

Р. Д. БАГЛАЙ

(Новосибирск)

К ВОПРОСУ АВТОМАТИЧЕСКОГО ИЗМЕРЕНИЯ ВЕЛИЧИН ПРИ МИНИМАЛЬНОЙ АПРИОРНОЙ ИНФОРМАЦИИ

Обсуждаются пути организации измерительных устройств, обеспечивающих при минимальной априорной информации и без участия оператора измерение искомых параметров.

Практически во всех основных видах современной деятельности человека возникает необходимость выполнять измерения разнообразных величин с заданной точностью. Это привело к разработке большого числа специализированных измерительных устройств, т. е. устройств, предназначенных для измерения значений какого-либо одного параметра нередко в узких пределах его изменения. Постоянному увеличению числа устройств этого типа способствует, в частности, стремление решать вновь возникающие задачи измерения при минимальных затратах средств и времени. Между тем можно утверждать: чем более специализированы устройства, имеющиеся в распоряжении оператора-измерителя, тем большее количество априорной информации необходимо иметь о параметрах источника, прежде чем оператор сможет рационально использовать подходящее измерительное устройство.

По-видимому, не требуется также особо доказывать, что по количеству априорной информации задачи измерения далеко не равноправны. Их по этому признаку условно можно разделить на две группы. К первой группе отнесем задачи измерения параметров преимущественно технических объектов, которые синтезируются человеком. Здесь оператору, по крайней мере, принципиально может быть многое известно об искомых параметрах. Располагая соответствующими сведениями, обычно не составляет большого труда осуществить выбор метода измерения и, быть может, конкретного измерительного устройства для каждого параметра. При такого рода измерениях новые задачи возникают главным образом в связи с необходимостью рациональной организации сбора и обработки большого объема измерительной информации [1].

Ко второй группе отнесем задачи измерения параметров таких объектов и процессов, знания о которых находятся на качественном уровне. Именно такие случаи измерения рассматриваются в дальнейшем.

В ситуации подобного рода накопление информации об искомых параметрах (первый этап), необходимой для обоснованного выбора измерительного устройства — нелегкая задача, которую приходится решать оператору. Эти предварительные сведения могут быть получены,

конечно, только в результате эксперимента, в основном измерительного, быть может, довольно «грубого» (ориентировочного). После того, как выбрана надлежащая измерительная цепь, осуществляется второй этап, который состоит, как известно, в оптимальной ее настройке, выражающейся в соответствующем выборе чувствительности, пределов измерения и др. Подчеркнем, что если на первом этапе решается вопрос о выборе структуры, принципиально пригодной для проведения на должном уровне данных измерений, то на втором этапе настраиваются некоторые параметры выбранной структуры с тем, чтобы использовать ее наилучшим образом. Очевидно также, что необходимые сведения для решения задачи на первом и втором этапах добываются различными путями: на первом — за счет вспомогательных измерительных устройств, обычно низкого класса, на втором — с помощью выбранного высококлассного специализированного устройства.

Согласно описанной выше процедуре, исследователю приходится выполнять ряд вспомогательных операций в течение длительного времени, прежде чем, наконец, он сможет осуществить измерение с точностью, допускаемой данным специализированным устройством. Проведение этой процедуры в значительной степени усложняется при решении ряда вновь возникающих задач измерения в таких сферах науки и техники, где затруднено или становится нежелательным постоянное вмешательство оператора-измерителя. Такого рода задачи возникают в атомной энергетике, при электрофизиологических исследованиях, исследованиях космического пространства и т. п.

Если на основании приведенных или иных причин считать доказанной нежелательность участия оператора в процессе измерения, по крайней мере, при решении некоторых практически важных задач указанного класса, следует признать актуальной проблему функциональной организации измерительного блока для этого класса задач.

Можно ожидать, что специфические трудности здесь в значительной мере будут определяться множеством параметров, для измерения которых разрабатывается устройство, и количеством априорной информации о них.

Ясно, например, что если требуется иметь устройство, позволяющее быстро и с необходимой точностью измерять любой (наперед неизвестно какой именно!) из n возможных параметров, то в простейшем варианте оно может быть организовано из n параллельных групп специализированных измерительных устройств. Каждая из таких групп должна обеспечить независимое измерение одного параметра, а каждое из специализированных устройств данной группы — осуществлять измерение параметра в определенных пределах. Однако такой подход к решению задачи вряд ли можно признать технически целесообразным, за исключением простейших случаев измерения.

Между тем, на основании анализа структур существующих измерительных устройств нетрудно убедиться в том, что в подавляющем большинстве своем они организованы из небольшого числа типовых узлов и различаются способом соединения их и значениями параметров элементов, образующих эти узлы. Это указывает на возможность построения на базе относительно немногочисленных узлов измерительных устройств с гибкой (перестраиваемой) структурой, функционирование которых самоопределялось бы в зависимости от особенностей источника измеряемых величин, или иначе — устройств, адаптивных ко входному воздействию.

Учитывая изложенное, цель поиска можно сформулировать следующим образом:

Исследовать пути построения устройств, обеспечивающих при минимальной априорной информации и без участия оператора 1) организацию необходимой структуры измерительной цепи для любого параметра из заданного множества параметров, 2) оптимальную в каком-то смысле настройку выбранной цепи и 3) осуществление измерения; метрологические показатели таких устройств не должны уступать соответствующим показателям современных специализированных измерительных устройств.

По-видимому, нет необходимости особо подчеркивать, что намеченный подход к решению обсуждаемого класса задач — разработка универсальных (на заданное число разнородных параметров) автоматических измерительных устройств — существенно отличается от других способов организации устройств для измерения большого числа параметров, в том числе реализуемых в системах многоточечного контроля, многосвязных измерительных системах и др. Это, по нашим представлениям, достаточно четко связано со спецификой указанных выше задач. Само собой разумеется, что такой подход не является единственно возможным, однако может оказаться полезным и уже поэтому заслуживает изучения.

Прежде чем приступить к обсуждению некоторых особенностей организации измерительных устройств указанного типа, определим исходные посылки.

Примем, что ситуация в исследуемой физической точке характеризуется конечным множеством существенных разнородных параметров, величины которых являются ограниченными функциями времени. Они могут быть случайными или неслучайными, зависимыми или независимыми, совместными или несовместными.

Это множество величин, или источник неизвестных величин (ИНВ), представим вектор-функцией времени

$$r(t) = \{x_i(t)\},$$

определенной, скажем, для $t \geq 0$.

Здесь i пробегает конечное множество индексов $1, 2, \dots, n$.

Будем считать совокупность параметров, которые могут входить в источник, априорно известной, и примем, что нам заведомо неизвестно число и род параметров, образующих данный источник.

Пока шла речь о величинах, характеризующих процесс, мы не интересовались его физической природой (т. е. природой носителя информации), от вида которой часто зависит успех проведения измерительного эксперимента. Поскольку в большом числе случаев приходится измерять параметры электрических процессов, которые широко используются также для представления адекватных моделей процессов другой природы, в дальнейшем будем иметь в виду главным образом электрические измерения. Здесь мы не будем затрагивать вопроса об энергетических преобразованиях, осуществляемых в датчиках; будем считать, что такие преобразования, если только они потребуются, могут быть выполнены без существенного изменения функциональных зависимостей, которыми описываются искомые параметры.

Ограничив таким образом круг наших интересов, попытаемся для начала, опираясь на определение измерения [2], выяснить то минимальное количество функциональных связей в устройстве, состоящем из типовых узлов, которое необходимо и достаточно, чтобы его можно было отнести к измерительным, а затем проследим, какими новыми узлами и связями необходимо дополнить это устройство, чтобы оно стало пригодным для решения рассматриваемых задач.

Чтобы осуществить измерение искомого параметра данного рода, согласно определению, необходимо располагать однородным с ним вспомогательным параметром, величина которого принята за единицу измерения, или известна нам в принятой системе единиц.

Устройства, которыми располагает современная измерительная техника, позволяют воспроизводить с высокой степенью постоянства ту или иную единицу измерения, кратные ей или дробные значения. Они могут развертывать по заданному закону во времени все кратные и дробные значения единицы в некоторых ограниченных пределах. Избранный нами закон может быть описан известной функцией времени.

Следовательно, чтобы иметь возможность измерять любой из параметров источника $r(t)$, необходимо располагать в общем случае источником известных величин (ИИВ) $r^0(t) = \{x_i^0(t)\} \quad (t \geq 0)$, причем для соответствующих значений величин обоих источников должны выполняться условия:

$$\begin{aligned} \max [x_i(t)] &\leq \max [x_i^0(t)], \quad 0 < t < T; \\ \min [x_i(t)] &\geq \min [x_i^0(t)], \quad 0 < t < T, \end{aligned}$$

где T — максимальное время, в течение которого необходимо осуществить хотя бы одно измерение.

Далее, согласно определению измерения, цель эксперимента сравнения однородных — искомой и известной — величин может быть сформулирована следующим образом: *моменту времени, когда достигается равенство $x_i(t)$ и $x_i^0(t)$, ставится в соответствие значение функции $x_i^0(t)$ в этот момент.*

Ясно, что из-за ограниченной разрешающей способности технических устройств, воспроизводящих еще различные доступными нам средствами доли единицы измерения, требование выполнения равенства $x_i(t)$ и $x_i^0(t)$ должно быть заменено требованием выполнения определенного их неравенства.

Схема измерительного устройства с минимальным числом функциональных связей представлена на рис. 1, где R — вычитающая цепь; P — индикатор равенства величин $x_i(t)$ и $x_i^0(t)$; S — отсчетное устройство, которое считывает значение функции $x_i^0(t)$ и в момент достижения равенства измеряемой и известной величин выдает соответствующее этому моменту значение $x_i^0(t)$ на приемное устройство (ПУ).

Ясно, что, несмотря на дискретный характер изменения функции $x_i^0(t)$, считывание ее значений по выходу R не может быть признано достаточным, поскольку для заданного закона развертывания единиц измерения всегда можно указать такую функцию $x_i(t)$, при которой для двух смежных наперед заданных тактов сравнения сигналы на выходе R будут одинаковы и, следовательно, без дополнительных связей останутся неразличимыми.

Как видим, в этой простейшей разомкнутой схеме отражено то минимальное число связей, которое необходимо и достаточно, чтобы можно было ее отнести к измерительной.

Для нас представляется важным отметить, что устройства, соответствующие схеме рис. 1, не меняют ритма своей работы в зависимости от особенностей измеряемого параметра. Как известно, такие измерительные устройства с неизменным функционированием могут быть усовершенствованы путем введения обратной связи A_2 (рис. 2). Эта связь позволяет прекращать развертку единиц измерения, осуществлять их

«сброс» после достижения равенства сравниваемых величин и, таким образом, сокращать время перехода к последующему измерению; если же в узле P осуществляется проверка на неравенство, указанная обратная связь позволяет управлять воспроизведением $x_i^0(t)$ в зависимости от результата сравнения на предыдущем такте и др. Иначе говоря, введенная связь позволяет в какой-то мере управлять работой ИИВ в зависимости от особенностей измеряемого параметра, т. е., по существу, открывает первую возможность построения измерительных устройств, адаптивных по отношению к $x_i(t)$.

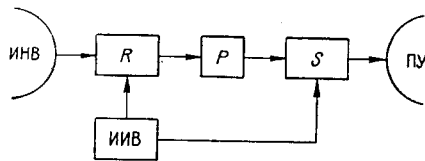


Рис. 1.

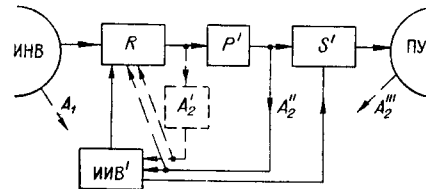


Рис. 2.

Чтобы не противоречить довольно общему и строгому в математическом отношении определению адаптивных систем [3] и вместе с тем отличать это практически важное свойство устройств (см. рис. 2), будем называть их адаптивными в узком смысле.

При введении связи A_2 появляются хорошо известные дополнительные возможности, позволяющие расширить область применения измерительных устройств и повысить их метрологические показатели. Рассмотрим некоторые граничные, с интересующей нас точки зрения, возможности таких устройств и, в первую очередь, выясним, достаточна ли приведенная на рис. 2 структура для решения задач указанного выше класса.

Легко видеть, например, что для обоснованного изменения скорости развертки единиц измерения, выбора их масштаба, способа набора и др. в зависимости от характера изменения $x_i(t)$ указанной обратной связи недостаточно. Тем не менее, эти частные вопросы могут быть разрешены как с помощью обратной связи A_2 , включающей дополнительное измерительное устройство, так и с помощью обратной связи A_2'' , соединяющей ПУ с ИИВ, если ПУ с памятью и если такая связь допускается условиями работы.

Что же касается рассматриваемого класса задач, то даже в том случае, когда каждый из параметров ИНВ приводится к роду i -го, требуется иметь дополнительную прямую функциональную связь. В самом деле, для того, чтобы воспользоваться соответствующим преобразователем и знать, к какому параметру относится данный результат измерения, необходимо опознать род искомого параметра.

В общем же случае, кроме опознания параметров, необходимо, как упоминалось выше, выполнить «ориентировочные» измерения, с тем чтобы обоснованно принять решение о порядке, способе, частоте их измерения.

Таким образом, приходим к выводу, что структуру измерительного устройства (см. рис. 2) необходимо дополнить блоком A_1 , как показано на рис. 3 (Q — преобразователь; в фигурных скобках обозначены наборы, из которых может выбираться данный узел).

Введение дополнительного блока (A_1) в прямую цепь измерительного устройства создает такую ситуацию, при которой становится необхо-

димым изучить ограничения, накладываемые на измерительные функции, выполняемые этим блоком. В противном случае может оказаться, что использование остальной части схемы станет излишним. В самом деле, если в блоке A_1 , кроме опознания параметров и принятия решения о порядке проведения измерительного эксперимента, выполняется достаточно точное измерение, в остальной части цепи не будет необходимости.

Для иллюстрации связи измерительных функций, выполняемых блоком A_1 и остальной частью цепи, рассмотрим два характерных в этом отношении примера.

Пусть ко входу устройства, в котором реализованы связи, показанные на рис. 3, подключен ИНВ. Далее предположим, что в результате анализа сигнала в блоке A_1 установлено: параметром, подлежащим измерению, является амплитуда напряжения определенной полярности и скорости изменения. При этом в блоке A_1 осуществляется «грубая» количественная оценка (ориентировочное измерение) этого параметра, например, с помощью набора пороговых элементов, которые позволяют практически мгновенно осуществить такую оценку. Примем, что на основании всей полученной информации может быть автоматически выбрана необходимая узкоспециализированная структура измерительной цепи. Тогда результатом предварительной оценки величины параметра можно воспользоваться для дальнейшего сокращения времени, необходимого для завершения измерительного эксперимента. В самом деле, на основании результата предварительной оценки в выбранной специализированной цепи может быть одновременно включено большое известное нам число единиц измерения, и, следовательно, процесс уравнивания ускорится без ухудшения точности измерения.

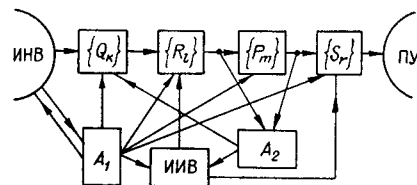


Рис. 3.

Если при тех же условиях в блоке A_1 периодически осуществляются измерения параметра медленно действующим прибором, то результаты таких измерений тоже можно с пользой применить для сокращения длительности измерительного процесса. Однако в этом случае единицы измерения, применяемые в блоке A_1 , должны быть достаточно точными. В конце каждого периода измерения в блоке A_1 результаты могут передаваться непосредственно в приемное устройство и одновременно использоваться в качестве исходных (опорных) данных для работы остальной части цепи в течение периода.

Как видим, измерительные функции блока A_1 в сравнении с такими же функциями остальной части цепи в общем случае не могут быть надежно охарактеризованы только по быстродействию и точности.

Специфические функциональные особенности (в том числе и измерительные) блока A_1 обусловлены тем, что он выступает в качестве задающего, доминирующего по отношению к остальной части устройства.

Отметим еще одну сторону вопроса, касающегося роли блока A_1 . Среди параметров, образующих источник неизвестных величин, могут оказаться так называемые пассивные параметры, поэтому в A_1 должна быть предусмотрена возможность формирования определенного вида воздействий для того, чтобы можно было осуществить опознание, а затем и измерение таких параметров. По существу, эта функция блока относится к довольно сложной и самостоятельной задаче опознания оператора пассивной цепи.

Итак, можно утверждать, что, по крайней мере, нет принципиальных препятствий организации на наборах типовых узлов таких автоматически перестраиваемых измерительных устройств, которые были бы пригодны для решения обсуждаемого класса задач. Необходимые данные для принятия решения, что и как измерять, для гибкого (алгоритмического) использования наборов и др. могут быть получены с помощью специального функционального блока (A_1), непосредственно связанного с источником, т. е. блок A_1 «ответственен» за обоснованный выбор из заданных наборов узлов подходящей структуры для измерения каждого параметра источника. Что же касается оптимальной в каком-то смысле настройки параметров выбранной структуры, то она, как обычно, может быть осуществлена с помощью надлежащих цепей обратных связей (блок A_2).

Синтез конкретных устройств этого типа может быть рассмотрен после задания определенных технических условий, однако уже сейчас можно выделить специфические вопросы, изучение которых в значительной мере определит успех создания таких устройств. Некоторые из этих вопросов перечислены ниже:

1. Разработать критерии опознания наиболее часто встречающихся электрических параметров, а также принципы построения относительно несложных технических средств для этой цели.

2. Определить теоретически обоснованные и практически приемлемые соотношения между измерительными функциями, выполняемыми блоком A_1 и остальной частью цепи.

3. Поскольку нет основания ожидать, что пассивные параметры будут линейными, предстоит рассмотреть круг задач, связанных с опознанием и измерением нелинейных параметров.

4. В блоке A_1 на основании анализа параметров источника предполагается принимать решения о порядке их измерения, частоте, с которой измерения должны осуществляться, наиболее приемлемом методе измерения и др., поэтому неизбежным окажется решение задач, связанных с выбором соответствующих критериев, и на их основе разработка правил принятия решений. Поскольку каждый метод измерения, по существу, представляет собою набор таких правил (алгоритм), задача принятия решения здесь сводится к алгоритмизации процесса выбора алгоритма.

5. При оптимальной (по метрологическим характеристикам) настройке выбранной структуры устройства с помощью блока A_2 потребуются рассмотреть с точки зрения теории чувствительности влияние различных параметров структуры на ее основные метрологические характеристики и др.

Можно ожидать также, что такие довольно общие для измерительной техники вопросы, как трансформация погрешностей, введение избыточности, и им подобные найдут свое специфическое отражение при изучении этого типа устройств.

ЛИТЕРАТУРА

1. К. Б. Карандеев. Измерительные информационные системы и автоматика.— Вестник АН СССР, 1961, № 10.
2. К. Б. Карандеев, В. И. Рабинович, М. П. Цапенко. К определению измерения.— Измерительная техника, 1962, № 12.
3. Заде (Zadhe L. A.). Об определении адаптивности.— ТИИЭР, 1963, т. 51, № 3, стр. 499.

Поступила в редакцию
10 апреля 1965 г.