

ЦИФРОВЫЕ ПРИБОРЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

УДК 681.2.082+621.317.725

И. Ф. КЛИСТОРИН
(Новосибирск)

ЦИФРОВЫЕ ВОЛЬТМЕТРЫ ДЕЙСТВУЮЩИХ ЗНАЧЕНИЙ

(Обзор принципов построения и перспективы развития)

Обосновывается необходимость создания цифровых приборов для измерения периодических напряжений произвольной формы в широком диапазоне частот. Формулируются требования к подобным приборам и дается анализ методов и аппаратуры с точки зрения пригодности их для создания цифровых вольтметров, удовлетворяющих этим требованиям. Предлагается новый принцип построения цифровых вольтметров для измерения действующего значения напряжения в диапазоне звуковых частот.

Одной из актуальных проблем измерительной техники является создание автоматических измерительных устройств — измерительных информационных систем, позволяющих частично или полностью освободить человека от участия в процессе измерения. Решение указанной проблемы в значительной степени связано с успехами в создании автоматических цифровых измерительных приборов (АЦИП), производящих квантование и кодирование измеряемых величин и выдающих результаты измерений в цифровом виде [1]. Следует заметить, что применение цифровых машин для управления технологическими процессами и сложными объектами может быть эффективным только при наличии соответствующих дискретных устройств контроля и измерения. Кроме того, повышение точности и быстродействия измерительных устройств успешно осуществляется с помощью АЦИП. Таким образом, АЦИП решают многие задачи получения количественной информации как для ввода цифровых данных в устройства обработки и управления, так и для использования человеком-оператором [2].

Поэтому в последнее десятилетие АЦИП получили всеобщее признание и распространение, а фронт исследований, связанных с их созданием и совершенствованием, непрерывно расширяется. И несмотря на это, существующие АЦИП предназначаются в основном для измерения постоянных напряжений, амплитудных и средних значений, разности фаз и частоты синусоидальных напряжений [2 и библиография к статье].

В то же время не разработаны АЦИП для измерения действующего значения периодических напряжений и токов произвольной формы в широкой полосе частот, а также мощности электрических цепей. В подобных приборах крайне нуждается промышленное производство и научное исследование.

До недавнего прошлого средства измерения и контроля напряжения, тока и мощности в электрических цепях промышленной частоты

практически синусоидальной формы более или менее удовлетворяли потребности народного хозяйства.

Электрификация железнодорожного транспорта и особенно введение электрической тяги переменного тока, характеризующейся высокими технико-экономическими и эксплуатационными показателями, приводит к появлению в энергосистеме, питающей выпрямительные электровозы, несинусоидальных токов, а следовательно, и к искажениям формы напряжения. Исследования показали, что даже на шинах высокого напряжения питающих станций высшие гармоники могут достигать соответственно: 3-я — 15%, 5-я — 30, 7-я — 16 и 9-я — 5% основной гармоники [3].

В последние десятилетия в энергетических установках началось широкое применение токов повышенной частоты (звукового диапазона) в связи с рядом преимуществ, заключающихся главным образом в уменьшении веса и габаритов, а также в улучшении других параметров электрических машин и аппаратов. Широкое внедрение машин и аппаратов, работающих на повышенных частотах, в значительной степени обусловлено бурным развитием авиации и других видов транспортных средств. Появлению мощных энергетических установок повышенной частоты способствовало также внедрение новых технологических процессов, например индукционного нагрева металлов, термической обработки деталей и т. п.

Для правильной и экономической эксплуатации оборудования, разработки и исследований различных устройств, работающих на токах звукового диапазона частот, возникла потребность в приборах для измерения основных электрических величин (тока, напряжения и мощности) с достаточной степенью точности в широкой полосе частот (от единиц герц до нескольких мегагерц) и с большим динамическим диапазоном (от микроампер и микровольт до сотен тысяч ампер и вольт) [4].

Для измерения и автоматического контроля ряда производственных процессов и объектов широко применяются первичные преобразователи (датчики) с выходом на переменном токе (индуктивные, индукционные, магнитоупругие и др.). С одной стороны, форма выходных напряжений большинства этих датчиков отличается от синусоидальной из-за наличия нелинейных элементов, в частности — цепей с ферромагнитными сердечниками. С другой стороны, преобразователи, работающие на повышенных частотах (в звуковом диапазоне), обладают улучшенными характеристиками (габариты, вес, помехозащищенность, главным образом от наводок промышленной частоты и др.). Следовательно, и в этом случае необходима аппаратура, пригодная для измерения напряжения искаженной формы в широкой полосе частот.

Исследование новых магнитных материалов и изделий из них связано с измерением напряжений и токов в диапазоне от промышленной до ультразвуковых частот резко искаженной формы, коэффициент амплитуды которой достигает зачастую 10—20. Причем в этих случаях необходимо знать среднее значение тока (напряжения), его коэффициент формы и другие параметры. Измерительная аппаратура для этих целей с удовлетворительными метрологическими и эксплуатационными характеристиками в настоящее время практически отсутствует.

Успехи исследований в области акустики и гидроакустики в значительной степени определяются совершенством электроизмерительной аппаратуры, работающей в непрерывном диапазоне от инфранизких до ультразвуковых частот.

Высокие требования к технике измерений переменных напряжений в еще более широком диапазоне частот предъявляются при геофизиче-

ских исследованиях. Методы электроразведки, используемые в структурной, разведочной и скважинной геофизике, охватывают диапазон частот от 10^{-4} до 10^7 *гц* [5]. В ряде методов электроразведки (частотное электромагнитное зондирование, зондирование становлением и др.) форма измеряемых напряжений существенно отличается от синусоидальной.

Таким образом, изложенное выше показывает, что назрела необходимость поиска путей создания дискретных устройств для измерения основных электрических величин (напряжения, тока и мощности) в широкой полосе частот, обладающих большим динамическим диапазоном и свободных от влияния формы измеряемых величин. По нашему мнению, в первую очередь следует обратить внимание на разработку принципов построения цифровых приборов для измерения напряжения, а именно — его действующего значения.

Основные требования, которым в совокупности должны удовлетворять методы и средства измерения переменного напряжения, сводятся к следующему: независимость показаний от формы измеряемого напряжения в сравнительно широкой полосе частот, малый порог чувствительности и высокое входное сопротивление, достаточное быстродействие и возможность сравнительно просто автоматизировать процесс измерения с выдачей результата в цифровой форме. Исходя из этих требований, рассмотрим методы и аппаратуру, предназначенные для измерения переменного напряжения.

ПРИБОРЫ С НЕПОСРЕДСТВЕННЫМ ОТСЧЕТОМ

В первую очередь, по-видимому, целесообразно рассмотреть приборы, содержащие электродинамические, электромагнитные и электростатические измерительные механизмы.

Электродинамические и электромагнитные механизмы являются одними из наиболее точных. Однако из-за наличия катушек взаимной индуктивности (у первых) и катушек индуктивности и ферромагнитных сердечников (у вторых) они пригодны для измерения напряжений в сравнительно узком диапазоне частот (до 2000—3000 *гц*) и обладают большим собственным потреблением энергии. Следовательно, они в значительной степени не удовлетворяют указанным выше требованиям.

Электростатические механизмы свободны от этих недостатков и поэтому заслуживают более детального рассмотрения. Действительно, электростатические механизмы можно успешно применять для измерения действующего значения напряжения в полосе частот от нуля герц до десятков мегагерц практически без потребления энергии от измеряемого объекта.

Укоренившееся мнение, что электростатические измерительные механизмы из-за малого вращающего момента могут выполняться для измерения только очень больших напряжений (порядка сотен вольт) и низких классов точности, в последние годы опровергнуто рядом исследований. В настоящее время созданы электростатические приборы класса 0,1 и 0,05 с пределом измерения 75 *в* [6].

Особого внимания заслуживает электростатический механизм, выходной величиной которого является частота колебаний подвижной части [7]. Поскольку действие измеряемого напряжения сравнивается не с моментом растяжек (пружин), а с моментом инерции (массой) подвижной части, значительно уменьшаются остаточные деформации и упругое последствие, которые ограничивают точность приборов. Вследствие этого, по утверждению автора, появляется возможность создать измери-

тельный механизм, обладающий погрешностью порядка сотых долей процента. Однако рассматриваемый измерительный механизм имеет и ряд существенных недостатков. Динамический диапазон измеряемых напряжений составляет от 50 до 300 в, и изменение частоты колебаний на его выходе равно примерно 1 гц на 100 в изменения измеряемого напряжения. Время установления стационарного показания на нижнем пределе составляет приблизительно 20 сек, а на верхнем — около 4 сек.

Электростатические измерительные механизмы для приборов высоких классов точности требуют учета влияния атмосферного давления, влажности, температуры и других факторов и, следовательно, соответствующего конструктивного и технологического выполнения отдельных узлов и всего прибора в целом [6].

Для измерения малых напряжений (до единиц милливольт) в последние годы широко начали применять в сочетании с электростатическим измерительным механизмом усилители, охваченные глубокой обратной связью (автокомпенсационные усилители) [8]. Лучшие типы подобных приборов имеют класс точности 1,5 и 1,0, который определяется в значительной степени погрешностью электростатического измерительного механизма.

В случае применения электростатического измерительного механизма (кстати, как и любого другого электромеханического) в качестве основного измерительного элемента цифрового прибора быстрдействие, а также надежность последнего предопределяются измерительным механизмом.

По нашему убеждению, электростатические измерительные механизмы могут быть применены для создания цифровых приборов только уникального назначения, например, для метрологических или специальных целей, т. е. когда можно создать исключительно благоприятные условия работы и время измерения практически не ограничивается. Кроме того, следует отметить, что стоимость этих приборов непомерно велика и, к сожалению, пока не видно путей ее резкого снижения. Например, стоимость электростатического прибора кл. 0,05 составляет примерно 6000 руб.

Возникают также технические трудности, связанные с преобразованием отклонения подвижной части измерительного механизма в цифровой отсчет. Таким образом, создание цифровых вольтметров с использованием измерительных механизмов электромеханического типа является, по нашему мнению, неперспективным.

Несомненный интерес представляет группа приборов, использующих автокомпенсационные усилители и преобразователи переменного тока в постоянный с магнитоэлектрическим измерительным механизмом [8]. Эти приборы обладают весьма высокой чувствительностью, большим входным сопротивлением и пригодны для работы в широкой полосе частот.

В случае применения в качестве преобразователя рода тока линейных выпрямителей показания прибора пропорциональны амплитудному или среднему значению измеряемой величины.

Линейные преобразователи, охваченные совместно с усилителем глубокой обратной связью, достигли весьма высокой степени совершенства [9]. У лучших образцов погрешность преобразования не превышает 0,1%. И поэтому в современных цифровых приборах, пригодных для измерения переменного напряжения, используются именно эти преобразователи.

Следует указать на одну особенность подобных преобразователей. Для низких частот (порядка десятков герц) время установления на-

пряжения на выходе преобразователя составляет величину порядка нескольких секунд из-за необходимости включения интегрирующих цепей с довольно большими постоянными времени для получения малых пульсаций.

Очевидно, что для точного измерения действующего значения напряжения необходимы прецизионные квадратичные выпрямители. К сожалению, до настоящего времени преобразователей с необходимыми характеристиками нет [10, 11]. Решение этой важной задачи измерительной техники зависит в значительной степени от разработки специальных элементов, обладающих соответствующими характеристиками.

Для измерения действующего значения напряжения получили распространение приборы, использующие усилители с глубокой обратной связью и термопреобразователи в качестве преобразователей рода тока [8, 12]. Применение указанных преобразователей для создания цифровых вольтметров является перспективным, однако пока встречается ряд трудностей, связанных главным образом с малой чувствительностью цифровых приборов постоянного тока и термопреобразователей, а также нестабильностью последних.

КОМПАРАТОРЫ

Наиболее точными средствами измерения тока, напряжения и мощности переменного тока являются компараторы — приборы, сравнивающие неизвестную величину переменного тока с эквивалентной ей по действию величиной постоянного тока. Эти приборы получили преимущественное распространение в метрологической практике и в виде исключения — в благоприятных лабораторных условиях [4].

Современные компараторы являются приборами с ручным или полуавтоматическим [13] уравниванием и требуют значительного времени на уравнивание и квалифицированного обслуживания.

Анализ компараторов показал, что для построения цифровых приборов, удовлетворяющих приведенным выше требованиям,

а) электромеханические компараторы не пригодны в основном по тем же соображениям, что и измерительные механизмы приборов с непосредственным отсчетом;

б) электротепловые компараторы представляют несомненный интерес, и необходимо искать пути значительного повышения их быстродействия и чувствительности, а также автоматизации процесса уравнивания.

При решении указанных задач компараторы могут входить в автоматические цифровые приборы переменного тока в качестве основных функциональных узлов.

КОМПЕНСАЦИОННЫЙ МЕТОД

Компенсационный метод является одним из наиболее точных методов измерения. Однако использование компенсационного метода переменного тока нуждается в соблюдении некоторых специфических условий, невыполнение которых приводит к невозможности проведения измерения или к появлению дополнительных погрешностей. Эти условия требуют совпадения частот и форм кривых измеряемого и компенсационного напряжений [14]. Первое требование в современных компенсаторах удовлетворяется тем, что измеряемая и компенсационная цепи пи-

таются от одного источника через разделительные трансформаторы. Выполнение второго требования обеспечивается питанием от источников напряжения, форма которых возможно близка к синусоидальной. Уравновешивание в компенсаторах производится по двум параметрам: по модулю и фазе в полярной системе координат или активной и реактивной составляющим вектора напряжения в прямоугольной системе координат*.

Для поворота вектора компенсирующего напряжения или получения двух ортогональных составляющих этого вектора обычно применяются фазовращающие (в полярных компенсаторах) или фазорасщепляющие (в прямоугольных компенсаторах) цепи. Обычно фазовращающие и фазорасщепляющие цепи состоят из частотозависимых элементов, обеспечивающих допустимые погрешности поворота или сдвига фазы в весьма узком диапазоне частот. Поэтому компенсаторы работают в лучшем случае на нескольких фиксированных частотах узкого диапазона.

Устройства сравнения, применяемые в компенсаторах, фазочувствительны (вибрационный гальванометр, электронные устройства) или фазочувствительны (ферродинамический гальванометр, электронные устройства и др.), но, как правило, избирательны и настроены на первую гармонику компенсационного напряжения. Значительно реже применяются устройства сравнения, реагирующие на все гармоники [15].

Автоматические цифровые компенсаторы переменного тока, предназначенные для измерения составляющих вектора напряжения определенной частоты, представляют самостоятельный класс приборов специализированного назначения [15—17].

На основании изложенного можно сделать вывод, что компенсационный метод переменного тока в его классическом понимании пригоден для точного измерения только синусоидальных напряжений, а также коэффициентов передачи четырехполюсников или параметров электрических цепей, и не удовлетворяет в полной мере перечисленным выше требованиям.

КОСВЕННЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЕРИОДИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ

Интегральные характеристики периодических напряжений произвольной формы можно определить путем автоматической обработки результатов измерения ряда мгновенных значений напряжений с помощью средств дискретной вычислительной техники [18]. Мгновенные значения напряжения в этом случае измеряются быстродействующим аналого-цифровым преобразователем.

Сложность прибора и его характеристики определяются исходным аналого-цифровым преобразователем, его разрешающей способностью и быстродействием, а также методикой обработки мгновенных значений напряжения [19]. Нахождение оптимальных решений в этом направлении сулит, по нашему мнению, перспективность подобным приборам.

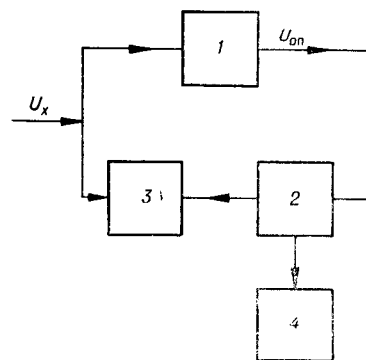
Основным достоинством этого принципа определения действующего и среднего значений напряжения является возможность практически неограниченного расширения частотного диапазона измеряемых напряжений в область нижних частот и получения результата измерения с большой скоростью и высокой точностью.

* Значительно реже встречаются компенсаторы, использующие косоугольную систему координат [15].

НОВЫЙ ПРИНЦИП ПОСТРОЕНИЯ ЦИФРОВЫХ ВОЛЬТМЕТРОВ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Предлагаемый принцип действия цифровых вольтметров переменного тока поясняется блок-схемой, представленной на рисунке.

Измеряемое напряжение (э. д. с.), в общем случае несинусоидальное, спектр частот* которого укладывается в определенный диапазон, подается на широкополосный усилитель с автоматической регулировкой коэффициента передачи по измеряемому сигналу 1, названный устройством формирования опорного напряжения (ФОН). В зависимости от конкретных требований, предъявляемых к колебаниям величины опорного напряжения, быстродействию устройства ФОН и др., оно может иметь одну или несколько отдельных цепей автоматической регулировки коэффициента передачи.



Устройство ФОН предназначено для получения опорного напряжения, форма которого повторяет форму измеряемого, а его величина остается постоянной независимо от уровня последнего в границах данного предела измерения. Это достигается тем, что в процессе формирования выходное напряжение широкополосного усилителя сравнивается с образцовым постоянным напряжением при помощи компаратора действующего, среднего или амплитудного значений. В зависимости от разности сравниваемых напряжений автоматически устанавливается такой коэффициент передачи усилителя, при котором выходное напряжение в устройстве ФОН равно образцовому постоянному напряжению с определенной точностью. При этом соблюдается очевидное соотношение

$$U_x = \frac{U_{оп}}{K_n},$$

где K_n — коэффициент передачи устройства ФОН.

Поскольку измеряемое и опорное напряжения практически совпадают по форме и во времени, то для определения коэффициента передачи, а следовательно, и измеряемого напряжения может быть применен компенсационный метод с уравниванием по одному параметру. Для этого из опорного напряжения делителем 2 формируется ряд дискретных значений (в определенном коде) компенсационного напряжения, с которым сравнивается измеряемое напряжение с помощью устройства сравнения 3. По положению переключающих элементов делителя или связанному с ними цифровому отсчетному устройству 4 определяют численное значение измеряемой величины.

При уравнивании измеряемого напряжения компенсационным их разность не может быть сведена к нулю вследствие неизбежных фазовых, амплитудных и нелинейных искажений в устройстве ФОН, т. е. из-за неполного совпадения форм сравниваемых напряжений и сдвига между ними во времени. Определить допустимые искажения на основании заданной погрешности измерения в общем виде, к сожалению, не

* Практически ограничиваемся конечным числом гармоник, например 5 или 7-й.

удается. По-видимому, требования, предъявляемые к искажениям в устройстве ФОН, будут в значительной степени обуславливаться принципом действия устройства сравнения.

При малых искажениях в устройстве ФОН успешно могут быть применены устройства сравнения в виде двухполупериодного синхронного детектора [20]. В частном случае измерения синусоидального сигнала измеряемое и компенсационное напряжения связаны соотношением

$$U_x \cos \varphi = U_n,$$

откуда после некоторых преобразований (при малых углах сдвига фазы) можно получить выражение, определяющее погрешность измерения:

$$\delta_\varphi \approx \frac{\varphi^2}{2}.$$

Легко показать, что погрешность из-за наличия нелинейных искажений для рассматриваемого случая определяется подобным же выражением

$$\delta_n = \frac{\gamma^2}{2},$$

где γ — клирфактор.

Очевидно, что при измерении несинусоидальных напряжений зависимости погрешностей от искажений усложняются, и, как показывает анализ, наибольшее влияние оказывают фазовые искажения.

Исследования устройств ФОН и милливольтметров с использованием последних выявили возможность создания приборов для измерения действующего значения напряжения с погрешностью в несколько десятых долей процента в диапазоне звуковых частот [21, 22].

ВЫВОДЫ

Показана необходимость изыскания путей создания цифровых приборов для измерения действующих значений периодических напряжений произвольной формы в широкой полосе частот. На основании анализа существующих методов и средств измерения переменных напряжений выяснено, что наиболее перспективными для создания цифровых приборов, предназначенных для измерения интегральных характеристик (действующего и среднего значений), являются:

1) измерение мгновенных значений напряжений с помощью дискретных измерительных устройств с последующей обработкой по заданному алгоритму;

2) использование быстродействующих компараторов в сочетании с масштабными преобразователями, и в частности, с усилителями с глубокой обратной связью.

Кроме того, предложен новый принцип построения цифровых милливольтметров и вольтметров для измерения периодических напряжений произвольной формы в диапазоне частот.

В заключение автор выражает глубокую благодарность чл.-корр. АН СССР К. Б. Карандееву и д-ру техн. наук М. П. Цапенко, сделавшим ряд полезных замечаний при обсуждении настоящей работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. К. Б. Карандеев. Автоматические цифровые измерительные устройства.— Вестник АН СССР, 1964, № 6.
2. А. Н. Касперович, И. Ф. Клисторин, М. П. Цапенко. Автоматические цифровые электроизмерительные приборы.— Автометрия, 1965, № 1.
3. Л. В. Бычков. Влияние несинусоидальности напряжений и токов цепей энергоснабжения электрических железных дорог на измерение и учет электроэнергии.— Автореф. дисс. Омск, ОИИЖТ, 1965.
4. Т. Б. Рождественская. Электрические компараторы для точных измерений тока, напряжения и мощности. М., Изд-во стандартов, 1964.
5. Ю. В. Якубовский, Л. Л. Ляхов. Электроразведка. Л., изд-во «Недра», 1964.
6. С. М. Пигин. Электростатические приборы высокой точности. Автореф. дисс. Л., ЛЭТИ, 1962.
7. А. Н. Гурова. Новый метод построения электростатических вольтметров с цифровым отсчетом.— Измерительная техника, 1963, № 7.
8. П. П. Орнатский. Автоматические измерительные приборы. Киев, изд-во «Техніка», 1965.
9. Б. И. Швецкий. Электронные измерительные приборы с цифровым отсчетом. Киев, изд-во «Техніка», 1964.
10. Л. И. Волгин. Зависимость погрешности измерения эффективного значения напряжения от вида вольт-амперной характеристики детектора.— ИВУЗ, Приборостроение, 1964, т. VII, № 3.
11. Б. Г. Кадук, А. И. Гладский. Анализ и исследование некоторых схем квадратичных детекторов.— Измерительная техника, 1963, № 2.
12. Вольтметр для измерения истинных эффективных значений напряжения на частотах до 50 мГц.— Электроника, 1963, № 11.
13. Б. А. Перминов, М. С. Ройтман, Э. И. Цимбалист. Компаратор переменного тока на фотоэлектрических преобразователях.— Автометрия, 1965, № 5.
14. К. Б. Карандеев. Специальные методы электрических измерений. М.—Л., Госэнергоиздат, 1963.
15. Л. Ф. Куликовский, А. М. Мелик-Шахназаров. Компенсаторы переменного тока. М., Госэнергоиздат, 1960.
16. Г. М. Алиев, А. М. Мелик-Шахназаров, И. Л. Шайн. Автоматические компенсационные устройства переменного тока. Баку, изд-во «АЗЕРНЕШР», 1965.
17. М. П. Цапенко. Автоматические измерительные компенсаторы с декадным магнитным сопротивлением.— Приборостроение, 1957, № 1.
18. F. Deist, R. Kitai. Digital Transfer Voltmeters: Principles and Error Characteristics.— Proc Instr. Electr. Engrs, 1963, v. 110, pp. 1887—1904. Экспресс-информация, серия «Контрольно-измерительная техника», 1964, № 3.
19. И. Ф. Клисторин, И. И. Коршевер. Определение интегральных характеристик напряжений произвольной формы путем обработки результатов измерений мгновенных значений.— Автометрия, 1966, № 2.
20. С. Т. Васьков. Об одном способе измерения переменных напряжений по действующему значению.— Изв. Сиб. отд. АН СССР, 1963, серия техн. наук, вып. 1, № 2.
21. С. Т. Васьков, И. Ф. Клисторин, А. М. Ковалев, И. И. Коршевер, Г. Г. Матушкин. Цифровой милливольтметр переменного тока.— Автометрия, 1966, № 2.
22. В. М. Белов, С. Т. Васьков, И. Ф. Клисторин, А. М. Ковалев, И. И. Коршевер, Г. Г. Матушкин. Французский патент № 1.409. 950.

*Поступила в редакцию
16 декабря 1965 г.*