

Г. А. АКСЕНОВ, Р. Д. БАГЛАЙ
(Новосибирск)

ВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ ВОЛЬТ-АМПЕРНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРИ АВТОМАТИЧЕСКОМ ИЗМЕРЕНИИ ПАРАМЕТРОВ НЕЛИНЕЙНОГО ЭЛЕМЕНТА

Проводится сравнительный анализ работы устройств автоматического воспроизведения вольт-амперных статических характеристик нелинейных элементов. Анализируются погрешности воспроизведения с учетом и без учета применения усилителей с положительной и отрицательной обратными связями. Обсуждаются различного рода ограничения, возникающие при воспроизведении вольт-амперных характеристик в режиме заданного тока и заданного напряжения.

В современной технике широко используются электрические цепи, содержащие пассивные элементы (сопротивления, конденсаторы и др.), параметры которых изменяются от изменения протекающего по ним тока или приложенного напряжения. Как известно, такого рода элементы, называемые нелинейными, исчерпывающе характеризуются своей вольт-амперной зависимостью. В каждой точке вольт-амперной зависимости нелинейный элемент может характеризоваться рядом параметров: статическим сопротивлением, динамическим сопротивлением и др. Каким бы параметром мы ни характеризовали нелинейный элемент, эта характеристика должна относиться к определенной точке вольт-амперной зависимости, и, следовательно, измерение должно проводиться либо в режиме заданного тока, либо в режиме заданного напряжения.

Методам измерения статических параметров нелинейных безреактивных элементов в одной точке, в основном на начальном участке вольт-амперной зависимости, посвящены работы [1, 2]. Для определения статических параметров во многих точках необходимо иметь последовательность значений токов i_1, i_2, \dots, i_n и соответствующую ей последовательность значений напряжений u_1, u_2, \dots, u_n ($n=1, 2, \dots$), что связано с проведением большого числа измерений. В ряде случаев количество измерений может быть существенно уменьшено, если вольт-амперную зависимость элемента подвергнуть соответствующему функциональному преобразованию. Так нередки случаи, когда после несложного функционального преобразования нелинейная зависимость, представленная сигналом, может быть преобразована в линейную, при этом для определения параметров потребуется, очевидно, минимальное число измерений. Примером более общего характера может служить преобразование функции с целью воспроизведения коэффициентов ее разложения по некоторым элементарным, обычно ортогональным, функциям. Эта операция, как известно, позволяет резко сократить число необходимых изме-

рений, которое обычно сводится к числу коэффициентов разложения. Что же касается самих функциональных преобразователей, то их технически проще организовать в том случае, когда требуется реализовать соответствующие математические операции по временному аргументу. Поэтому представляет интерес такое воспроизведение вольт-амперной характеристики ($u=f(i)$ или $i=\varphi(u)$) нелинейного элемента, при котором аргумент является линейной функцией времени (тогда $u=f(t)$ или $i=\varphi(t)$). Это можно осуществить, если нелинейный элемент подключить к источнику тока или источнику э.д.с., ток или напряжение которых представляют собой линейные функции времени.

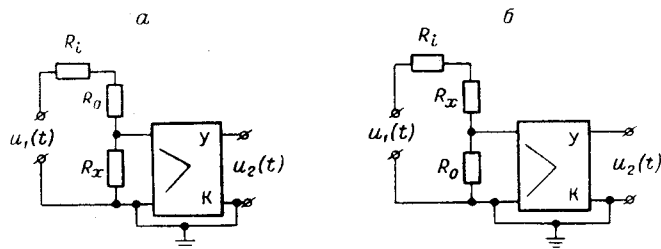


Рис. 1.

Простейшей электрической цепью, предназначенной для этой цели, может служить делитель R_0 , R_x (рис. 1), подключенный к источнику линейно изменяющегося напряжения. На рисунке R_i — внутреннее сопротивление источника, $У$ — усилитель с высокоомным входом и коэффициентом усиления $К$.

При помощи делителя в зависимости от соотношения образцового сопротивления R_0 и измеряемого сопротивления R_x можно осуществить воспроизведение вольт-амперной зависимости как в режиме заданного тока (см. рис. 1, а), так и в режиме заданного напряжения (см. рис. 1, б).

Режим, близкий к режиму заданного тока, можно получить при условии $R_0 \gg R_{x(\max)}$. На вход подается напряжение

$$u_1(t) = at \quad (0 < t < T), \quad (1)$$

которое описывается линейной функцией времени и создает в цепи практически линейно нарастающий ток i .

Напряжение на сопротивлении R_x можно выразить соотношением

$$u_2(t) = K \frac{R_x}{R_0 + R_x} u_1(t) \quad (2)$$

с относительной величиной систематической погрешности, равной

$$\delta_{u_2} = \left| 1 - \frac{u_2'}{u_2} \right| = \frac{R_x}{R_0 + R_x + R_i} \quad (3)$$

Здесь $u_2' = \frac{K R_x}{R_x + R_0 + R_i} u_1$ — реальная величина напряжения на R_x .

Из соотношения (2) для любого момента времени в интервале $[0, T]$ можно определить величину сопротивления R_x .

В инженерной практике нелинейные элементы различают по типу вольт-амперных зависимостей. Примером тому могут служить сопротивления, которые зависят от приложенного к ним напряжения (стабилизаторы напряжения $R(u)$), и сопротивления, зависящие от протекающего тока (стабилизаторы тока $R(i)$).

Из выражения (3) видно, что относительная величина систематической погрешности воспроизведения зависит от величины R_x и, следовательно, от вида вольт-амперной зависимости. Так, для зависимости типа $R(u)$ относительная величина систематической погрешности будет наибольшей на начальном участке кривой. При этом величину образцового сопротивления, как это вытекает из (3), следует выбирать, исходя из условия

$$R_0 > \frac{R_{x(\max)}(1 - \delta_{u_2})}{\delta_{u_2}} - R_i, \quad (4)$$

где $R_{x(\max)}$ — значение нелинейного сопротивления при $i \cong 0$;
 δ_{u_2} — допустимая величина погрешности преобразования на начальном участке кривой ($\delta_{u_2} = \delta_{u_2}|_{t=0}$).

Для вольт-амперной зависимости типа $R(i)$ относительная величина систематической погрешности воспроизведения будет наибольшей в момент времени $t=T$, когда нелинейное сопротивление принимает максимальное значение в выбранном интервале преобразования $[0, T]$. В этом случае сопротивление R_0 тоже необходимо выбирать из условия (4), однако при $\delta_{u_2} = \delta_{u_2}|_{t=T}$ и значении нелинейного сопротивления $R_{x(\max)}$ в конце интервала преобразования.

Оценим относительную величину погрешности воспроизведения, обусловленную нестабильностью входного напряжения $u_1(t)$ в некоторый фиксированный момент времени или, что то же, при некотором фиксированном значении тока i , протекающего по измеряемому сопротивлению R_x . Обозначив нестабильность входного напряжения

$$\delta'_{u_1} = \frac{u_1(t + \Delta t) - u_1(t)}{u_1(t)} = \frac{\Delta u_1}{u_1},$$

запишем выражение для относительной величины погрешности в виде

$$\delta'_{u_2} = \left| 1 - \frac{u_2(t + \Delta t)}{u_2(t)} \right| = 1 - \frac{R_x(i + \Delta i)}{R_x(i)} \left(\frac{u_1 + \Delta u_1}{u_1} \right) = 1 - \eta - \eta \delta'_{u_1}. \quad (5)$$

Здесь $\eta = \frac{R_x(i + \Delta i)}{R_x(i)}$ — отношение величины измеряемого сопротивления при токе $i + \Delta i$ к величине сопротивления при токе i .

Для линейной вольт-амперной зависимости $\eta = 1$, а для нелинейной — величина η зависит от типа характеристики и знака отклонения входного напряжения, как указано в табл. 1. Для всех случаев, когда $\eta < 1$, погрешность воспроизведения на нелинейных участках характеристики теоретически можно сделать сколь угодно малой, если выполнить условие

$$\delta'_{u_1} = \frac{1}{\eta} - 1. \quad (6)$$

При небольшой величине нестабильности входного напряжения справедливо соотношение

$$\delta'_{u_2} \cong \frac{du_2}{u_2} = \frac{du_2}{u_2} \frac{di}{di} = \frac{du_2 di}{K i R_x^{(c)} di} = \frac{R_x^{(n)}}{K R_x^{(c)}} \delta'_{u_1}, \quad (7)$$

где $R_x^{(n)} = \frac{du_2}{di}$ — динамическое сопротивление нелинейного элемента; $R_x^{(c)}$ — его статическое сопротивление.

Режим заданного напряжения приближенно можно осуществить при условии $R_i + R_0 \ll R_x(\min)$. На вход цепи (см. рис. 1, б) подается линейно изменяющееся напряжение (1). О токе в нелинейном сопротив-

Таблица 1			Таблица 2		
Знак отклонения	$+\Delta u_1$	$-\Delta u_1$	Знак отклонения	$+\Delta u_1$	$-\Delta u_1$
Тип зависимости			Тип зависимости		
$R(u)$	$\eta < 1$	$\eta > 1$	$R(u)$	$\eta > 1$	$\eta < 1$
$R(i)$	$\eta > 1$	$\eta < 1$	$R(i)$	$\eta < 1$	$\eta > 1$

лении можно судить по выходному напряжению $u_2(t)$. Если $u_2(t)$ определить из соотношения

$$u_2(t) = K \frac{R_0}{R_x} u_1(t) \quad (0 < t < T), \quad (8)$$

то относительная величина систематической погрешности будет равна

$$\delta_{u_2} = \frac{R_0 + R_i}{R_x + R_i + R_0}. \quad (9)$$

Величину проводимости $Y_x = \frac{1}{R_x}$ измеряемого сопротивления для любого момента времени в интервале $[0, T]$ можно определить по формуле (8).

Исходя из допустимой относительной величины систематической погрешности (9), образцовое сопротивление R_0 следует выбирать из условия

$$R_0 \leq \frac{\delta_{u_2} R_x(\min)}{1 - \delta_{u_2}} - R_i. \quad (9')$$

Ясно, что в режиме заданного напряжения, в отличие от режима заданного тока, для зависимости типа $R(u)$ систематическая погрешность будет наибольшей в конце интервала преобразования ($\delta_{u_2} = \delta_{u_2}|_{t=T}$), а для зависимости типа $R(i)$ — в начале интервала ($\delta_{u_2} = \delta_{u_2}|_{t=0}$).

Относительная величина погрешности воспроизведения δ'_{u_2} из-за нестабильности входного напряжения δ'_{u_1} определяется соотношением (5), где в этом случае $\eta = \frac{R_x(u_1)}{R_x(u_1 + \Delta u_1)}$ — отношение величины измеряемого сопротивления при напряжении u_1 к величине сопротивления при напряжении $u_1 + \Delta u_1$.

Для линейной вольт-амперной зависимости $\eta=1$, для нелинейных — η зависит от типа характеристики и знака Δu_1 , как указано в табл. 2. Как и прежде, погрешность преобразования из-за нестабильности входного напряжения при $\eta < 1$ может быть сделана сколь угодно малой, если удовлетворяется условие (6).

Рассмотренные простые схемы преобразования имеют два существенных недостатка: а) в режиме тока при заданной систематической погрешности δ_{u_2} сопротивление R_0 (4) может оказаться большим, и, таким образом, появляется необходимость применения высоковольтного источника входного напряжения; б) в обоих режимах воспроизведения возникает принципиально неустранимая систематическая погрешность, которая может оказаться выше допустимой. Далее рассмотрим другие способы преобразования, свободные от указанных недостатков.

Применение усилителя с положительной обратной связью

В режиме заданного тока относительная величина систематической погрешности может быть значительно уменьшена, если ввести положительную обратную связь, как показано на рис. 2. В цепи обратной связи помещается линейный двухполюсник R_1 .

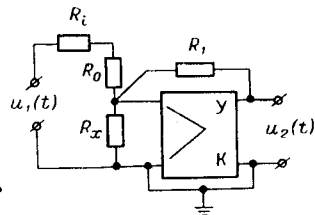


Рис. 2.

При входном напряжении вида (1) об измеряемом нелинейном сопротивлении можно судить по выражению

$$u_2(t) = K \frac{R_x}{R_0 + R_i} u_1(t). \quad (10)$$

Систематическую погрешность

$$\delta_{u_2} = \left| 1 - \frac{u_2'}{u_2} \right| = \frac{\left(1 + \frac{R_0 + R_i}{R_1} - \frac{(R_0 + R_i)K}{R_1} \right) \frac{R_x}{R_0 + R_i}}{\left[1 + \left(1 + \frac{R_0 + R_i}{R_1} - \frac{(R_0 + R_i)K}{R_1} \right) \frac{R_x}{R_0 + R_i} \right]}, \quad (11)$$

где

$$u_2' = K \frac{R_x}{R_0 + R_i} \frac{1}{\left[1 + \left(1 + \frac{R_0 + R_i}{R_1} - \frac{(R_0 + R_i)K}{R_1} \right) \frac{R_x}{R_0 + R_i} \right]} u_1$$

— реальное напряжение на выходе цепи [3], можно исключить, выбрав коэффициент усиления K удовлетворяющим условию

$$K = 1 + \frac{R_1}{R_0 + R_i}. \quad (12)$$

При этом в (11) выражение в круглых скобках обращается в нуль.

Однако при выборе коэффициента усиления K необходимо учитывать условие устойчивости усилителя с положительной обратной связью, которое можно записать в виде

$$Y_{вх}^* = \frac{Y_0 [Y_{вх} + Y_1 (1 - K)]}{Y_0 + Y_{вх} + Y_1 (1 - K)} > 0, \quad (13)$$

где $Y_{вх}^*$ и $Y_{вх}$ — соответственно входные проводимости усилителя с положительной обратной связью и без нее.

Условие устойчивости (13) удовлетворяется при

$$K < 1 + \frac{Y_{вх}}{Y_1}.$$

Приняв, что $\frac{1}{Y_{вх}} = R_{x(\max)}$, из неравенств

пустимое значение измеряемого сопротивл
с учетом (12) получим

$$R_{x(\max)} \leq R_0.$$

Таким образом, R_0 следует выбирать по заданному $R_{x(\max)}$.
отношения (12) найдем R_1 для принятого K .

Результат анализа влияния нестабильности входного напряже-
на погрешность воспроизведения при помощи усилителя с положитель-
ной обратной связью будет аналогичен случаю воспроизведения при по-
мощи делителя в режиме заданного тока. Поэтому выражения (5)—(7)
справедливы для рассматриваемого случая.

Скомпенсировать систематическую погрешность с помощью усли-
теля с положительной обратной связью в режиме заданного напряжения
не удастся, так как в этом случае условие (12) зависело бы от самого
измеряемого сопротивления.

Сравнительный анализ способов воспроизведения вольт-амперной
зависимости при помощи делителя и усилителя с положительной обратной
связью показывает, что при прочих равных условиях последний способ
дает возможность получить систематическую погрешность, во много раз
меньшую по сравнению с первым. Ясно, что полная компенсация систе-
матической погрешности с помощью усилителя с положительной обрат-
ной связью практически невозможна из-за изменения параметров схемы
и коэффициента усиления в процессе воспроизведения. Этот существен-
ный недостаток данного способа можно устранить применяя усилитель с
отрицательной обратной связью.

Применение усилителя с отрицательной обратной связью

Цели для воспроизведения вольт-амперной зависимости неинтерно-
сопротивления с помощью усилителя с отрицательной обратной
связью соответственно в режиме заданного напряжения и тока показан-
ны на рис. 3 (здесь используются те же обозначения, что и в предыду-
щих случаях).

Как известно, при глубокой обратной связи напряжение на входе
усилителя $u_{аб}$ будет малым. Следовательно, если пренебречь сеточным

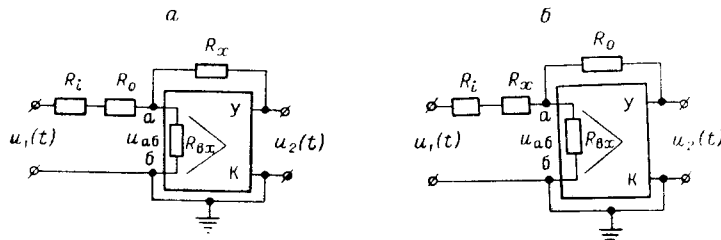


Рис. 3.

Током, то
протекает
ка пост
получ
прог
на,
и

можно считать, что через сопротивление R_x (см. рис. 3, а) ток $i = \frac{u_1(t)}{R_0 + R_i}$. Задавая закон изменения входного тока посредством выбора напряжения $u_1(t)$ и сопротивления R_0 ($R_i \ll R_0$), можно воспроизвести вольт-амперную зависимость измеряемого сопротивления в режиме заданного тока. При больших значениях K и R_x напряжение на измеряемом сопротивлении связано с $u_1(t)$ соотношением

$$u_2(t) = -\frac{R_x}{R_0} u_1(t) \quad (0 < t < T) \quad (16)$$

с относительной величиной систематической погрешности

$$\delta_{u_2} = \left| 1 - \frac{u_2'}{u_2} \right| = \frac{1}{K} \left[1 + R_x \left(\frac{1}{R_0 + R_i} + \frac{1}{R_{\text{вх}}} \right) \right], \quad (17)$$

где $u_2' = u_1 \frac{R_x}{R_0 + R_i} \frac{K}{1 - K + R_x \left(\frac{1}{R_0 + R_i} + \frac{1}{R_{\text{вх}}} \right)}$ — реальное напряжение на выходе цепи при конечных значениях K и $R_{\text{вх}}$ [4].

При $R_i \cong 0$ и $\frac{1}{R_{\text{вх}}} \cong 0$ выражение (17) примет вид

$$\delta_{u_2} \cong \frac{1}{K} \left(1 + \frac{R_x}{R_0} \right), \quad (18)$$

откуда видно, что систематическая погрешность зависит не только от K и R_0 , но и от типа вольт-амперной характеристики. Поскольку коэффициент усиления K всегда конечен, отношение $\frac{R_x}{R_0}$ должно быть выбрано таким, чтобы систематическая погрешность не превосходила допустимую.

Как и прежде, для вольт-амперной зависимости типа $R(u)$ значение измеряемого сопротивления оказывается наибольшим в начале интервала, поэтому здесь систематическая погрешность максимальна. В данном случае при принятом коэффициенте усиления K величину образцового сопротивления, согласно (18), следует выбирать из условия

$$R_0 \geq \frac{R_{x(\text{max})}}{K \delta_{u_2} - 1}, \quad (19)$$

где $R_{x(\text{max})}$ — значение измеряемого сопротивления при $t \cong 0$; $\delta_{u_2} = \delta_{u_2}|_{t=0}$ — заданная относительная величина систематической погрешности в начале интервала преобразования.

Для вольт-амперной зависимости типа $R(i)$ погрешность преобразования будет наибольшей в конце интервала $[0, T]$. В этом случае величина R_0 по-прежнему выбирается из условия (19), а $R_{x(\text{max})}$, соответствующая моменту времени $t = T$, а $\delta_{u_2} = \delta_{u_2}|_{t=T}$.

Применение усилителя с отрицательной обратной связью для преобразования вольт-амперной зависимости в режиме заданного тока не вносит новых особенностей в анализ влияния неустойчивости входного

напряжения на результат преобразования по сравнению со схемой делителя (см. рис. 1). Поэтому для рассматриваемого случая по-прежнему справедливы соотношения (5)—(7).

С помощью цепи, изображенной на рис. 3, б, осуществляется преобразование вольт-амперной зависимости измеряемого сопротивления в режиме заданного напряжения. На вход подается напряжение $u_1(t)$ вида (1), которое создает ток в сопротивлении обратной связи, соответствующий вольт-амперной зависимости элемента R_x . О характере изменения тока можно судить по выходному напряжению $u_2(t)$, которое в данном случае можно определять из соотношения

$$u_2(t) = -\frac{R_0}{R_x} u_1(t) \quad (20)$$

с относительной величиной систематической погрешности

$$\delta_{u_2} = \left| 1 - \frac{u_2'}{u_2} \right| = \frac{1}{K} \left[1 + R_0 \left(\frac{1}{R_x + R_i} + \frac{1}{R_{вх}} \right) \right], \quad (21)$$

где $u_2' = u_1 \frac{R_0}{R_x + R_i} \frac{K}{1 - K + R_0 \left(\frac{1}{R_x + R_i} + \frac{1}{R_{вх}} \right)}$ — реальное выходное напряжение при конечных значениях K и $R_{вх}$.

На результат воспроизведения в режиме заданного напряжения с помощью усилителя с отрицательной обратной связью в сильной степени могут влиять (особенно для зависимости типа $R(u)$ в начале интервала, а для зависимости типа $R(i)$ в конце интервала) внутреннее сопротивление входного источника $u_1(t)$ и напряжение $u_{аб}$ на входе усилителя, которое определяется формулой [4]:

$$u_{аб} = -\frac{u_2'}{K} = -u_1 \frac{R_0}{R_x + R_i} \frac{1}{1 - K + R_0 \left(\frac{1}{R_x + R_i} + \frac{1}{R_{вх}} \right)}, \quad (22)$$

или при $K \gg 1 + R_0 \left(\frac{1}{R_0 + R_i} + \frac{1}{R_{вх}} \right)$.

$$u_{аб} \cong \frac{1}{K} u_1 \frac{R_0}{R_x + R_i}. \quad (23)$$

На измеряемом сопротивлении падает напряжение

$$u_{R_x} = u_1 - u_{R_x} - u_{аб},$$

где u_{R_x} — падение напряжения на внутреннем сопротивлении источника.

Естественно потребовать, чтобы при наименьшем интересующем нас значении измеряемого сопротивления $R_x = R_{x(\min)}$ выполнялось условие

$$u_{R_x} \cong u_{аб}. \quad (24)$$

Падение напряжения на R_i легко находится (см. рис. 3, б) из соотношения

$$u_{R_i} = \frac{u_1 - u_{a6}}{R_x + R_i} R_i \cong \frac{u_1 - u_{R_i}}{R_x + R_i} R_i. \quad (25)$$

После несложных преобразований (25) получим

$$u_{R_i} \cong \frac{u_1 R_i}{R_x + 2R_i}. \quad (26)$$

При $R_x = R_{x(\min)}$ с учетом (23), (24) и (26) найдем уравнение, связывающее R_i с параметрами схемы:

$$R_i^2 + \frac{K R_{x(\min)} - 2R_0}{K} R_i - \frac{R_0 R_{x(\min)}}{K} = 0. \quad (27)$$

Решение уравнения (27) дает

$$R_i = -\frac{R_{x(\min)}}{2} + \frac{R_0}{K} + \sqrt{\left(\frac{R_{x(\min)}}{2} - \frac{R_0}{K}\right)^2 + \frac{R_{x(\min)} R_0}{K}}. \quad (28)$$

Таким образом, при заданном K и R_i , выбранном в соответствии с (28), напряжение на измеряемом сопротивлении будет равняться $U_1(t)$ с абсолютной погрешностью $\Delta' u_1 \cong 2u_{a6}$, тем меньшей, чем больше K .

Выражение (21) при $R_i < R_{x(\min)}$ и $\frac{1}{R_{вх}} \cong 0$ упрощается:

$$\delta_{u_2} \cong \frac{1}{K} \left(1 + \frac{R_0}{R_x}\right). \quad (29)$$

Как видим, относительная величина систематической погрешности (29) растет с увеличением R_0 . Однако с целью увеличения сигнала на выходе (см. (20)) можно принять $R_0 > R_{x(\min)}$. Ясно, что выбор величины R_0 следует вести с учетом коэффициента усиления и допустимой погрешности воспроизведения.

Применение усилителя с отрицательной обратной связью для преобразования вольт-амперной зависимости в режиме заданного напряжения не вносит ничего нового в результат анализа влияния неустойчивости входного напряжения по сравнению с результатом, полученным для делителя в этом же режиме.

Из сравнительного анализа способов воспроизведения вольт-амперной зависимости нелинейного сопротивления видно, что выбор режима воспроизведения по минимуму систематической погрешности из-за неустойчивости входного напряжения должен проводиться с учетом типа характеристики. Например, при незначительной неустойчивости входного напряжения для воспроизведения зависимости типа $R(u)$ на начальном участке предпочтителен режим заданного напряжения (систематическая погрешность будет минимальна), а для зависимости типа $R(i)$ на том же участке — режим заданного тока.

Применение обратимого усилителя

Чтобы осуществить желаемый режим воспроизведения с помощью цепей, изображенных на рис. 3, необходимо измеряемое сопротивление R_x подключить либо ко входу, либо к цепи, замыкающей выход со

входом усилителя. Если такое переключение по каким-либо причинам нежелательно, можно воспользоваться обратимым усилителем (рис. 4), в котором выбор режима воспроизведения может быть осуществлен с помощью переключения источника входного напряжения. В справедливости этого утверждения можно убедиться на основании следующего рассуждения.

Если, например, в рассмотренном ранее усилителе с отрицательной обратной связью (см. рис. 3, б) вместо сопротивления R_0 включить сопротивление $R'_0 = 2R_0$, то величина напряжения (u_{23}), снимаемого с половины сопротивления R'_0 (это соответствует 3 на схеме рис. 4), окажется равной выходному напряжению u_2 исходной цепи.

Далее, если внутреннее сопротивление источника входного сигнала и выходное сопротивление исходного усилителя пренебрежимо малы по сравнению с R_x и R_0 , то при соединении входа и выхода усилителя, например, через дополнительное сопротивление R_0 , режим работы цепи не нарушается. Причем входу исходного усилителя теперь соответствует 1 (см. рис. 4).

Таким образом, от цепи обычного усилителя с отрицательной обратной связью мы перешли к некоторой новой цепи, эквивалентной исходной по величине выходного напряжения, т. е. $u_{23} = u_2$. Следовательно,

$$u_{23} = -\frac{R_0}{R_x} u_1, \quad (30)$$

где u_1 — входное напряжение, приложенное к 1.

Если теперь источник входного сигнала (u_1) подключить к 3, а выходное напряжение (u_{12}) снимать с 1 (по существу, u_{12} снимается с сопротивления R_x , так как узел 4 потенциально заземлен), то цепь по выходному напряжению (u_{12}) будет эквивалентна цепи (см. рис. 3, а) для воспроизведения вольт-амперной характеристики сопротивления R_x в режиме тока. Следовательно,

$$u_{12} = -\frac{R_x}{R_0} u_1. \quad (31)$$

Как видим (см. также [5]), усилитель (см. рис. 4) обладает свойством обратимости и с его помощью можно осуществлять воспроизведение вольт-амперных характеристик нелинейных элементов в обоих режимах. Причем для перехода от режима напряжения к режиму тока здесь нет необходимости переключать сопротивления R_0 и R_x . Для этого достаточно осуществить переключение источника входного напряжения. Ясно, что применение обратимого усилителя сопряжено с некоторыми неудобствами, обусловленными значительной величиной выходного сопротивления. Приведенные выше основные результаты анализа способов воспроизведения вольт-амперных зависимостей при использовании усилителя с отрицательной обратной связью можно распространить и на случай применения обратимого усилителя.

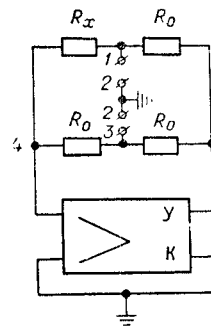


Рис. 4.

ЛИТЕРАТУРА

1. Р. Д. Баглай, А. С. Ситников. Способ измерения сопротивлений. Авторское свидетельство № 133120. Бюллетень изобретений, 1960, № 21.
2. Р. Д. Баглай, А. С. Ситников. Способ измерения больших сопротивлений при

- заданном токе.— Автоматический контроль и электрические измерения. (Труды ИАЭ СО АН СССР, вып. 5). Новосибирск, Изд-во СО АН СССР, 1963.
3. И. М. Тетельбаум. Электрическое моделирование. М., Физматгиз, 1959.
 4. А. Н. Лебедев. Счетно-решающие устройства. М., Физматгиз, 1958.
 5. Г. Е. Пухов. Избранные вопросы теории математических машин. Киев, Изд-во АН УССР, 1964.

*Поступила в редакцию
30 июня 1965 г.*
