

А. Н. КАСПЕРОВИЧ,
И. Ф. КЛИСТОРИН, М. П. ЦАПЕНКО
(Новосибирск)

АВТОМАТИЧЕСКИЕ ЦИФРОВЫЕ ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ

Кратко излагается современное состояние теоретических исследований и практических разработок в области автоматических электроизмерительных цифровых приборов, рассматриваются перспективные направления их развития.

Автоматические цифровые измерительные приборы (АЦИП) являются одним из основных и наиболее перспективных средств получения количественной информации об окружающем нас материальном мире [1]. В силу своих особенностей они позволяют успешно решать задачи, связанные главным образом с повышением точности измерений и с получением объективных результатов в виде, пригодном как для ввода в устройства обработки данных, так и для использования человеком-оператором.

Несмотря на короткую историю развития, в настоящее время существует весьма большое число различных автоматических цифровых приборов, предназначенных для измерения электрических и неэлектрических величин [2—11 и др.].

Автоматические цифровые электроизмерительные приборы ныне используются в основном для измерения напряжений постоянного тока, амплитудных и средних значений, а также разности фаз и частоты синусоидальных напряжений.

Заметим, что подавляющее большинство АЦИП, выпускающихся промышленностью за рубежом и в СССР, предназначено для измерения напряжений постоянного тока [11].

В значительно меньшей степени разработаны и исследованы АЦИП, служащие для измерения постоянных и переменных токов и мощностей, параметров элементов электрических цепей (активного сопротивления, емкости, индуктивности, тангенса угла потерь, добротности и т. п.), напряжений переменного тока (действующего и среднего значений, клирфактора и др.) в широком диапазоне частот, параметров электромагнитных полей и т. п.

Недостаточно интенсивно решаются практические задачи по созданию дискретных измерительных устройств для определения характеристик процессов, изменяющихся во времени (например, корреляционных функций этих процессов).

Таким образом, одна из наиболее актуальных задач приборостроения — расширять области применения АЦИП, создавать приборы, которые позволят производить измерение более широкого круга параметров, чем это делается ныне.

Нужно сказать, что в этом направлении в ближайшее время следует ожидать серьезных результатов. Так, например, в Институте автоматизации и электрометрии СО АН СССР предложены новые принципы построения автоматических цифровых вольтметров, позволяющих измерять с погрешностью порядка 0,2% действующие значения переменных напряжений произвольной формы, спектр частот которых имеет диапазон от 50 гц до 20 кгц. Там же создан и готовится к серийному выпуску (на заводе «Точэлектроприбор» в Киеве) универсальный автоматический цифровой мост переменного тока, обладающий приведенной погрешностью порядка 0,2% и временем измерения 5 сек.

Характеристики современных АЦИП в ряде случаев не соответствуют требованиям народного хозяйства. Можно признать более или менее удовлетворительными достигнутые в АЦИП постоянного тока погрешность измерения (обычно 0,05—1%) и быстродействие (порядка 1—1000 *изм/сек*).

Вместе с тем надежность АЦИП существенно ниже надежности измерительных приборов непрерывного действия. Как показано в статье Н. Я. Феста*, имеется настоятельная необходимость в создании АЦИП, обладающих временем исправной работы порядка 10—100 тыс. часов.

Для расширения области применения АЦИП весьма актуальной является задача снижения предела измерения напряжений до 1 мв и ниже при одновременной разработке мер защиты таких высокочувствительных приборов от влияния помех.

Нерешенной остается проблема создания быстродействующих АЦИП повышенной точности.

Значительный интерес для практики могут представить приборы, сочетающие непрерывный и цифровой принципы действия. Такие комбинированные приборы смогут обеспечить высокую точность измерения и наглядность наблюдения за изменениями измеряемой величины.

Наконец, мы считаем полезным обратить внимание на необходимость более целеустремленного развертывания исследований, направленных на снижение стоимости АЦИП. Нужно, чтобы она была соизмеримой со стоимостью приборов непрерывного действия.

Создание новых и совершенствование существующих АЦИП немислимо без развития соответствующей теоретической базы. Однако сейчас более или менее оформившейся теории АЦИП не существует. Исследованы лишь отдельные, недостаточно увязанные между собой вопросы. Учитывая важность разработки основ построения АЦИП, остановимся далее на состоянии основных теоретических вопросов АЦИП и наметим некоторые направления дальнейших исследований в области теории и практики АЦИП.

Методы сравнения измеряемой и известной величин в АЦИП

В общем случае АЦИП (см. рисунок) содержат блоки масштабных преобразований (БМП X и БМП N) измеряемой (X) и известной (образцовой) (N) величин, осуществляющие умножение величин X и N .

* Публикуется в этом номере журнала.

на коэффициенты n и m . Совокупности значений nX и mN , полученные в результате масштабных преобразований, сопоставляются и среди всех значений выбираются наиболее близкие между собой — $n_i X$ и $m_j N$. При этом с погрешностью дискретности выполняется равенство

$$n_i X = m_j N. \quad (1)$$

Отношение $\frac{m_j}{n_i}$ дает численное значение измеряемой величины (при принятой единице измерения N).

Таким образом, АЦИП являются такими устройствами, в которых из измеряемой и известной величин образуется совокупность значений nX и mN и производится сопоставление их с целью нахождения наиболее близких значений. Основными способами сопоставления являются уравнивание и совпадение [12]. При использовании в АЦИП способа уравнивания в каждый данный момент сопоставляется всего два значения nX и mN , причем значения m (или n) изменяются по определенному закону последовательно до тех пор, пока не будет достигнуто равенство (1). В зависимости от закона изменения коэффициентов m или n различаются АЦИП, основанные на способах развертывающего, поразрядного и следящего уравнивания (примеры таких АЦИП см., например, в [13, 14, 15]).

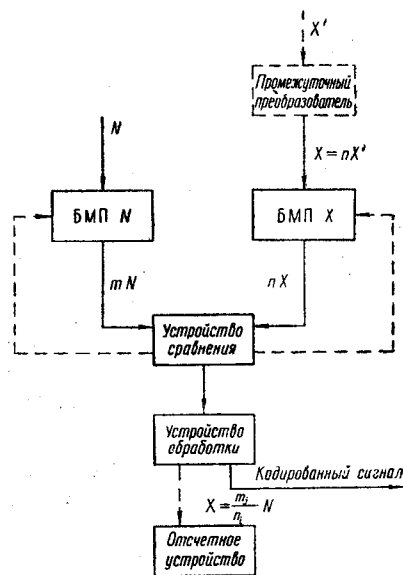
Наибольшее распространение имеют АЦИП с поразрядным и развертывающим уравниванием. Нам представляется неоправданным некоторое сокращение объема исследований по созданию приборов следящего уравнивания. Эти приборы могут выдавать информацию о приращениях измеряемой величины и при определенном характере изменения измеряемых величин получать большее число отсчетов за один и тот же промежуток времени, чем при использовании поразрядного или развертывающего уравнивания.

АЦИП с различными видами уравнивания в основном отличаются друг от друга устройствами управления. Очевидно, можно синтезировать универсальное устройство управления так, что в зависимости от характера изменения измеряемой величины АЦИП будет способен изменять вид уравнивания. Такие АЦИП можно отнести к приборам с переменной структурой.

При использовании способа совпадения в АЦИП сопоставляются все возможные значения nX и mN и результат измерения определяется по тем значениям n_i и m_j , при которых выполняется условие (1).

Применение способа совпадения позволяет создавать наиболее быстродействующие АЦИП. Время измерения у них ограничивается лишь быстродействием сравнивающих устройств и временем считывания результатов измерения.

К типичным АЦИП, основанным на методе совпадения, относятся приборы, описанные в [16, 17].



Блок-схема цифрового прибора

Преимущество подобных АЦИП в том, что управление их работой весьма просто и нет необходимости в переключающих элементах блоков масштабных преобразований. Однако создание таких АЦИП связано с серьезными конструктивными трудностями, так как в них должно одновременно действовать столько устройств сравнения, сколько пар значений nX и mN сравниваются между собой.

В связи со все возрастающими требованиями к повышению быстродействия АЦИП уместно более широким фронтом развернуть работы по теоретическим исследованиям и созданию приборов, основанных на методе совпадения.

Мы предполагаем, что наиболее интересных теоретических и практических результатов в исследовании и создании АЦИП следует ожидать от совместного применения методов уравнивания и совпадения. Примеры приборов комбинированного действия приведены в [18, 19].

Целесообразно обратить внимание на создание АЦИП, в которых используется метод одновременного сравнения измеряемых и образцовых величин.

Наконец, следует заметить, что если АЦИП используются в качестве составной части измерительных систем, то требования к отдельным элементам АЦИП могут претерпеть существенные изменения. Например, функции, обычно выполняемые АЦИП, могут быть распределены между отдельными устройствами (квантуемыми устройствами, цифровыми датчиками и т. д.), а ряд функций (управление работой, обработка промежуточных данных и т. п.) может быть передан другим устройствам системы. В связи с этим интересно рассмотреть особенности работы АЦИП в более сложных системах.

Количественная оценка сложности и надежности АЦИП

Назрела необходимость количественной оценки сложности структуры, стоимости и качества функционирования АЦИП. Многообразие АЦИП, отличающихся природой измеряемых величин, методами измерения, техническим выполнением и т. п., чрезвычайно затрудняет решение этой задачи. Поэтому представляется необходимым прежде всего выработать единый подход к описанию структуры и поведения этих устройств. Такие попытки были предприняты еще несколько лет тому назад. Так, например, в [20] для описания работы АЦИП предложено использовать аппарат логических схем алгоритмов. Позднее для рационального выбора таких важнейших характеристик АЦИП, как число уровней квантования при заданной точности результатов измерений и известной погрешности промежуточных преобразований, пропускная способность, скорость получения информации и др., были успешно использованы представления и аппарат теории информации [21 и др.].

Чисто вероятностный подход характерен для [22], где исследовано функционирование АЦИП поразрядного и развертывающего уравнивания в условиях помех. Качество функционирования приборов оценивается с помощью таких статистических показателей, как усредненная (по шкале) вероятность правильного измерения, усредненные вероятности тех или иных ошибок, усредненные вероятности попадания результатов измерения в заранее заданный интервал и т. п. Проведенное исследование позволило определить условия целесообразного применения указанных АЦИП для некоторых случаев.

Некоторый интерес представляют работы [23, 24], в которых разными путями введены характеристики, оценивающие сложность структуры АЦИП. В [23] такой характеристикой является количество мер, используемых при измерении. В [24] учитывается характеристика объема аппаратуры. При этом структура АЦИП раскрывается на уровне физических элементов, из которых прибор изготовлен.

Однако рассмотренный материал дает основание считать, что работы в этом направлении только начаты. И если функционирование АЦИП в настоящее время все же может быть достаточно эффективно оценено с помощью уже известных характеристик, то этого нельзя сказать о показателях сложности приборов, которые во многих отношениях несовершенны и мало обоснованы. В связи с этим важное значение приобретают дальнейшие исследования структуры АЦИП, направленные на выяснение общих закономерностей их построения и выделение структурных элементов. С целью общности структурные элементы не должны зависеть от рода измеряемой величины, метода измерения и технического выполнения. На базе этих элементов могут быть получены достаточно общие показатели сложности (стоимости) структуры АЦИП.

Для оценки АЦИП необходимо получить обоснованную комплексную характеристику, которая учитывала бы как сложность (стоимость) их структуры, так и функционирование в заранее заданных условиях. Использование такой характеристики позволило бы устранить субъективизм в оценке достоинств и недостатков различных цифровых приборов, а также в сравнении их с измерительными приборами непрерывного действия.

Эта комплексная характеристика должна учитывать и надежность АЦИП, поскольку при использовании одного из наиболее перспективных методов повышения надежности — резервирования — сложность АЦИП должна увеличиваться. Учет надежности необходимо производить и потому, что повышение надежности не должно ухудшать качества функционирования АЦИП и, в частности, их основных измерительных характеристик. Заметим, что исследование методов резервирования в АЦИП полезно тесно связать с бионическими исследованиями органов чувств живых организмов.

Квантование и цифровое кодирование измеряемой величины, погрешности АЦИП

Как следует из определения цифровых измерительных приборов [12], важными являются задачи рациональной организации операций квантования по уровню и времени, а также цифрового кодирования.

Наличие квантования измеряемой величины в цифровых приборах приводит к тому, что значения измеряемой величины определяются с погрешностью, зависящей от шага квантования по уровню и времени. Значения этих шагов должны быть определены при проектировании АЦИП на основе заданного значения погрешности и известных характеристик измеряемой величины.

В результате анализа процесса квантования по уровню получается максимальное значение и некоторые статистические характеристики погрешности квантования (если имеются статистические данные об измеряемой величине) [21].

Значение шага квантования по уровню можно выбирать, исходя из различных критериев, характеризующих качество операций кванто-

вания по уровню. Например, использование информационного критерия позволяет получить оптимальное соотношение между дисперсией погрешности первичного преобразования и дисперсией погрешности квантования [21].

В ряде случаев шаг квантования по уровню может быть неравномерным; при этом обеспечивается оптимальное значение какого-либо критерия (например, дисперсии погрешности квантования, количества информации и т. п.). Но нужно отметить, что практических реализаций АЦИП с неравномерным шагом квантования по уровню весьма мало.

Анализ процесса квантования по времени необходим для учета погрешности, возникающей из-за изменения во времени измеряемой величины. При анализе квантования по времени устанавливается связь между значением погрешности, шагом квантования по времени и способом обработки, используемым для определения значения измеряемой величины в промежутках между измерениями. Шаг квантования по времени может быть либо постоянным, либо меняться в зависимости от поведения измеряемой величины. В соответствии с этим различают жесткую и адаптивную дискретизацию измеряемой величины во времени.

Рассмотрим процесс квантования измеряемой величины по времени с постоянным шагом. АЦИП производит измерения значений величины $x(t)$ в моменты времени t_k . Значения $x(t)$ для моментов времени, не совпадающих с моментами t_k , вычисляются устройством обработки результатов измерений. Для вычисления значений $x(t)$ обычно используется линейная комбинация значений отсчетов $x(t_k)$

$$x^*(t) = \sum_{k=1}^{k=n} x(t_k) \cdot a_k(t), \quad (2)$$

где $a_k(t)$ — весовой коэффициент, являющийся функцией времени.

Определение значения $x(t)$ по формуле (2) приводит к появлению погрешности

$$\varepsilon(t) = x(t) - x^*(t),$$

значение которой зависит от свойств измеряемой величины, выбора коэффициентов $a_k(t)$ и шага квантования по времени. Последний выбирается исходя из некоторых априорных данных об измеряемой величине и заданного значения погрешности $\varepsilon(t)$ (см., например, [25] и библиографию к ней). Отметим, что в работах, посвященных определению шага квантования по времени, не всегда учитываются погрешности измерения $x(t_k)$, обусловленные квантованием измеряемой величины по уровню. Кроме того, в настоящее время недостаточно полно разработаны рекомендации по выбору коэффициентов $a_k(t)$ и выбору рационального порядка формулы (2) (числа учитываемых отсчетов) в зависимости от свойств измеряемой величины. Рекомендации такого типа важны, так как формула (2) определяет сложность устройства обработки результатов измерений.

При квантовании с переменным шагом (адаптивной дискретизации) величина интервала времени между измерениями меняется в зависимости от текущего поведения измеряемой величины [2, 26]. Адаптивная дискретизация дает выигрыш в числе измерений в единицу времени по сравнению с жесткой дискретизацией. Интересной является задача оценки этого выигрыша в зависимости от свойств измеряемой величины. Следует заметить, однако, что АЦИП с адаптивной дискретизацией, как правило, более сложны.

Таким образом, в области теории квантования АЦИП наибольший интерес представляют задачи, связанные с изучением процессов с неравномерными шагами квантования как по уровню, так и по времени.

Выбор системы кодирования в АЦИП имеет существенное значение, так как от нее зависит структура, удобство обработки и представления информации, а также в определенной мере помехоустойчивость приборов. Чаще всего в АЦИП используются двоичная и двоично-десятичная системы кодирования. Подробно различные виды кодов, используемых в АЦИП, рассмотрены в [3—5].

Если АЦИП работает в таких условиях, что процессы квантования и кодирования (а также регистрации и передачи результатов) осуществляются при наличии помех, то целесообразно использовать системы кодирования с избыточностью, которые в известной степени позволяют обнаруживать и исправлять ошибки. В этом направлении известны исследования по выбору двоично-десятичных кодов, наиболее защищенных от определенного вида помех [27, 28]. Несомненно, что подобные исследования должны привести к созданию систем кодирования, позволяющих проводить правильные измерения в присутствии помех широкого класса. Обратим внимание на важность анализа погрешностей АЦИП, тесно связанного с вопросами квантования и кодирования, и методов автоматического исключения этих погрешностей. До сего времени должной ясности в этом отношении нет.

Создание новых и совершенствование существующих элементов АЦИП

Существенное значение для дальнейшего развития АЦИП имеет создание новых и совершенствование существующих элементов этих приборов, коренное улучшение технологии изготовления элементов и АЦИП в целом. Остановимся на некоторых задачах в этом направлении.

Необходимо продолжать работы по созданию известных (образцовых) величин, приближающихся по точности к эталонам и в то же время легко воспроизводимых в АЦИП.

В области разработки измерительных схем АЦИП достигнуты определенные успехи, позволяющие создавать достаточно совершенные (в измерительном смысле) приборы [7, 8]. Однако мы считаем необходимым продолжать работы по созданию и совершенствованию измерительных схем АЦИП. В частности, перспективно создание измерительных схем переменного тока с делителями напряжения и тока с тесной индуктивной связью, а также стабильных измерительных схем, состоящих из элементов пониженной стабильности и надежности и т. п.

Для повышения надежности, быстродействия и точности АЦИП целесообразно применение новых, более совершенных переключающих устройств. В этом направлении предстоит самая интенсивная работа. Необходимо рассмотреть принципиальные возможности использования новых физических эффектов и явлений для создания таких переключающих устройств. В ближайшее время надо добиться, чтобы одно из наиболее совершенных переключающих устройств — магнитоуправляемое реле — выпускалось нашей промышленностью серийно [29].

Важную роль в дальнейшем совершенствовании АЦИП могут сыграть новые типы промежуточных преобразователей измеряемых величин, например преобразователи с частотной модуляцией, использование которых, возможно, позволит существенно улучшить характеристики АЦИП.

Одним из основных элементов любого АЦИП являются устройства сравнения. Как правило, они представляют собой довольно сложные электронные блоки, обладающие относительно невысоким быстродействием, чувствительностью и стабильностью. Поэтому сейчас нужны серьезные исследования по резкому улучшению измерительных характеристик устройств сравнения и уменьшению их сложности. Должны быть тщательно проанализированы устройства сравнения, основанные на использовании разнообразных нелинейных элементов, в том числе магнитных и др.

Существенное улучшение характеристик АЦИП может быть достигнуто за счет использования в них устройств обработки. Укажем на несколько перспективных задач в этом направлении.

Уменьшение случайных погрешностей в АЦИП может быть достигнуто путем многократного повторения процесса измерения и последующего усреднения результатов измерений. Для уменьшения систематических погрешностей может быть использовано измерение значений образцовой величины и автоматическое введение поправок в результаты измерения.

Интересные результаты могут быть получены при уменьшении влияния внешних помех на работу быстродействующих и высокочувствительных АЦИП путем применения соответствующей обработки результатов ряда прямых измерений.

Перспективными могут оказаться методы определения интегральных характеристик переменных напряжений (например, действующих значений) с использованием обработки результатов измерений [30, 31, 32]. Применение цифровой вычислительной техники в АЦИП только начинается, и нужно интенсифицировать работы в этом направлении.

Поскольку цифровые измерительные приборы являются автоматическими, то в них существенную роль играют устройства управления процессом измерения, особенно оптимального управления. Осуществление оптимального процесса измерения (уравновешивания) оказывается особо трудным в цифровых приборах, предназначенных для одновременного измерения нескольких параметров. Наиболее распространенным примером таких приборов являются мосты переменного тока, измеряющие одновременно активную и реактивную составляющие сопротивления. Для уравновешивания в таких мостах требуется регулировка двух параметров (известных величин), причем контуры уравновешивания по этим параметрам почти всегда взаимосвязаны. При этом трудно осуществлять устройства сравнения — детекторы равновесия, выходной сигнал которых должен определять направление изменения известных величин. Для построения детекторов равновесия точных мостов целесообразно использовать метод параметрической модуляции [8].

Перспективным для всех АЦИП является изучение методов адаптации, методов построения таких устройств управления работой АЦИП, при которых его функционирование будет оптимальным.

Необходимы дальнейшие работы по совершенствованию выходных устройств АЦИП (отсчетных, регистрирующих устройств, а также устройств, выводящих результаты измерений в виде электрических сигналов).

З а к л ю ч е н и е

Существующие АЦИП охватывают измерение ограниченного количества физических величин, и их измерительные и эксплуатационные характеристики далеки от совершенства. В связи с этим перед

научными и конструкторскими коллективами стоят следующие первоочередные задачи:

1. Необходима разработка основ построения АЦИП, предназначенных для измерения постоянных и переменных токов и мощностей, постоянного и переменного тока в широком диапазоне частот, параметров элементов электрических цепей, характеристик электромагнитных полей и других величин, а также приборов, объединяющих непрерывный и цифровой принципы действия.

2. Особое внимание должно быть обращено на повышение надежности АЦИП, на изучение связи надежности с точностью и быстродействием АЦИП.

3. Актуальны исследования, связанные с повышением чувствительности и быстродействия АЦИП, а также их помехозащищенности.

4. Нужно усилить исследования, направленные на создание теоретических основ АЦИП.

5. Дальнейшие успехи развития цифровой измерительной техники во многом зависят от создания новых и совершенствования существующих элементов АЦИП. В частности, особо важны работы по использованию в АЦИП средств вычислительной техники и методов оптимального управления процессом измерения.

Приведенный выше перечень задач, конечно, не является исчерпывающим. Однако нам представляется, что он окажется полезным для выбора направления дальнейших теоретических исследований и практических разработок в области автоматических цифровых электроизмерительных приборов. Основные мысли, высказанные в данной статье, по нашему мнению, применимы и к цифровым приборам, измеряющим разнообразными неэлектрические величины.

В обсуждении и подготовке некоторых материалов статьи принимали участие д-р техн. наук Ф. Б. Гриневич, научные сотрудники П. Е. Твердохлеб и В. М. Ефимов.

ЛИТЕРАТУРА

1. К. Б. Карандеев. Автоматические цифровые измерительные устройства. Вестн. АН СССР, 1964, № 6.
2. Ф. Е. Темников. Автоматические регистрирующие приборы. М., Машгиз, 1960.
3. Техника непрерывно-дискретного преобразования. Под ред. А. Саскина. НТООИ, 1960.
4. М. Клейн, Г. Морган, М. Аронсон. Цифровая техника для вычислений и управления. М., Изд-во иностр. лит., 1960.
5. Э. И. Гитис. Преобразователи информации для цифровых вычислительных устройств. М., ГЭИ, 1961.
6. Е. А. Дроздов, А. П. Пятибратов. Автоматическое преобразование и кодирование информации. М., Изд-во «Советское радио», 1964.
7. К. А. Нетребенко. Цифровые автоматические компенсаторы. М.—Л., ГЭИ, 1961.
8. Ф. Б. Гриневич, А. В. Чеботарев, А. И. Новик. Элементы и схемы цифровых экстремальных мостов переменного тока. Фрунзе, Изд-во АН КиргССР, 1963.
9. Ф. Б. Гриневич. Автоматические мосты переменного тока. Новосибирск, РИО СО АН СССР, 1964.
10. Электроизмерительные цифровые приборы. Под ред. В. Н. Хлистунова. М., ЦИНТИЭлектропром, 1961.
11. В. Р. Романовский. Цифровые приборы США, Англии, Франции, ФРГ и Бельгии. Приборы и средства автоматизации, 1963, № 1.
12. М. П. Цапенко. О классификации цифровых измерительных приборов. Измерительная техника, 1961, № 5.
13. Д. В. Лебедев, Е. М. Толчинский, М. В. Тяпкин. Электронное измерительное устройство ДИУ-256/1 с цифровым выходом. Приборостроение, 1961, № 11.
14. М. П. Цапенко. Автоматические измерительные компенсаторы с декадными магазинами сопротивлений. Приборостроение, 1957, № 1.

15. М. П. Цапенко, А. А. Арефьев, Б. В. Карпюк, А. Н. Касперович. Цифровой электронный многоточечный милливольтметр.— Труды конференции по автоматическому контролю и методам электрических измерений (Новосибирск. Сентябрь 1959 г.). Новосибирск, Изд-во СО АН СССР, 1961.
16. Коларчик. Быстродействующее квантующее устройство на стабилитронах. Электроника, 1962, № 33.
17. T. Kiyono, K. Ikeda, H. Jchiki. Analog — to — Digital Converter Utilizing an Esaki Diode Stack. IRE Transactions on Electronic Computer, 1962, EC — 11, № 6.
18. Paul Barr. Voltage to digital converters and digital voltmeters. Electromechanical Design, 1964, 8, № 1.
19. В. М. Шляндин. Быстродействующий электромеханический цифровой вольтметр. Измерительная техника, 1961, № 4.
20. Б. В. Карпюк. Об алгоритмическом описании процессов измерения. Измерительная техника, 1962, № 1.
21. М. П. Цапенко, В. И. Рабинович. Информационные характеристики измерительных систем.— Тезисы докладов и сообщений IV конференции по автоматическому контролю и методам электрических измерений. Новосибирск, Изд-во СО АН СССР, 1962.
22. П. Е. Твердохлеб. Сравнительная оценка двух методов аналого-дискретного преобразования.— Тезисы докладов и сообщений VI конференции по автоматическому контролю и методам электрических измерений. Новосибирск, 1964.
23. Karl Eüler. Neue Prinzipien zur Analog—Digital—Umwandlung und deren optimale Auslegung. Frequenz, 1963, 17, № 10.
24. Э. И. Гитис, Е. Г. Пронин. Обобщенные характеристики многоканального полупроводникового преобразователя напряжения в код с поразрядным кодированием. ИВУЗ, Приборостроение, 1964, № 2.
25. Э. Л. Ицкович. Статистические методы при автоматизации производства. М., Изд-во «Энергия», 1964.
26. Э. Фридрих. К вопросу о неравномерной дискретизации непрерывных сигналов. ИВУЗ, Радиофизика, 1960, № 2.
27. В. В. Ефименко. О выборе двоично-десятичного кода в приборах поразрядного уравнивания.— Тезисы докладов и сообщений V конференции по автоматическому контролю и методам электрических измерений. Новосибирск, ЦБТИ, 1963.
28. Л. И. Волгин. Способы повышения помехоустойчивости цифровых вольтметров с кодо-импульсным преобразованием.— Тезисы докладов и сообщений V конференции по автоматическому контролю и методам электрических измерений. Новосибирск, ЦБТИ, 1963.
29. Я. М. Диковский, И. И. Капралов, М. П. Цапенко. Реле с магнитоуправляемыми контактами. Авторское свидетельство № 146407. Бюллетень изобретений, 1962, № 8.
30. М. И. Ланин, С. М. Мандельштам. О применении метода статистических испытаний для измерения среднего значения быстропеременных величин.— В сб. «Применение кибернетики в электроизмерительной технике». М., ЦИНТИ-Электропром, 1963.
31. А. В. Каляев. Частотно-импульсный преобразователь непрерывных электрических величин в дискретный код.— Геофизическое приборостроение, вып. 10. Л., Гостоптехиздат, 1961.
32. F. Deist, R. Kitai. Digital transfer voltmeters: principles and error characteristics. Proc. Instn. Electr. Engrs., 1963, 110, № 10, 1887—1904.

*Поступила в редакцию
1 октября 1964 г.*