

ИЗМЕРЕНИЕ МОЩНОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ С АВТОМАТИЧЕСКОЙ КОРРЕКЦИЕЙ СИСТЕМАТИЧЕСКИХ ПОГРЕШНОСТЕЙ

Кондратов В.Т., Липницький С.О.

Институт кибернетики им. В.М.Глушкова НАН Украины,

Институт новейших технологий НАУ, г. Киев

Abstract

Kondratov V.T., Lipnitskiy S.O. The measuring of power with automatic correction of systematic errors. Technical decisions for the digital power meter with automatic correction of systematic errors are developed with the help of current sensor with an asymmetrical output and the second sum-difference method of current and voltage effective values multiplication.

Введение. В настоящее время широкое применение находят электротепловые методы избыточных измерений мощности периодических сигналов сложной формы с использованием термоэлектрических преобразователей (ТПР), состоящих из резистивного нагревательного элемента (НЭ) и термочувствительного пьезорезонатора (ПР) [1, 2]. В основу работы ТПР положено преобразование электрической мощности в тепловую с последующим преобразованием температуры нагрева пьезорезонатора ТПР в частоту электрического сигнала.

По данным [2], чувствительность ТПР к мощности нагрева составляет 750 кГц/Вт и более для резонаторов, работающих на частоте 20 МГц . Нелинейность характеристики преобразования в интервале 10°C не превышает $(0,6 \dots 1,0)\%$, а в интервале $100^\circ\text{C} - (2 \dots 6)\%$.

Недостатком электротепловых методов измерения мощности является зависимость результата измерения от разброса характеристик ТПР (значения сопротивления резистивного нагревателя и параметров нелинейной ФП резонатора) при его замене, например, по результатам поверки, влияние на результат измерений составляющих погрешностей, обусловленных нелинейностью и нестабильностью функции преобразования (ФП) генератора с ТПР. Нестабильность нелинейной ФП и старение элементов ТПР приводит к изменению параметров ФП генератора и появлению дополнительных нелинейной, аддитивной и мультипликативной составляющих погрешности. Это приводит к ограничению диапазона измерения мощности с заданной точностью.

Постановка проблемы и ее актуальность. В работах [1, 3] описаны технические решения цифровых измерителей мощности (ЦИМ), реализующих метод избыточных измерений, который обеспечивает автоматическую коррекцию систематических погрешностей, в том числе и погрешностей, связанных с разбросом характеристик ТПР.

Основным их недостатком является использование сенсора тока с парафазными выходами с целью формирования с высокой точностью противофазных (с разностью фазовых сдвигов в 180°) сигналов, пропорциональных току через нагрузку, и операции вычитания (суммирования) предварительно усиленных выходных сигналов сенсоров тока и напряжения.

Создание сенсоров тока с симметричными парафазными выходами затруднительно ввиду неизбежной асимметрии витков обмоток и появления разных паразитных емкостных связей, что приводит к получению парафазных сигналов, отличающихся между собой на 180° с погрешностью Δ_φ .

Дополнительные фазовые сдвиги в выходных периодических сигналы (сложной формы) сенсоров тока и напряжения вносят и используемые усилители. В результате суммирование и вычитание предварительно усиленных выходных сигналов сенсоров осуществляется с погрешностями, обусловленными разными фазовыми сдвигами гармонических составляющих сигналов. Это, в конечном счете, приводит к снижению точности измерения мощности периодических сигналов сложной формы.

Использование широкополосных фазовращателей в одном из каналов не решает задачи компенсации вносимых фазовых сдвигов, поскольку компенсируются фазовые сдвиги, в основном, нечетных гармоник (первой, третьей и т.д.). Фазовые сдвиги четных и других высших гармоник не компенсируются.

Проблема повышения точности измерения мощности периодических сигналов сложной формы по-прежнему остается актуальной, особенно при рассмотрении и учете тонкой структуры сигналов (фазовых соотношений высших гармонических составляющих) и процессов высокоточного „геометрического” вычитания и суммирования указанных сигналов.

Постановка задачи исследований. В работе [1] решена задача автоматической коррекции систематических погрешностей измерения мощности электрических сигналов при реализации суммо-разностного способа перемножения действующих значений тока и напряжения, описываемого уравнением величин $U_U U_I = 0,5[(U_U + U_I)^2 - (U_U - U_I)^2]$.

Научный и технический интерес представляет решение аналогичной метрологической задачи при реализации второго суммо-разностного способа перемножения действующих значений тока и напряжения, описываемого уравнением величин $U_U U_I = 0,5[(U_U + U_I)^2 - (U_U^2 + U_I^2)]$. Особенностью данного способа является то, что для его реализации не требуется использование сенсора тока с парафазными выходами и реализации операции вычитания выходных электрических сигналов сенсора тока и напряжения.

Цель исследований. Целью настоящей работы является разработка нового метода избыточных измерений и соответствующего технического решения цифрового измерителя мощности с автоматической коррекцией систематических составляющих погрешности результата измерений при использовании второго суммо-разностного способа перемножения действующих значений тока и напряжения и сенсора тока с непарафазным (асимметричным) выходным сигналом.

Основной материал и результаты исследований. Рассмотрим сущность предложенного метода избыточных измерений мощности на примере работы цифрового измерителя мощности (ЦИМ), структурная схема которого приведена на рис. 1, где 1 – нагрузка Z; 2 – сенсор тока (СТ); 3 – сенсор напряжения (СН); 4 и 5 – первый и второй усилители; 6 и 7 – первый и второй автоматические переключатели (АП); 8, 9 и 10 – первое, второе и третье суммирующие устройства; 11, 12 и 13 – первый, второе и третий согласующие усилители; 14, 15 и 16 – первый, второй и третий ТПР, состоящие из резистивных НЭ и термочувствительных ПР; 17, 18 и 19 – первый, второй и третий генераторы (с предвключенными ТПР) электрических сигналов прямоугольной формы; 20 – логический элемент (ЛЭ) ЗИ-ИЛИ-НЕ; 21 – перепрограммируемое постоянное запоминающее устройство (ППЗУ); 22 – оперативное запоминающее устройство (ОЗУ); 23 – цифроаналоговый преобразователь (ЦАП); 24 – цифровое отсчётное устройство (ЦОУ); 25 – микропроцессор (МП) и 26 – общая шина (ОШ).

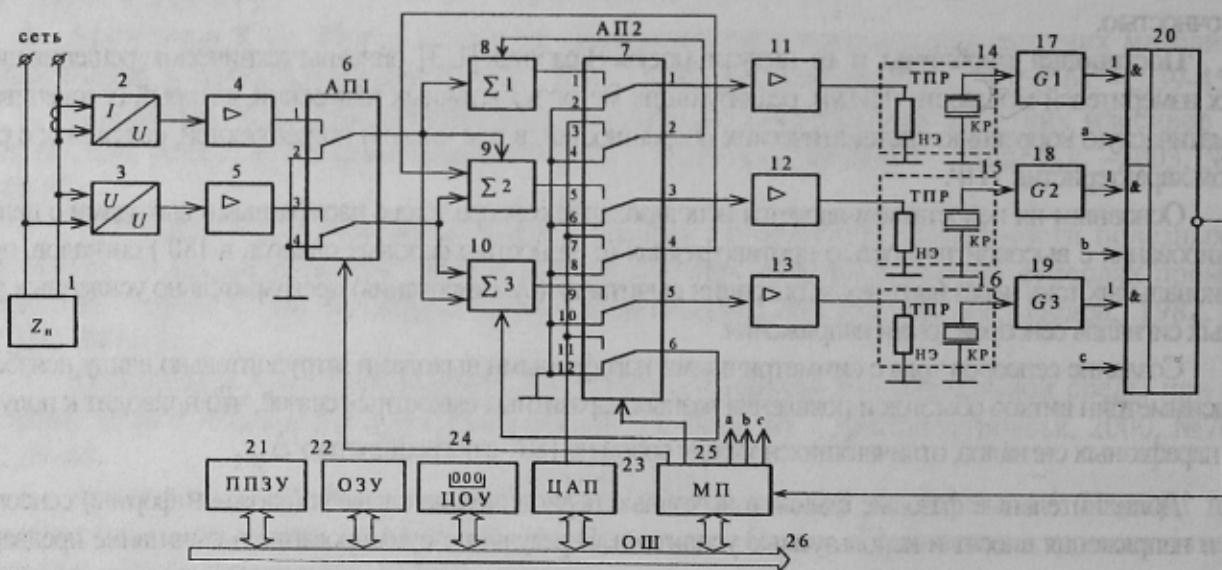


Рис. 1. Структурная схема цифрового измерителя мощности электрических сигналов сложной формы

Для реализации предложенного метода измерения, априори в ППЗУ ЦИМ записываются коды чисел N_{01} , N_{02} и N_{03} , обеспечивающие формирование с помощью ЦАП 23 калиброванных по значениям напряжений U_{01} , U_{02} и U_{03} . Причём коды чисел N_{01} , N_{02} и N_{03} выбираются такими, чтобы напряжение U_{02} на выходе ЦАП 23 было меньшим напряжения U_{01} на калиброванную по значению величину ΔU_0 , а напряжение U_{03} – большим напряжения U_{01} на ту же величину, т. е.

$$\{U_{02}\} = \{U_{01}\} - \{\Delta U_0\} \text{ и } \{U_{03}\} = \{U_{01}\} + \{\Delta U_0\}. \quad (1)$$

Затем вычисляют и записывают в ППЗУ в виде кода числа N_{P0} значение мощности P_0 , выделяемой на известных по значению сопротивлениях $R_{н1}$, $R_{н2}$ и $R_{н3}$ нагревательных элементов НЭ ТПР 14, 15 и 16 при напряжении U_{01} .

Необходимо отметить, что современные технологии напыления обеспечивают формирование идентичных (с погрешностью 0,001%) резистивных нагревательных элементов с равными между собой сопротивлениями $R_{н1}$ и $R_{н2}$, т.е. $\{R_{н1}\} = \{R_{н2}\} = \{R_{н3}\} = \{R_n\}$.

В общем случае, при нелинейной (квадратичной) ФП генераторов 17, 18 и 19 с включенными ТПР, частоты выходных сигналов будут связаны с мощностью, выделенной на НЭ ТПР, следующими уравнениями величин: $f'_x = P_x^2 S'_н + P_x S'_л + f'_0$, $f''_x = P_x^2 S''_н + P_x S''_л + f''_0$ и $f'''_x = P_x^2 S'''_н + P_x S'''_л + f'''_0$, где $S'_н$, $S'_л$, $S''_н$, $S''_л$, $S'''_н$ и $S'''_л$ – параметры нелинейной ФП ТПР, причём $\{S'_н\} = \{S_n\} \pm \pm \{\Delta S'_н\} = \{S_n\} (1 \pm \gamma'_н)$; $\{S''_н\} = \{S_n\} \pm \pm \{\Delta S''_н\} = \{S_n\} (1 \pm \gamma''_н)$; $\{S'''_н\} = \{S_n\} \pm \pm \{\Delta S'''_н\} = \{S_n\} (1 \pm \gamma'''_н)$; $\{S'_л\} = \{S_l\} \pm \pm \{\Delta S'_л\} = \{S_l\} (1 \pm \gamma'_л)$; $\{S''_л\} = \{S_l\} \pm \pm \{\Delta S''_л\} = \{S_l\} (1 \pm \gamma''_л)$; $\{S'''_л\} = \{S_l\} \pm \pm \{\Delta S'''_л\} = \{S_l\} (1 \pm \gamma'''_л)$; f'_0 , f''_0 и f'''_0 – начальные частоты выходных сигналов генераторов 17, 18 и 19 соответственно; γ – относительные изменения параметров ФП ТПР, обусловленные воздействием внешних дестабилизирующих факторов и старением элементов.

Запомненное в ППЗУ 21 значение N_{P0} электрической мощности P_0 может быть записано в виде уравнения числовых значений $N_{P0} = \{P_0\} = \{U_{01}\}^2 / \{R_n\}$.

ЦИМ работает следующим образом. После включения источника питания (на рис. 1 не показано), АП 6 и 7 устанавливаются в положения, указанные на рисунке. ОЗУ 22 очищается, на входах ЦАП 23 устанавливается код нуля, а ЦОУ 24 обнуляется.

С помощью сенсоров 2 и 3 напряжение $u_n(t)$ на нагрузке Z $u_n(t)$ и ток $i_n(t)$ через неё преобразуются в соответствующие электрические сигналы $u_{c1}(t)$ и $u_{c2}(t)$. Эти сигналы усиливаются с помощью усилителей 4 и 5 и поступают, соответственно, на первый и третий входы АП 6 (см. рис. 1).

В первом такте измерений на входы суммирующих устройств 8, 9 и 10 сигналы не поступают. В результате в первом такте измерений тепловая мощность P_{00} , рассеиваемая на НЭ ТПР 14, 15 и 16 при нулевых значениях тока через НЭ, преобразуется в частоты $f'_1 = S'_н + P_{00} S'_л + f'_0$, $f''_1 = P_{00}^2 S''_н + P_{00} S''_л + f''_0$ и $f'''_1 = P_{00}^2 S'''_н + P_{00} S'''_л + f'''_0$ электрических сигналов прямоугольной формы с помощью генераторов 17, 18 и 19 соответственно. Эти сигналы поступают на первые входы ЛЭ 20. На вторые входы ЛЭ 20 поступают импульсы управления с выходов a, b и c МП 25.

Электрические сигналы прямоугольной формы поочередно поступают на последовательный порт МП 25 с выхода ЛЭ 20. С помощью МП осуществляется измерение частот f'_1 , f''_1 и f'''_1 следования указанных импульсов и запоминание результатов измерений в ви-

де кодов чисел N'_{f1} ($N'_{f1} = \{\Delta t_0\}\{f'_1\}$), N''_{f1} ($N''_{f1} = \{\Delta t_0\}\{f''_1\}$) и N'''_{f1} ($N'''_{f1} = \{\Delta t_0\}\{f'''_1\}$) в ОЗУ 22.

Во втором такте по команде с МП 25 АП 7 переводится в положение, противоположное указанному на рис. 1. По команде с МП 25 на вход ЦАП 23 поступает код числа N_{02} . В результате на НЭ ТПР 14, 15 и 16 поступает второе калиброванное по значению напряжение U_{02} . На сопротивлениях НЭ выделяется электрическая мощность P_1 ($N_{P1} = \{P_1\} = \{U_{02}\}^2 / \{R_H\}$, где $\{P_1\} = \{P_0\} - \{\Delta P\}$) в течение времени Δt_H , равном или превышающем значение тепловой постоянной ТПР. Тепловая мощность P_1 , выделенная на НЭ с помощью генераторов 17, 18 и 19 с ТПР, преобразуется, соответственно, в частоты $f'_2 = P_1^2 S'_H + P_1 S'_L + f'_0$, $f''_2 = P_1^2 S''_H + P_1 S''_L + f''_0$ и $f'''_2 = P_1 S'''_H + P_1 S'''_L + f'''_0$ электрических сигналов прямоугольной формы с помощью генераторов 17, 18 и 19 соответственно. Эти сигналы поступают на первые входы ЛЭ 20. С помощью МП 25 осуществляется измерение час-

тот f'_2 , f''_2 и f'''_2 следования указанных импульсов и запоминание результатов измерений в виде кодов чисел N'_{f2} ($N'_{f2} = \{\Delta t_0\}\{f'_2\}$), N''_{f2} ($N''_{f2} = \{\Delta t_0\}\{f''_2\}$) и N'''_{f2} ($N'''_{f2} = \{\Delta t_0\}\{f'''_2\}$) в ОЗУ 22.

В третьем такте измерений состояние функциональных блоков ЦИМ не меняется, а на ЦАП 23 через ЛЭ 20 с выхода МП 25 подается код числа N_{03} . В результате, в третьем такте на НЭ ТПР 14, 15 и 16 поступает калиброванное по значению напряжение U_{03} . В течение времени Δt_H на нагревательных элементах рассеивается мощность P_2 , значение которой $\{P_2\} = \{P_0\} + \{\Delta P\}$. Аналогичным образом тепловая мощность P_2 , выделенная на НЭ ТПР 14, 15 и 16, преобразуется в частоты $f'_3 = P_2^2 S'_H + P_2 S'_L + f'_0$, $f''_3 = P_2^2 S''_H + P_2 S''_L + f''_0$ и $f'''_3 = P_2 S'''_H + P_2 S'''_L + f'''_0$ электрических сигналов прямоугольной формы с помощью генераторов 17, 18 и 19 соответственно. Эти сигналы поступают на первые входы ЛЭ 20. С помощью МП 25 осуществляется измерение частот f'_3 , f''_3 и f'''_3 следования указанных импульсов и запоминание результатов измерений в виде кодов чисел N'_{f3} ($N'_{f3} = \{\Delta t_0\}\{f'_3\}$), N''_{f3} ($N''_{f3} = \{\Delta t_0\}\{f''_3\}$) и N'''_{f3} ($N'''_{f3} = \{\Delta t_0\}\{f'''_3\}$) в ОЗУ 22.

В четвертом такте измерений АП 6 переводится в положение, противоположное приведенному на рис. 1. В этом такте на вход ЦАП 23 с выхода МП 25 также поступает код числа N_{02} . В результате в СУ 8 и 9 с напряжением U_{02} суммируются усиленные выходные сигналы сенсоров 2 и 3, соответственно, а в СУ 10 – сумма усиленных выходных сигналов сенсоров 2 и 3. Сигналы с выходов СУ 8, 9 и 10 поступают на НЭ ТПР 14, 15 и 16 соответственно. В результате в течение времени Δt_H на НЭ ТПР выделяется электрическая мощность P'_3 ($\{P'_3\} = \{P_{c2}\} + \{P_{02}\}$), P''_3 ($\{P''_3\} = \{P_{c3}\} + \{P_{02}\}$) и P'''_3 ($\{P'''_3\} = \{P_{\Sigma}\} + \{P_{02}\}$), где $\{P_{c2}\}$, $\{P_{c3}\}$ и $\{P_{\Sigma}\}$ – значения мощностей, выделяемых на НЭ ТПР 14, 15 и 16 сигналами от сенсоров 2 и 3, а также суммарным сигналом сенсоров 2 и 3.

По истечении времени Δt_H выделенная на нагревательных элементах НЭ ТПР тепловая мощность преобразуется в частоты $f'_4 = P_3^2 S'_H + P_3 S'_L + f'_0$, $f''_4 = P_3^2 S''_H + P_3 S''_L + f''_0$ и $f'''_4 = P_3 S'''_H + P_3 S'''_L + f'''_0$ электрических сигналов прямоугольной формы с помощью генераторов 17, 18 и 19 соответственно. Эти сигналы поступают, через

ЛЭ 20 на последовательный порт МП 25. С помощью МП 25 осуществляется измерение частот f_4' , f_4'' и f_4''' следования импульсов прямоугольной формы и запоминание результатов измерений в виде кодов чисел N'_{f4} ($N'_{f4} = \{\Delta t_0\}\{f_4'\}$), N''_{f4} ($N''_{f4} = \{\Delta t_0\}\{f_4''\}$) и N'''_{f4} ($N'''_{f4} = \{\Delta t_0\}\{f_4'''\}$) в ОЗУ 22.

В пятом такте на входы ЦАП 23 с выхода МП 25 поступает код числа N_{03} . В результате на выходах СУ 8, 9 и 10 формируются новые сигналы, которые в течение времени Δt_n на НЭ ТПР 14, 15 и 16 выделяют электрическую мощность $P_4' (\{P_4'\} = \{P_{c2}\} + \{P_{03}\})$, $P_4'' (\{P_4''\} = \{P_{c3}\} + \{P_{03}\})$ и $P_4''' (\{P_4'''\} = \{P_{\Sigma}\} + \{P_{03}\})$ соответственно.

По истечению времени Δt_n выделенная на нагревательных элементах НЭ ТПР тепловая мощность с помощью генераторов 17, 18 и 19 преобразуется, соответственно, в частоты $f_5' = P_4'^2 S'_n + P_4' S'_l + f_0'$, $f_5'' = P_4''^2 S''_n + P_4'' S''_l + f_0''$ и $f_5''' = P_4'''^2 S'''_n + P_4''' S'''_l + f_0'''$ электрических сигналов прямоугольной формы с помощью генераторов 17, 18 и 19 соответственно. Как и в предыдущих тактах, эти сигналы поступают, через ЛЭ 20, на последовательный порт МП 25. С помощью последнего осуществляется измерение частот f_5' , f_5'' и f_5''' следования указанных импульсов и запоминание результатов измерений в виде кодов чисел N'_{f5} ($N'_{f5} = \{\Delta t_0\}\{f_5'\}$), N''_{f5} ($N''_{f5} = \{\Delta t_0\}\{f_5''\}$) и N'''_{f5} ($N'''_{f5} = \{\Delta t_0\}\{f_5'''\}$) в ОЗУ 22.

Затем результаты промежуточных измерений электрической мощности, выделяемой на НЭ разными электрическими сигналами обрабатываются по уравнению числовых значений

$$N_U = \frac{N_{P0} \left[(N'_{f5} - N'_{f4}) - \left(\frac{2N_{P0}N_{\Delta P}(N'_{f2} + N'_{f3} - 2N'_{f1}) - (N_{P0}^2 + N_{\Delta P}^2)(N'_{f3} - N'_{f2})}{N_{P0}^2 - N_{\Delta P}^2} \right) \right]}{(N'_{f3} - N'_{f2}) - \left(\frac{2N_{P0}N_{\Delta P}(N'_{f2} + N'_{f3} - 2N'_{f1}) - (N_{P0}^2 + N_{\Delta P}^2)(N'_{f3} - N'_{f2})}{N_{P0}^2 - N_{\Delta P}^2} \right)}, \quad (2)$$

$$N_I = \frac{N_{P0} \left[(N''_{f5} - N''_{f4}) - \left(\frac{2N_{P0}N_{\Delta P}(N''_{f2} + N''_{f3} - 2N''_{f1}) - (N_{P0}^2 + N_{\Delta P}^2)(N''_{f3} - N''_{f2})}{N_{P0}^2 - N_{\Delta P}^2} \right) \right]}{(N''_{f3} - N''_{f2}) - \left(\frac{2N_{P0}N_{\Delta P}(N''_{f2} + N''_{f3} - 2N''_{f1}) - (N_{P0}^2 + N_{\Delta P}^2)(N''_{f3} - N''_{f2})}{N_{P0}^2 - N_{\Delta P}^2} \right)}, \quad (3)$$

$$N_{\Sigma} = \frac{N_{P0} \left[(N'''_{f5} - N'''_{f4}) - \left(\frac{2N_{P0}N_{\Delta P}(N'''_{f2} + N'''_{f3} - 2N'''_{f1}) - (N_{P0}^2 + N_{\Delta P}^2)(N'''_{f3} - N'''_{f2})}{N_{P0}^2 - N_{\Delta P}^2} \right) \right]}{(N'''_{f3} - N'''_{f2}) - \left(\frac{2N_{P0}N_{\Delta P}(N'''_{f2} + N'''_{f3} - 2N'''_{f1}) - (N_{P0}^2 + N_{\Delta P}^2)(N'''_{f3} - N'''_{f2})}{N_{P0}^2 - N_{\Delta P}^2} \right)}, \quad (4)$$

полученному в результате решения системы нелинейных уравнений величин и вывода уравнений избыточных измерений.

Результат измерений электрической мощности сигналов сложной формы определяют по уравнению числовых значений

$$N_x = \frac{1}{2} (N_{\Sigma}^2 - (N_U^2 + N_I^2)). \quad (5)$$

Нетрудно показать, что предложенное техническое решение ЦИМ обеспечивает автоматическое исключение систематической составляющей погрешности результата определения действительного значения мощности, в том числе и погрешности от нелинейности. Для этого в (5) необходимо подставить аналитические выражения (2), (3) и (4), а также значения частот $N'_{f1}, N''_{f1}, N'''_{f1}, \dots, N'_{f5}, N''_{f5}, N'''_{f5}$, выраженные через измеряемые мощности.

Таким образом, предложено техническое решение ЦИМ обеспечивает достижение цели исследований – повышение точности измерений. При этом быстродействие ЦИМ равно сумме продолжительности всех шести тактов промежуточных измерений.

Недостатком предложенного технического решения является аппаратная избыточность функциональных элементов. Этот недостаток может быть устранен за счет последовательного, а не параллельного во времени преобразования электрической мощности в частоту электрического сигнала генератора. На рис. 2 приведена структурная схема ЦИМ с последовательным во времени преобразованием электрической мощности выходных сигналов сенсоров тока и напряжения и суммы этих сигналов в тепловую мощность, а затем в частоту электрического сигнала прямоугольной формы. В данном случае уменьшение числа функциональных блоков привело к увеличению на два числа тактов промежуточных преобразований, т.е. к уменьшению быстродействия.

Предложенное техническое решение ЦИМ обеспечивает сокращение аппаратных затрат на 20% при той же точности измерений.

Анализ показал, что дальнейшее уменьшение аппаратных затрат возможно при временном разделении процесса формирования электрических сигналов, поступающих на НЭ ТПР.

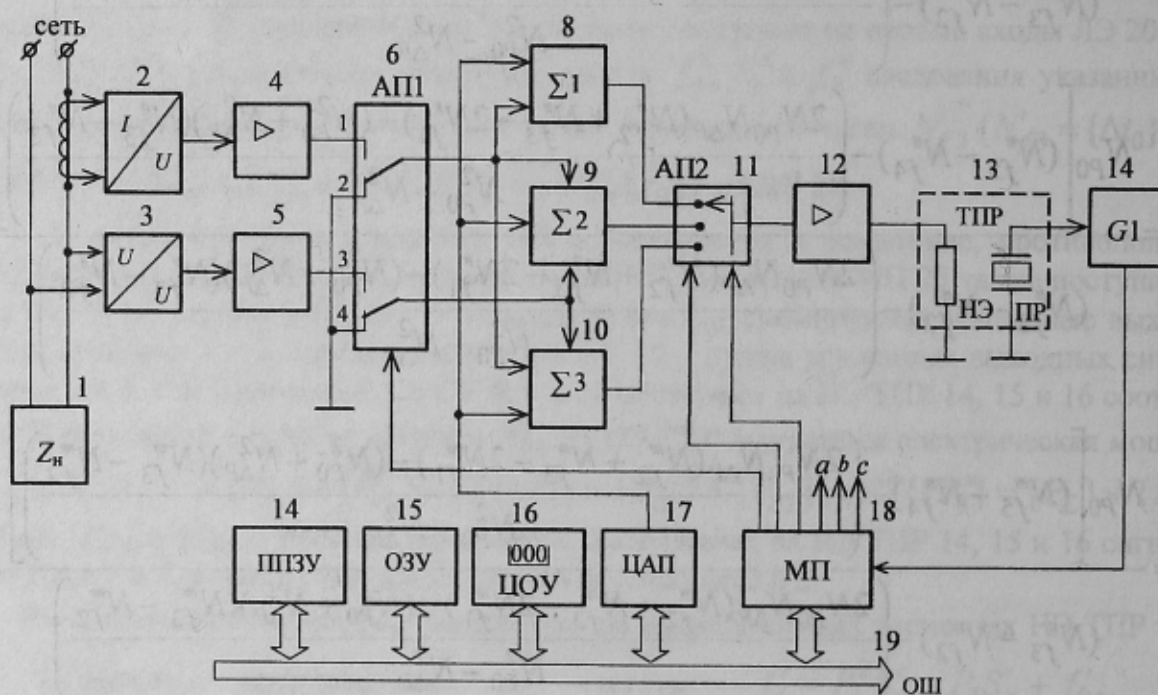


Рис.2. Структурная схема цифрового измерителя мощности электрических сигналов сложной формы

На рис. 3 приведена структурная схема ЦИМ реализующего метод избыточных измерений с временным разделением процессов преобразования выходных сигналов сенсоров.

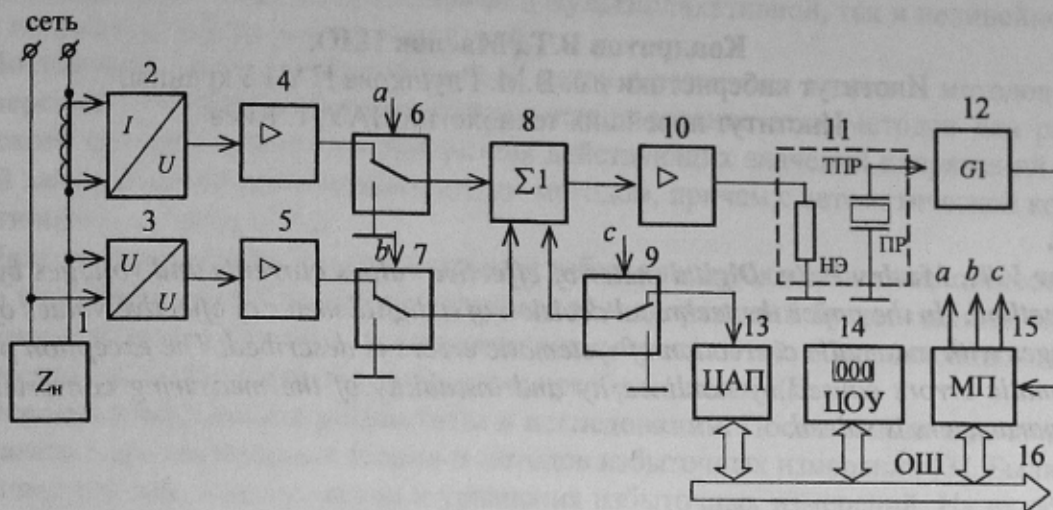


Рис. 3. Структурная схема цифрового измерителя мощности электрических сигналов сложной формы

В результате достигается уменьшение аппаратных затрат на 64% при сохранении той же точности измерений. Положительный эффект достигнут за счет увеличения времени измерений на два такта по сравнению со схемой ЦИМ, приведенной на рис. 1.

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о перспективности электротепловых методов избыточных измерений мощности с автоматической коррекцией систематических погрешностей при использовании сенсоров тока с несимметричным выходом и второго суммо-разностного способа перемножения действующих значений тока и напряжения.

Выводы

1. В целом, достигнута цель научно-исследовательской работы. Разработаны технические решения ЦИМ с автоматической коррекцией систематических погрешностей при использовании сенсоров тока с несимметричным выходом и второго суммо-разностного способа перемножения действующих значений тока и напряжения.
2. Описана работа ЦИМ, реализующих метод избыточных измерений с пространственным и временным разделением каналов. Показана возможность уменьшения аппаратных затрат на 20% и 64% при увеличении времени измерений всего на два измерительных такта.
3. Приведенные технические решения ЦИМ на сегодняшний день являются наиболее перспективными, поскольку реализуют электротепловой метод преобразования электрических сигналов.
4. Получены новые знания об электротепловых ЦИМ с автоматической коррекцией систематических погрешностей, обеспечивающие дальнейшее развитие техники высокоточного измерения мощности периодических сигналов сложной формы.

Литература

1. Методы измерения электрической мощности: основные понятия, определения, классификация / В.Т.Кондратов, Богданова. – Киев, 2002. – 57 с. – (Препр. / НАН Украины. Ин-т кибернетики им. В.М.Глушкова; 2002-5).
2. Малов В.В. Пьезорезонансные датчики. - М.: Энергия, 1978.- 248 с.
3. Кондратов В.Т., Богданова О.О. Цифровий вимірювач потужності. Деклараційний патент на винахід № 57321 А, 7 G01 R21/10, Україна. Бюл. № 6, 2003 р.