

В. П. КИРЬЯНОВ

(Новосибирск)

ОБ ОДНОМ МЕТОДЕ
ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ПРЯМЫХ ИЗМЕРЕНИЙ
ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДЕЙСТВУЮЩЕГО ЗНАЧЕНИЯ
ПЕРИОДИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРОИЗВОЛЬНОЙ ФОРМЫ

Приводится алгоритм обработки результатов прямых измерений (мгновенных значений) для определения действующего значения периодических напряжений произвольной формы, основанный на использовании квадратурной формулы гауссовского типа. Описывается одна из возможных реализаций данного алгоритма. Оцениваются наиболее характерные источники погрешностей измерения.

В последнее время при измерении действующего значения периодических напряжений произвольной формы в области низких звуковых и инфразвуковых частот все большее внимание уделяется методу обработки результатов прямых измерений (мгновенных значений напряжений) [1—3].

Как показано в [4], измерение действующего значения напряжения

$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T f^2(t) dt} \quad (1)$$

может быть осуществлено по различным алгоритмам, отличающимся методами накопления интегральной суммы, являющейся приближенным значением интеграла

$$S = \int_0^T f^2(t) dt. \quad (2)$$

Одним из алгоритмов обработки, требующих минимального времени для накопления суммы, соответствующей интегралу (2), является алгоритм

$$S \simeq \Delta t \sum_{i=1}^N f_i^2(t), \quad (3)$$

суммирующий квадраты мгновенных значений $f_i^2(t)$, взятых через равноотстоящие интервалы Δt . Количество членов N интегральной суммы (3) определяется требуемой точностью вычисления интеграла (2). Для повышения точности вычисления интеграла (2) требуется увеличение числа выборок N , причем при увеличении $N \rightarrow \infty$ выражение (3) должно давать точное значение интеграла (2). Однако данное положение справедливо лишь в случае, когда отсчеты мгновенных значений известны нам абсолютно точно. В реальных условиях отсчеты мгновенных значений, получаемые при помощи аналого-цифровых преобразователей, неизбежно содержат определенную погрешность. Кроме того, увеличение числа отсчетов на конечном интервале интегрирования приводит к такому сближению точек отбора, когда начинает сказываться корреляция между отсчетами. Известно [5, 6], что в этих условиях целесообразно увеличивать число выборок лишь до некоторого числа N_0 . Увеличение числа отсчетов $N > N_0$ приводит лишь к ухудшению точности вычисления выражения (3) при возросшем объеме вычислений, повышенных требованиях к элементам отбора мгновенных значений и возросшей сложности арифметического устройства. Таким образом, из [5, 6] следует, что простое увеличение числа выборок мгновенных значений в выражении (3) не может быть наиболее эффективным методом повышения точности измерения интегральных характеристик периодических напряжений произвольной формы.

По нашему мнению, точность измерения интегральных характеристик, в частности действующего значения, методом обработки мгновенных значений можно повысить, например, за счет усложнения алгоритма обработки. Однако сложилось убеждение, что применение более сложных алгоритмов, например квадратур типа гауссовских, затруднено ввиду сложности задания узлов и коэффициентов интегрирования данных квадратур.

Ниже делается попытка синтеза структурной схемы цифрового устройства, использующего один из наиболее сложных вычислительных алгоритмов — квадратурную формулу гауссовского типа, причем ставится задача максимального упрощения структуры цифрового устройства.

Непосредственное применение квадратуры Гаусса в цифровом устройстве затруднено тем, что большинство узловых точек, в которых производится отбор мгновенных значений, является иррациональным. Поэтому целесообразно применять квадратуры с округленными узлами [7]. Так как отсчеты мгновенных значений выдаются аналого-цифровым преобразователем в арифметическое устройство с определенной точностью, в нашем случае до трех десятичных знаков, то и коэффициенты квадратурной формулы необходимо округлить до трех десятичных знаков при сохранении условия

$$\sum_{k=1}^N A_k = 2, \quad (4)$$

где A_k — коэффициенты (или «веса») квадратурной формулы, приведенной к интервалу $[-1, 1]$.

Из практики приближенных вычислений известно, что для любого вида сигнала можно подобрать такой алгоритм вычисления, который обеспечил бы требуемую точность при минимальном объеме вычислений. Однако применение таких адаптирующихся алгоритмов повлечет за собой чрезмерное усложнение структуры устройства. Поэтому нами сделана попытка выбора такого алгоритма, который обеспечил бы тре-

буемую точность вычисления интеграла (2) для достаточно широкого класса сигналов. Так как оценки квадратурных формул по их остаточным членам R_n ориентировочны, то выбор квадратурной формулы и степень ее приближения определялись численными методами. При этом для достаточно широкого класса сигналов, форма которых тяготеет как к прямоугольной, так и к импульсной, получен следующий вычислительный алгоритм:

$$S \approx \frac{1}{16} \sum_{m=1}^8 \sum_{k=1}^9 A_k f^2(t_k). \quad (5)$$

Алгоритм (5) получен при разбиении интервала интегрирования $[0, T]$ на 8 подинтервалов ($m=1, 2, \dots, 8$), внутри каждого из которых применяется квадратурная формула гауссовского типа с девятью узлами ($k=1, 2, \dots, 9$). Значения узлов и коэффициентов квадратурной формулы приведены в табл. 1, графа *a*. Данный алгоритм обработки (5)

Таблица 1

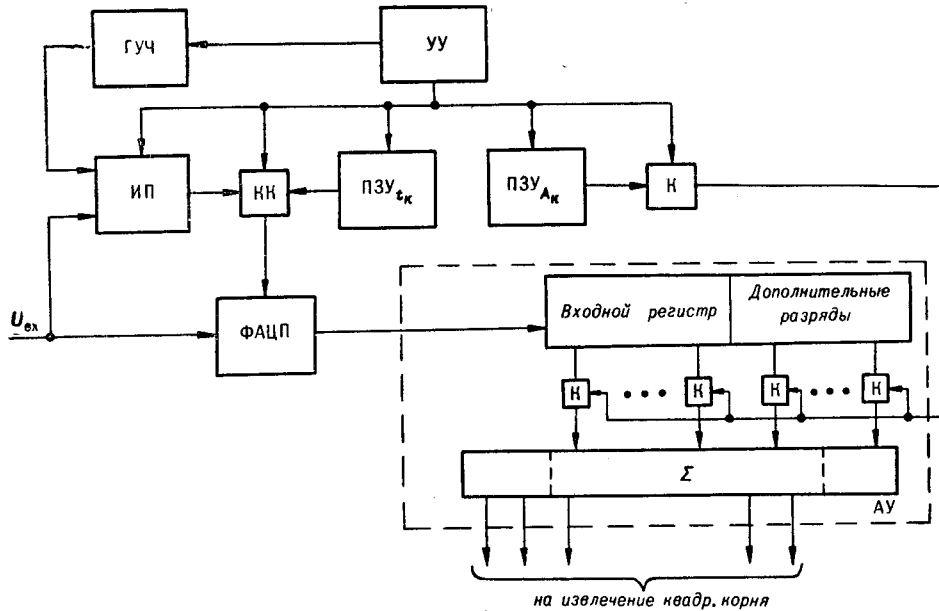
<i>k</i>		1	2	3	4	5	6	7	8	9
<i>a</i>	t_k	-0,97	-0,84	-0,61	-0,32	0,00	0,32	0,61	0,84	0,97
	A_k	0,077	0,184	0,268	0,307	0,328	0,307	0,268	0,184	0,077
<i>б</i>	t_k	0,03	0,16	0,39	0,68	0,00	0,32	0,61	0,84	0,97
	A_k	0,077	0,184	0,268	0,307	0,328	0,307	0,268	0,184	0,077

может быть реализован устройством, структурная схема которого приведена на рисунке. Устройство содержит функциональный аналого-цифровой преобразователь ФАЦП, арифметическое устройство АУ, измеритель периода ИП, компаратор кодов КК, генератор управляемой частоты ГУЧ, постоянные запоминающие устройства ПЗУ $_{t_k}$ ПЗУ $_{A_k}$ и устройство управления УУ. Цикл обработки сводится к следующему. На первом этапе производится измерение периода входного напряжения T и установка частоты ГУЧ, пропорциональной частоте входного сигнала:

$$f_{\text{ГУЧ}} = k f_{\text{вх}}. \quad (6)$$

Для алгоритма (5) коэффициент пропорциональности равен $k=1600$. На втором этапе происходит накопление интегральной суммы (5). Вначале производится выбор мгновенного значения в узловой точке t_1 . При этом на вход измерителя периода ИП поступают заполняющие импульсы с генератора управляемой частоты ГУЧ. Как только код временного интервала совпадет с кодом t_1 , компаратор кодов КК выдаст импульс, запускающий функциональный аналого-цифровой преобразователь ФАЦП. По окончании цикла кодирования код мгновенного значения $f^2(t_1)$ передается во входной регистр арифметического устройства АУ.

В АУ данное значение $f^2(t_1)$ умножается на A_1 . Для удобства накопления суммы парных произведений $A_k f^2(t_k)$ операцию умножения целесообразно осуществлять сдвигом множимого $f^2(t_k)$ вправо, а множителя A_k влево [8]. После окончания операции умножения производится выбор мгновенного значения в узловой точке t_2 с последующим умножением на A_2 и т. д. После перебора всех узловых точек результат, полученный в сумматоре, передается без четырех младших разрядов (деление на 16) на извлечение квадратного корня.









Использование координат узловых точек для всех восьми подинтервалов интегрирования в форме, представленной в табл. 1, графа *a*, потребует некоторого усложнения ПЗУ $_{t_k}$. Значительное упрощение ПЗУ $_{t_k}$ достигается при использовании координат узловых точек в форме, приведенной в табл. 1, графа *б*. При этом необходимо отмечать каждую сотню заполняющих импульсов генератора управляемой частоты, причем каждой нечетной сотне импульсов соответствуют узлы с индексами $t_1 - t_4$, каждой четной — $t_5 - t_9$. Таким образом, число констант, хранимых в ПЗУ, сокращается до 14: 5 чисел в ПЗУ $_{A_k}$ и 9 чисел в ПЗУ $_{t_k}$ — и, следовательно, ПЗУ могут быть выполнены на простейших диодных матрицах.

При использовании в устройстве (см. рисунок) комплекса элементов с тактовой частотой $f_T = 250$ кГц можно обеспечить обработку сигналов с частотой до 50 Гц.

Рассмотрим наиболее характерные источники погрешностей, сопутствующие измерению действующего значения периодического напряжения, согласно алгоритму (5).

Первый источник погрешности — методическая погрешность, вносимая представлением интеграла (2) суммой вида (5). Как указывалось выше, алгоритм (5) выбирался таким образом, чтобы методическая погрешность была меньше допустимой погрешности δ , которая в нашем случае выбиралась равной 0,1%. В табл. 2, *a* приведены результаты вычисления квадрата действующего значения для наиболее характерных

Таблица 2

Вид сигнала							
Истинное значение U^2		1,000000	0,666667	0,500000	0,333333	0,277778	0,111111
а	вычисленное значение U^2	0,999999	0,666500	0,500005	0,333255	0,277586	0,111083
	погрешность δ , %	0,0001	0,025	0,001	0,024	0,07	0,02
б	вычисленное значение U^2	0,999999	0,666545	0,499871	0,333346	0,278032	0,111197
	погрешность δ , %	0,0001	0,019	0,025	0,004	0,091	0,077

форм сигналов. При вычислениях принималось, что аргумент (т. е. координаты узлов) задан точно, а отсчеты квадратов мгновенных значений даны с точностью до трех десятичных знаков (т. е. $\delta_1 = 0,1\%$). Как видно из табл. 2, а, методическая погрешность для выбранного класса сигналов меньше допустимой, причем для сигналов, обладающих достаточной гладкостью и малым числом изменения знака производной, методическая погрешность не превышает $1/4 \delta$ — допустимой погрешности измерения.

Другим источником погрешности является погрешность, возникающая при заполнении периода измеряемого напряжения импульсами генератора управляемой частоты, в случае отсутствия синхронизации первого заполняющего импульса и начала периода (т. е. при случайной фазе квантования временного интервала). Как известно, максимальный сдвиг фазы при этом может достигать Δ (Δ — шаг квантования временного интервала). Максимальное значение погрешности вычисления квадрата действующего значения напряжения при случайной фазе квантования для тех же сигналов приведено в табл. 2, б. Особо следует оценить зависимость погрешности измерения от длительности фронтов измеряемого напряжения. Максимальная погрешность данного типа может быть оценена следующим образом. В случае идеальных скачков напряжения имеем идеальный прямоугольный импульс, квадрат действующего значения которого вычисляется довольно точно. Если фронт импульса имеет значительную протяженность и на его длительность приходится определенное число узловых точек, то квадрат действующего значения сигнала трапецеидальной формы вычисляется с достаточной точностью (в табл. 2 приводится один из частных случаев трапецеидального сигнала). Поэтому интересно оценить вклад в погрешность измерения, вносимый фронтом, длительность которого соизмерима с минимальным шагом выборки Δt_{\min} мгновенного значения, равным $0,03 \frac{T}{8}$. Принимая длительность фронта импульса $t_{\phi} = 0,002 T$, получим, что погрешность вычисления U^2 составит $\delta = 0,2\%$. При увеличении фронта до $t_{\phi} = 0,02 T$ погрешность δ не превышает $0,025\%$. Таким образом, при наложении определенных ограничений на максимальную скорость изменения сигнала

ла можно гарантировать измерение действующего значения напряжения произвольной формы с высокой точностью.

Итак, в устройствах, измеряющих интегральные характеристики периодических напряжений в области низких звуковых и инфранизких частот по методу обработки результатов прямых измерений и требующих в своей реализации специализированного вычислительного устройства, представляется возможным использование более сложных алгоритмов обработки первичной информации, обеспечивающих более высокую точность измерения при незначительном усложнении структуры устройства.

ЛИТЕРАТУРА

1. F. Deist, R. Kitai. Digital Transfer Voltmeters: Principle and Error Characteristics.— Proc. Inst. Electr. Engrs., 1963, v. 110, № 10, pp. 1887—1904. Экспресс-информация, серия «Контрольно-измерительная техника», 1964, № 3.
2. И. Ф. Клисторин, И. И. Коршевер. Определение интегральных характеристик напряжений сложной формы путем обработки результатов измерения мгновенных значений.— Автометрия, 1966, № 2.
3. М. И. Левин, Ю. И. Семко. Определение параметров периодических сигналов путем измерения их мгновенных значений.— Автометрия, 1966, № 1.
4. И. Ф. Клисторин, И. И. Коршевер. Методы определения интегральных характеристик переменных напряжений путем обработки их мгновенных значений.— Автометрия, 1967, № 2.
5. Л. А. Халфин, Н. Е. Розе. Статистический подход к методам приближенных вычислений интегралов.— Труды математ. ин-та им. В. А. Стеклова, т. XXIX. Работы по математической статистике и теории вероятностей. М.—Л., «Наука», 1965.
6. С. Я. Виленкин. Об оценке среднего в стационарных процессах.— Теория вероятностей и ее применение, т. IV, вып. 4. М., Изд-во АН СССР, 1959.
7. К. Ланцош. Практические методы прикладного анализа. М., Физматгиз, 1961.
8. А. А. Папернов. Логические основы цифровых машин и программирования. М., «Наука», 1965.

*Поступила в редакцию
1 ноября 1966 г.*

V. P. Kir'yanov

**ON ONE METHOD OF DIRECT MEASUREMENTS PROCESSING
TO DETERMINE THE ACTUAL VALUES
OF ARBITRARY PERIODIC VOLTAGES**

Instantaneous measurements processing algorithm on the basis of use of Gaussian quadratic formula is described to determine actual values of arbitrary periodic voltages. A possible realization of the algorithm is given as an example. Main sources of measurements errors are assessed.
