

Р. Р. ХАРЧЕНКО
(Москва)

АНАЛОГОВЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

Настоящая работа имеет целью кратко обрисовать состояние вопроса и указать на некоторые исследовательские задачи в области теории и принципов построения аналоговых измерительных преобразователей.

Измерительный преобразователь (ИП) представляет собой устройство, в котором реализуется с известной точностью однозначная функциональная связь между двумя физическими величинами X и Y .

Зависимость

$$Y=f(X) \quad (1)$$

называется функцией преобразования ИП. Независимая переменная X рассматривается как входная величина ИП, зависимая переменная Y — как выходная. По физическому смыслу X представляет собой воздействие, а Y — реакцию ИП на это воздействие. Зависимость (1) может быть задана аналитически или графически на основе опытных данных.

Данные определения показывают, что в понятие «измерительный преобразователь» вложен широкий смысл и что к ИП могут быть отнесены не только простые блоки и звенья измерительных устройств вроде датчиков, усилителей, модуляторов, измерительных механизмов и т. д., но и состоящие из них комплексы, образующие так называемую измерительную цепь, в которой осуществляются необходимые операции преобразования, передачи, воспроизведения и представления измерительной информации.

Любое автоматическое измерительное устройство без выходного отсчетного приспособления или с неградуированной шкалой (например, осциллограф) представляет собой в широком смысле измерительный преобразователь.

Структурная схема комплексного ИП в целях анализа расчленяется на элементарные ИП. Среди последних особое значение имеет ИП, через который в измерительную цепь или в прибор вводится измеряемая величина. Измерительный преобразователь этого назначения принято называть датчиком*.

Любопытно отметить, что электрометрия, вычислительная техника и автоматика (регулирование), казавшиеся до недавнего времени само-

* Первоначально к датчикам относили только такие ИП, в которых входная величина была неэлектрической, а выходная — электрической [1]. По-видимому, такая трактовка понятия «датчик» в настоящее время устарела.

стоятельными областями, теперь рассматриваются как аспекты технической кибернетики. Действительно, следящая система есть не что иное, как измерительный преобразователь, а решающее устройство для вычисления функции нескольких переменных в сочетании с датчиками и с выходным указателем представляет собой автоматический измерительный прибор.

На этом основании целесообразно понятие «измерительный преобразователь» распространить на устройства с несколькими входами; их функция преобразования имеет вид

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n). \quad (2)$$

Простейшим примером ИП с функцией преобразования (2) является датчик мощности.

Итак, измерительные преобразователи служат базовыми элементами в разнообразных устройствах технической кибернетики.

Общепринятая классификация измерительных преобразователей до сих пор не установлена. Существует много частных подходов с самыми разнообразными классификационными признаками, отражающими практические интересы ведомственных организаций, а также научный опыт отдельных школ.

Измерительная информация как на входе, так и на выходе ИП может быть представлена либо в виде физической аналоговой величины A (неквантованной или квантованной по уровню), либо в виде технически реализуемого цифрового кода K , либо в виде интервала времени ΔT , заданного двумя короткими импульсами или фронтами одного импульса.

Если образовать сочетания из 3 элементов ($A, K, \Delta T$) по 2 (вход и выход ИП), то получим всего 9 классов ИП. Мы займемся только одним из них, а именно преобразователями класса $A \rightarrow A$.

Прежде всего отметим, что в этот класс входит огромное количество типов ИП: усилители, блоки согласования входных и выходных сопротивлений, преобразователи рода тока, модуляторы и демодуляторы, функциональные преобразователи (например, квадраторы или интеграторы), блоки линеаризации, корректирующие звенья, датчики с унифицированными выходными величинами, разнообразные преобразователи электрических величин в электрические и пневматические, измерительные механизмы указывающих и регистрирующих приборов, измерительные следящие системы и др.

Каждый из названных типов ИП имеет свое специальное назначение и множество технических реализаций. Несмотря на это, можно назвать то общее, что объединяет разнообразные и разнотипные ИП, а именно: характеристики связи входной и выходной величин для статического или стационарного режима и способы их получения, методы оценки точности и методы определения показателей точности, характеристики динамической разрешающей способности (способности правильно воспроизводить спектр сигнала, либо изменять его нужным образом в заданной полосе частот), принципы оптимизации указанных характеристик.

Очевидно, что, пользуясь методом аналогий, можно исследованные для отдельных типов ИП частные задачи переводить на уровень более общих задач, ожидающих разрешения в области теории и техники аналоговых измерительных преобразователей.

Рассмотрим несколько комплексов таких задач, полагая, что они дополняют круг актуальных проблем измерительной техники (включая и средства автоматизации) на современном этапе ее развития [2—5].

1. Тарировка и определение точности ИП

Тарировкой принято называть установление паспортного соответствия между входной (X) и выходной (Y) величинами ИП в рабочем диапазоне функции преобразования и последующее определение показателей точности. Эта операция намного сложнее градуировки и определения класса точности прибора, имеющего шкалу, т. е. она обычно требует многократного измерения с повышенной точностью соответствующих друг другу значений X и Y , в то время как при градуировке прибора необходимо измерять только значения одной переменной X .

В плане научной проблематики должна найти место систематизация известных и разработка новых схем тарировки разных типов ИП с соответствующим теоретическим анализом. На рис. 1 приведены для примера 3 схемы. Схем подобного назначения может быть и больше. Для

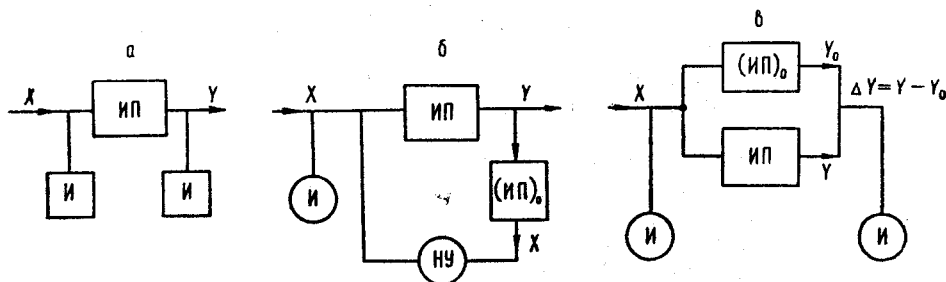


Рис. 1. Методы тарировки измерительных преобразователей:

ИП — измерительный преобразователь; $(ИП)_0$ — образцовый ИП; И (в квадрате) — измерительная установка высокой точности; И (в кружке) — технический измерительный прибор.

схемы рис. 1, а требуются две измерительные установки высокой точности, для схемы рис. 1, б — регулируемый прецизионный обратный преобразователь, нулевой указатель НУ величины X и технический измерительный прибор (ограниченной точности) для измерения величины X . Для схемы рис. 1, в нужен прецизионный прямой преобразователь, имеющий одинаковую паспортную функцию преобразования с испытуемым ИП, и два технических измерительных прибора для измерения X и Y .

Каждая из показанных схем имеет свои области применения. Например, схема 1, б была предложена автором для тарировки гальванометрических усилителей высокой точности [6]. В ней обратным преобразователем $(ИП)_0$ служит делитель напряжения, нулевым указателем — серийный гальванометр с теневой стрелкой. Новый метод тарировки усилителей высокой точности несравнимо проще классических методов, осуществляемых по блок-схеме (см. рис. 1, а), для которой необходимы два пятидекадных потенциометра постоянного тока.

Тарировка ИП производится при разных режимах его работы как в нормальных условиях, так и при воздействии внешних факторов, оговоренных техническими условиями. Это дает статистические сведения для определения паспортной функции преобразования и показателей точности ИП. В случае заведомо линейного ИП ординаты паспортной функции преобразования предварительно определяются, как математические ожидания, вычисленные по группам ординат ансамбля экспериментальных кривых $Y=f(X)$. При этом систематические погрешности должны исключаться, а случайные — выявляться с достаточной точностью. После этого находится наилучшим образом проведенная прямая, а затем выбирается доверительный интервал и устанавливаются показа-

тели точности ИП. Теоретический подход к этой задаче ясен [7], но в практике часто допускается кустарщина, что ведет к некорректной оценке точности ИП.

В случае, когда ИП не имеет строго линейной характеристики, но паспортную функцию преобразования требуется считать линейной (со снижением класса точности), необходимо по данным тарировки выбрать «наилучшим образом проведенную прямую» с таким расчетом, чтобы относительная дисперсия погрешностей по рабочему диапазону шкалы была наименьшей. В литературе этот вопрос освещен недостаточно.

К задаче определения точности примыкает чрезвычайно важная задача установления классов точности и нормирования основных и дополнительных погрешностей ИП. Как известно, для подавляющего большинства ИП нет государственных стандартов и вместо них действуют временные технические условия или ведомственные нормы [8].

Наконец, существенно важной задачей, подлежащей систематическому и глубокому исследованию, является анализ погрешностей, вносимых ИП при трансформации величины X в величину Y . Другими словами, это вопрос о том, как по погрешностям преобразователя найти погрешность преобразования (подобно тому, как по погрешностям прибора находят погрешности измерения посредством данного прибора). Поскольку литература по аналоговым ИП бедна общетеоретическими исследованиями данного вопроса, мы покажем на одном частном примере подход к его решению. Условимся называть рабочие диапазоны значений X и Y в функции преобразования (1) шкалами величин X и Y . Рассмотрим только линейные ИП с односторонними шкалами величин X и Y . У таких ИП может быть 4 разновидности функции преобразования. На рис. 2 нижние (начальные) значения входной и выходной величин обозначены X_0 и Y_0 , верхние (номинальные) значения — соответственно X_n

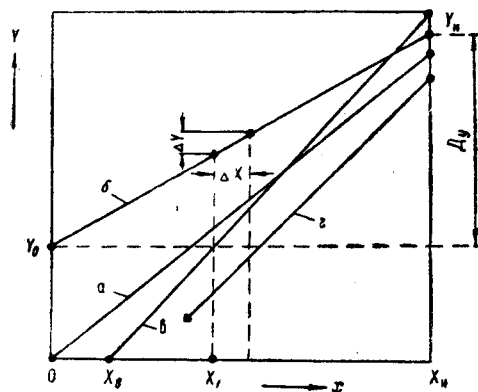


Рис. 2. Виды шкал линейных измерительных преобразователей.

и Y_n ; диапазоны шкал: на входе — $D_x = X_n - X_0$, на выходе — $D_y = Y_n - Y_0$, крутизна характеристики — $S = \frac{\Delta Y}{\Delta X}$. Примерами преобразователей с такими характеристиками являются измерительный усилитель постоянного тока (см. рис. 2, а), управляемый генератор в передающем подкомплексе частной телеизмерительной системы (см. рис. 2, б), термопара с термостатированием одного спая (см. рис. 2, в), мостовая схема с реостатным датчиком (см. рис. 2, г).

Проведем анализ для ИП с характеристикой, представленной на рис. 2, б. Пусть на входе ИП задано значение $X = X_1$ и пусть вследствие разных причин истинное значение соответствующей выходной величины отклонилось от паспортного значения на величину ΔT . Причинами могут быть некомпенсированная помеха, дрейф начальной точки шкалы Y_0 (условного нуля), нелинейность истинной (непаспортной) функции преобразования, нестабильность крутизны S .

Из рис. 2, б видно, что появление ΔY будет восприниматься измерительной аппаратурой на выходе ИП так, как будто на его входе действует сигнал $X + \Delta X$. Таким образом, налицо абсолютная приведенная

ко входу погрешность преобразования ΔX . Относительная приведенная ко входу погрешность преобразования будет иметь вид $\gamma_x = \frac{\Delta X}{X}$. Нетрудно показать [6], что эта погрешность выражается

$$\gamma_x = \frac{\Delta Y}{Y} \left(1 + \frac{Y_0}{i D_y} \right), \quad (3)$$

где $i = \frac{X_t}{X_n}$.

Итак, искомая погрешность зависит от трех факторов — от значения (в относительных единицах) действующей на входе величины i , от вида функции преобразования, заданной параметрами Y_0 и D_y , и от относительной погрешности $\frac{\Delta Y}{Y} = \gamma_y$, возникающей из-за нестабильности функции преобразования. Для полного решения задачи необходимо найти γ_y .

Пусть рассматриваемый ИП (в данном примере управляемый генератор) построен по замкнутой схеме, т. е. имеет звено обратной связи с коэффициентом передачи β , и пусть на вход ИП подается, кроме сигнала, стабильное смещение $X_{см} = \beta Y_0$ для установления начальной точки шкалы Y_0 (см. рис. 2, б). В таком случае, как показано в [9], искомая погрешность γ_y выразится формулой

$$\Delta_y = \frac{\Delta Y_0}{Y_0} \cdot \frac{Y_0}{Y_0 + S(X_{см} + X)} + \frac{\Delta X_{см}}{X_{см}} \cdot \frac{S X_{см}}{Y_0 + S(X_{см} + X)} + \\ + \frac{\Delta \beta}{\beta} \cdot \frac{S \beta}{1 + S \beta} + \frac{\Delta S}{S} \cdot \frac{S X}{[Y_0 + S(X_{см} + X)](1 + S \beta)}. \quad (4)$$

В (4) выявлены влияния всех факторов, определяющих погрешность γ_y , а именно — дрейфа условного нуля ΔY_0 у прямого преобразователя без звена обратной связи, нестабильности коэффициента передачи звена обратной связи $\Delta \beta$, нестабильности крутизны ΔS и нестабильности $\Delta X_{см}$ режимного параметра $X_{см}$.

Формулы (3) и (4) непосредственно позволяют подсчитывать фиксированные погрешности, но они же могут служить базой и для вероятностной оценки точности ИП, если имеются данные о математических ожиданиях и дисперсиях случайных величин ΔY_0 , $\Delta X_{см}$, $\Delta \beta$ и ΔS .

В заключение отметим, что задача анализа погрешностей всегда возникает при разработке новых ИП повышенной точности. Среди мер, ведущих к уменьшению погрешностей, особенно важны введение стабильной обратной связи и автоматическая компенсация дрейфа нуля. Это хорошо подтверждается опытом разработки измерительных усилителей высокой точности: в [10, 11] рассмотрены способы введения обратных связей, а в [12] — способы компенсации дрейфа нуля у измерительных усилителей.

Следует считать весьма актуальным и строгий анализ погрешностей у измерительных преобразователей с несколькими входами. Эта задача еще ждет своих исследователей.

2. Измерительные следящие преобразователи

Выше было отмечено, что следящая система может рассматриваться как типичный измерительный преобразователь. Такого рода ИП целесообразно назвать следящим. Однако в технике автоматического управления [13] под следящими системами обычно понимают системы с серводвигателями, т. е. системы астатические. Мы в целях общности по-

становки задачи будем относить к следящим ИП не только астатические, но и статические системы с любыми физическими величинами на входе и выходе.

Обратимся к рис. 3, где изображена в общем виде структурная схема измерительного следящего преобразователя и указано назначение его блоков.

Для абсолютно подавляющего большинства известных ИП с замкнутой структурной схемой (см. рис. 3) характерны две особенности: 1) физические величины X и Z на входах сравнивающего устройства однородны (два напряжения, два сопротивления, два перемещения) и

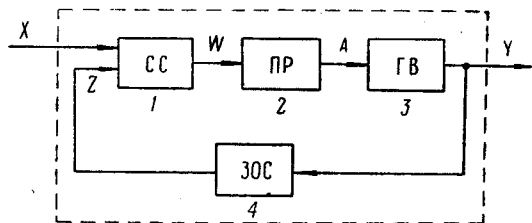


Рис. 3. Структурная схема измерительного следящего преобразователя:

СС — схема сравнения; ПР — преобразователь рассогласования; ГВ — «генератор» выходной величины; ЗОС — звено обратной связи; 1, 2, 3, 4 — номера блоков; $W = W_0 + \Delta W$; $W_0 = 0$ или $W_0 = \text{const}$.

2) физическая величина $W = W_0 + \Delta W$ на входе преобразователя рассогласования представлена в большинстве случаев либо напряжением, либо током, причем, как правило, $W = \Delta W$, так как $\Delta W = 0$; в астатической системе равновесие устанавливается при $\Delta W = 0$ (точнее, в пределах порога чувствительности блока 2), в статической системе — при $\Delta W \neq 0$.

Назовем условно такие ИП измерительными преобразователями класса А. Их теория как для линейного, так и для нелинейного варианта разработана достаточно подробно [13].

Теперь представим себе ИП (см. рис. 3), у которого, во-первых, величины X и Z разнородны и, во-вторых, W представлена какой угодно физической, в частности любой электрической, величиной или функцией двух величин. Впрочем, определяющим является только первое условие, второе — необязательно. Назовем такие ИП измерительными преобразователями класса Б.

Преобразователи классов А и Б различаются между собой не только формальными признаками. Из схемы рис. 3 видно, что формула передаточной функции для ИП класса А (с линейными звеньями)

$$K(p) = \frac{K_1(p) \cdot K_2(p) \cdot K_3(p)}{1 + K_1(p) \cdot K_2(p) \cdot K_3(p) \cdot K_4(p)} \quad (5)$$

совсем не подходит для выражения передаточной функции ИП класса Б. Следовательно, речь идет о более глубоком различии, затрагивающем особенности физических процессов в схеме.

В чем же смысл выделения следящих ИП класса Б в особую группу? Ответ на это прост: необходимо показать, что они перспективны, но мало изучены. Специфическими в них являются схема сравнения и преобразователь рассогласования, образующие в совокупности сравнивающее устройство. Последнее играет не менее важную роль, чем звено обратной связи, определяя точность и динамические характеристики ИП в целом. В сущности, само сравнивающее устройство представляет собой своеобразный измерительный преобразователь, посредством которого осуществляется установление функциональной связи между величинами X и Z в режиме отработки рассогласования ΔW на нуль (в статических системах — до значения, определяемого статизмом).

Следовательно, функция преобразования ИП класса Б при достаточной глубине обратной связи (см. рис. 3) выразится

$$Y = \frac{1}{K_4} \varphi(X), \quad (6)$$

где φ — функция преобразования сравнивающего устройства;
 K_4 — коэффициент усиления (чувствительность) звена обратной связи.

Если функция φ линейна, то и весь ИП будет линейным, если — нет, то можно ввести нелинейную обратную связь и вновь получить линейный ИП. Из (6) видно, что точность преобразования $X \rightarrow Y$ определяется стабильностью сравнивающего устройства и звена обратной связи.

Большой интерес представляют динамические характеристики различных следящих ИП класса Б — вид передаточной функции, запас устойчивости, качество переходного процесса и рабочая полоса частот. Но они неизвестны, пока неизвестны определяющие их динамические характеристики сравнивающих устройств.

Заметим, что возможности построения сравнивающих устройств чрезвычайно широки и разнообразны. Достаточно сказать, что один только параметр W , по приращению которого осуществляется режим слежения, может быть представлен не менее чем десятком электрических величин и их функций, например: R (выходное сопротивление схемы сравнения), U , f , φ , Q , Φ , $U \cos \varphi$, $\frac{|\dot{U}_1|}{|\dot{U}_2|}$, $U_1 U_2$, $|\dot{U}_1| - |\dot{U}_2|^*$.

Таким образом, можно синтезировать много различных сравнивающих устройств.

В литературе отражен опыт разработки, исследования и применения нескольких видов измерительных следящих преобразователей класса Б. Первое место среди них, несомненно, занимают так называемые квазиравновесные мосты с преобразователями рассогласования по отклонению от величины $W_0 = \varphi_0 = 90^\circ$ в одном варианте и $W_0 = \frac{|\dot{U}_1|}{|\dot{U}_2|} = 1$ — в другом*.

Они позволяют (в разных модификациях) линейно «сравнивать» между собой R и Z (модуль), или R и C , или R и ωL и др.

Квазиравновесные мосты, глубоко исследованные в Институте автоматики и электрометрии СО АН СССР [14], дают возможность построить серию надежных приборов для автоматического контроля параметров цепей переменного тока с одной следящей системой вместо двух.

Вторым характерным примером оригинального построения следящего преобразователя класса Б является серия преобразователей, основанных на применении так называемых фазопостоянных цепей [15], которые позволяют осуществить в замкнутой структурной схеме функциональные связи частоты переменного тока f с целым рядом практически важных параметров измерительной цепи, таких, как α (угол поворота оси измерительного механизма), M , R и др. Режим слежения в них осуществляется по отклонению от величины $W_0 = \varphi_0 = 0$ в одном варианте и $W_0 = \varphi_0 = 90^\circ$ — в другом. Преобразователи этого вида, по данным [15], предназначаются для использования в аппаратуре частотной телеметрии и обладают повышенной точностью.

* Наименования соответствующих величин не приводятся, так как данные обозначения общеизвестны.

3. Вопросы динамики ИП

Ряд актуальных вопросов, относящихся к динамике ИП, в настоящее время решен лишь частично. Остановимся кратко на некоторых неисследованных вопросах. Прежде всего следует внести полную ясность в вопрос о собственных динамических характеристиках различных ИП, о способах их опытного определения и о методах обработки экспериментальных данных для аналитического выражения искомых характеристик. Литература, освещающая отдельные стороны этого вопроса, столь разбросана по страницам технических книг и журналов, что нет никакой возможности дать здесь какие-либо обобщающие ссылки. Имеется настоятельная необходимость в организации на высоком уровне специальной плановой работы, чтобы проанализировать все аспекты указанной темы, отобрать наиболее ценные теоретические и методические сведения и четко систематизировать их.

Собственные динамические характеристики многих типов ИП можно изменять посредством корректирующих звеньев. Известно немало способов коррекции линейных ИП применительно к условиям их работы в измерительных цепях, системах регулирования, аппаратуре связи и др. Естественно, что методы осуществления коррекции могут быть различными. В [16, 17] систематически описаны и проанализированы методы коррекции, типичные для некоторых видов датчиков и для измерительных механизмов прямого преобразования, в том числе для светолучевого осциллографа. Подобного рода обобщающие работы необходимы и для других групп ИП.

Для исследования динамических свойств измерительных приборов и преобразователей нужна специальная методика и соответствующая испытательная аппаратура. Как правило, на вход исследуемых ИП необходимо подавать определенным образом сформированные испытательные сигналы $x(t)$. Эти сигналы должны фиксироваться регистрирующим устройством или устройством для визуального наблюдения одновременно с сигналами $y(t)$, снимаемыми с выхода ИП. Сопоставление кривых $x(t)$ и $y(t)$ позволяет судить о динамических свойствах ИП в разных режимах работы. Главная трудность состоит в том, что огромное количество подлежащих испытанию ИП не имеет двух электрических сторон. Поэтому приходится пристраивать к ИП дополнительные малоинерционные преобразователи неэлектрических величин в электрические, для которых нередко еще необходимы усилители, согласующие устройства и др. В этом случае целесообразно заменять испытываемые ИП их электрическими моделями. Автор решил подобную задачу применительно к исследованию динамических свойств светолучевого осциллографа [18]. Этот метод исследования оказался настолько простым, наглядным и удобным, что его следует рекомендовать для массового применения при испытании любых ИП. Для этой цели полезно составить каталог электрических моделей различных типов ИП.

В последнее время в Советском Союзе было разработано несколько видов автоматических мостов и компенсаторов переменного тока. Эти устройства, характеризующие современный уровень электрометрии, представляют собой связанные двухконтурные следящие системы [19—22]. В указанных работах динамика систем рассматривалась более или менее приближенно. Несомненно, что этот сложный и важный вопрос должен быть предметом внимания исследователей и в дальнейшем.

Опыт показывает, что универсально хороших измерительных устройств не бывает, так как при их разработке какое-либо нужное качество обычно достигается за счет других, может быть, менее важных.

Это подтвердилось и в интересной работе о роли фильтра в соотношении между быстродействием и точностью одного вида ИП [23]. Остается пожелать, чтобы в исследованиях динамические характеристики противопоставлялись разным критериям качества других видов измерительных преобразователей.

Наконец, следует указать на особую важность исследования динамических характеристик нелинейных ИП. К последним относятся, например, функциональные преобразователи и модуляторы. Нетрудно убедиться в том, что даже в специальной литературе по аналоговым счетно-решающим устройствам [24] о динамических свойствах функциональных преобразователей приводится очень мало данных. То же можно сказать и об аналоговых множительных устройствах [25].

Что же касается модуляторов, то их характеристики разработаны в основном применительно к технике связи. Но в этой области требования к точности намного ниже, чем в измерительной технике, поэтому вопросы о метрологических характеристиках модуляторов и демодуляторов остались во многом неразрешенными. Между тем современные виды модуляции (ЧИМ, ШИМ) применяются не только в радиотелеметрии, но и в локальных измерительных установках, например в аппаратуре для магнитной записи сигналов от датчиков. Актуальность указанных вопросов вполне очевидна, но только некоторые из них, в частности опытное определение динамических характеристик модуляторов ЧИМ и ШИМ [26], выбор соотношения между предельной частотой модулирующего сигнала (при заданной несущей) и нелинейными искажениями в тракте за счет особенностей спектра [27], в литературе освещены.

4. Специальные задачи

Дальнейшее развитие средств автоконтроля, в частности появление информационно-вычислительных и информационно-управляющих машин, выдвинуло ряд новых задач в области разработки теории и принципов построения аналоговых измерительных преобразователей.

Прежде всего стоит подчеркнуть, что измерительная техника оказалась на стыке с вычислительной техникой. Действительно, измерительные цепи, связывающие физические объекты со специализированными решающими устройствами, фактически включают в себя и последние, поскольку в них тоже осуществляется преобразование измерительной информации (2) и поскольку они должны иметь гарантированную точность. Таким образом, ясно, что задача построения новых решающих устройств для систем автоконтроля (решающих измерительных преобразователей) относится к проблемам как измерительной, так и вычислительной техники.

Измерительная цепь для передачи сигналов от физических объектов к вычислительным и управляющим машинам должна отвечать целому ряду требований, в том числе надежности, точности и информационной добротности. Последний термин мы ввели как некоторую собирательную характеристику, включающую в себя конкретные информационные показатели [3, 28]. Исследование и улучшение этих показателей, т. е. применение на практике информационной теории измерений, является одной из важных задач в области синтеза оптимальных измерительных цепей.

В оптимальной измерительной цепи существенную роль играет также взаимное согласование преобразователей. Глубокое исследование этого вопроса показало, что для многих типов ИП весьма плодотворным

оказывается подход к решению задачи на основе энергетических соотношений [29, 30]. Несомненно, что это направление следует развивать и совершенствовать.

Сложным вопросом теории измерительных цепей является преобразование изменений электрических сопротивлений в изменения тока или напряжения. Задача нахождения функции преобразования $\Delta R \rightarrow I$ для режима статики в общем виде решена в [31], задача нахождения функций преобразования $\Delta R(t), \Delta L(t), \Delta C(t) \rightarrow i(t)$ в режиме динамики для синусоидальных воздействий в одноконтурной схеме — в [32]. Последняя задача в более общем виде не решена еще никем. Между тем она должна быть решена хотя бы приближенно, так как в измерительных цепях встречается большое количество параметрических датчиков с выходными величинами вида $\Delta R(t), \Delta L(t), \Delta C(t)$.

Нередко измерительные цепи включают в себя функциональные преобразователи сигналов; примерами выполняемых ими операций являются: $Y = \frac{C}{X}$, $Y = CX^2$, $Y = C \int X dt$, $Y = C \lg X$ и др. В литературе, посвященной описанию функциональных преобразователей, недостаточно уделяется внимания анализу точности. Этот пробел должен быть восполнен. Среди известных методов анализа в некоторых случаях может оказаться полезным метод сравнения реальных и идеальных частотных характеристик. Поясним его на простейшем примере интегрирующей цепи $R - C$, нагруженной бесконечно большим сопротивлением. Коэффициент передачи этой цепи выражается $W = \frac{U_2(p)}{U_1(p)} = \frac{1}{1 + p\tau}$, где $\tau = RC$.

Рассматриваемый метод анализа основывается на представлении W в виде произведения трех множителей $W = S\Pi\nu$, где S — чувствительность; Π — функциональный оператор или коэффициент передачи идеального преобразователя в масштабе S ; ν — отношение коэффициентов передачи реального и идеального преобразователей. В данном примере, учитывая, что $\Pi = \frac{1}{p}$, представляем W в виде $W = \frac{1}{\tau} \cdot \frac{1}{p} \cdot \frac{p\tau}{1 + p\tau}$, откуда $S = \frac{1}{\tau}$, $\nu = \frac{p\tau}{1 + p\tau}$.

Полагая теперь $p = j\omega$, получаем зависимость ν от частоты. Это дает возможность найти рабочую полосу частот, в пределах которой $|\nu|$ отличается от 1 не более чем на величину наперед заданной погрешности. Легко находится и фазовая погрешность. Описанный метод анализа можно применить и к другим видам функциональных преобразователей.

Упомянем еще о двух интересных специальных задачах, возникающих при разработке систем централизованного контроля [33]. Это задачи линеаризации и масштабирования измерительных цепей. Известно, что некоторые серийные датчики имеют нелинейную функцию преобразования. Если по техническим условиям необходимо применить именно их и если все остальные ИП, входящие в измерительные цепи, линейны, то связи между входными (измеряемыми) и выходными величинами в каналах передачи информации окажутся нелинейными. Для большинства систем централизованного контроля это неприемлемо, поэтому в измерительные цепи в таких случаях дополнительно включают корректирующие нелинейные звенья для выравнивания нелинейностей, вносимых датчиками [34]. Вопросы синтеза и динамики таких цепей в общем виде почти еще не исследованы.

Масштабированием называется такая регулировка коэффициентов передачи измерительных цепей в машинах централизованного контроля, которая позволяет после преобразования их унифицированных выходных величин в цифровую форму получить на отсчетных устройствах значения входных величин разнообразных датчиков в единицах измеряемых величин с масштабом 1 : 1. Способы масштабирования различны. К сожалению, этот вопрос слабо освещен даже в специальной литературе [33]. С нашей точки зрения, для целей масштабирования очень перспективными являются умножители и делители электрических сигналов [25].

Нам осталось коснуться большой общей задачи создания ряда типовых серийных ИП с унифицированными входными и выходными величинами [33—35]. При ее решении необходимо рассматривать новые научные проблемы, отражающие тенденции развития автоматической измерительной техники. В этом плане интересно доказательство возможности и перспективности построения таких систем сбора и переработки измерительной информации, в которых носителем информации, т. е. унифицированной выходной величиной измерительных цепей, является частота импульсов или частота переменного тока [36]. Соответствующие этой задаче новые ИП с частотным выходом [9], с нашей точки зрения, должны быть линейными и иметь более высокую точность, чем в телеметрии [37, 38].

В заключение укажем на одно особое направление в измерительной технике, которое в последнее время привлекает внимание научных учреждений. Это автоматическая обработка осциллограмм и других документов регистрации с помощью вычислительных устройств. Для ввода данных в вычислительные устройства необходимы специальные преобразователи ординат графиков в электрические сигналы [39]. Разработка ИП этого назначения, их исследование, усовершенствование и серийный выпуск является задачей актуальной и неотложной.

Настоящий обзор показывает, что теория и техника измерительных преобразователей представляет собой фундаментальный отдел автоматической измерительной техники — автометрии. Об этом же говорит и факт введения в новые учебные планы вузов по специальности «Электроизмерительная техника» базовой дисциплины «Измерительные преобразователи».

ЛИТЕРАТУРА

1. Ф. Е. Темников, Р. Р. Харченко. Электрические измерения неэлектрических величин. М.—Л., ГЭИ, 1948.
2. К. Б. Карандеев. Измерения и прогресс. Автометрия, 1965, № 1.
3. Е. Г. Шрамков, Г. И. Кавалеров, П. В. Новицкий. Первоочередные направления разработки общей информационной теории измерений. Измерительная техника, 1963, № 9.
4. В. О. Арутюнов. Основные задачи современной метрологии. Измерительная техника, 1963, № 8.
5. Важнейшие задачи развития приборостроения (передовая). Приборостроение, 1963, № 11.
6. Р. Р. Харченко. К вопросу определения точности линейных измерительных преобразователей. Приборостроение, 1960, № 6.
7. Б. М. Щиголов. Математическая обработка наблюдений. М., Физматгиз, 1962.
8. Д. И. Агейкин, Е. Н. Костина, Н. Н. Кузнецова. Датчики систем автоматического контроля и регулирования. Под ред. Б. С. Сотскова. М., Машгиз, 1959.
9. Ю. Н. Евланов, Р. Р. Харченко. Измерительные преобразователи электрических величин в частоту импульсов. Электричество, 1965, № 1.
10. К. Б. Карандеев, Л. Я. Мизюк. Электронная измерительная аппаратура для геофизической разведки. М., Госгеолтехиздат, 1958.
11. П. П. Орнатский. Автокомпенсаторы переменного тока. Приборостроение, 1962, № 7.

12. Р. Р. Харченко, Ю. И. Семко. Измерительные усилители для систем централизованного контроля. Электричество, 1961, № 8.
13. А. А. Фельдбаум, А. Д. Дудькин, А. П. Мановцев, Н. Н. Миролубов. Теоретические основы связи и управления. М., Физматгиз, 1963.
14. К. Б. Карандеев, Г. А. Штамбергер. Обобщенная теория мостовых цепей переменного тока. Новосибирск. Изд-во СО АН СССР, 1961.
15. В. О. Арутюнов. Фазопостоянные измерительные цепи и их применение. М., Стандартгиз, 1963.
16. Р. Р. Харченко. Коррекция динамических характеристик электроизмерительных приборов и преобразователей. Приборостроение, 1956, № 2.
17. Л. Д. Гик. Коррекция частотных характеристик сейсмических вибродатчиков. Автоматический контроль и электрические измерения (Труды ИАЭ СО АН СССР, вып. 1). Новосибирск, Изд-во СО АН СССР, 1960.
18. Р. Р. Харченко. Определение динамических погрешностей осциллографа посредством моделирования. Приборостроение, 1959, № 4.
19. Л. Ф. Куликовский, А. М. Мелик-Шахназаров. Компенсаторы переменного тока. М.—Л., ГЭИ, 1960.
20. К. Б. Карандеев, Л. Я. Мизюк, Г. А. Штамбергер. Автоматический мост для независимого измерения и регистрации активной и реактивной составляющих комплексного сопротивления. Приборостроение, 1960, № 6.
21. В. Ю. Кнеллер. Влияние взаимосвязи контуров уравнивания на динамические свойства мостов и компенсаторов переменного тока. Автоматика и телемеханика, 1959, № 9.
22. Ф. Б. Гриневич. Автоматические мосты переменного тока. Новосибирск, РИО СО АН СССР, 1964.
23. В. Ф. Дмитриев, Я. А. Купершмидт. Оптимальный выбор параметров фильтра на выходе датчика. Измерительная техника, 1962, № 5.
24. В. Б. Смоллов и др. Вычислительные машины непрерывного действия. М., Изд-во «Высшая школа», 1964.
25. И. В. Латенко. Аналоговые множительные устройства. Киев, Гостехиздат УССР, 1963.
26. Р. Я. Сыропятова, Р. Р. Харченко. Определение динамических характеристик модуляторов в системах ЧИМ и ШИМ. Измерительная техника, 1964, № 11.
27. Р. Я. Сыропятова. Спектры сигналов в тракте магнитной записи измерительной информации. ИВУЗ, Приборостроение, 1965, № 1.
28. В. И. Рабинович, М. П. Цапенко. О количестве измерительной информации. Измерительная техника, 1963, № 4.
29. А. А. Харкевич. Теория преобразователей. М.—Л., ГЭИ, 1948.
30. В. Н. Мильштейн. Энергетические соотношения в электроизмерительных приборах. М.—Л., ГЭИ, 1960.
31. М. И. Левин. Общие свойства измерительных схем. Электричество, 1946, № 2.
32. Я. З. Цыпкин. Нерезонансные электрические цепи с переменным параметром. Электричество, 1946, № 8.
33. Ф. Е. Темников, И. М. Шенброт. Машины и системы централизованного контроля. М., ГОСИНТИ, 1964.
34. Е. М. Душин, А. В. Фремке. Измерительные преобразователи с унифицированным сигналом. Приборостроение, 1959, № 8.
35. Н. Ф. Бройдо. Приборы пневматической унифицированной системы в схемах автоматизации. М., Машгиз, 1963.
36. П. В. Новицкий. Проблема создания датчиков для всех электрических и неэлектрических величин. Измерительная техника, 1961, № 3.
37. А. В. Фремке. Телеизмерения. М.—Л., ГЭИ, 1958.
38. Я. А. Купершмидт, В. С. Малов, А. М. Пшеничников. Современные телеизмерительные системы. М.—Л., ГЭИ, 1961.
39. А. И. Петренко. Преобразование графиков в электрические сигналы. Киев, Гостехиздат УССР, 1964.

*Поступила в редакцию
5 сентября 1964 г.*