

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ТЕНДЕНЦИИ В ПОСТРОЕНИИ УНИВЕРСАЛЬНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЕЙ ПАРАМЕТРОВ ОБЪЕКТОВ С МНОГОЭЛЕМЕНТНОЙ СХЕМОЙ ЗАМЕЩЕНИЯ

Д.А. Бобылев

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН
Россия, 117997, Москва, Профсоюзная ул., 65
E-mail: dabobyl@ipu.ru

Л.П. Боровских

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН
Россия, 117997, Москва, Профсоюзная ул., 65
E-mail: borovski@ipu.ru

Ключевые слова: структурная схема, параметры, многоэлементный двухполюсник, импульсная характеристика, иммитанс.

Аннотация: Рассмотрены принципы построения компьютеризированных измерителей многоэлементных двухполюсников, предложена оптимальная структура преобразования, позволяющая обеспечить его высокую помехоустойчивость.

1. Введение

Измерение параметров объектов, представимых многоэлементной электрической схемой замещения, является важной составляющей актуальной современной технологии – импедансных исследований объектов различной физической природы, т. е. исследование их свойств при прохождении через них электрического тока. Определение параметров многоэлементных двухполюсников (ПМД) – задача, которая часто встречается при преобразовании параметров различных датчиков, исследовании физических и химических процессов, контроле параметров различных устройств и т. д. [1, 2].

Наработки в этой сфере имеют давнюю историю. Многие классические методы и средства измерения ПМД были разработаны еще до начала компьютеризации измерительной техники. При этом сложность задачи, решение которой требовало серьезных вычислительных затрат, приводила к тому, что вычисления старались осуществлять в аналоговом виде, а измерительные устройства превращались в сложные и громоздкие системы.

Постепенная компьютеризация, возможности которой первоначально были весьма скромными, приспособивалась, как правило, к уже сложившейся системе методов и средств измерения ПМД. Сегодня широкая компьютеризация измерительной техники настоятельно диктует пересмотр подходов к созданию преобразователей ПМД. Возни-

кает потребность выделить и оценить наиболее перспективные направления в этой сфере.

2. Система базовых векторов

Линейный электрический двухполюсник описывается своей импульсной характеристикой (ИХ) $x(t, \mathbf{q})$, связывающей ток $i(t)$, протекающий через него, и падение напряжения $u(t)$ на нем уравнением свертки (здесь $\mathbf{q} = (q_1, q_2, \dots, q_n)$ – матрица-столбец ПМД). Преобразования Лапласа или Фурье позволяют использовать более удобную форму описания: операторное сопротивление (проводимость) или иммитанс $X(f, \mathbf{q}) \leftrightarrow x(t, \mathbf{q})$ – комплексное сопротивление (проводимость). Таким образом, для измерения ПМД исследуемого объекта необходимо осуществить достаточно сложные математические преобразования указанных величин посредством технических средств (аналоговых и цифровых).

Математически множеству исследуемых объектов соответствуют множество функций $x(t)$ или $X(f)$, которые можно рассматривать как функциональные векторные пространства. Это в свою очередь означает, что для реализации процесса идентификации необходимы два условия.

Во-первых, в этом пространстве должны быть заданы некоторые опорные точки, элементы, параметры которых известны. (Такие векторы условно можно назвать базовыми.)

А, во-вторых, должна быть определена процедура, позволяющая сравнивать различные элементы пространства, т. е. устанавливать количественные (скалярные) соотношения между каждым вектором, отображающим идентифицируемый объект, и векторами некоторого множества образцовых элементов пространства, с известными параметрами.

В функциональном анализе существует понятие функционала, т. е. правила, позволяющего каждому вектору $x(t)$ поставить в соответствие число (скаляр), характеризующее данный элемент в смысле выбранного правила. В данном рассмотрении особое значение приобретает понятие линейного функционала, поскольку последний обязательно предполагает наличие вектора $h(t)$, порождающего данный функционал и определяющий его свойства. Значение функционала V в точке $x(t)$ нормированного векторного пространства представляет собой скалярное произведение вектора $x(t)$ с базовым вектором $h(t)$, порождающим данный функционал:

$$V = (x(t), h(t)) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)h(t)dt$$

Здесь множество функций $x(t)$ предстает как множество объектов исследования, а базовая функция $h(t)$ выступает как средство, инструмент исследования, образцовый функциональный «зонд», с известными, образцовыми параметрами. Иными словами, скалярное произведение позволяет оценить степень корреляции V между исследуемым и образцовым объектами.

Важно и то, что в соответствии с равенством Парсеваля общий вид линейного функционала (скалярного произведения) инвариантен по отношению к преобразованию Фурье:

$$\int_{-\infty}^{\infty} x(t)h(t)dt = \int_{-\infty}^{\infty} X(f)\overline{H(f)}df,$$

где $X(f)$ и $H(f)$ – преобразования Фурье функций $x(t)$ и $h(t)$ соответственно. Иными словами, каждому линейному функционалу во временной области можно поставить в со-

ответствие линейный функционал в частотной области, который имеет вполне определенное аналитическое выражение.

Импульсная характеристика $x(t)$ линейного двухполосника – это абстрактный «сигнал», имеющий размерность пассивной физической величины и проявляющий себя только в результате энергетического воздействия на исследуемый объект посредством реального тестового сигнала $u(t)$. Поэтому значение V линейного функционала ИХ можно получить только как скалярное произведение отклика исследуемого объекта $u(t)*x(t)$ и некоторого опорного сигнала $g(t)$, т. е. посредством преобразования «вектор – скаляр» (ПВС).

Преобразование «вектор – скаляр» посредством опорного сигнала $g(t)$ исследуемого сигнала $u(t)*x(t)$, можно представить как прохождение этого сигнала через линейное звено с импульсной характеристикой $g(-t)$ с последующей фиксацией результата в момент времени $t = 0$ [3].

Учитывая равенство Парсеваля, можно записать:

$$V = \int_{-\infty}^{\infty} [u(t)*x(t)]g(t)dt = \int_{-\infty}^{\infty} X(f)[U(f)\overline{G(f)}]df = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)[u(-t)*g(t)]dt.$$

Таким образом, функционально эту процедуру удобнее представить как последовательное «прохождение» виртуального «сигнала» $x(t)$ через линейные звенья с ИХ $u(t)$ и $g(t)$ и частотными характеристиками $U(f)$ и $G(f)$ с последующей фиксацией результата.

Таким образом, базовый вектор $h(t)$ во временной области будет представлять собой свертку тестового и опорного сигналов, а базовый вектор $H(f)$ в частотной области – произведение их спектров:

$$h(t) = u(-t)*g(t),$$

$$H(f) = U(f)\overline{G(f)}.$$

Последнее означает, что тестовый и опорный сигналы коммутативны с точностью до знака перед аргументом. При этом необходимо учитывать, что именно характер спектра опорного сигнала определяет помехоустойчивость преобразования ПМД, поскольку позволяет обеспечить инвариантность к помехе, воздействующей на исследуемый объект.

3. Требования, предъявляемые к базовым векторам

При разработке преобразователей ПМД изначально следует определиться с характером базовых векторов $h_n(t)$ или $H_n(f)$, $n = 1, 2, \dots, m$, относительно которых планируется получать массив скаляров V_n .

Прежде всего, необходимо, чтобы система уравнений, составленная с использованием полученных скаляров, была линейно независимой, а для этого должны быть линейно независимыми векторы $h_n(t)$ или $H_n(f)$. Например, базовые векторы частотного метода [1, 4] – комплексные экспоненты $\exp(-j2\pi f_n t)$ – могут быть даже взаимно ортогональными. Однако в общем случае это недостижимо. Так, например, в методе моментов ИХ [5-7] базовые векторы – t^n , представляют скорее пучок векторов с малыми углами между ними.

Другое важное требование также касается характера системы уравнений: желательно избегать трансцендентного характера уравнений, отдавая предпочтение системе линейных уравнений.

И, наконец, необходимо оптимизировать аппаратно-программную реализацию преобразователя. Учитывая, что тестовый и опорный сигналы математически равноценны

в формировании базового вектора, следует распределить «нагрузку» между ними таким образом, чтобы, с одной стороны, минимизировать объем оборудования, а с другой – обеспечить необходимую помехоустойчивость. Последнее означает, что нельзя сильно упрощать опорный сигнал, поскольку его характер определяет избирательность преобразования «вектор – скаляр» и, как следствие, во многом и помехоустойчивость преобразователя ПМД в целом.

Более того, общая тенденция при формировании базового вектора связана с переносом основного упора на формирование именно опорного сигнала, причем таким образом, чтобы максимально использовать цифровые преобразования как наиболее точные. При этом сигналы представляются в виде массивов их мгновенных или интегрально-взвешенных значений. Таким образом, базовый вектор во многом формируется виртуально и весьма точно.

Многообразие различных реализаций одного и того же метода определяется, прежде всего, многообразием сочетаний операндов сверки $u(t)*g(t)$, результат которой представляет собой вектор из системы базовых векторов данного метода, а также разнообразием возможных реализаций преобразований «вектор – скаляр».

4. Цифро-аналоговые преобразователи или аналого-цифровые?

Изначально господствовал подход, базировавшийся на методе настраиваемой модели, который можно считать альтернативным рассматриваемому, поскольку еще полвека назад отсутствовала возможность построения линейных и точных преобразователей сигналов, а также аналого-цифровых преобразователей с высокой разрешающей способностью. Не говоря уже о том, что цифровые вычисления в автономных измерительных средствах были практически невозможны.

Именно поэтому преобладали мостовые методы измерения, для построения которых не требовалось не только средств вычислительной техники или аналого-цифровых преобразователей, но даже хоть сколько-нибудь точных измерительных преобразователей сигналов [1].

Метод настраиваемой модели можно представить как создание базовых векторов в виде пассивных объектов (двухполюсников) с регулируемыми параметрами, т. е. векторов, перемещаемых в определенных направлениях фактически по шкалам. Необходимо было свести к нулю «расстояние» между вектором исследуемого объекта и базовым вектором по какому-либо параметру. Здесь требовались не столько точные преобразователи электрических величин, сколько чувствительные «нуль-органы».

При этом основные функции выполняли цифроаналоговые преобразователи (ЦАП) пассивных величин, дискретно регулируемых проводимостей и емкостей, которые в мостовых и компенсационных цепях должны работать на переменном токе, а их паразитные параметры при этом входят в функцию преобразования. Это существенно ограничивает диапазон частот, в котором данные методы могут быть эффективными. Проблемы, связанные с динамикой процессов уравнивания, и невысокое быстродействие довершают картину.

Современные высокоточные АЦП (устройства достаточно компактные и в целом недорогие) и средства вычислительной техники пришли, скорее, на смену ЦАП пассивных величин, а не в дополнение к ним. Постепенный отказ от применения ЦАП, работающих на переменном токе, в пользу цифровых вычислений на основе результатов аналого-цифрового преобразования активных величин является сегодня неоспоримой тенденцией. Это вполне объяснимо. Ведь создание высокоточных ЦАП пассивных ве-

личин (кодоуправляемых мер проводимости или емкости), работающих в широком диапазоне частот, например, для поверки или калибровки измерителей импеданса, представляет собой отдельную серьезную проблему.

5. Подход к построению преобразователей ПМД

Учитывая, что аналоговые преобразования являются, как правило, основной причиной аппаратурных затрат, и они же служат основными источниками погрешностей, число их должно быть сведено к минимально необходимому (см. рисунок).

Прежде всего, к числу необходимых аналоговых преобразований следует отнести преобразование пассивной величины $x(t, \mathbf{q})$ (а, следовательно, также $\tilde{X}(p, \mathbf{q})$ и $X(f, \mathbf{q})$) в активную ППА, т. е. воспроизведение посредством энергетического тестового воздействия $u(t)$ одного или нескольких сигналов $v_k(t)$, несущих информацию об измеряемых пассивных величинах (см. рисунок). Измерительная цепь, выполняющая эту функцию, представляет собой четырехполюсник или многополюсник, содержащий исследуемый объект и, как минимум, один рабочий эталон [1, 2, 4].

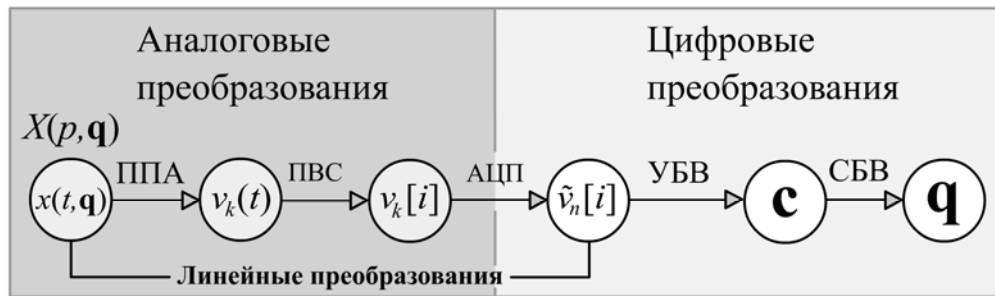
Кроме того, и самих тестовых сигналов может быть несколько. Например, в широко распространенной реализации метода моментов ИХ применяется один тестовый сигнал в виде степенного импульса [6]. Однако возможны и другие варианты реализации метода, предполагающие, например, последовательное воздействие на исследуемый объект нескольких импульсов полиномиальной формы. То же самое касается частотного метода: может быть использован как один тестовый сигнал (полигармонический), так и набор чисто гармонических тестовых сигналов последовательно во времени.

Следующий и необходимый этап преобразования ПМД, также выполняемый в аналоговой форме – преобразование «вектор – скаляр» ПВС. Это преобразование сигналов $v_k(t)$ в массив значений $v_k[i]$ определенного числа линейных функционалов. Оно реализуется, как правило, с помощью емкостного аналогового интегратора или устройства выборки и хранения.

Аналого-цифровое преобразование АЦП массива скаляров $v_k(i)$ в массив кодов $\tilde{v}_k(i)$ должно быть последним этапом, содержащим аналоговые преобразования.

Учитывая, что иммитанс линейного двухполюсника представляет собой дробно-рациональную функцию $X(f, \mathbf{q})$, определение ее коэффициентов $\mathbf{c} = (c_1, c_2, \dots, c_m)$ вполне естественно сделать универсальной составляющей преобразования ПМД [4], поскольку преобразование вектора \mathbf{c} в вектор \mathbf{q} , индивидуальное для каждой конкретной схемы замещения, не представляет собой сложности.

Алгоритм вычислительной части целесообразно формировать из двух блоков: унифицированного блока вычислений УБВ, в целом общего для всех исследуемых объектов, и специализированного блока вычислений СБВ, уникального для каждой конкретной схемы замещения.



Функциональная схема преобразования ПМД.

Если результат преобразования ПМД должен быть представлен в аналоговом виде, на последнем этапе следует предусмотреть цифроаналоговое преобразование.

6. Заключение

Совершенствование электронных компонентов и широкое внедрение средств вычислительной техники в измерительный процесс существенным образом смещают акценты в вопросах преобразования/измерения ПМД. Прежде всего, речь идет о максимально возможной замене аналоговых преобразований на цифровые вычислительные процедуры, т. е. о существенном ограничении применения мостовых и компенсационных методов преобразования. При этом важно, чтобы базовые векторы формировались не столько за счет образцовых тестовых воздействий на исследуемый объект, сколько в процессе вычислений, т. е. при формировании опорных векторов ПВС цифровыми средствами, что позволит базовые векторы сделать по-настоящему образцовыми при минимальных аппаратных затратах.

Список литературы

1. Кнеллер В.Ю., Боровских Л.П. Определение параметров многоэлементных двухполюсников. М.: Энергоатомиздат, 1986. 144 с.
2. Мартяшин А.И., Куликовский К.Л., Куроедов С.К., Орлова Л.В. Основы инвариантного преобразования параметров цепей. М.: Энергоатомиздат, 1990. 261 с.
3. Хургин Я.И., Яковлев В.П. Фinitные функции в физике и технике. М.: URSS, 2010. 416 с.
4. Bobylev D.A., Borovskikh L.P. A Universal Converter for the Parameters of Multicomponent Two-Terminal Networks // Automation and Remote Control. 2016. Vol. 77, No 9. С. 1649-1655.
5. Дегтяренко П.И., Коноваленко В.И. Определение характеристик звеньев систем автоматического регулирования. М.: Энергия, 1973.
6. Иванов В.И., Титов В.С., Голубов Д.А. Применение обобщенных параметров измерительной цепи для идентификации многоэлементных двухполюсников // Датчики и системы. 2010. № 8. С. 43-45.
7. Бобылёв Д.А. Оценка эффективности применения частотного метода и метода моментов импульсной характеристики для параметрической идентификации двухполюсников // Датчики и системы. 2012. № 7. С. 29-33.