

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПЕРВИЧНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ (ДАТЧИКИ)

УДК 621.3.084.2

Л. Д. ГИК, А. Г. КОЗАЧОК

(Новосибирск)

К ВОПРОСУ О ТЕОРИИ ПЕРВИЧНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ*

Под первичным измерительным преобразователем подразумевается устройство, осуществляющее восприятие параметров исследуемого объекта и преобразование их в эквивалентный сигнал, удобный для измерения и других операций. Первоначально датчиками называли преобразователи, используемые для целей измерения неэлектрических величин электрическими методами, но в настоящее время значение этого термина расширилось.

Первичные измерительные преобразователи являются неотъемлемыми элементами современных измерительных информационных систем [1], причем именно они зачастую определяют технические возможности системы в целом. Поэтому над совершенствованием их работает большое количество специалистов как у нас в стране, так и за рубежом. Однако работы в подавляющем большинстве носят разрозненный узкоспециализированный характер и решают, как правило, частные задачи. Одной из причин создавшегося положения является отсутствие общей теории, которая должна научно объяснить основные свойства преобразователей независимо от их принципа действия и конкретного назначения. Под основными свойствами преобразователей мы подразумеваем точность, чувствительность и быстродействие (динамические характеристики).

Первой попыткой создания общей теории преобразователей явилась работа академика А. А. Харкевича «Теория преобразователей», опубликованная в 1948 году [2]. Им были замечены общие свойства преобразователей энергии различных принципов действия, что дало возможность, выражаясь его же языком, «вынести за скобки общую теорию преобразователей, не конкретизируя до некоторого этапа физического содержания ее выводов».

Сущность теории А. А. Харкевича заключается в следующем: преобразователь рассматривается как многополюсный элемент, имеющий несколько сторон (рис. 1), под которыми подразумеваются пути поступления энергии. Наибольшее распространение получили преобразователи с двумя сторонами — четырехполюсники, для которых соотношения,

* Материал доложен на VII Всесоюзной конференции по автоматическому контролю и методам электрических измерений в сентябре 1965 года в Новосибирске.

определяющие их работу, оказываются наиболее простыми. Заметим сразу, что данная теория применима к обратимым преобразователям, для которых каждая сторона может быть как входом, так и выходом энергии.

А. А. Харкевич в общем виде рассматривает взаимосвязь между входными и выходными величинами четырехполюсника, произведения которых равны мощности. Этим величинам приписывается смысл обобщенной силы и обобщенной скорости. Кроме мощности, можно оперировать выражением энергии, но тогда вместо обобщенной скорости нужно использовать обобщенные перемещения. За обобщенные силу и скорость могут приниматься различные физические параметры, но наиболее рационально применять при преобразовании механической энергии силу и скорость, электрической — напряжение и ток, магнитной — магнитодвижущую силу и магнитный поток и т. д.

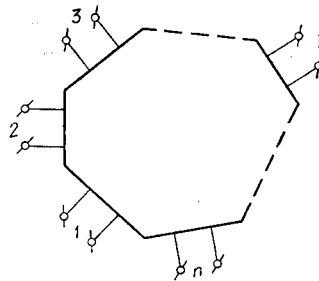


Рис. 1.

В общем случае для линейного четырехполюсника процесс преобразования характеризуется уравнениями:

$$\begin{aligned} x_1 &= z_{11}y_1 + z_{12}y_2; \\ x_2 &= z_{21}y_1 + z_{22}y_2, \end{aligned} \quad (1)$$

где x_1 и y_1 — обобщенные сила и скорость на входной стороне, а

x_2 и y_2 — на выходной стороне;

z_{11} — собственное сопротивление преобразователя со стороны входа;

z_{22} — то же, со стороны выхода.

Из уравнений (1) видно, что сила x_1 зависит не только от скорости y_1 на своей стороне, но и от скорости y_2 на другой стороне преобразователя, что указывает на взаимное влияние обеих сторон. Коэффициенты z_{12} и z_{21} , связывающие соответственно x_1 с y_2 и x_2 с y_1 , являются важнейшими характеристиками датчика, определяющими его назначение как преобразователя энергии. В обратимых датчиках, рассмотрением которых А. А. Харкевич ограничивается, они равны друг другу и их называют коэффициентами преобразования.

Таким образом, каждый двухсторонний обратимый преобразователь подобно электрическому четырехполюснику характеризуется тремя независимыми параметрами z_{11} , z_{22} и $z_{12} = z_{21}$. Основные характеристики преобразователя, например чувствительность, к. п. д., входное сопротивление, могут быть выражены посредством трех названных с учетом нагрузки.

Ценность метода заключается в общем подходе к анализу преобразователей, основанных на самых различных физических принципах. Это избавляет от трудоемкой работы — искать специфические методы анализа в каждом конкретном случае.

Возьмем, к примеру, магнитоэлектрический датчик, который обычно в генераторном режиме характеризуется одним уравнением

$$U_{\text{вых}} = BlV,$$

не учитывающим ни обратной реакции, ни потерь в датчике. Естественно, что такое важное понятие, как к. п. д., при этом теряется.

Уравнения четырехполюсника для магнитоэлектрических датчиков принимают вид:

$$F = z_{\text{мех}} V + BlI;$$

$$U_{\text{вых}} = -BlV + z_i I.$$

Здесь F и V — соответственно сила, действующая на чувствительный орган, и скорость его движения;

$z_{\text{мех}}$ — механическое сопротивление движению (при разомкнутой катушке);

$U_{\text{вых}}$ и I — напряжение и ток на выходе датчика;

B и l — индукция в зазоре и длина провода;

z_i — выходное электрическое сопротивление.

Произведение Bl называют коэффициентом преобразования или взаимным сопротивлением. Как выше указывалось, это важнейший параметр, определяющий взаимосвязь входного и выходного воздействий.

Из приведенных уравнений уже непосредственно видно, что полезный эффект датчика определяется вторым слагаемым первого и первым слагаемым второго уравнений, в то время как остальные два слагаемых определяют бесполезное рассеивание мощности в датчике. Решая эти уравнения, можно определить основные эксплуатационные характеристики датчика, например входное сопротивление преобразователя z_1 , его коэффициент полезного действия η , которые соответственно равны:

$$z_1 = z_{\text{мех}} + \frac{(Bl)^2}{z_i + z_n};$$

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{z_1}{z_n}} \frac{1}{1 + \frac{z_{\text{мех}}}{(Bl)^2} (z_i + z_n)}.$$

Здесь z_n — сопротивление внешней нагрузки.

К сожалению, рассмотренные выше теоретические положения нашли очень малое практическое применение в измерительной технике. Это, видимо, объясняется тем, что в названной выше монографии не было уделено достаточного внимания развитию приложений теории для инженерной практики. Стремление изложить материал по возможности кратко привело к некоторой сухости и отсутствию пояснений физического смысла различных обобщенных понятий, что также отрицательно влияет на практическое применение теории. Между тем, дальнейшее развитие основ ее должно, по-видимому, значительно содействовать прогрессу в развитии и совершенствовании преобразователей.

Так, необходимо обоснование принципа взаимности в применении к преобразователям. Желательно вывести условия, при которых принцип взаимности справедлив, а значит, и применима теория, на которой она основана. В противном случае вопрос о применимости теории для каждого нового преобразователя решается лишь после составления уравнений и проверки равенств $z_{12} = z_{21}$. Интересной представляется попытка обоснования единых для всех датчиков критериев их качества. Необходимо внести единство в понятие чувствительности, показать

большую значимость коэффициента полезного действия преобразователя.

Далее, теория, разработанная А. А. Харкевичем, как указывалось выше, применима только для обратимых преобразователей. Для большой группы необратимых параметрических датчиков, например реостатных, фотоэлектрических и др., принцип взаимности неприменим. Поэтому система уравнений (1) распадается на два независимых выражения и теряет практический смысл. Это естественно, поскольку названные датчики не являются преобразователями энергии; они лишь управляют мощностью некоторого вспомогательного источника.

Так как параметрический датчик не генерирует сам активную мощность, то для того, чтобы им воспользоваться, приходится включать его в некоторую электрическую цепь и использовать изменение режима цепи под влиянием изменения параметра данного датчика. При этом вопросы получения максимальной выходной мощности также обычно являются главными, ибо они определяют чувствительность и порог чувствительности, помехоустойчивость, техническую простоту последующих элементов устройства и т. д.

В такой постановке теория параметрических преобразователей практически совпадает с теорией измерения параметров электрических цепей, наиболее полно развитой К. Б. Карандеевым и его школой (см., в частности, [3, 4]). Анализ работы такого преобразователя сводится к выяснению условий максимального изменения его рабочего параметра под воздействием измеряемой величины и отысканию оптимальных методов обнаружения малых изменений этого параметра.

Для измерения параметров электрических цепей наибольшее распространение получили мостовые методы. В применении к оптимизации характеристик преобразователей, в частности, для получения максимальной чувствительности, основные выводы теории мостовых цепей можно сформулировать следующим образом:

- а) относительные изменения параметра преобразователя должны быть по возможности максимальными;
- б) режим питания должен обеспечивать рассеивание на преобразователе максимально допустимой мощности;
- в) источник питания и остальные параметры плеч моста должны быть такими, чтобы на трех вспомогательных плечах рассеиваемая мощность превышала мощность на преобразователе.

При выполнении указанных условий в выходной электроизмерительный прибор отдается максимальная мощность, равная

$$P_{\max} = \frac{1}{4} \left(\frac{\Delta R_x}{R_x} \right)^2 P_{R_x}. \quad (2)$$

Здесь $\frac{\Delta R_x}{R_x}$ — относительное изменение параметра преобразователя;
 P_{R_x} — максимально допустимая мощность рассеивания на датчике.

Физическая сущность равенства (2) была наглядно раскрыта В. Н. Мильштейном [5] как максимально возможный резерв мощности преобразователя, определяемый максимально допустимым током

$I_{\max} = \sqrt{\frac{P_{R_x}}{R_x}}$ и приращением сопротивления ΔR_x , образующими некоторую эквивалентную э. д. с. E , равную $I_{\max} \Delta R_x$ (рис. 2).

Такой подход позволяет найти некоторые предельные возможности

параметрических преобразователей и увидеть большую общность в методах анализа генераторных и параметрических датчиков.

Все сказанное относительно параметрических преобразователей с активным сопротивлением легко может быть распространено и на пре-

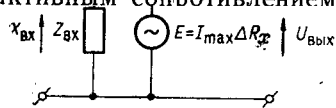


Рис. 2.

В последние годы имеется тенденция использовать в измерительной технике достижения теории информации. Информационный анализ должен показать, как осуществить прибор, чтобы количество сведений об измеряемом процессе, получаемое с его помощью, было максимальным.

Нам представляется, что ряд вопросов теории преобразователей также с успехом может решаться с позиций теории информации. Например, часто приходится решать задачу выбора одного преобразователя из серии однотипных вариантов, в которых одни характеристики улучшены в ущерб другим. Примером может быть проблема увеличения полосы пропускания в ущерб чувствительности. Здесь нужны интегральные критерии, и, на наш взгляд, можно воспользоваться соотношениями теории информации.

Однако к ее применению нужно относиться осторожно, поскольку аппарат теории информации не является универсальным. Например, при использовании преобразователей мы сплошь и рядом встречаемся с ситуацией, когда значения измеряемых величин не являются равноценными, а объективно определить соответствующие весовые коэффициенты не представляется возможным. В этом случае использование теории информации весьма затруднительно.

Теории преобразователей в последние годы, к сожалению, уделялось незаслуженно мало внимания, что, естественно, сдерживает прогресс в развитии первичных преобразователей. В данной статье преследовалась цель обрисовать положение в этой области и поднять некоторые вопросы, которые, по нашему мнению, являются одними из основных и требуют своего решения.

ЛИТЕРАТУРА

1. К. Б. Карандеев. Измерительные информационные системы и автоматика.— Вестник АН СССР, 1961, № 10.
2. А. А. Харкевич. Теория преобразователей. М.—Л., Госэнергоиздат, 1948.
3. К. Б. Карандеев. Специальные методы электрических измерений. М.—Л., Госэнергоиздат, 1963.
4. К. Б. Карандеев. Мостовые методы измерений. Киев, Гостехиздат УССР, 1953.
5. В. Н. Мильштейн. Энергетические соотношения в электронизмерительных приборах. М.—Л., Госэнергоиздат, 1960.

Поступила в редакцию
21 декабря 1966 г.