

ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ЦЕПИ

УДК 621.317.733

Ю. В. ВИЗИР, Э. В. ЗЕЛЯХ

(Одесса)

НУЛЕВЫЕ СХЕМЫ С ОДНОСТОРОННИМИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ НАПРЯЖЕНИЯ

Нулевые схемы в виде мостов с различным числом плеч широко известны. В таких нулевых схемах усилительные устройства включаются только в диагоналях, где они не влияют на равновесие, а сигнал неравновесия формируется высокостабильными пассивными элементами, обуславливающими их высокую точность. Эти схемы находят широкое применение при построении измерительных приборов, дифсистем, фильтров и других устройств электронной техники. Однако в последнее время начинают входить в практику и нулевые схемы [1—4], в которых сигнал неравновесия формируется устройствами, содержащими усилительные элементы. Применение подобных схем вызвано тем, что ряд требований измерительной техники и электроники (возможность микроминиатюризации нулевой схемы, измерение на низких частотах, защищенность от влияния паразитных утечек, подача поляризующего напряжения или тока подмагничивания на объект измерения и т. д.) трудно выполнить, пользуясь обычными нулевыми схемами.

Цель настоящей работы — дать методику синтеза простейших нулевых схем с одним видом усилительного устройства, называемым односторонним преобразователем напряжения (ОПН).

Исходные положения. Для построения нулевых схем с ОПН удобно применить аппарат теории четырехполюсника [5]. Действительно, нулевая цепь, питающаяся от одного источника и имеющая один индикатор, должна содержать, по меньшей мере, два канала передачи энергии со входа на выход. При этом знаки напряжений и токов на выходе этих каналов должны быть противоположными. Такие цепи можно представить в виде двух регулярно соединенных четырехполюсников, как пока-

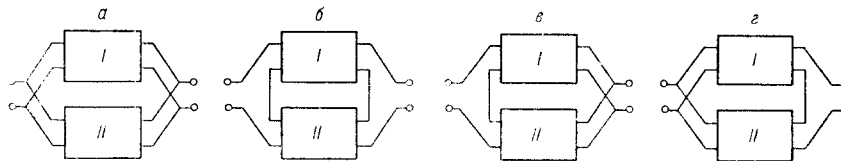


Рис. 1.

зано на рис. 1, и рассматривать их как схемы нулевых цепей в общем виде.

Согласно [5], условия равновесия для схем рис. 1, а, б, в и г будут соответственно следующие:

$$y'_{21} + y''_{21} = 0; z'_{21} + z''_{21} = 0; h'_{21} + h''_{21} = 0; g'_{21} + g''_{21} = 0. \quad (1)$$

Здесь одним штрихом обозначены параметры первого четырехполюсника, а двумя — параметры второго четырехполюсника.

В дальнейшем будем полагать, что четырехполюсники нулевых цепей (см. рис. 1) могут быть как пассивными, так и содержать внутри себя ОПН; кроме того, сопротивления настройки могут быть в любом из четырехполюсников. При синтезе нулевых схем будем считать также, что ОПН — идеальный. (Напомним, что идеальный ОПН для любых конечных сопротивлений нагрузки имеет: $Z_{вх} = \infty$; $Z_{вых} = 0$; $K_u = k$; $K_i = \infty$. Здесь приняты следующие обозначения: $Z_{вх}$ — входное сопротивление; $Z_{вых}$ — выходное сопротивление; K_u — коэффициент передачи по напряжению; K_i — коэффициент передачи по току).

Непосредственное использование идеального ОПН в качестве четырехполюсника I или II (см. рис. 1) невозможно, так как идеальный ОПН не имеет матрицы $[Y]$, $[Z]$ и $[h]$. Но если параллельно входу и последовательно выходу ОПН включить двухполюсники, как показано на рис. 2, то такая схема будет иметь все матрицы, и ее можно использовать как основной элемент при синтезе нулевых схем.

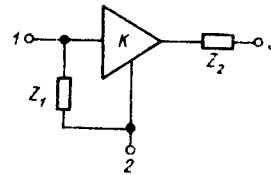


Рис. 2.

Заземляя поочередно один из зажимов схемы трехполюсника рис. 2, мы получим три схемы четырехполюсника, которые вместе с их матрицами приведены в табл. 1. В этой же таблице даны схемы простейших пассивных четырехполюсников.

Синтез нулевых схем. Процедура синтеза нулевых схем заключается в том, что перебирают различные сочетания четырехполюсников табл. 1, соединяя их между собой в соответствии со структурами рис. 1. При этом нужно придерживаться следующей последовательности.

1. Составляем уравнение равновесия нулевой схемы, согласно соотношениям (1), в соответствии с использованным видом соединения четырехполюсников. Для того чтобы можно было выполнить нулевую схему без отрицательных элементов, слагаемые в уравнении равновесия должны иметь разные знаки.

2. Исключаем из схемы сопротивления, которые не входят в уравнение равновесия и, следовательно, не влияют на баланс схемы.

3. Оставшиеся сопротивления в схеме делим на измеряемое и образцовое, руководствуясь следующими соображениями: неуравновешенный объект измерения должен быть включен в таком месте схемы, где он имел бы общую точку одновременно с индикатором нуля и генератором; уравновешенный же объект должен включаться так, чтобы утечки с концов измеряемого сопротивления на «землю» не влияли на равновесие схемы.

4. Задаваясь видом объекта измерения, по уравнению равновесия схемы выясняем возможность раздельного отсчета и изменения пределов измерения.

В табл. 2 приведены некоторые простейшие нулевые схемы, полученные по предлагаемой методике; здесь же даны матрицы нулевых схем, условия их равновесия и выражения для приведенной чувствительно-

Таблица 1

Схемы		Матрицы				
		[Y]	[Z]	[h]	[g]	
1		$\frac{1}{z_1}$	z_1	0	$\frac{1}{z_1}$	
		$-\frac{k}{z_2}$	kz_1	$-\frac{kz_1}{z_2}$	k	
2		$\frac{z_1(1-k) + z_2}{z_1 z_2}$	z_1	$\frac{z_1 z_2}{z_2 + z_1(1-k)}$	$\frac{1}{z_1}$	
		$\frac{k-1}{z_2}$	$z_1(1-k) z_2 + z_1(1-k)$	$\frac{z_1(1-k)}{z_2 + z_1(1-k)}$	$1-k$	
3		$\frac{1}{z_1}$	$z_2 + z_1(1-k)$	z_1	$\frac{1}{z_2 - z_1(1-k)}$	
		$\frac{kz_1 - z_2}{z_1 z_2}$	$z_2 - kz_1$	$\frac{kz_1 - z_2}{z_2}$	$\frac{z_2 - kz_1}{z_2 + z_1(1-k)}$	

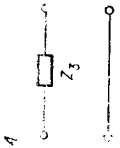
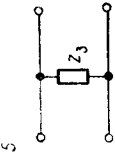
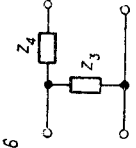
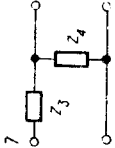
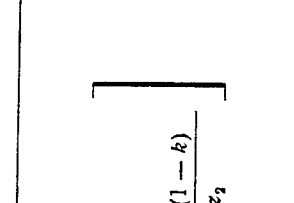
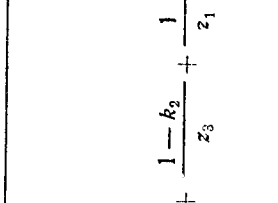
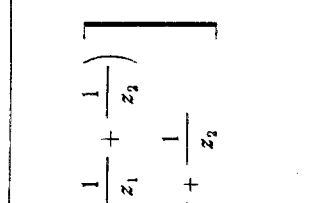
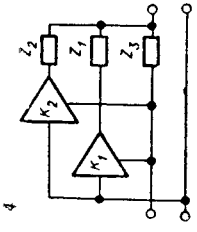
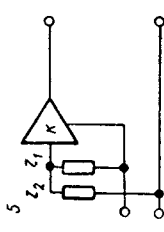
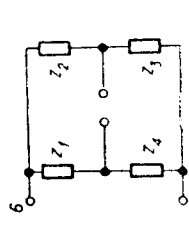
<p>4</p> 	$\frac{1}{Z_3}$ $-\frac{1}{Z_3}$	<p>—</p>	<p>—</p>	<p>—</p>
<p>5</p> 	<p>—</p>	Z_3 Z_3	<p>—</p>	<p>—</p>
<p>6</p> 	<p>—</p>	<p>—</p>	$\frac{Z_3 Z_4}{Z_3 + Z_4}$ $-\frac{Z_3}{Z_3 + Z_4}$ $\frac{Z_3}{Z_3 + Z_4}$ $\frac{1}{Z_3 + Z_4}$	<p>—</p>
<p>7</p> 	<p>—</p>	<p>—</p>	<p>—</p>	$\frac{1}{Z_3 + Z_4}$ $\frac{Z_4}{Z_3 + Z_4}$ $\frac{Z_3 Z_4}{Z_3 + Z_4}$

Таблица 2

Нулевые схемы	Матрицы	Уравнение равновесия	льность
<p>1</p> 	$[Y] = \begin{bmatrix} \frac{1}{z_1} & -\frac{1}{z_1} \\ \frac{kz_1 - z_2}{z_1 z_2} & \frac{1 - k}{z_1 z_2} \end{bmatrix}$	$z_2 = k z_1$	$= k$
<p>2</p> 	$[Y] = \begin{bmatrix} \frac{1}{z_1} & -\frac{1}{z_1} \\ \frac{k_1}{z_2} + \frac{k_2}{z_3} - \frac{1}{z_1} & \frac{1 - k_1}{z_2} + \frac{1 - k_2}{z_3} + \frac{1}{z_1} \end{bmatrix}$	$\frac{1}{z_1} = \frac{k_1}{z_2} + \frac{k_2}{z_3} + \frac{1 - k_1}{z_2} + \frac{1 - k_2}{z_3} + \frac{1}{z_1}$	$\frac{+ k_2 z_2}{+ z_3}$
<p>3</p> 	$[Y] = \begin{bmatrix} \frac{1 - k}{z_2} + \frac{1}{z_1} & -\left(\frac{1}{z_1} + \frac{1}{z_2}\right) \\ \frac{k - 1}{z_2} - \frac{1}{z_1} & \frac{1}{z_1} + \frac{1}{z_2} \end{bmatrix}$	$z_2 = z_1 (k - 1)$	$\frac{-1}{k}$

	$[Y] = \begin{bmatrix} \frac{1}{z_3} + \frac{1-k_1}{z_1} + \frac{1-k_2}{z_2} & -\left(\frac{1}{z_1} + \frac{1}{z_2} + \frac{1}{z_3}\right) \\ \frac{k_1-1}{z_1} + \frac{k_2-1}{z_2} - \frac{1}{z_3} & \frac{1}{z_1} + \frac{1}{z_2} + \frac{1}{z_3} \end{bmatrix}$	$\frac{1}{z_3} = \frac{k_1-1}{z_1} + \frac{k_2-1}{z_2}$
	$[Z] = \begin{bmatrix} z_1 + z_2 & z_1 + z_2 \\ z_1(1-k) + z_2 & z_1(1-k) + z_2 \end{bmatrix}$	$z_2 = z_1(k-1)$ $S = \frac{k-1}{k}$
	$[h] = \begin{bmatrix} \frac{z_1 z_2}{z_1 + z_2} + \frac{z_3 z_4}{z_3 + z_4} & \frac{z_4}{z_3 + z_4} - \frac{z_1}{z_1 + z_2} \\ \frac{z_1}{z_1 + z_2} - \frac{z_2}{z_3 + z_4} & \frac{1}{z_1 + z_2} + \frac{1}{z_3 + z_4} \end{bmatrix}$	$S = \frac{k}{(1+k)^2}$ $k = \frac{z_1}{z_4} = \frac{z_2}{z_3}$

сти S^* . Кроме того, для сравнения в табл. 2 представлена схема обычного моста переменного тока.

В схеме 1 указанной таблицы измеряемым сопротивлением может быть как сопротивление z_1 , так и z_2 . Если объект измерения уравновешенный, его следует включать в качестве сопротивления z_1 . Тогда утечки с двух концов этого сопротивления на землю не будут влиять на равновесие схемы, так как они шунтируют только генератор и индикатор. Если же объект измерения неуравновешенный, его следует включить в качестве сопротивления z_2 . В этом случае генератор, индикатор и измеряемое сопротивление имеют общую точку. Для получения условий раздельного отсчета схемы замещения объекта измерения и образцового сопротивления должны быть одинаковыми. Как видно из табл. 2, чувствительность схемы 1 выше, чем у схем 3, 4 и 5, и значительно выше, чем у обычного моста. Недостаток этой схемы — сложность изменения пределов измерения по составляющим комплексного сопротивления.

В схеме 2 за счет введения дополнительного ОПН устранен недостаток схемы 1. В ней можно широко менять пределы измерения дискретным изменением k_1 и k_2 . В остальном свойства схемы 2 такие же, как у схемы 1.

Схемой 3 можно измерять только уравновешенные объекты измерения. В ней измеряемое и образцовое сопротивления находятся практически в одинаковых условиях относительно «земли», так как они по переменному току включены параллельно (выходное сопротивление ОПН легко сделать весьма малым — порядка 0,1 Ом). Из уравнения равновесия видно, что этой схемой можно измерять как положительные, так и отрицательные комплексные сопротивления. В данной схеме допустимо любое (не слишком малое) значение входного сопротивления ОПН; оно не влияет на результат измерения. Недостаток схемы 3, как и схемы 1, — сложность изменения пределов измерения по составляющим комплексного сопротивления.

Схема 4 обладает такими же свойствами, как и схема 3, но в ней за счет введения дополнительного ОПН можно легко менять пределы измерения.

Схема 5 хорошо приспособлена для измерения только неуравновешенных объектов измерения (z_2). Основное ее преимущество: выходное сопротивление ОПН не влияет на результат измерения, что облегчает требования к ОПН.

Все нулевые схемы, содержащие ОПН, как и следовало ожидать, имеют большую чувствительность по сравнению с обычной схемой моста переменного тока.

Заключение

На основании изложенного можно сделать следующие выводы о достоинствах нулевых схем с ОПН:

1) в данных схемах исключено влияние утечек на результаты измерения; 2) нулевые схемы с ОПН поддаются микроминиатюризации и позволяют производить измерения на низких частотах, вплоть до инфранизких; 3) некоторые из полученных нулевых схем с ОПН позволяют изме-

* Здесь $S = \frac{d|K_u|}{dz} \frac{z}{U_n}$, где K_u — коэффициент передачи по напряжению нулевой схемы, z — измеряемое сопротивление; U_n — напряжение питания нулевой схемы.

рять как положительные, так и отрицательные значения составляющих комплексного сопротивления; 4) чувствительность нулевых схем с ОПН выше, чем у мостов с пассивными сопротивлениями.

Однако следует указать и недостатки нулевых схем с ОПН: 1) вследствие неидеальности ОПН величины измеряемых объектов должны находиться в определенных пределах; 2) активный элемент в схеме требует ограничения уровня подаваемого сигнала и является дополнительным источником тепла и шумов.

ЛИТЕРАТУРА

1. H. P. Hall, R. G. Fulk s. The Use of Aktive Devices in Precision Bridges.— Electrical Engineering, 1962, May.
2. R. L. Königsberg. Operational Bridge Gages High Capacitance.— Elektronics, 1957, v. 30.
3. Г. Л. Г р и н. Активные устройства в точных мостовых схемах.— Измерительная техника, 1964, № 1.
4. Ю. В. В и з и р. Измерительные нулевые схемы с односторонними преобразователями напряжения и отрицательными сопротивлениями. Реферат дисс. Одесса, 1968.
5. Э. В. З е л я х. Основы общей теории линейных электрических схем. М., Изд-во АН СССР, 1951.

*Поступила в редакцию
24 апреля 1970 г.*