_3(i_3)$ пересекаются.
2. Кривые не пересекаются.
3. Кривые совпадают.

В первом случае точки пересечения являются решениями системы уравнений (1). Если точка пересечения одна, то решение единственное, а ее координаты определяют режим нелинейного трехполосника. Во втором случае система не имеет решения — схема не работает. Третий случай характерен для неуправляемого трехполосника.

Анализ схем с параллельным соединением нелинейных трехполосников ничем не отличается от уже рассмотренного, если построить вольт-амперные характеристики всего соединения, руководствуясь методикой, изложенной в работе [2].

$$\begin{array}{c}
 \begin{array}{l}
 \varphi_1(i_3'; u_{12}') i_3 = 0 \\
 \varphi_2(i_3''; u_{13}'') i_3'' = 0 \\
 \varphi_2(i_2; u_{12}; i_3) = E \\
 f_1(i_3'; u_{13}') u_{13}' = 0 \\
 f_2(i_3''; u_{13}'') u_{13}'' = 0 \\
 \varphi_2(i_3; u_{13}; u_{12}) = E
 \end{array}
 \begin{array}{l}
 \xrightarrow{I} \\
 \\
 \\
 \xrightarrow{II} \\
 \\
 \\
 \xrightarrow{VI}
 \end{array}
 \begin{array}{l}
 \varphi(i_2; u_{12}) i_3 = 0 \\
 \psi_1(i_2; u_{12}; i_3) = E \\
 f(i_3; u_{13}) u_{12} = 0 \\
 \psi_2(i_3; u_{13}; u_{12}) = E
 \end{array}
 \begin{array}{l}
 \\
 \\
 \xrightarrow{III} \\
 \\
 \xrightarrow{IV} \\
 \\
 \xrightarrow{VII}
 \end{array}
 \begin{array}{l}
 u_{12} = \xi_1(i_2) \\
 u_{12} = \xi_2(i_3) \\
 u_{12} = \xi_3(i_3) \\
 u_{13} = \xi_4(i_3)
 \end{array}
 \left. \vphantom{\begin{array}{l} \varphi_1 \\ \varphi_2 \\ \varphi_2 \\ f_1 \\ f_2 \\ \varphi_2 \end{array}} \right\} \begin{array}{l} \\ \\ \\ \xrightarrow{V} I_3; U_{12}, \\ \\ \\ U_{13} \end{array} \quad (4)
 \end{array}$$

где $\varphi_1; f_1$ и $\varphi_2; f_2$ — ВАХ трехполосников; φ и f — ВАХ соединения; $\varphi_1; \varphi_2$ — уравнения, полученные из схемы.

Приведем краткие пояснения к алгоритму (4) анализа схем такого типа.

I и II. Построим ВАХ параллельного соединения трехполосников.

III, IV, V. Решив полученные из схемы уравнения, определяем

$$U_{12} \text{ и } U_{13}.$$

VI, VII. По известным U_{12} и U_{13} определяем токи трехполосников.

В заключение следует сказать, что в других семействах ВАХ задача решается аналогично.

Используя рассмотренные методы графических решений уравнений, перейдем теперь к анализу схем, состоящих из двух нелинейных трехполосников или проходных четырехполосников и схем, содержащих нелинейные трехполосник и двухполосник.

Анализ схем такого типа производится в следующей последовательности.

1. Выделив контур, в который входят искомые токи и напряжения обоих нелинейных элементов, запишем для него уравнения равновесия напряжений. В связи с тем, что это уравнение будет линейным для мгновенных значений токов и напряжений, его можно представить в виде

$$E = \Phi_1 + \Phi_2, \quad (5)$$

где Φ_1 и Φ_2 — функции параметров первого и второго нелинейных элементов соответственно.

Учитывая важность уравнения (5) для решения целого ряда задач, целесообразно ввести для него термин уравнение связи. Уравнение связи можно решить графически, если Φ_1 и Φ_2 — функции одного аргумента (тока), т. е.:

$$\Phi_1 = f(i); \quad (6)$$

$$\Phi_2 = \varphi(i). \quad (7)$$

Получить зависимости (6) и (7) аналитически не всегда представляется возможным, поэтому находим их графическим путем.

2. Составляем для рассматриваемой схемы уравнения, используя законы Ома и Кирхгофа, в которые войдут токи и напряжения функций (6) и (7), и решаем их в соответствующих ВАХ. Полученные в результате решения зависимости $u_{ks} = \xi(i)$ и $u'_{ks} = \xi(i)$, где u_{ks} и u'_{ks} — узловые напряжения первого и второго трехполосников соответственно, дают возможность построить $\Phi_1 = f(i)$ и $\Phi_2 = \varphi(i)$, а следовательно, решить уравнение связи. После этого, используя ранее найденные зависимости $u_{ks} = \xi(i)$ и $u'_{ks} = \xi(i)$, находим остальные токи и напряжения, определяющие режим нелинейных элементов.

АНАЛИЗ НЕКОТОРЫХ РАСПРОСТРАНЕННЫХ СХЕМ С НЕЛИНЕЙНЫМИ ТРЕХПОЛЮСНИКАМИ

1. Схемы с одним нелинейным трехполосником. Рассмотрим наиболее общий случай включения нелинейного трехполосника в схему (рис. 2, а). Для рассматриваемой схемы можно записать

$$i_3(R_1 + R_2) + u_{13} + i_3R_1 = E; \quad (8)$$

$$i_3(R_1 + R_3) + u_{13} + i_2R_4 + i_4R_3 = E; \quad (9)$$

$$(i_3 + i_2)R_1 + u_{13} = i_4R_4; \quad (10)$$

$$i_4R_4 + u_{32} + i_2R_2 = E \quad (11)$$

$$i_4R_4 + (i_1 - i_2)R_3 + i_4R_3 = E \quad (12)$$

$$i_1R_1 + u_{13} + u_{32} + i_2R_2 = E \quad (13)$$

Примечание.

1. Для схем, имеющих общий узел для обоих нелинейных элементов, за аргумент функций Φ_1 и Φ_2 целесообразно принять ток общего узла.

2. Одно из слагаемых уравнений связи, составленных для схем, содержащих нелинейные трехполосник и двухполосник, задано ВАХ двухполосника.

Используя выражения (8), (9) и (10), находим решение в семействах ВАХ

$$\varphi(i_2; u_{13})i_3 = 0 \text{ и } \varphi(i_2; u_{13})u_{12} = 0.$$

Решаем уравнение (8) в семействе $\varphi(i_2; u_{12})i_3 = 0$.

Ранее мы обосновали принцип графического решения уравнений. Практические решения сводятся к следующему.

Подставляя в уравнение (8) значение токов i_3 , взятые из ВАХ $\varphi(i_2; u_{12})i_3 = 0$, получим семейство прямых, координаты которых можно найти, поочередно приравнявая u_{13} и i_2 к нулю,

$$\begin{aligned} u_{13} = 0; \quad i_3^{(k)} &= \frac{E - i_3^{(k)}R_1}{R_1 + R_2}; \\ i_2 = 0; \quad u_{13}^{(k)} &= E - i_3^{(k)}R_1; \\ \operatorname{tg} \alpha &= \frac{1}{R_1 + R_2}. \end{aligned} \quad (14)$$

Соотношения (14) показывают, что угол наклона прямых — величина постоянная. Это положение упрощает решение задачи, так как нет необходимости находить обе координаты для каждой прямой. Достаточно построить одну из них, а затем, определив $i_2^{(k)}$ либо $u_{12}^{(k)}$, проводим остальные

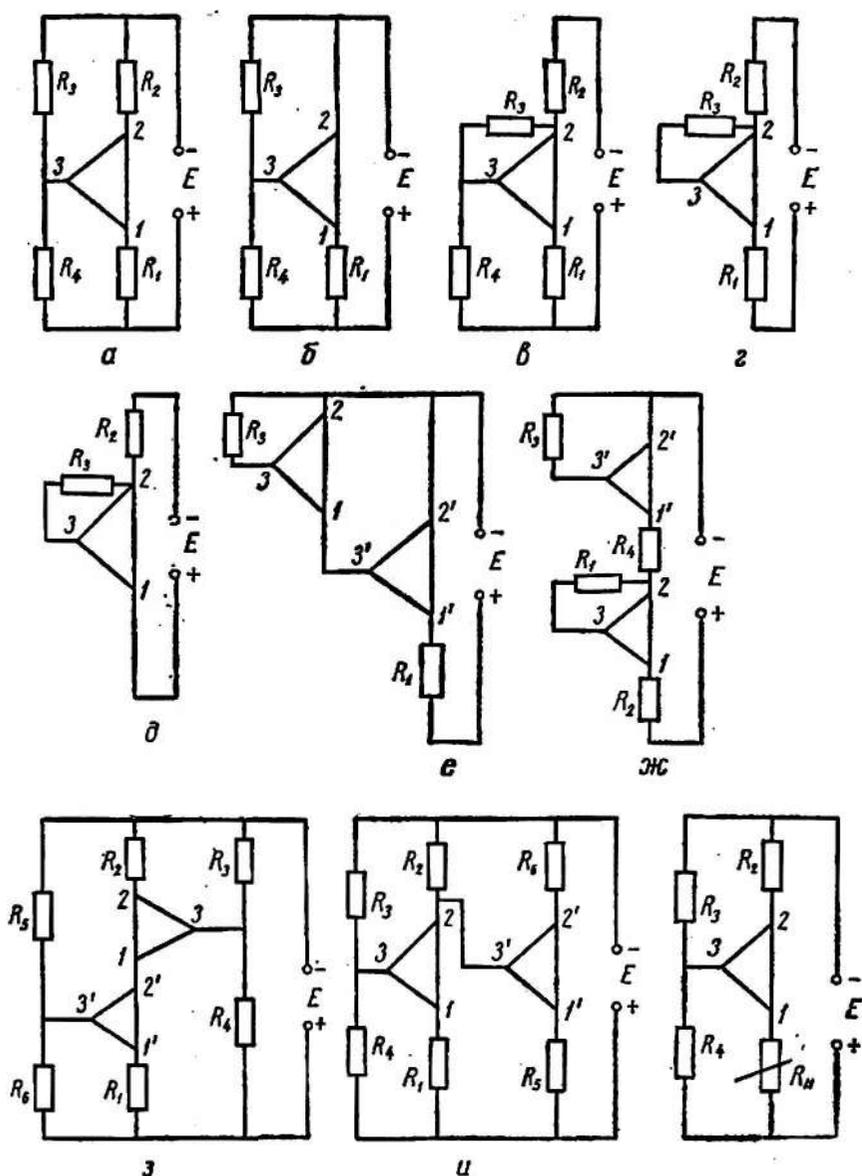


Рис. 2. Типовые схемы с линейными трехполюсниками.

прямые параллельно построенной. Соединяя точки пересечения каждой k -ой прямой с ВАХ, построенной для $i_3 = i_3^{(k)}$, получим динамическую линию нагрузки — $u_{12} = \xi(i_2)$.

Подставив в (12) значения i_2 и i_4 из (8) и (10), получим

$$i_3 = Eg' - u_{12}g'' + u_{12}g''' \quad (15)$$

где

$$\begin{aligned} g' &= \frac{R_2 R_4 - R_1 R_3}{R_1 R_3 R_4 + R_1 R_2 R_3 + R_1 R_2 R_4 + R_2 R_3 R_4}; \\ g'' &= \frac{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)}{R_1 R_3 R_4 + R_1 R_2 R_3 + R_1 R_2 R_4 + R_2 R_3 R_4}; \\ g''' &= \frac{R_1 (R_3 + R_4)}{R_1 R_3 R_4 + R_1 R_2 R_3 + R_1 R_2 R_4 + R_2 R_3 R_4}; \\ \operatorname{tg} \alpha' &= g'''. \end{aligned} \quad (16)$$

Решая (15) в семействе $\varphi(i_3; u_{13}) u_{12} = 0$, получим динамическую линию нагрузки $u_{13} = \xi(i_3)$. Перестраивая $u_{13} = \xi(i_3)$ в семейство $\varphi(i_2; u_{12}) i_3 = 0$, либо $u_{12} = \xi(i_2)$ в семействе $\varphi(i_3; u_{13}) u_{12} = 0$, получим точку пересечения, координаты которой определяют режим трехполосника. Если рабочую точку находим в семействах $\varphi(i_2; u_{32}) i_1 = 0$ и $\varphi(i_1; u_{13}) u_{32} = 0$, то необходимое уравнение получим из соотношений (11), (12) и (13)

$$i_2 = E g_1 - u_{32} g_2 + i_1 k, \quad (17)$$

где

$$\begin{aligned} g_1 &= \frac{R_3}{R_3 R_4 + R_2 R_3 + R_2 R_4}; \\ g_2 &= \frac{R_3 + R_4}{R_3 R_4 + R_2 R_3 + R_2 R_4}; \\ k &= \frac{R_3 R_4}{R_3 R_4 + R_2 R_3 + R_2 R_4}; \\ \operatorname{tg} \beta &= g_2; \\ i_1 &= E g_1' - u_{13} g_2'' - u_{32} g_3''', \end{aligned} \quad (18)$$

$$i_1 = E g_1' - u_{13} g_2'' - u_{32} g_3''', \quad (19)$$

где

$$\begin{aligned} g_1' &= \frac{1 - g_1 R_2}{R_1 + k R_2}; \quad g_2'' = \frac{1}{R_1 + k R_2}; \quad g_3''' = \frac{1 - g_2 R_2}{R_1 + k R_2}; \\ \operatorname{tg} \beta' &= g_2''. \end{aligned} \quad (20)$$

Решив уравнение (17) в семействе $\varphi(i_2; u_{32}) i_1 = 0$ и (19) в семействе $\varphi(i_1; u_{13}) u_{32} = 0$, получим динамические линии нагрузок $u_{32} = \xi(i_2)$ и $u_{13} = \xi(i_1)$, совмещая которые, в любом из семейств находим рабочую точку.

Положив в уравнениях (8), (11), (13) $R_2 = 0$, получим для схемы рис. 2, б

$$i_2 = \frac{E - u_{13}}{R_1} - i_3; \quad (21)$$

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{1}{R_1}; \quad (22)$$

$$i_3 = (u_{12} - u_{13}) g' - E g''; \quad (23)$$

здесь

$$\begin{aligned} g' &= \frac{R_3 + R_4}{R_3 R_4}; \quad g'' = \frac{1}{R_4}; \\ \operatorname{tg} \alpha' &= g'; \end{aligned} \quad (24)$$

$$i_2 = E \frac{1}{R_4} - u_{32} \frac{R_3 + R_4}{R_3 R_4} + i_3; \quad (25)$$

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{R_3 + R_4}{R_3 R_4}; \quad (26)$$

$$i_1 = \frac{E - u_{13} - u_{32}}{R_1}; \quad (27)$$

$$\operatorname{tg} \beta' = \frac{1}{R_1}. \quad (28)$$

Схема рис. 2, в описывается уравнениями

$$E = i_2 (R_1 + R_2) + u_{12} + i_3 (R_1 + R_2) + i_4 R_2; \quad (29)$$

$$E = i_4 (R_2 + R_3 + R_4) + i_3 (R_2 + R_3) + i_2 R_2; \quad (30)$$

$$E = i_3 (R_1 + R_2 + R_3) + u_{13} + i_4 (R_3 + R_2) + i_2 (R_1 + R_2); \quad (31)$$

$$i_4 R_4 = u_{13} + R_1 (i_3 + i_2); \quad (32)$$

$$u_{32} = i_4 R_3 + i_3 R_3. \quad (33)$$

Подставляя i_4 из выражения (30) в (29), имеем

$$i_2 = E \frac{R_3 + R_4}{R_{\text{экв}}^2} - u_{12} \frac{R_2}{R_{\text{экв}}^2} - i_3 \frac{R_{\text{экв}}^2 - R_2 R_3}{R_{\text{экв}}^2}; \quad (34)$$

$$R_{\text{экв}} = R_2 + R_3 + R_4;$$

$$R_{\text{экв}}^2 = R_1 R_2 + R_1 R_3 + R_1 R_4 + R_2 R_3 + R_2 R_4;$$

$$\text{tg } \alpha = \frac{R_2}{R_{\text{экв}}^2}. \quad (35)$$

Подставив i_4 и i_2 из формул (32) и (34) в (31), найдем

$$i_3 = u_{12} g''' - u_{13} g'' - E g'; \quad (36)$$

$$g' = \frac{R_1 R_2}{R_{\text{экв}}^2 (R_3 + R_4) - R_2 R_3^2};$$

$$g'' = \frac{R_2 R_{\text{экв}}^2}{[R_{\text{экв}}^2 (R_3 + R_4) - R_2 R_3^2] R_3};$$

$$g''' = \frac{R_2 (R_{\text{экв}}^2 - R_2 R_3)}{[R_{\text{экв}}^2 (R_3 + R_4) - R_2 R_3^2] R_3};$$

$$\text{tg } \alpha' = g''. \quad (37)$$

Используя известное соотношение $i_1 = i_2 + i_3$, из равенства (30) и (33) найдем

$$i_2 = E g_1 - u_{32} g_2 + i_1 k; \quad (38)$$

$$g_1 = \frac{1}{R_2 + R_4};$$

$$g_2 = \frac{R_2}{R_3 (R_3 + R_4)}; \quad (39)$$

$$k = \frac{R_4}{R_2 + R_4}; \quad \text{tg } \beta = g_2.$$

Подставляя значения токов i_4 и i_2 из формул (33) и (38) в (32), получим

$$i_1 = E g_1' - u_{13} g_2'' - u_{32} g_3'''; \quad (40)$$

$$g_1' = \frac{R_4}{R_1 (R_3 + R_4) + R_2 R_4};$$

$$g_2'' = \frac{R_3 + R_4}{R_1 (R_3 + R_4) + R_2 R_4}; \quad (41)$$

$$g_3''' = \frac{R_4^2}{R_3 [R_1 (R_3 + R_4) + R_2 R_4]}; \quad \text{tg } \beta' = g_2''.$$

Схемы рис. 2, г и рис. 2, д — частные случаи уже рассмотренной нами схемы рис. 2, в. Опуская выводы, запишем для них интересующие нас уравнения.

Для схемы рис. 2, г:

$$i_2 = \frac{E - u_{12}}{R_1 + R_3} - i_3; \quad (42)$$

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{1}{R_1 + R_3}; \quad (43)$$

$$i_3 = \frac{u_{12} - u_{13}}{R_3}; \quad (44)$$

$$\operatorname{tg} \alpha' = \frac{1}{R_3}; \quad (45)$$

$$i_2 = i_1 - \frac{u_{32}}{R_3}; \quad (46)$$

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{1}{R_3}; \quad (47)$$

$$i_1 = \frac{E - u_{32} - u_{13}}{R_1 + R_3}; \quad (48)$$

$$\operatorname{tg} \beta' = \frac{1}{R_1 + R_3}; \quad (49)$$

Для схемы рис. 2, д.

$$i_2 = \frac{E - u_{12}}{R_3} - i_3; \quad (50)$$

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{1}{R_3}; \quad (51)$$

$$i_3 = \frac{u_{12} - u_{13}}{R_3}; \quad (52)$$

$$\operatorname{tg} \alpha' = \frac{1}{R_3}; \quad (53)$$

$$i_2 = \frac{i_1 R_3 - u_{32}}{R_3}; \quad (54)$$

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{1}{R_3}; \quad (55)$$

$$i_1 = \frac{E - u_{12} - u_{32}}{R_3}; \quad (56)$$

$$\operatorname{tg} \beta' = \frac{1}{R_3}. \quad (57)$$

2. Схема с составным нелинейным трехполюсником (рис. 2, е). Рассматриваемая схема описывается уравнениями

$$u_{12} = u'_{32}; \quad (58)$$

$$i_1 = i'_3; \quad (59)$$

$$(i'_2 + i'_3) R_1 + u'_{12} = E; \quad (60)$$

$$u_{12} = u_{32} + u_{12}; \quad (61)$$

$$(i_1 - i_2) R_3 = u_{32}; \quad (62)$$

$$u'_{32} = u'_{12} - u'_{13}. \quad (63)$$

Схемы такого типа анализируются с помощью уравнения связи. В нашем случае оно задано соотношением (58, 59). Следовательно, задача сводится к нахождению функций $u_{12} = \psi(i'_3 = i_1)$ и $u'_{32} = \psi(i'_3 = i_1)$.

Решив (62) в семействе $\varphi(i_2; u_{32}) i_1 = 0$, построим зависимость $u_{32} = \xi(i_2)$. Переносим ее в семейство $\varphi(i_1; u_{13}) u_{32} = 0$, а затем, используя (61), построим зависимость $u_{12} = \psi(i'_3 = i_1)$. Решаем уравнение (60) в семействе $\varphi(i_2; u'_{12}) i_3 = 0$ и переносим полученную кривую $u'_{12} = \zeta(i'_2)$ в семейство $\varphi(i'_2; u'_{13}) u'_{12} = 0$. После этого, используя (63), можно построить зависимость $u'_{32} = \psi(i'_3 = i_1)$ на одном графике с ранее построенной $u_{12} = \psi(i'_3 = i_1)$. Точка пересечения

кривых $u_{12} = \psi(i'_2 = i_1)$ и $u'_{32} = \psi(i_2 = i_1)$ даст нам значение тока $i'_3 = I_1$, где $u_{12} = u_{32}$.

3. Каскодные схемы. Анализ этих схем (рис. 2, ж и 2, з) ничем не отличается от анализа уже рассмотренной нами схемы рис. 2, е. Приведем для них необходимые уравнения.

Для схемы рис. 2, ж:

$$(i_1 - i_2) R_1 = u_{32}; \quad (64)$$

$$(i'_1 - i'_2) R_3 = u'_{32}; \quad (65)$$

$$E = U_1 + U_2. \quad (66)$$

Здесь

$$U_1 = i_1 (R_2 + R_4) + u'_{12} + u'_{32};$$

$$U_2 = u_{12} + u_{32}.$$

Для схемы рис. 2, з:

$$E = i_2 \frac{R_2 R_3 + R_2 R_4 + R_3 R_4}{R_3} + u_{32} \frac{R_3 + R_4}{R_3} - i_1 R_4; \quad (67)$$

$$E = i'_3 \frac{R_1 R_5 + R_1 R_6 + R_5 R_6}{R_6} + u_{12} \frac{R_5 + R_6}{R_6} + i'_2 \frac{R_1 (R_5 + R_6)}{R_6}; \quad (68)$$

$$E = U_1 + U_2; \quad (69)$$

$$U_1 = (i'_2 + i'_3) R_1 + u'_{12},$$

где

$$U_2 = u_{12} + i_2 R_2.$$

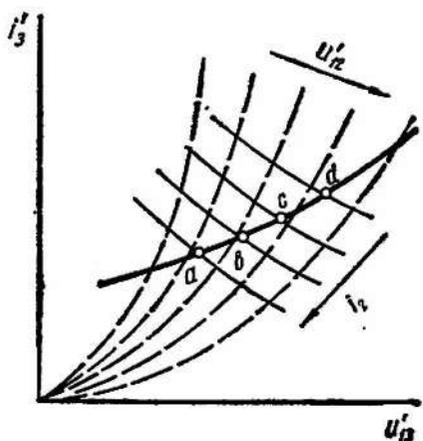


Рис. 3. Семейство динамических линий нагрузок трехполосника.

Решаем уравнение (70) в семействе $\varphi(i'_3; u'_{12}) i'_2 = 0$. Подставляя i_2 из формулы (70) в (71), получим

$$i'_3 = \frac{E - R_6 - i_2 R_2 (R_5 + R_6) - u'_3 (R_5 + R_6) + u'_{12} R_5}{R_5 R_5 + R_2 R_5 + R_2 R_6}. \quad (73)$$

Определяем максимально возможный диапазон изменения тока i_2 . Для этого, решив уравнение (72) в семействе $\varphi(i_2; u_{12}) i_3 = 0$ при $i'_3 = 0$, получим зависимость $u_{12} = \xi(i_2) i_3 = 0$. Решая уравнение (73) для ряда значений тока i_2 , зависимости $u_{12} = \xi(i_2) i_3 = 0$ получим в ВАХ $\varphi(i'_3; u_{12}) u'_{12} = 0$ семейство динамических линий нагрузки $u_{12} = \xi(u'_3) i_1$ (рис. 3). Перестраивая кривую

Соотношения (66) и (69) — уравнения связи рассматриваемых схем. Слагаемые этих уравнений можно найти, используя выражения (64), (65) и (67), (68). Отметим, что уравнение (68) решается в семействе $\varphi(i'_3; u'_{12}) i'_2 = 0$.

4. Схема с непосредственной связью. Для данной схемы (рис. 2, и) можно записать:

$$E = i'_2 (R_5 + R_6) + u'_{12} + i'_3 R_5; \quad (70)$$

$$E = i_2 R_2 = i'_3 (R_2 + R_5) + u'_{12} + i_2 R_5; \quad (71)$$

$$E = i_2 (R_1 + R_2) + u_{12} + i_3 R_1 + i'_3 R_2. \quad (72)$$

$u'_{12} = \xi(i'_2)$ в семейство $\varphi(i'_3; u'_{12}) u_{12} = 0$ и отмечая точки пересечения с семейством $u'_{12} = \xi(i'_{12}) i_2$ (a, b, c), можно построить зависимость

$$U = \psi(i_2),$$

где

$$U = i'_3(R_3 + R_2) + u'_{12} + i'_3 R_3.$$

После этого, графически решая (71), находим I_2 , а затем, используя $u'_3 = \xi(i'_3) i_3$ и $u'_{12} = \xi(i'_2)$, определяем остальные токи и напряжения трехполосника 1'—2'—3'. Зная ток I'_3 трехполосника 1'—2'—3', известными методами находим остальные токи и напряжения трехполосника 1—2—3.

5. Схемы с нелинейным двухполосником и трехполосником. Для этих схем (рис. 2, k) можно записать:

$$E = i_4(R_4 + R_3) + (i_1 - i_2)R_3; \quad (74)$$

$$E = i_4 R_4 + u_{32} + i_2 R_2; \quad (75)$$

$$E = u_{R_n} + u_{12} + i_2 R_2. \quad (76)$$

Здесь u_{R_n} — напряжение на линейном двухполоснике R_n . Подставляя значение тока i_4 , найденное из уравнения (74), в (75), получим

$$E = i_2 \frac{R_2 R_3 + R_2 R_4 + R_3 R_4}{R_3} + u_{32} \frac{R_3 + R_4}{R_3} - i_1 R_4 \quad (77)$$

Решаем равенство (77) в семействе $\varphi(i_2; u_{32}) i_1 = 0$. Перестроив полученную кривую $u_{32} = \xi(i_2)$ в семействе $\varphi(i_1; u_{12}) u_{12} = 0$, можно получить зависимость

$$U_1 = \psi(i_1),$$

где

$$U_1 = U_{12} + i_2 R_2.$$

Затем, решив уравнение (76), определяем I_2 и U_{R_n} . Используя ранее полученную кривую $u_{32} = \xi(i_2)$, находим остальные токи и напряжения трехполосника.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изложенная в статье методика анализа и расчетные соотношения были проверены экспериментально на транзисторах. Исследование показало хорошее совпадение расчетных и экспериментальных данных, что подтверждает возможность практического использования предложенного метода.

ЛИТЕРАТУРА

1. Б. И. Блажкевич, Р. П. Базилевич. В кн. «Автоматический контроль и измерительная техника», изд. 6. Изд-во АН УССР, Киев, 1962.
2. Р. П. Базилевич. В кн. «Теория и практика для преобразования электроизмерительной информации». Изд-во АН УССР, Киев, 1966.