

## ЦИФРОВОЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ ДЕЙСТВУЮЩИХ ЗНАЧЕНИЙ ТОКОВ И НАПРЯЖЕНИЙ БЕСКОНТАКТНЫМ МЕТОДОМ

Кондратов В.Т., Маслов П.Ю.

Институт кибернетики им. В.М. Глушкова НАН Украины,  
Институт новейших технологий НАУ, г. Киев

### Abstract.

*Kondratov V.T., Maslov P.Yu. Digital meter of effective values currents and voltages by the contactless method. In the paper the technical decision of a digital meter of effective values of currents and voltages with automatic correction of systematic errors is described. The exception problem of the systematic errors caused by nonlinearity and instability of the measuring converter transfer function parameters is solved.*

**Постановка проблемы и ее актуальность.** Применение бесконтактных методов съема информации позволяет реализовать принципиально новые возможности по измерению физических величин, например, одновременное измерение действующих значений напряжения и тока в проводнике при отсутствии гальванического контакта с ним. Такие измерители содержат сенсор и измерительный преобразователь (ИП), – обычно квадратор. Сенсор представляет собой некоторую конструкцию, экранированную со всех сторон, кроме торца, от воздействия электрических и магнитных полей [1]. В его состав входят: чувствительный элемент, выполненный, например, в виде проводника из магнитного материала, чувствительного к воздействию внешних электромагнитных полей, и повышающий трансформатор тока. Вторичный ИП измерителя обеспечивает получение действующего значения электрического сигнала.

Существующим методам и цифровым измерителям действующих значений токов и напряжений бесконтактным методом [1] присуща недостаточная точность измерений, обусловленная нестабильностью и нелинейностью функции преобразования сенсора и/или ИП.

В настоящее время для преобразования мгновенных значений электрических сигналов в действующие наиболее перспективным является использование термочувствительных пьезорезонаторных преобразователей (ТПР). Они состоят из резистивного нагревательного элемента (НЭ) и термочувствительного пьезорезонатора (ПР) [2], подключенного к генератору электрического сигнала.

В основу работы таких ИП положено преобразование электрической мощности в тепловую, с последующим преобразованием температуры нагрева пьезорезонатора в частоту электрического сигнала. Основным достоинством ИП с ТПР является высокая чувствительность ( $>750$  кГц/Вт при  $f_0 = 20$  МГц). Однако они имеют нелинейность характеристики, которая в интервале температур  $(0 \dots 100)^\circ\text{C}$  может достигнуть нескольких процентов. Это приводит к появлению дополнительных погрешностей измерений действующих значений токов и напряжений бесконтактным методом.

Проблема состоит в том, что существующие методы и цифровые измерители действующих значений токов и напряжений бесконтактным методом не решают проблему системной линеаризации общей функции преобразования цифрового измерительного прибора при нелинейной и нестабильной функции преобразования сенсора и/или ИП и, тем самым, не могут реально претендовать на возможность достижения одной из главных целей метрологии – обеспечение точности измерений, соизмеримой с точностью образцовых мер.

В этой связи актуальной является проблема разработки таких прикладных методов и средств бесконтактного измерения параметров электрических сигналов, которые бы обеспечивали линейризацию общей функции преобразования цифрового измерительного прибора и автоматическую коррекцию как аддитивной и мультипликативной, так и нелинейной составляющих погрешности результатов измерений.

**Постановка задачи исследований.** В связи с развитием теории и методов избыточных измерений [3], перспективным является использование этих методов для разработки технического решения цифрового измерителя действующих значений напряжений и токов в активной электрической цепи бесконтактным методом, причем с автоматической коррекцией систематических погрешностей.

**Цель исследований.** Целью настоящей работы является повышение точности бесконтактного измерения действующих значений токов и напряжений бесконтактным методом за счет автоматической коррекции систематических погрешностей, обусловленных нелинейностью и нестабильностью параметров функции преобразования ИП.

**Основной материал и результаты исследований.** Поставленная задача исследований решалась с использованием теории и методов избыточных измерений [3]. Были разработаны математические модели, метод и уравнения избыточных измерений. На их основе разработано техническое решение цифрового измерителя (ЦИ) действующих значений токов и напряжений. На рис. 1 приведена его структурная схема.

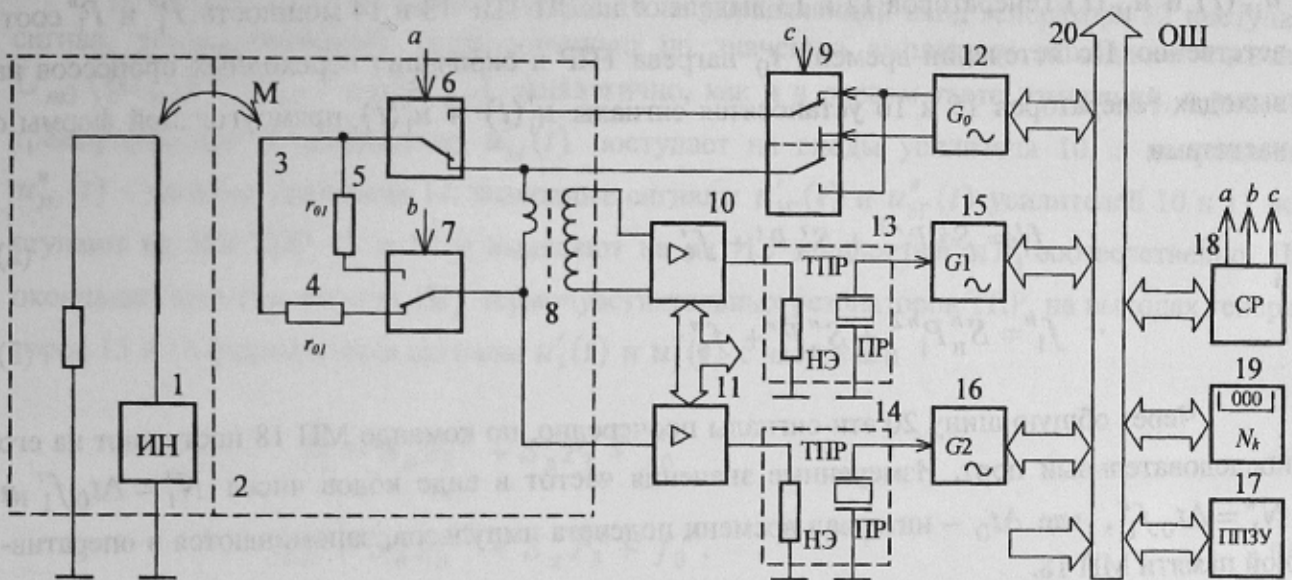


Рисунок 1. Структурная схема цифрового измерителя действующих значений токов и напряжений бесконтактным методом

На рисунке: 1 – объект, состоящий из исследуемого проводника (ТР) с током, источника напряжения (ИН) и нагрузочного резистора  $R_n$ ; 2 – сенсор, включающий в себя чувствительный элемент 3, выполненный из магнитного материала, нагрузочный резистор 4 ( $r_{01}$ ), согласующий резистор 5 ( $r_{01}$ ), первый и второй автоматические переключатели (АП) (см. АП 6 и АП 7) и трансформатор тока 8; 9 – третий АП; 10 и 11 – первый и второй усилители с кодоуправляемым коэффициентом передачи; 12 – генератор опорных сигналов прямоугольной формы; 13 и 14 – первый и второй ТТР; 15 и 16 – первый и второй генераторы электрических сигналов прямоугольной формы; 17 – перепрограммируемое постоянное запоминающее устройство (ППЗУ); 18 – микропроцессор (МП); 19 – цифровое отсчетное устройство; 20 – общая шина (ОШ).

Предположим, что функция преобразования ТПР с генератором электрических сигналов описывается уравнением величин

$$f_{\text{вых}} = S_{\text{н}} P_{\text{вх}}^2 + S_{\text{л}} P_{\text{вх}} + f_0, \quad (1)$$

где  $S_{\text{н}}$  и  $S_{\text{л}}$  – параметры функции преобразования;  $f_0$  – начальная частота генератора;  $P_{\text{вх}}$  – мощность, рассеиваемая на НЭ ТПР.

В первом такте автоматические переключатели АП 6 и АП 7 устанавливаются, по команде с МП 18, в положения, противоположные указанному на рис. 1, а АП 9 – в положение, указанное на рис. 1. На управляющий вход генератора 12 поступает код числа, устанавливающий выходную частоту  $f_0$  и амплитуду  $U_{m1}$  ( $\{U_{m1}\} = \{U_{m0}\}$ ) выходного сигнала прямоугольной формы. Сенсор устанавливается на проводник с током (см. рис. 1). В результате взаимной индукции, на чувствительном элементе 3 сенсора 2 наводится ток, который, с помощью трансформатора 8 преобразуется в напряжение  $u'_{1x}(t)$ , которое поступает на входы дифференциального усилителя 10. На вход усилителя 11 поступает напряжение  $u''_{2Ux}(t)$  с клеммы 2 первичной обмотки трансформатора 8. Усиленные по току выходные сигналы  $u'_{1r}(t)$  и  $u''_{1r}(t)$  генераторов 12 и 13 выделяют на ЭН ТПР 13 и 14 мощность  $P'_1$  и  $P''_1$  соответственно. По истечении времени  $t_0$  нагрева ТПР и окончания переходных процессов на выходах генераторов 15 и 16 установятся сигналы  $u'_1(t)$  и  $u''_1(t)$  прямоугольной формы с частотами

$$f'_1 = S'_n P_1'^2 + S'_l P_1' + f_0 \quad (2)$$

и

$$f''_1 = S''_n P_1''^2 + S''_l P_1'' + f_0. \quad (3)$$

Через общую шину 20 эти сигналы поочередно, по команде МП 18 поступают на его последовательный порт. Измеренные значения частот в виде кодов чисел  $N'_1 = \Delta t_0 f'_1$  и  $N''_1 = \Delta t_0 f''_1$ , где  $\Delta t_0$  – интервал времени подсчета импульсов, запоминаются в оперативной памяти МП 18.

По результатам первого такта измерений определяется поддиапазон значений определяемых величин и средняя частота электрического сигнала в проводнике ТП с током (см. рис. 1) Выбор поддиапазона осуществляется по команде с микропроцессора 18, путем подачи на управляющие входы усилителей 10 и 11 соответствующих кодов чисел  $N_{K1}$  и  $N_{K2}$  коэффициентов усиления.

Результат измерений средней частоты обрабатывается и подается в виде управляющего кода  $N_f$  на управляемый генератор 12 опорного сигнала. Последний генерирует сигнал прямоугольной формы и заданной амплитуды.

Во втором такте по команде с МП 18 устанавливается нормированная по значению амплитуда  $U_{m2}$  ( $\{U_{m2}\} = \{U_{m0}\} - \{\Delta U_m\}$ ) выходного парафазного сигнала  $u_{01}(t)$  генератора 12. Сигнал  $u_{01}(t)$  с парафазных выходов генератора 12 поступает через АП 9, АП 6 и АП 7 на первичную обмотку трансформатора 8. С выхода трансформатора 8 напряжение  $u'_{2l}(t)$  поступает на вход усилителя 10. Падение напряжения  $u''_{2U}(t)$  на сопротивлении  $r_{01}$

$(\{r_{01}\} = \{r_0\} + \{\Delta r_{АП6}\} + \{\Delta r_{АП7}\})$ , образованное в результате прохождения тока через последовательно соединенные переходные сопротивления АП 9 и АП 7 (т.е.  $r_{АП6}$  и  $r_{АП7}$ ) и сопротивление резистора 5, поступает на вход усилителя 11. Усиленные по току выходные сигналы  $u'_{2Г}(t)$  и  $u''_{2Г}(t)$  генераторов 12 и 13 выделяют на ЭН ТПР 13 и 14 мощность  $P'_2$  и  $P''_2$  соответственно. В результате нагрева термочувствительных резонаторов КР в течение времени  $\Delta t_n$  на выходах генераторов 15 и 16 электрических сигналов прямоугольной формы формируются сигналы  $u'_2(t)$  и  $u''_2(t)$  с частотами

$$f'_2 = S'_н P_2'^2 + S'_л P_2' + f'_0 \tag{4}$$

и

$$f''_2 = S''_н P_2''^2 + S''_л P_2'' + f''_0. \tag{5}$$

Сигналы  $u'_2(t)$  и  $u''_2(t)$  прямоугольной формы через ОШ 20 поступают, поочередно, на последовательный порт МП 18. С его помощью осуществляется измерение частот (4) и (5) указанных сигналов. Результаты измерений в виде кодов чисел  $N'_2 = \Delta t_0 f'_2$  и  $N''_2 = \Delta t_0 f''_2$ , где  $\Delta t_0$  – интервал времени подсчета импульсов, запоминаются в оперативной памяти МП 18.

В третьем такте по команде с МП 18 на управляющий вход генератора 12 поступит сигнал, устанавливающий нормированную по значению амплитуду выходного сигнала  $U_{m3}$  ( $\{U_{m3}\} = \{U_{m0}\} + \{\Delta U_m\}$ ). Аналогично, как и в первом такте измерений, с выхода трансформатора 8 напряжение  $u'_{3Г}(t)$  поступает на входы усилителя 10, а напряжение  $u''_{3Г}(t)$  – на вход усилителя 11. Выходные сигналы  $u'_{3Г}(t)$  и  $u''_{3Г}(t)$  усилителей 10 и 11 поступают на НЭ ТПР 13 и 14 и выделяют на их НЭ мощность  $P'_3$  и  $P''_3$  соответственно. По окончании времени нагрева  $\Delta t_n$  термочувствительных резонаторов ТПР, на выходах генераторов 15 и 16 формируются сигналы  $u'_3(t)$  и  $u''_3(t)$  с частотами

$$f'_3 = S'_н P_3'^2 + S'_л P_3' + f'_0 \tag{6}$$

и

$$f''_3 = S''_н P_3''^2 + S''_л P_3'' + f''_0. \tag{7}$$

Как и в предыдущих тактах, выходные сигналы  $u'_3(t)$  и  $u''_3(t)$  усилителей 13 и 14 поступают поочередно, через ОШ 20, на последовательный порт МП 18. Результаты измерений частот (6) и (7) в виде кодов чисел  $N'_3 = \Delta t_0 f'_3$  и  $N''_3 = \Delta t_0 f''_3$  запоминаются в оперативной памяти МП 18.

В четвертом такте по команде с МП 18 устанавливается нормированная по значению амплитуда  $U_{m4}$  ( $\{U_{m4}\} = \{\Delta U_m\}$ , где  $\{\Delta U_m\} = 0,1\{U_{m4}\}$ ) выходного парафазного сигнала генератора 12. Одновременно АП 7 устанавливается в положение, противоположное указанному на рис. 1. В результате на входы усилителя 10 поступит электрический сигнал  $u'_{4Г}(t)$  с амплитудой, равной сумме амплитуд опорного и наведенного, за счет взаимной индукции, сигналов, т. е.  $U_{m\Sigma}$  ( $\{U_{m\Sigma}\} = \{U_{mx}\} + \{\Delta U_m\}$ ). С выхода трансформатора 8 напряжение  $u'_{4Г}(t)$  поступает на входы усилителя 10, а на вход усилителя 11 – падение напряжения  $u''_{4Г}(t)$  с амплитудой, уменьшенной на  $U_{m\Sigma}$ . Выходные сигналы  $u'_{4Г}(t)$  и  $u''_{4Г}(t)$

усилителей 10 и 11 поступают на ТПР 13 и 14 и выделяют на их НЭ мощность  $P_4'$  и  $P_4''$  соответственно. По истечении времени  $\Delta t_n$  нагрева ТПР частоты

$$f_4' = S_{\text{н}}' P_4'^2 + S_{\text{л}}' P_4' + f_0' \quad (8)$$

и

$$f_4'' = S_{\text{н}}'' P_4''^2 + S_{\text{л}}'' P_4'' + f_0'' \quad (9)$$

выходных сигналов  $u_4'(t)$  и  $u_4''(t)$  измеряются с помощью МП 18. Результаты измерений в виде кодов чисел  $N_4' = \Delta t_0 f_4'$  и  $N_4'' = \Delta t_0 f_4''$  запоминаются в оперативной памяти.

В пятом такте измерений, по команде с МП 18, АП9 устанавливается в положение, противоположное указанному на рис. 1. В результате изменится знак сигнала, поступающего с выходов генератора 12 на трансформатор 8 через АП9, АП6, резисторы  $r_0$  и АП7. На входной обмотке происходит вычитание токов, обусловленных наведенным сигналом и опорным. На входы усилителя 10 уже поступит электрический сигнал  $u_{5I}'(t)$  с амплитудой  $U_{m\Delta}$  ( $\{U_{m\Delta}\} = \{U_{mx}\} - -\{\Delta U_m\}$ ), а на вход усилителя 11 – падение напряжения  $u_{5U}''(t)$  с амплитудой, также уменьшенной на  $U_{m\Delta}$ . Выходные сигналы  $u_{5Г}'(t)$  и  $u_{5Г}''(t)$  усилителей 10 и 11 поступают на ТПР 13 и 14 и выделяют на их НЭ мощность  $P_5'$  и  $P_5''$  соответственно. По истечении времени  $\Delta t_n$  нагрева ТПР устанавливаются частоты

$$f_5' = S_{\text{н}}' P_5'^2 + S_{\text{л}}' P_5' + f_0' \quad (10)$$

и

$$f_5'' = S_{\text{н}}'' P_5''^2 + S_{\text{л}}'' P_5'' + f_0'' \quad (11)$$

выходных сигналов  $u_5'(t)$  и  $u_5''(t)$  генераторов 15 и 16, которые измеряются с помощью МП 18. Результаты измерений в виде кодов чисел  $N_5' = \Delta t_0 f_5'$  и  $N_5'' = \Delta t_0 f_5''$  запоминаются в оперативной памяти.

О действующих значениях тока  $N_{Ix}$ , напряжения  $N_{Ux}$ , проводимости цепи  $N_G$  и рассеиваемой в ней мощности  $N_{Px}$  судят после обработки результатов промежуточных измерений ( $N_1', N_2', N_3', N_4', N_5'$  и  $N_1'', N_2'', N_3'', N_4'', N_5''$ ) по уравнениям числовых значений

$$N_{Ix} = \frac{\{\Delta U_m\} (N_4' - N_5') - (N_2' - N_3')}{2 (N_4' + N_5') - 2N_1'} - \{U_{m0}\}, \quad (12)$$

$$N_{Ux} = \frac{\{\Delta U_m\} (N_4'' - N_5'') - (N_2'' - N_3'')}{2 (N_4'' + N_5'') - 2N_1''} - \{U_{m0}\}, \quad (13)$$

$$N_G = \frac{N_{Ix}}{N_{Ux}}, \quad (14)$$

$$N_{Px} = N_{Ix} N_{Ux}, \quad (15)$$

Последующие циклы измерений повторяются аналогичным образом. Обработка результатов промежуточных измерений частот по уравнениям числовых значений (12) ... (15) обеспечивает исключение аддитивной, мультипликативной и нелинейной составляющих систематической погрешности, обусловленных нестабильностью и нелинейностью функций преобразования ТПР 13 и ТПР 14. Кроме того, исключается влияние и абсолютных значений параметров нелинейной функции преобразования ТПР. Погрешность измерений будет определяться, в основном, погрешностью воспроизведения корректирующих величин, в частности  $\Delta U_m$  и  $U_{m0}$ , значения которых могут быть установлены с погрешностью не хуже 0,1%.

Таким образом, описанное техническое устройство цифрового измерителя действующих значений токов и напряжений бесконтактным методом, обеспечивает автоматическую коррекцию систематических погрешностей и повышение точности измерений более, чем в 10 раз.

### Выводы

1. В целом достигнута цель научно-исследовательской работы – повышение точности измерения действующих значений токов и напряжений бесконтактным методом. Разработана структурная схема с ЦИ с автоматической коррекцией систематических погрешностей. Описана его работа.

2. Благодаря реализации нового метода и уравнения избыточных измерений достигнуто расширение диапазона измерений как за счет повышения точности измерений, так и за счет исключения влияния нелинейной составляющей функции преобразования на результат измерений.

3. Приведенное техническое решение ЦИ на сегодняшний день является наиболее перспективным, т.к. реализует электротепловой метод преобразования электрических сигналов.

### Литература

1. Яковлев Н.И. Бесконтактные электроизмерительные приборы для диагностирования электронной аппаратуры. – Л.: Энергоатомиздат, 1990. – 256 с.
2. Малов В.В. Пьезорезонансные датчики. – М.: Энергия, 1978. – 248 с.
3. Кондратов В.Т. Основы теории автоматической коррекции систематических погрешностей измерения физических величин при нестабильной и нелинейной функции преобразования датчика, *Дис. ... докт. техн. наук*: 05.11.15 и 05.11.01, Киев, 2001. Т. 1, 501 с.