А К А Д Е М И Я Н А У К С С С Р
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
А В Т О М Е Т Р И Я

№ 6 1969

ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ЦЕПИ

УДК 621.317.08

К. Б. КАРАНДЕЕВ, Г. А. ШТАМБЕРГЕР

(Львов, Новосибирск)

К АНАЛИЗУ ЦЕПЕЙ УРАВНОВЕШИВАНИЯ, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫХ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ДЕТЕРМИНИРОВАННЫХ И СЛУЧАЙНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

Характерной особенностью методического подхода к анализу и синтезу цепей уравновешивания синусоидального тока, предназначенных для измерения пассивных и активных электрических величин, является использование связи между параметрами цепи и тем задаваемым состоянием, к которому она приводится в результате выполнения определенных, целенаправленных операций [1—4]. Такой подход позволяет глубже вникнуть в физическую картину поведения цепи и открывает значительно более широкие возможности использования различных режимов измерительной цепи уравновешивания. Кроме того, подобный подход позволяет наметить пути реализации цепей для измерения характеристик не только детерминированных, но и случайных величин. Состояние, к которому приводится цепь, определяет технику эксперимента, свойства самой цепи, а также характер выполняемых операций и зависит в основном от заданного измерительного режима [2].

Для измерения компонент комплексных величин цепь необходимо привести к состоянию, характеризующемуся определенным отношением векторов двух напряжений (или токов)

$$\frac{\dot{U}_1}{\dot{U}_2} = W = we^{j\Theta}.$$

Это условие является необходимым и достаточным для получения результатов независимо от структуры цепи, если только оно функционально связано с измеряемой величиной. В этом случае условие может быть представлено через известные параметры цепи и измеряемую величину в виде дробно-линейной (линейной) функции

$$W = \frac{aX + b}{cX + d}, \tag{1}$$

где X — измеряемая величина; a, b, c, d — коэффициенты, являющиеся функциями известных сопротивлений цепи.

Измерительная цепь может быть использована либо в векторном, либо в одном из следующих скалярных режимов: модульном, фазовом и компонентном измерительном.

Измерительный режим, при котором в цепи устанавливается заранее заданное соотношение между двумя векторами напряжений (токов), т. е. одновременно между модулями и фазовыми углами этих напряжений (токов), называется векторным. Частных вариантов цепей уравновешивания, используемых в векторном режиме измерения, может быть предложено значительное количество, так как в общем случае можно не накладывать никаких ограничений на значение модуля и фазового угла вектора W. Однако среди цепей уравновешивания, используемых в векторном режиме измерения, особое место занимают цепи, в которых выполняется условие $W=1$ между двумя связанными общей точкой напряжениями в различных ветвях моста (компенсатора). При выполнении этого условия напряжение в измерительной диагонали цепи становится равным нулю, что соответствует равновесному состоянию. Исключительно высокие метрологические свойства таких устройств требуют выделения их из множества других цепей, используемых в векторном режиме измерения. К таким измерительным цепям относятся широко распространенные в практике уравновешенные полярные и прямоугольно-координатные компенсаторы, четырехплечие и многоплечие, а также Т-образные мосты переменного тока.

Приведение цепи к векторному режиму измерения возможно, однако, только в том случае, когда формы обоих сравниваемых напряжений (токов) совершенно идентичны. Это очевидно, так как этот режим предполагает сравнение мгновенных значений величин. В силу этого обстоятельства уравновешенные мосты и компенсаторы используются в основном тогда, когда в цепях действуют синусоидальные напряжения (токи). В случае других форм кривых напряжений и токов, например прямоугольных, их сравнение достигается выравниванием амплитуд и сдвигом их соответствующим образом во времени.

В последние годы определенное внимание уделялось разработке цепей уравновешивания, используемых в скалярном измерительном режиме (так называемых квазиуравновешенных цепей). Под скалярным понимается режим, при котором условия, накладываемые на измерительную цепь, характеризуются одной из составляющих вектора W. Эти условия могут быть записаны в следующем виде:

$$w = \left|\frac{\dot U_1}{\dot U_2}\right| = \left|\frac{aX+b}{cX+d}\right| = \text{const}, \quad \arg W = \Theta = \arg\left(\frac{aX+b}{cX+d}\right) = \text{const},$$

или, представляя вектор W в тригонометрической форме

$$W = w(\cos\Theta + j\sin\Theta) = \frac{U_1\cos\Theta}{U_2} + j\,\frac{U_1\sin\Theta}{U_2} = u + j\,v,$$

можно записать:

$$\operatorname{Re}(W) = \frac{U_1\cos\Theta}{U_2} = \operatorname{Re}\left(\frac{aX+b}{cX+d}\right) = \text{const};$$

$$\operatorname{Im}(W) = \frac{U_1\sin\Theta}{U_2} = \operatorname{Im}\left(\frac{aX+b}{cX+d}\right) = \text{const}.$$

Первые два из приведенных соотношений указывают на то, что в цепи устанавливается только заданное отношение модулей двух напряжений или заданный фазовый сдвиг между ними, остальные же предполагают сравнение синфазной или квадратурной составляющей одного из напряжений как проекции на другое напряжение с действующим значением второго напряжения.

Таким образом, измерительные цепи уравновешивания могут быть использованы в векторном или скалярном измерительных режимах. Приведение цепи к векторному измерительному режиму всегда позволяет определить компоненты искомой комплексной величины. Однако выполнение векторного условия требует одновременной регулировки двух известных элементов цепи и результат может быть получен только после выполнения обоих регулировок. Такие цепи характеризуются сравнительно сложной техникой эксперимента.

Скалярный измерительный режим, достигаемый одной регулировкой переменного элемента цепи, в общем случае не позволяет определить искомой комплексной величины. Приведение же цепи к двум независимым состояниям, описываемым скалярными уравнениями, позволяет получить искомый результат. В частном случае последовательное выполнение двух независимых условий может привести цепь к состоянию равновесия. Это так называемые цепи с раздельным уравновешиванием [5]. Типичными примерами подобных цепей являются полярные и прямоугольно-координатные компенсаторы. Раздельное уравновешивание органически связано со структурой этих цепей и поэтому в отличие от мостовых не требует для своей реализации специальных приемов.

В некоторых случаях при определенной структуре измерительной цепи и определенных условиях оказывается возможным в результате выполнения одной единственной регулировки, приводящей цепь к состоянию квазиравновесия, описываемого скалярным уравнением, найти одну из компонент искомой комплексной величины.

Таково в настоящее время положение в области измерения активных параметров электрических цепей, характеризующихся синусоидальной формой кривых, и пассивных параметров при протекании через них синусоидальных токов.

Однако приведенные соображения могут быть распространены на случаи измерения характеристик периодических несинусоидальных и непериодических напряжений и токов [6], а также характеристик пассивных объектов, включаемых в цепи, в которых действуют несинусоидальные напряжения и токи.

В любой линейной цепи отношение двух каких-либо напряжений (токов) всегда может быть представлено дробно-линейной (линейной) функцией. Поэтому в более общем случае соотношение (1) может быть записано в виде временных зависимостей следующим образом:

$$w(t) = \frac{u_1(t)}{u_2(t)} = \frac{A\,x(t) + B}{C\,x(t) + D}. \qquad (2)$$

Однако между выражениями (2) и (1) имеется существенная разница. Дело в том, что известные параметры цепи, участвующие в формировании коэффициентов $a, b, c, d,$ в уравнении (1) представляют собой в общем случае некоторые комплексные величины, определение которых при заданной частоте не вызывает особых затруднений. В уравнении (2) коэффициенты A, B, C, D могли бы также формироваться из активных и реактивных сопротивлений цепи и принятых в качестве известных напряжений. В то же время если в цепи действуют несинусоидальные напряжения (токи) и цепи содержат частотозависимые реактивные элементы, то значения этих коэффициентов будут различными для отдельных спектральных составляющих напряжения (тока) и не могут быть столь просто определены, как в случае синусоидального тока, поэтому задача может оказаться неразрешимой.

В связи с этим одним из условий, обеспечивающих возможность использования цепей уравновешивания для измерения компонент несинусоидальных детерминированных и случайных величин, является отсутствие частотозависимых (за исключением измеряемых) элементов в измерительной цепи. Поэтому коэффициенты A, B, C, D должны формироваться только за счет активных сопротивлений и цепь не может содержать индуктивностей и емкостей, используемых широко в мостах переменного тока и для образования координатных систем компенсаторов при измерении сигналов синусоидальной формы. Подобные цепи могут состоять только из активных сопротивлений или делителей напряжения из активных сопротивлений и специальных фазосдвигающих устройств (спектральных) [7], обеспечивающих поворот в заданном диапазоне частот каждой из составляющих спектра на угол $\pi/2$ без изменения исходного соотношения амплитуд, т. е. формирующих напряжения, ортогональные напряжениям, принятым в качестве опорных.

Сказанное удобно проиллюстрировать на примерах компенсационных цепей. В полярно-координатных компенсаторах компенсация достигается изменением отношения модулей сравниваемых напряжений (токов) с помощью делителей напряжения на активных сопротивлениях и совмещением их фаз с помощью фазовращателя. Если эти операции необходимо было бы выполнить в спектре частот, то фазовращатель должен был бы обеспечить возможность раздельной, независимой регулировки фазы каждой составляющей спектра одного из напряжений до совмещения с соответствующими составляющими другого, а с помощью делителя напряжения необходимо было бы иметь возможность регулировать амплитуду каждой из составляющих спектра в отдельности. Практически такая задача невыполнима. Очевидно, картина еще более усложнится, если спектры измеряемого напряжения и напряжения, принятого в качестве компенсирующего, неидентичны. В этом случае цепи не могут быть приведены к состоянию компенсации и векторный указатель никогда не будет показывать нуль.

В силу сказанного можно заключить, что использование векторного режима в цепях уравновешивания при измерении несинусоидальных периодических и случайных величин практически неосуществимо.

В то же время приведение цепей уравновешивания к скалярному режиму измерения, не требующего одновременного выполнения двух условий, позволит расширить возможности этих цепей в области измерения параметров при наличии напряжений (токов) сложной формы. По аналогии с цепями, в которых протекают синусоидальные токи, и при несинусоидальных токах будем рассматривать модульный, фазовый и компонентные режимы измерения:

$$\overline{w(t)} = \text{const};\quad \overline{\Theta(t)} = \text{const};\quad \operatorname{Re}[w(t)] = \text{const};\quad \operatorname{Im}[w(t)] = \text{const}.$$

Модульный режим измерения целесообразно представить в двух видах. Прежде всего этот режим можно характеризовать отношением действующих (средних) значений периодических несинусоидальных напряжений (токов), а в случае непериодических величин отношением математических ожиданий или квадратов из дисперсий, например:

$$\overline{w(t)} = \frac{\sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T u_1^2(t)\,dt}}{\sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T u_2^2(t)\,dt}};\quad \overline{w(t)} = \frac{\sqrt{\lim\limits_{T\to\infty}\frac{1}{2T}\int_{-T}^{T} u_1^2(t)\,dt}}{\sqrt{\lim\limits_{T\to\infty}\frac{1}{2T}\int_{-T}^{T} u_2^2(t)\,dt}}.$$

Однако при такой постановке вопроса теряется существенное свойство сигналов — исключается корреляция между обоими напряжениями, подаваемыми на вход указателя. Поэтому в ряде случаев, в частности, когда полезные сигналы сопровождаются помехами, выгодно этот режим представлять следующим образом:

для периодических несинусоидальных напряжений

$$\overline{w'(t)} = \sqrt{\left(\frac{\frac{1}{T}\int_0^T u_1(t)\,u_2(t)\,dt}{\frac{1}{T}\int_0^T u_2^2(t)\,dt}\right)^2 + \left(\frac{\frac{1}{T}\int_0^T u_1^k(t)\,u_2(t)\,dt}{\frac{1}{T}\int_0^T u_2^2(t)\,dt}\right)^2} = \mathrm{const}$$

и для случайных величин

$$\overline{w'(t)} = \sqrt{\left(\frac{\lim\limits_{T\to\infty}\frac{1}{2T}\int_{-T}^{T} u_1(t)\,u_2(t)\,dt}{\lim\limits_{T\to\infty}\frac{1}{2T}\int_{-T}^{T} u_2^2(t)\,dt}\right)^2 + \left(\frac{\lim\limits_{T\to\infty}\frac{1}{2T}\int_{-T}^{T} u_1^k(t)\,u_2(t)\,dt}{\lim\limits_{T\to\infty}\frac{1}{2T}\int_{-T}^{T} u_2^2(t)\,dt}\right)^2} = \mathrm{const},$$

где $u_1^k(t)$ — функция, ортогональная $u_1(t)$.

При синусоидальных напряжениях (токах), действующих в цепи, под фазовым измерительным режимом понимается режим, при котором в результате приведения цепи к заданному состоянию фазовый угол между двумя напряжениями принимает определенное значение, чаще всего 0, $\pi/2$ или π. В цепях, в которых действуют напряжения сложной формы, условие, обеспечивающее выполнение этого режима, можно записать для случайных величин в следующем виде:

$$\overline{\Theta(t)} = \operatorname{arctg}\frac{\lim\limits_{T\to\infty}\frac{1}{2T}\int_{-T}^{T} u_1^k(t)\,u_2(t)\,dt}{\lim\limits_{T\to\infty}\frac{1}{2T}\int_{-T}^{T} u_1(t)\,u_2(t)\,dt} = \mathrm{const}.$$

И, наконец, соответственно под компонентными измерительными режимами будем понимать режимы, характеризующиеся выполнением соотношений:

$$\mathrm{Re}\,[w(t)] = \frac{\lim\limits_{T\to\infty}\frac{1}{2T}\int_{-T}^{T} u_1(t)\,u_2(t)\,dt}{\lim\limits_{T\to\infty}\frac{1}{2T}\int_{-T}^{T} u_2^2(t)\,dt} = \mathrm{const};$$

$$\mathrm{Im}\,[w(t)] = \frac{\lim\limits_{T\to\infty} \frac{1}{2T} \int\limits_{-T}^{T} u_1^k(t)\, u_2(t)\, dt}{\lim\limits_{T\to\infty} \frac{1}{2T} \int\limits_{-T}^{T} u_2^2(t)\, dt} = \mathrm{const}.$$

Нетрудно видеть, что между условиями, характеризующими различные режимы измерения, в цепях, в которых действуют синусоидальные, периодические несинусоидальные и непериодические напряжения и токи, существует формальная аналогия. В то же время нельзя упускать из виду того обстоятельства, что при наличии синусоидальных напряжений (токов) сравнению подлежат модули, синфазные и квадратурные компоненты и их отношение, а в случае действия в цепях напряжений сложных форм сравнению подлежат статистические характеристики: математические ожидания, дисперсии, коэффициенты корреляции.

Таким образом, выдвигаемые современной практикой задачи измерения характеристик пассивных и активных величин, независимо от их спектрального состава, могут быть реализованы с помощью методов уравновешивания — наиболее точных нулевых методов измерения. Эти методы становятся действительно универсальными и могут быть использованы для измерения не только компонент комплексных сопротивлений и напряжений, но также и для измерения важнейших статистических характеристик сигналов и различных характеристик пассивных объектов и элементов электрических цепей при воздействии на них несинусоидальных напряжений (токов). Приведенные соображения относительно использования цепей уравновешивания в том или другом режиме измерения позволяют принять единый метод анализа и синтеза этих цепей. Как известно, такой метод уже оправдался при исследовании цепей синусоидального тока [8]. Его использование в случае несинусоидального тока не будет представлять принципиальных затруднений и позволит получить универсальные результаты при исследовании с указанных позиций таких важных характеристик цепей уравновешивания, как чувствительность и погрешность.

ЛИТЕРАТУРА

1. К. Б. Карандеев. Специальные методы электрических измерений. М., Госэнергоиздат, 1963.
2. К. Б. Карандеев, Г. А. Штамбергер. Обобщенная теория мостовых цепей переменного тока. Новосибирск, Изд-во СО АН СССР, 1961.
3. К. М. Соболевский. Электроизмерительные цепи уравновешивания и элементы их общей теории.— Автометрия, 1965, № 2.
4. Г. А. Штамбергер. О некоторых общих свойствах цепей уравновешивания.— Электроизмерительные схемы и устройства. Труды ИАЭ СО АН СССР, вып. 10. Новосибирск, РИО СО АН СССР, 1965.
5. К. Б. Карандеев. Мостовые методы измерений. Киев, Гостехиздат УССР, 1953.
6. Г. А. Штамбергер. О характеристиках переменных напряжений, подлежащих измерению.— Автометрия, 1967, № 3.
7. Г. А. Штамбергер. Способ регулирования фазы в широком диапазоне частот. Авторское свидетельство № 192933.— ИПОТЗ, 1967, № 6.
8. К. М. Соболевский. Обобщенный метод анализа чувствительности электроизмерительных цепей уравновешивания.— Автометрия, 1966, № 6.

Поступила в редакцию
2 июля 1969 г.