

**ЦИФРОВЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА
МЕТОДЫ ПОСТРОЕНИЯ**

УДК 621.317.725

И. Ф. КЛИСТОРИН, И. И. КОРШЕВЕР

(Новосибирск)

**МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
ПЕРЕМЕННЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПУТЕМ ОБРАБОТКИ
ИХ МГНОВЕННЫХ ЗНАЧЕНИЙ***

Предложена геометрическая интерпретация методов численного интегрирования с целью определения интегральных характеристик периодических напряжений произвольной формы. Это позволило систематизировать существующие и предложить новые методы определения действующего значения напряжений. Приведены возможные реализации и сравнительные характеристики рассмотренных методов с точки зрения точности, быстродействия и структурной сложности.

Среди существующих в литературе работ, посвященных вопросу определения действующего значения переменного напряжения путем обработки мгновенных значений этого напряжения при фиксированном временном параметре или временных интервалов при фиксированном уровне напряжения, авторам не известны попытки систематизации описанных методов с целью сравнения их по тем или иным признакам.

Поставленная в [1] задача — определение корреляционных функций — более широка, чем рассматриваемая в данной работе. Поэтому систематизация, приведенная в [1], чрезвычайно обща, и классификации методов цифровой обработки в ней уделяется мало внимания.

В настоящей статье на основе кратного численного интегрирования предпринята попытка обобщить и систематизировать существующие и возможные методы определения действующего значения напряжения путем обработки и дать им по возможности сравнительную характеристику с точки зрения структурной сложности, быстродействия и точности измерения.

Величина среднего и действующего значений ниже приведена к временному параметру $t = \frac{\bar{t}}{T}$, нормированному относительно периода напряжения T (\bar{t} — текущее значение времени). Следовательно, $0 \leq t \leq 1$. Тогда

$$U_{cp} = \int_0^1 u(t) dt; \quad (1a)$$

$$U^2 = \int_0^1 u^2(t) dt. \quad (1б)$$

* Материал доложен на VIII Всесоюзной конференции по автоматическому контролю и методам электрических измерений в сентябре 1966 года в Новосибирске.

Для получения интегральных характеристик методом обработки мгновенных значений временная переменная t представляется в виде множества отстоящих друг от друга на величину временного подинтервала τ моментов взятия отсчетов мгновенных значений $t_{kj}^{\alpha v}$, а напряжение $u(t)$ в виде цифрового кода $u_k = k \Delta u$ ($k=1, 2, \dots, n$ — порядковый номер уровня квантования напряжения; рис. 1). Здесь $\alpha=1$ при возрастании сигнала в момент пересечения им k -го уровня и $\alpha=-1$ при его

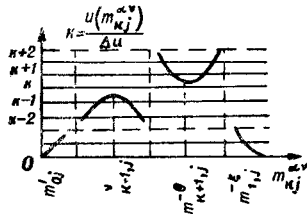


Рис. 1. Квантование сигнала по времени и уровню.

убыванию; v — порядковый номер максимума, в окрестностях которого взят отсчет, соответствующий моменту времени $t_{kj}^{\alpha v}$; $v=1, 2, \dots, \theta, \dots, \xi$; $j=1, 2, \dots, i$ — порядковый номер отсчета, взятого в течение его пребывания внутри подинтервала $[k, k+1]$ при $\alpha=1$ и подинтервала $[k-1, k]$ при $\alpha=-1$ (см. рис. 1).

Таким образом, $t_{01}^1 = \tau$ и $1 - \tau < t_{1i}^{-\xi} \leq 1$. Количество отсчетов, содержащихся во временном интервале $t_{kj}^{\alpha v}$, обозначим через $m_{kj}^{\alpha v} = \frac{t_{kj}^{\alpha v}}{\tau}$ ($m_{kj}^{\alpha v} = 1, 2, \dots, m_{1i}$) и, следовательно, $m_{01}^1 = 1$ и $\frac{1}{\tau} - 1 < m_{1i}^{-\xi} \leq \frac{1}{\tau}$.

Кроме того,

$$i = \begin{cases} m_{k+1,1}^v - m_{k,1}^v & \text{при } \alpha=1; \\ m_{k,1}^{-v} - m_{k,1}^v & \text{при нахождении максимума внутри подинтервала } [k-1, k]; \\ m_{k-1,1}^{-v} - m_{k,1}^{-v} & \text{при } \alpha=-1; \\ m_{k+1,1}^{v+1} - m_{k+1,1}^{-v} & \text{при нахождении минимума внутри подинтервала } [k, k+1]. \end{cases}$$

Таким образом, текущее количество отсчетов $m_{kj}^{\alpha v}$ является фактически текущим значением времени, нормированного относительно периода напряжения и вторично нормированного относительно временного подинтервала τ для представления выражений (1а) и (1б) в виде интегральной суммы. Тогда

$$U_{\text{ср}} = \sum_{m_{01}^1}^{m_{1i}^{-\xi}} u(m_{kj}^{\alpha v}); \quad (2a)$$

$$U^2 = \sum_{m_{01}^1}^{m_{1i}^{-\xi}} u^2(m_{kj}^{\alpha v}). \quad (2б)$$

Пользуясь языком приближенного интегрирования, можно сказать, что интервал интегрирования $[0, 1]$ разбит на равные подинтервалы τ , а интервал изменения величины сигнала — на равные подинтервалы Δu .

Очень плодотворным, на наш взгляд, является геометрическое представление процесса получения интегральных характеристик. Так, среднее значение сигнала произвольной формы при нормированном времен-

ном параметре интерпретируется площадью, ограниченной временной осью и функцией сигнала, или же амплитудой прямоугольного импульса, обладающего площадью, равновеликой вышеуказанной площади, и длительностью, равной величине нормированного периода сигнала (рис. 2, а).

Аналогично тому, как аналитическое понятие среднего значения переменного напряжения в геометрической интерпретации приводит к площади, понятие квадрата действующего значения интерпретируется объемом. Действительно, представим себе, что аналитическое выражение (1б) получено в результате вычисления объема тела, образованного перемещением вдоль оси t ортогональной ей площади величиной $u^2(t)$.

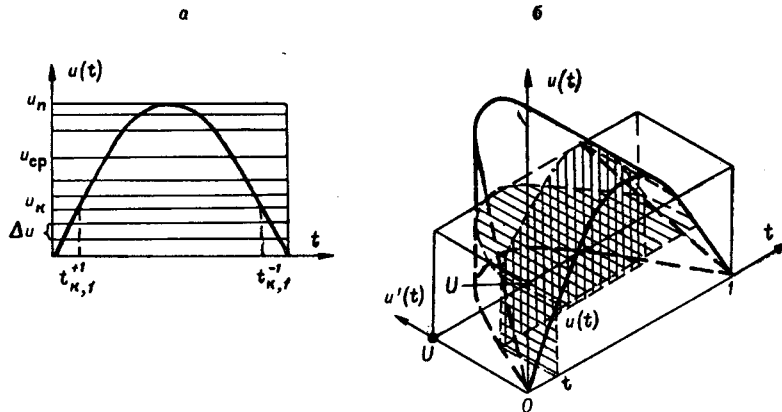


Рис. 2. Геометрическое представление интегральных характеристик переменных напряжений:
а — среднего значения; б — действующего значения.

Наиболее удобной для рассмотрения фигурой, площадь которой равна $u^2(t)$, является квадрат со сторонами $u(t)$. Путем перемещения этой фигуры вдоль оси t образуется тело, изображенное на рис. 2, б. Оно получено, по существу, в результате взаимного пересечения двух цилиндрических тел, каждое из которых построено на площади, ограниченной функцией сигнала и временной осью, как на основании, и оси которых ортогональны друг другу и своим основаниям.

Искомое действующее значение этого сигнала есть сторона квадрата, лежащего в той же плоскости, что и квадрат со сторонами $u(t)$, и образующего при перемещении этой плоскости вдоль оси t призматическое тело, равновеликое по объему телу, полученному перемещением квадрата со сторонами $u(t)$ (см. рис. 2, б).

Алгоритмы определения интегральных характеристик вытекают из возможных методов получения площадей и объемов. Эти методы различаются принятой переменной интегрирования и элементом интегральной суммы.

Выражения (2а) и (2б) являются простейшими алгоритмами подобного рода. В качестве переменной интегрирования в них используется временной параметр t , а в качестве элемента интегральной суммы — код мгновенного значения напряжения $u(m_{kj}^{av})$, интерпретируемый ординатой, или код квадрата этого значения, интерпретируемый площадью сечения тела, ортогонального временной оси (рис. 3, а).

Так как выражения (2) предполагают равномерное разбиение интервала интегрирования на подинтервалы, то в качестве кодирующего устройства здесь удобно использовать АЦП, в котором выдача кода

синхронизована некоторой внутренней частотой, например АЦП по-разному уравнивания. Такой способ получения интегральных характеристик широко распространен, так как реализуется простыми средствами (см. рис. 3, б). Кстати, выражения (1а) и (1б) являются математической моделью всех существующих аналоговых способов получения интегральных характеристик периодических напряжений.

Погрешность определения среднего и действующего значений, очевидно, тем меньше, чем больше подинтервалов τ содержится в интервале интегрирования. Так как величина подинтервала определяется временем выдачи кода с выхода АЦП, то необходимо использовать быстродействующий АЦП и дискретные вычислительные средства. Но даже и в этом случае класс функций, которые в состоянии обрабатывать устройство, основанное на таком методе, ограничивается сигналами с фронтами небольшой крутизны, определяемой способностью применяемого АЦП к непрерывному слежению. При достаточно высоком быстродействии АЦП крутизна фронта сигнала ограничена быстродействием вычислительных средств, так как операция возведения в квадрат и суммирования должна быть произведена в промежутке времени τ между двумя соседними отсчетами.

Сечение тела, интерпретирующего квадрат действующего значения, семейством параллельных плоскостей $u(t) = k\Delta u$ и $u'(t) = k\Delta u'$ приводит

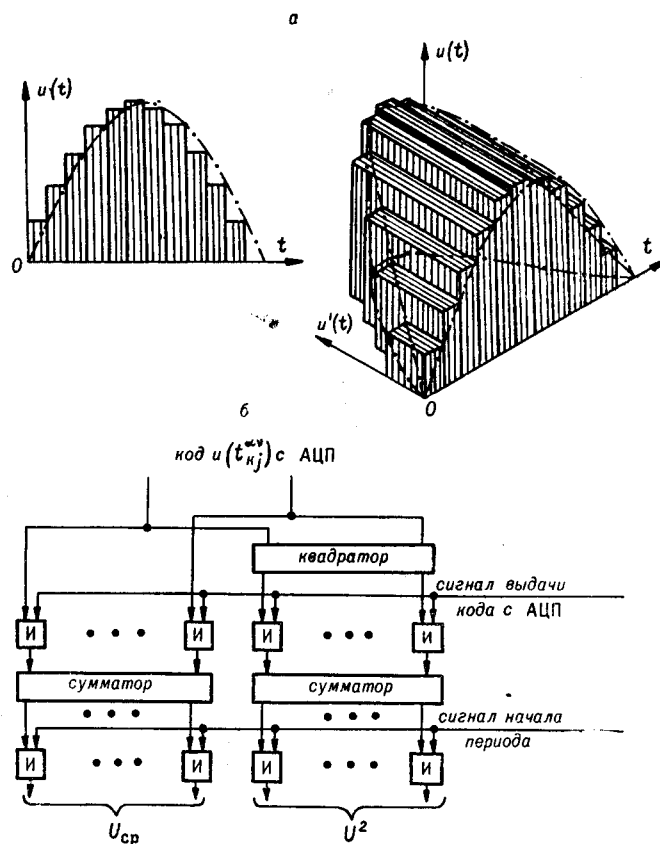


Рис. 3. Интегрирование по временному аргументу:
 а — геометрическое представление процесса интегрирования; б — блок-схема устройства.

к интегральной сумме одного и того же вида (рис. 4, а). Элементом этой суммы S_k является часть сигнала $u(t)$, проинтегрированная в интервале времени $[t_{k,1}^v, t_{k,1}^{v-1}]$, в течение которого мгновенные значения сигнала находились выше некоторого уровня $k\Delta u$, являющегося переменной интегрирования:

$$S_k = \sum_{m_{kj}^{av} = m_{k,1}^v}^{m_{k,1}^{v-1}} u(m_{kj}^{av}), \quad (3)$$

тогда

$$U^2 = \Delta u \sum_{k=0}^n S_k = \Delta u \sum_{k=0}^n \sum_{v=1}^{\xi} \sum_{m_{kj}^{av} = m_{k,1}^v}^{m_{k,1}^{v-1}} u(m_{kj}^{av}).$$

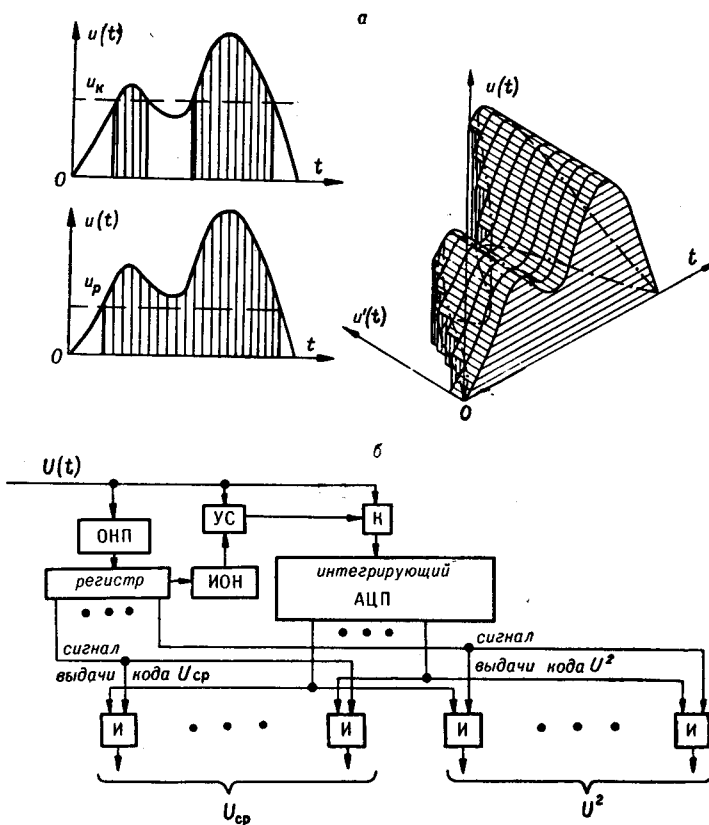


Рис. 4. Двукратное интегрирование по переменным времени и уровню напряжения: а — геометрическое представление процесса интегрирования; б — блок-схема устройства: ОНП — устройство определения начала периода; УС — устройство сравнения; К — ключ; ИОН — источник опорных напряжений.

К аналогичному результату приходим из простых аналитических соображений. Для упрощения выкладок представим, что квантуется лишь одно из перемножаемых напряжений $u'(t)$, т. е. $u'(t) = k\Delta u'$ на интервале $[k-1, k]$, а второе напряжение $u(t)$ обладает одним максимумом и интегрируется в аналоговом виде. Тогда из (1б) следует

$$U^2 = \int_0^1 k \Delta u' u(t) dt = \Delta u' \sum_{k=1}^n k a \int_{t_{k-1,1}^{av}}^{t_{k,1}^{av}} u(t) dt.$$

Обозначим

$$a \int_{t_{k-1,1}^{av}}^{t_{k,1}^{av}} u(t) dt = \Delta U_k^{av}.$$

Тогда

$$\begin{aligned} U^2 &= \Delta u \sum_{k=1}^n k \Delta U_k^{av} = \Delta u [\Delta U_1^1 + 2\Delta U_2^1 + \dots + \\ &+ (n-1)\Delta U_{n-1}^1 + n\Delta U_n^1 + (n-1)\Delta U_{n-1}^{-1} + \dots + \\ &+ 2\Delta U_2^{-1} + \Delta U_1^{-1}] = \Delta u [(\Delta U_1^1 + \Delta U_2^1 + \dots + \\ &+ \Delta U_{n-1}^1 + \Delta U_n^1 + \Delta U_{n-1}^{-1} + \dots + \Delta U_2^{-1} + \Delta U_1^{-1}) + \\ &+ (\Delta U_2^1 + \dots + \Delta U_{n-1}^1 + \Delta U_n^1 + \Delta U_{n-1}^{-1} + \dots + \Delta U_2^{-1}) + \\ &+ \dots + (\Delta U_{n-1}^1 + \Delta U_n^1 + \Delta U_{n-1}^{-1}) + \Delta U_n^1.] \end{aligned} \quad (4)$$

Каждый из стоящих в скобках многочленов есть среднее значение сигнала на интервалах времени, в течение которых сигнал находится выше некоторого уровня квантования напряжения $u'(t)$. Если перебраны все n уровней, то (4) можно записать так:

$$U^2 = \Delta u \sum_{k=0}^n \int_{t_{k,1}^{av}}^{t_{k,1}^{-av}} u(t) dt. \quad (5)$$

В случае, когда функция обладает несколькими максимумами, приходим к аналогичному результату (см. рис. 4, б):

$$U^2 = \Delta u \sum_{v=1}^{\varepsilon} \sum_{k=0}^n \int_{t_{k,1}^{av}}^{t_{k,1}^{-av}} u(t) dt. \quad (5a)$$

Для реализации такого метода (см. рис. 4, б) необходимо осуществить последовательный перебор мер, соответствующих всем оцифрованным значениям шкалы напряжений, причем управление этим перебором должно осуществляться от устройства, определяющего момент начала периода (ОНП). Ключ К, таким образом, открывается лишь на время,

в течение которого мгновенные значения сигнала превышают данный уровень. Затем происходит интегрирование полученной серии выборок сигнала по переменному временному параметру и, следовательно, к окончанию n -го периода в сумматоре накопится значение квадрата действующего значения.

Если использован АЦП поразрядного уравнивания, как и в описанном выше случае, то преимущества такого метода незначительны. Они определяются в основном тем, что исключается операция возведения в квадрат, а следовательно, источник потери времени между соседними отсчетами. Преимущества такого метода очевидны, если в качестве устройства для получения средних значений использован какой-либо несложный интегратор, аналоговый или частотный. В этом случае такое интегрирующее устройство дополняется квантующей приставкой, производящей последовательный перебор уровней в течение n периодов или одновременно осуществляющей сравнение всех оцифрованных уровней шкалы с сигналом. В последнем случае обработку можно производить в течение одного периода изменения напряжения, однако необходимо некоторое усложнение аппаратуры, так как на каждый из уровней квантования понадобится пороговое устройство и регистр времени. Если в последнем случае применить неравномерную шкалу квантования [2], то количество необходимой аппаратуры существенно уменьшается.

Существует, однако, модификация алгоритма (5), позволяющая производить вычисления эффективного значения напряжения одновременно с измерением амплитуд сигнала. Действительно, подставим вместо элементов суммы (4) $\Delta U_k^{\alpha y}$ разности:

$$\Delta U_k^{\alpha y} = \begin{cases} U_{k,1}^y - U_{k-1,1}^y & \text{при } \alpha = 1; \\ U_{k-1,1}^{-y} - U_{k-1,1}^y & \text{при нахождении максимума внутри} \\ & \text{подинтервала } [k-1, k]; \\ U_{k,1}^{-y} - U_{k-1,1}^{-y} & \text{при } \alpha = -1; \\ U_{k,1}^{y+1} - U_{k,1}^{-y} & \text{при нахождении минимума внутри} \\ & \text{подинтервала } [k, k-1]. \end{cases}$$

Здесь

$$U_k^{\alpha y} = \int_0^{\alpha y_{k,1}} u(t) dt.$$

Тогда из (4) получаем:

$$\begin{aligned} U^2 &= \Delta u [U_1^1 + 2(U_2^1 - U_1^1) + \dots + (n-1)(U_{n-1}^1 - U_{n-2}^1) + \\ &+ n(U_{n-1}^{-1} - U_{n-1}^1) + (n-1)(U_{n-2}^{-1} - U_{n-1}^{-1}) + \dots + \\ &+ 2(U_2^{-1} - U_3^{-1}) + (U_1^{-1} - U_2^{-1})] = \Delta u (-U_1^1 - U_2^1 - \dots - \\ &- U_{n-1}^1 + U_n^1 + U_{n-1}^{-1} + \dots + U_2^{-1} + U_1^{-1}) = \\ &= \Delta u \sum_{k=1}^n U_k^{\alpha y} (-\alpha). \end{aligned} \quad (6)$$

Нетрудно убедиться, что при содержании в функции сигнала нескольких максимумов формула (6) также справедлива.

Согласно (6), элементы среднего значения, интегрируемые от начала периода до момента пересечения сигнала с k -м уровнем, следует,

в свою очередь, интегрировать по переменному временному параметру так, чтобы так интегрирования задавался моментами пересечения сигналом уровней квантования напряжения, причем элементы второй интегральной суммы должны учитываться со знаком «минус» при $\alpha = +1$ и со знаком «плюс» при $\alpha = -1$. На рис. 5, а приведено геометрическое построение, поясняющее процесс интегрирования по данному алгоритму. Построение фиксирует момент $t_{k,1}^{-2}$. Пусть $i\Delta u$ — произвольно взятый квантованный уровень напряжения. Приведем в соответствие каждому элементу $U_i^{-\nu}$, учтенному в момент $t_{i,1}^{\nu}$ со знаком «плюс», элемент U_i^{ν} , учтенный в момент $t_{i,1}^{\nu}$ со знаком «минус» так, чтобы в сумме они образовали при $i > k$ элемент $S_i^{\nu} = (U_i^{-\nu} - U_i^{\nu}) > 0$, а при $i < k$ элемент $S_i^{-\nu} = (U_i^{-\nu} - U_i^{\nu}) < 0$. В результате элементы, просуммированные на интервале времени $[t_{k,1}^{\alpha\nu}, t_{k,1}^{-\alpha\nu}]$, для каждого $\alpha\nu$ образуют сумму $\sum_k^{\alpha\nu} = \sum_k^n S_k^{\alpha\nu}$, где n — экстремум функции на этом интервале, причем

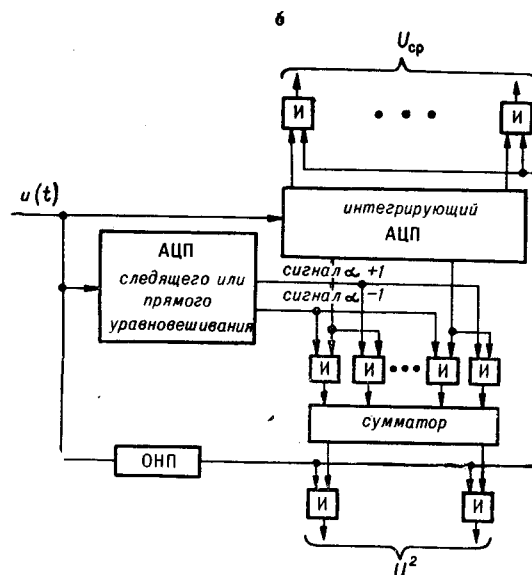
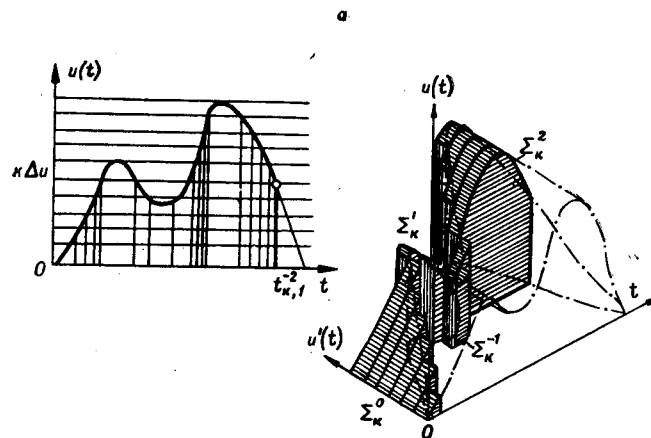


Рис. 5. Двукратное интегрирование по переменному временному аргументу: а — геометрическое представление процесса интегрирования; б — блок-схема устройства.

$\sum_k^{\alpha v} > 0$ при $n > k$ и $\sum_k^{\alpha v} < 0$ при $n < k$. Эти суммы интерпретируются объемами, показанными на рис. 5, а в первом случае жирной, а во втором — тонкой линией.

На рис. 5, б приведена примерная структурная схема устройства, реализующего этот метод. В основу устройства положен интегрирующе-

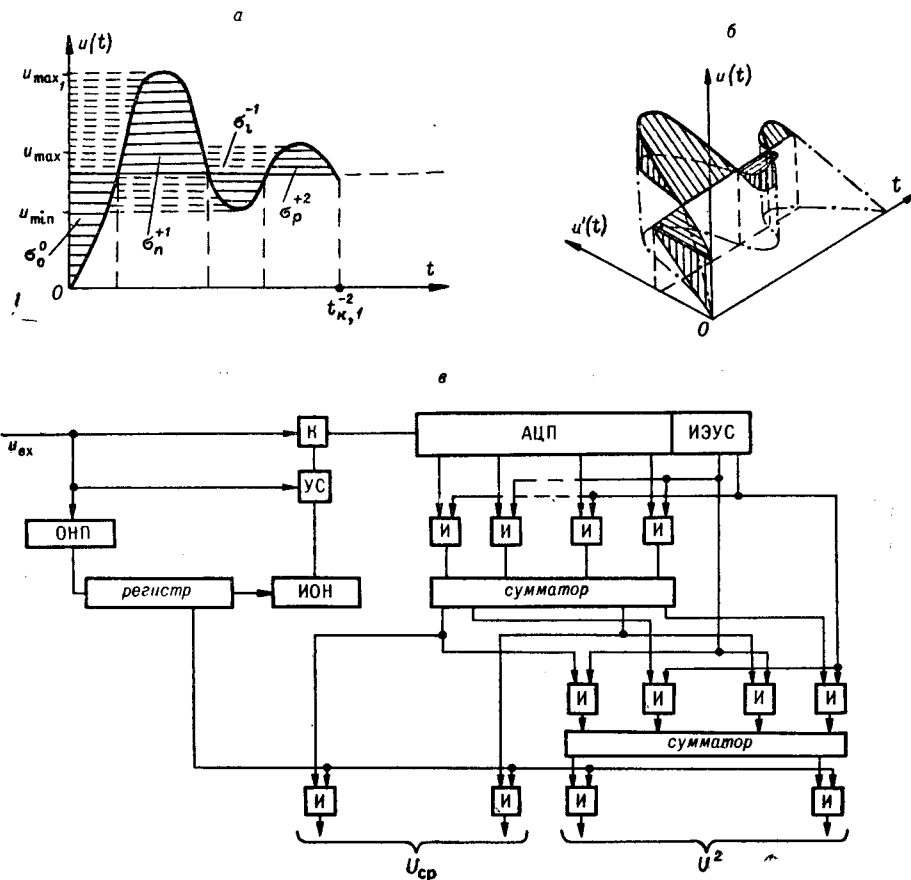


Рис. 6. Интегрирование по переменному уровню напряжения:
 а — геометрическое представление процесса получения U_{cp} ; б — геометрическое представление получения U^2 ; в — блок-схема устройства.

ния, что величина интеграла (1а) может быть определена путем интегрирования по аргументу $u(t)$, где функцией является время t . Так как при этом можно провести линию, параллельную оси t , которая пересечет интегрируемую функцию более чем один раз, то нахождение U_{cp} производится здесь путем интегрирования времени t по контуру функции [3]:

$$U_{cp} = \int_S t du. \quad (7)$$

Согласно правилу вычисления определенного интеграла такого типа, искомая площадь, интерпретирующая данный интеграл, состоит из суммы площадей, каждая из которых определяется интегралом, взятым на отрезке кривой, не имеющем разрыва производной, и учитывается со знаком, соответствующим направлению интегрирования (рис. 6, а). Поэтому в виде конечной суммы временных отрезков, нормированных относительно длительности взятия отборов (числа отборов $m_{k,1}^{kv}$), выражение (7) представляется так:

$$(U_k^{-2})_{cp} = \Delta u \left(- \sum_{k=0}^n m_{k,1}^1 + \sum_{k=n}^l m_{k,1}^{-1} - \sum_{k=l}^p m_{k,1}^2 + \sum_{k=p}^0 m_{k,1}^{-2} \right). \quad (8)$$

На рис. 6, а зафиксирован момент $t_{k,1}^{-2}$. Пусть $i\Delta u$ — произвольно взятый квантованный уровень напряжения. Приведем в соответствие каждому количеству отсчетов $m_{i,1}^{-v}$, учтенному со знаком «плюс», количество отсчетов $m_{i,1}^v$, учтенное со знаком «минус» так, чтобы в сумме они образовали при $i > k$ количество отсчетов $m_i^v = m_{i,1}^{-v} - m_{i,1}^v > 0$, а при $i < k$ количество отсчетов $m_i^{-v} = m_{i,1}^{+1} - m_{i,1}^{-v} < 0$. В сумме эти количества

отсчетов образуют интегральные элементы $\sigma_k^{av} = \sum_k^q m_i^{av}$, где q — экстремум

функции на этом интервале, причем $\sigma_k^{av} > 0$ при $q > k$ и $\sigma_k^{av} < 0$ при $q < k$. Если зафиксирован момент $t_{k,1}^{-2}$, то, согласно изложенному выше,

$$(U_k^{-2})_{cp} = \Delta u \left(- \sigma_0^0 + \sigma_n^{+1} - \sigma_l^{-1} + \sigma_p^{+2} \right).$$

Элементы σ_k интерпретируются участками площади, показанными на рис. 6, а в первом случае жирными, а во втором — тонкими линиями.

Развитие этого метода приводит к определению действующего значения напряжения. Аналогично (7) для действующего значения получим

$$U^2 = \int_S t d(U^2) = 2 \int_S tu du. \quad (9)$$

Пусть процесс суммирования зафиксирован в момент $t_{k,1}^{-2}$ и $i\Delta u$ — произвольно взятый квантованный уровень напряжения. Тогда конечная сумма, полученная к моменту $t_{k,1}^{-2}$, выразится так:

$$(U_k^{-2})^2 = 2\Delta u^2 \left(- \sum_{i=0}^n im_{i,1}^1 + \sum_{i=n}^l im_{i,1}^{-1} - \sum_{i=l}^p im_{i,1}^1 + \sum_{i=p}^k im_{i,1}^{-2} \right). \quad (10)$$

Аналогично приведенному выше для одной площади в выражении (10) каждому $im_{i,1}^-$ можно привести в соответствие $im_{i,1}^+$, если $i > k$, и тогда $im_i^+ = im_{i,1}^- - im_{i,1}^+ > 0$ или $im_{i,1}^{+1}$, если $i < k$, и тогда $im_i^- = im_{i,1}^{+1} - im_{i,1}^- < 0$. В результате выражение (9) преобразуется таким образом:

$$(U_k^-)^2 = 2\Delta u^2 \left[- \sum_{i=0}^k im_i^0 + \sum_{i=k}^n (n-i) m_i^{+1} - \sum_{i=k}^l (l-i) m_i^{-1} + \sum_{i=k}^p m_i^2 (p-i) \right].$$

Обозначим

$$\sum_{i=k}^p (p-i) m_i^2 = \sum_p^y.$$

Тогда

$$(U_k^-)^2 = 2\Delta u^2 \left[- \sum_k^0 + \sum_n^1 - \sum_l^{-1} + \sum_p^2 \right].$$

На рис. 6, б геометрически интерпретирован процесс интегрирования по (9), зафиксированный в момент $t_{k,1}^-$. Элементы суммы \sum_p^y интерпретируются объемами, причем учитываемые со знаком «плюс» изображены жирными линиями, а со знаком «минус» тонкими. Каждый из объемов образован из элементов, представляющих собой цилиндры высотой Δu , основания которых — части площади сигнала, находящиеся выше уровня напряжения $i\Delta u$, которому соответствует данный элемент. Пунктиром обозначены контуры тела, образованного при окончании процесса интегрирования. Легко заметить, что это тело, интерпретирующее, согласно (9), половину U^2 , получено в результате сечения тела (см. рис. 2, б) биссекториальной плоскостью $u(t) = u'(t)$, образующего при этом две равные половины тела. Изложенный метод предполагает, очевидно, наличие аналого-цифрового преобразователя следящего уравнивания (или совпадения) (см. рис. 6, в). Среднее значение получается с помощью сумматора и регистра t , причем перенос из регистра в сумматор осуществляется импульсами, снимаемыми с двухпозиционного выхода исполнительного элемента, каждая позиция которого определяет одно из напряжений уравнивания.

Выражение (10) может быть записано и так:

$$(U_k^-)^2 = 2\Delta u^2 \sum_s km_{ki}^{\alpha y} (-\alpha) = 2\Delta u^2 \sum_{i=0}^0 \sum_{k=0}^i m_k^{\alpha y} (-\alpha). \quad (11)$$

Выражение (11) может быть получено с помощью дополнительного суммирующего устройства, осуществляющего интегрирование результатов, полученных при вычислении среднего значения по изложенному выше методу на каждом такте интегрирования.

При измерении времени достижения более высокая точность и поэтому использование интегрирования временных отрезков по переменному уровню напряжения временного аргумента предпочтительно при стремлении к повышению точности измерения.

Вернемся к выражению (8). Пусть процесс интегрирования окончен. Тогда (8) примет вид

$$\begin{aligned} U_{\text{cp}} &= \Delta u \left(- \sum_{k=0}^n m_{k,1}^1 + \sum_{k=n}^l m_{k,1}^{-1} - \sum_{k=l}^p m_{k,1}^2 + \sum_{k=p}^0 m_{k,1}^{-2} \right) = \\ &= \Delta u \left(\sum_{k=0}^l m_{k,1}^2 + \sum_{k=l}^n m_{k,1}^1 + \sum_{k=l}^m m_{k,1}^2 \right). \end{aligned}$$

Введем обозначение

$$\sum_{\nu=1}^{\xi} m_{k,1}^{\nu} = m_{k,1}.$$

При этом

$$U_{\text{cp}} = \Delta u \sum_{k=0}^n m_{k,1}. \quad (12)$$

Выражение (12) раскрывает еще одну возможность получения интегральных характеристик, соответствующую аналитическому понятию интеграла Лебега в отличие от интеграла Римана, интерпретирующего изложенные выше способы и применяемого в анализе для интегрирования быстропеременных функций [4]. Интегральная сумма здесь составляется из временных отрезков $t_{k,1} = \tau m_{k,1}$, в течение которых сигнал находится выше данного уровня k , причем интегрирование оканчивается тогда, когда перебраны все возможные уровни.

Аналогично этому, выражение (10) можно записать так:

$$U^2 = 2\Delta u^2 \left(\sum_{k=0}^l k m_{k,1}^{-2} + \sum_{k=l}^n k m_{k,1}^1 + \sum_{k=l}^m k m_{k,1}^2 \right).$$

Введя обозначение $\sum_{\nu=1}^{\xi} m_{k,1}^{\nu} = m_k$, получим

$$U^2 = 2\Delta u^2 \sum_{k=0}^n k m_k, \quad (13)$$

или иначе

$$U^2 = 2\Delta u^2 \sum_{k=0}^n \sum_{k=i}^n m_k. \quad (14)$$

На рис. 7 приведены геометрические построения, интерпретирующие процесс получения выражения (13) (см. рис. 7, а) и (14) (см. рис. 7, б). Метод и устройство, основанное на нем, описаны в [5]. Временные интервалы m_k получаются в результате сравнения сигнала с каждым из k -х уровней. В качестве исходного АЦП здесь следует или использовать АЦП совпадения (или прямого уравнивания), если желательна обработка

сигнала (или, по крайней мере, снятие необходимой для обработки информации) в реальном масштабе времени, или, если это требование отсутствует, производить последовательный перебор квантованных уровней шкалы так, что на каждом последующем периоде сигнала происходит его сравнение с новым фиксируемым уровнем источника опорного напряжения, благодаря чему происходит как бы стробоскопическая развертка быстропеременного сигнала и крутизна фронта сигнала не огра-

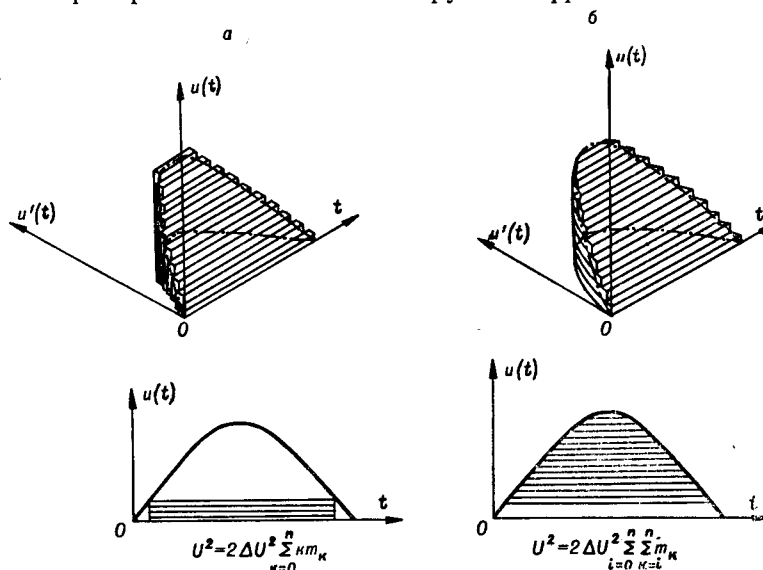


Рис. 7. Геометрическое представление процесса получения интегральной суммы по Лебегу, интерпретирующей U^2 :

$$а) U^2 = 2 \Delta U^2 \sum_{k=0}^n k m_k; \quad б) U^2 = 2 \Delta U^2 \sum_{i=0}^n \sum_{k=i}^n m_k.$$

ничивается быстродействием устройства сравнения преобразователя. В последнем случае существенно, чтобы сигнал был периодическим и чтобы искомая интегральная характеристика не изменялась до окончания процесса перебора амплитуд.

Исключительным достоинством методов, основанных на интегрировании по Лебегу, является значительно более широкий, чем в предыдущих случаях, класс обрабатываемых функций. Точность фиксации временных интервалов m_k определяется быстродействием элемента совпадения k -го уровня (амплитудного компаратора), и измерение интервалов m_k может быть в целом произведено с весьма малой погрешностью. По своей динамической точности и быстродействию эти методы соответствуют аналого-цифровому преобразованию совпадения на постоянном токе, но, к сожалению, так же, как и последние, сложны при реализации, так как требуют специальных вычислительных устройств.

Таким образом, методы определения действующего значения различаются принятой переменной интегрирования и самой интегрируемой функцией и разделяются на методы, которые предполагают интегрирование мгновенных значений напряжений по переменному временному параметру или же интегрирование временных интервалов по переменному уровню напряжения. Первые из них просты, но не отличаются высокой точностью и большим быстродействием, вторые — сложнее, но обладают меньшими погрешностями, а те из них, в которых реализуется

интегрирование по Лебегу, обладают большим быстродействием и позволяют значительно расширить класс обрабатываемых сигналов. Целью работы не являлось выявление всесторонне предпочтительного метода. Выбор того или иного метода окончательно определяется конкретными техническими требованиями задачи.

ЛИТЕРАТУРА

1. D. G. Watts. A General Theory of Amplitude Quantization with Applications to Correlation Determination.—The Institute of Electrical Engineers, Monograph № 481M, Nov. 1961; реф. С. А. Козубовского. Автоматика, 1963, № 1, стр. 73—89.
2. И. Ф. К л и с т о р и н, И. И. К о р ш е в е р. Определение интегральных характеристик напряжений произвольной формы путем обработки результатов измерения мгновенных значений.—Автоматика, 1966, № 2.
3. В. И. С м и р н о в. Курс высшей математики, т. II, гл. III, § 2. М., Гостехиздат, 1954.
4. В. И. С м и р н о в. Курс высшей математики, т. I, гл. III, § 3. М., Гостехиздат, 1953.
5. F. Deist, R. Kitai. Digital Transfer Voltmeters; Principles and Error Characteristics.—Proc. Inst. Electr. Engrs., 1963, v. 110, № 10, pp. 1887—1904. Экспресс-информация, серия «Контрольно-измерительная техника», 1964, № 3.

*Поступила в редакцию
1 ноября 1966 г.*

I. Ph. Klistorin, I. I. Korshever

**METHODS OF DETERMINATION
OF INTEGRAL CHARACTERISTICS OF ALTERNATING VOLTAGES
BY PROCESSING ITS INSTANTANEOUS VALUES**

To determine the integral characteristics of arbitrary periodic voltages the geometric interpretation of methods of numerical integration was suggested. This has made it possible to systematize the methods of determination of actual value of voltage and to propose the new ones. From the point of accuracy, fastresponse and structure complexity view the possible realization and the comparative characteristics of the methods were given.
