

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ УСТАНОВОК ДЛЯ ПОВЕРКИ СЧЕТЧИКОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Розглянуто принципи побудови окремих вузлів автоматизованої установки для перевірки лічильників електроенергії, наведено їх структурні схеми та алгоритми роботи. Описано алгоритм роботи метрологічної установки в цілому, представлено фото її дослідного зразка .

Рассмотрены принципы построения отдельных узлов автоматизированной установки для поверки счетчиков электроэнергии, приведены их структурные схемы и алгоритмы работы. Описан алгоритм работы метрологической установки в целом, представлено фото ее опытного образца .

Одним из определяющих факторов успешного производства и продвижения новой измерительной продукции на рынки государства и мира является наличие современных серийных средств метрологического обеспечения этой продукции. В особенности это касается таких распространенных средств измерения, как счетчики электроэнергии (СЭЭ).

Счетчики электроэнергии являются одним из самых массовых средств измерения. Их потребность в масштабах Украины составляет сотни тысяч штук в год. Каждый из этих СЭЭ должен пройти полный цикл метрологической поверки. Выходным информативным параметром для СЭЭ является количество выходных импульсов (или оборотов диска в индукционных СЭЭ), приходящихся на 1 кВт·ч. Это обстоятельство позволяет определять метрологические характеристики путем сравнения выходных частот поверяемых и образцовых СЭЭ.

Проблема создания автоматизированной метрологической установки для поверки средств учета электроэнергии существовала еще с начала 80-х годов прошлого столетия. Однако она была настолько сложной и многоплановой, что Минприбор СССР не смог обеспечить финансирование для ее решения.

Действительно, общая проблема по созданию автоматизированной системы поверки счетчиков электроэнергии (АСПСЭ) может быть разбита на несколько проблем, решение каждой из которых представляло собой крупное достижение в области измерительной техники.

В первую очередь сюда следует отнести создание рабочих эталонов мощности и электроэнергии 1-, 2- и 3-го разрядов.

Следующим важнейшим направлением работ является создание цифрового управляемого многофазного генератора с мощными выходными измерительными усилителями.

Создание эталонного мультиметра для контроля устанавливаемых параметров многофазной сети является третьим основополагающим звеном в решении общей проблемы.

Важное место в построении АСПСЭ занимает создание многоканальных определителей погрешности с разрешающей способностью 0,0001 %.

Создание алгоритмов и программного обеспечения для синхронного управления работой перечисленных узлов также относится к ключевым работам по созданию метрологических установок.

Таким образом, в состав автоматизированного стенда должны входить управляемый многофазный генератор (МФГ), образцовый СЭЭ, мультиметр и многоканальный определитель погрешностей электросчетчиков. Вся аппаратура стенда должна была создаваться с использованием микроконтроллеров, так как управление стендом предполагалось осуществлять при помощи ПЭВМ через последовательный порт типа RS232, который сопрягается со всей аппаратурой через адаптер токовой петли. В МФГ, который построен на основе микроконтроллера и цифроаналоговых преобразователей [1], заносятся параметры напряжений и токов поверяемой точки. Образцовый и поверяемые СЭЭ измеряют активную и реактивную мощности и преобразуют полученные значения в импульсные последовательности, которые

поступают на опорный и измерительные каналы определителя погрешностей, последний сравнивает частоты выходных импульсов поверяемых и образцового СЭЭ с учетом масштабных коэффициентов и вычисляет для каждого СЭЭ относительную погрешность, которая также заносится в ПЭВМ. Следовательно, в ПЭВМ создаются два массива данных – первый массив для задания параметров поверяемых точек, используется для программирования задающего МФГ, и второй массив данных результатов проверки СЭЭ в этих точках. Программное обеспечение в ПЭВМ объединяет этих два массива в одну таблицу, которая входит в протокол проверки СЭЭ.

Рассмотрим каждое из упомянутых направлений исследований более детально.

Настройка и проверка устройств для измерения параметров трехфазных электрических сетей (счетчики электроэнергии, измерители показателей качества электроэнергии и т.п.) предполагает применение специализированных МФГ сигналов. МФГ должен моделировать реальные параметры электрической сети – напряжения до нескольких сотен вольт, токи до сотен ампер с заданными значениями амплитуд и углов сдвига фаз гармоник. Создание генераторов с высокими метрологическими характеристиками, которые обеспечивают указанные диапазоны токов и напряжений, достаточно сложная задача, связанная в основном со сложностью построения мощных выходных усилителей с нормированными метрологическими характеристиками с погрешностями на уровне десятых и сотых долей процента.

В общем случае выходные сигналы МФГ описываются следующими зависимостями:

$$\begin{aligned} u_A(t) &= \sum_{k=1}^{K_{\max}} U_{Ak} \sin(k\omega t + \Psi_{U_{Ak}}), & i_A(t) &= \sum_{k=1}^{K_{\max}} I_{Ak} \sin(k\omega t + \Psi_{I_{Ak}}), \\ u_B(t) &= \sum_{k=1}^{K_{\max}} U_{Bk} \sin(k\omega t + \Psi_{U_{Bk}}), & i_B(t) &= \sum_{k=1}^{K_{\max}} I_{Bk} \sin(k\omega t + \Psi_{I_{Bk}}), \\ u_C(t) &= \sum_{k=1}^{K_{\max}} U_{Ck} \sin(k\omega t + \Psi_{U_{Ck}}), & i_C(t) &= \sum_{k=1}^{K_{\max}} I_{Ck} \sin(k\omega t + \Psi_{I_{Ck}}), \end{aligned} \quad (1)$$

где $u_A(t)$, $u_B(t)$, $u_C(t)$, $i_A(t)$, $i_B(t)$, $i_C(t)$ – мгновенные значения выходных сигналов МФГ; U_{Ak} , U_{Bk} , U_{Ck} , I_{Ak} , I_{Bk} , I_{Ck} , $\Psi_{U_{Ak}}$, $\Psi_{U_{Bk}}$, $\Psi_{U_{Ck}}$, $\Psi_{I_{Ak}}$, $\Psi_{I_{Bk}}$, $\Psi_{I_{Ck}}$ – амплитуды и начальные углы сдвига фаз k -х гармоник фазных напряжений и токов; K_{\max} – наибольший номер задаваемой гармоники, $\omega = 2\pi f_1$, где f_1 – частота 1-й гармоники.

Создать универсальный генератор со столь сложной формой выходных сигналов традиционными средствами аналоговой техники практически невозможно. Поэтому мы решили эту задачу при помощи микропроцессорной техники. В этом случае создается массив данных мгновенных значений сигналов вида (1), которые последовательно во времени выводятся на входы цифроаналоговых преобразователей (ЦАП). Выходные сигналы ЦАП, пропорциональные сигналам (1), могут быть усилены до соответствующих значений транзисторными усилителями мощности [1].

Блок-схема алгоритма функционирования МФГ, показанная на рис. 1, отражает последовательность преобразования и использования массивов данных. В массив входных параметров входят частота первой гармоники, k – номер гармоники (диапазон изменения 2...15), действующие значения напряжений первой и k -й гармоник, действующие значения токов первой и k -й гармоник, начальные углы сдвига фаз для всех перечисленных выше напряжений и токов.

Действующие значения гармоник напряжения задаются в диапазоне от 0 до 499.99 В с дискретностью 0.01 В, действующие значения гармоник токов задаются в диапазоне от 0 до 59.999 А с дискретностью 0.001 А, а углы сдвига фаз – в диапазоне от 0 до 359.9 град с дискретностью 0.1 град.

Сразу отметим, что нет принципиального ограничения на количество задаваемых гармоник; могут быть заданы гармоники с номерами k_1 , k_2 и т.д. в диапазоне от 2 до $N/2$, где N – количество ступенек в сигнале на одном периоде первой гармоники. Но далее, чтобы не загромождать формулы, будем считать, что задается только одна высшая k -я гармоника.

Начальное значение всех входных параметров, кроме f_1 , равно нулю, $f_1=50$ Гц. Заполнение массива входных параметров возможно либо в процедуре установки параметров либо через последовательный порт соответствующей процедурой обмена данными с ПЭВМ. Значение частоты первой гармоники f_1 из этого массива используется для задания периода дискретизации выходных сигналов. Остальные параметры используются для расчета мгновенных значений выходных сигналов для моментов времени $t_n = T_x n$, где $n=0, \dots, N-1$ – номер дискретного отсчета.

Для того чтобы исключить большой объем вычислений тригонометрических функций, действующие значения гармоник A и их углы сдвига начальных фаз Ψ , которые представляют собой полярные координаты вектора \dot{A} , преобразуются в ортогональные составляющие X и Y (прямоугольные координаты вектора) в соответствии с формулами Эйлера:

$$\dot{A} = A \exp(j\Psi) = X + jY, \quad X = A \cos(\Psi), \quad Y = A \sin(\Psi).$$

Рассмотрим эти преобразования на примере напряжения и тока фазы “А”, причем будем учитывать, что угол сдвига фазы тока задается относительно соответствующего ему напряжения, а угол сдвига фазы высшей гармоники напряжения или тока – относительно нуля-перехода соответствующего напряжения или тока первой гармоники. Тогда ортогональные составляющие первой и k -й гармоник напряжения и тока равны:

$$\begin{aligned} X_{UA1} &= U_{A1} \cos(\Psi_{UA1}), & Y_{UA1} &= U_{A1} \sin(\Psi_{UA1}), \\ X_{UAk} &= U_{Ak} \cos(k\Psi_{UA1} + \varphi_{UAk}), & Y_{UAk} &= U_{Ak} \sin(k\Psi_{UA1} + \varphi_{UAk}), \\ X_{IA1} &= I_{A1} \cos(\Psi_{UA1} + \varphi_{IA1}), & Y_{IA1} &= I_{A1} \sin(k\Psi_{UA1} + \varphi_{IA1}), \\ X_{IAk} &= I_{Ak} \cos(k(\Psi_{UA1} + \varphi_{IA1}) + \varphi_{IAk}), & Y_{UA1} &= I_{Ak} \sin(k(\Psi_{UA1} + \varphi_{IA1}) + \varphi_{IAk}). \end{aligned}$$

Мгновенное значение напряжения в фазе “А” в момент времени t_n равно

$$u_A(t_n) = X_{UA1} \sin(2\pi f_1 t_n) + Y_{UA1} \cos(2\pi f_1 t_n) + X_{UAk} \sin(2\pi f_1 k t_n) + Y_{UAk} \cos(2\pi f_1 k t_n). \quad (2)$$

Аналогичные формулы будут для других фаз напряжений и токов.

С учетом того, что $f_1 t_n = n/N$, формула (2) примет вид

$$u_A(t_n) = X_{UA1} \sin \frac{2\pi n}{N} + Y_{UA1} \cos \frac{2\pi n}{N} + X_{UAk} \sin \frac{2\pi nk}{N} + Y_{UAk} \cos \frac{2\pi nk}{N}. \quad (3)$$

Нетрудно заметить, что все значения синусов и косинусов принадлежат множеству значений $S[i]=\sin(2\pi i/N)$, $i=0 \dots N-1$. Поэтому для расчета по формуле (3) элементов массива мгновенных значений $u_A[n]$, $n=0 \dots N-1$, достаточно иметь таблицу из N значений функции синуса в массиве $S[i]$, и вычислять индексы элементов этого массива. Тогда формула (3) преобразуется к виду

$$u_A[n] = X_{UA1} S[n] + Y_{UA1} S[(n + N/4) \bmod N] + X_{UAk} S[nk \bmod N] + Y_{UAk} S[(nk + N/4) \bmod N],$$

где операция $X \bmod N$ соответствует получению остатка от деления целого числа X на N .

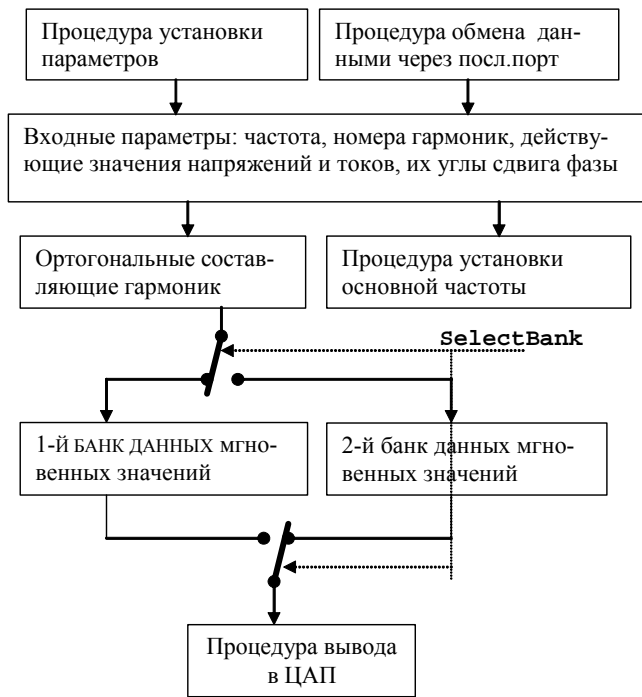


Рис. 1

Аналогично вычисляются элементы массивов мгновенных значений $u_B[n]$, $u_C[n]$, $i_A[n]$, $i_B[n]$, $i_C[n]$.

Полученные мгновенные значения сигналов накапливаются в одном из двух банков данных, причем эти значения хранятся в последовательно расположенных ячейках ОЗУ в следующем порядке:

$$\begin{aligned} &u_A[0], u_B[0], u_C[0], i_A[0], i_B[0], i_C[0], u_A[1], u_B[1], u_C[1], i_A[1], i_B[1], i_C[1], \dots, \\ &u_A[N-1], u_B[N-1], u_C[N-1], i_A[N-1], i_B[N-1], i_C[N-1]. \end{aligned} \quad (4)$$

Данные для занесения в ЦАП выбираются из другого банка данных мгновенных значений. После вычисления всех мгновенных значений (4) логическая переменная SelectBank

изменяет свое значение на противоположное. Поэтому в ЦАП будут заноситься данные из того банка, в котором только что были обновлены данные, а другой банк будет подготовлен для модификации содержимого. Этот процесс на рис. 1 условно показан в виде двух синхронно переключающихся коммутаторов.

Рассмотренный МФГ может быть использован в установке для проверки средств измерения параметров трехфазных сетей (см. рис. 2). Выходы МФГ подключены к исследуемому объекту (поверяемому измерительному прибору) и к образцовому мультиметру, который используется для проверки.

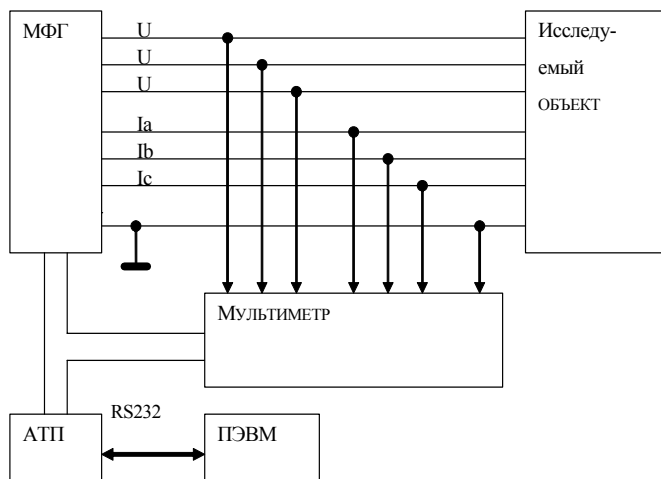


Рис. 2

Поскольку состояние электрических сетей, в том числе и трехфазных, характеризуется большим количеством параметров, к которым относятся действующие значения напряжений и токов, действующие значения гармоник напряжений и токов и их углы сдвига фазы, симметричные составляющие, активные, реактивные, полные мощности и др., для их измерения нужны соответствующие приборы. Очевидно, что не целесообразно решать эту задачу разработкой отдельного прибора для каждого из параметров. Всю необходимую информацию можно получить путем соответствующей обработки д

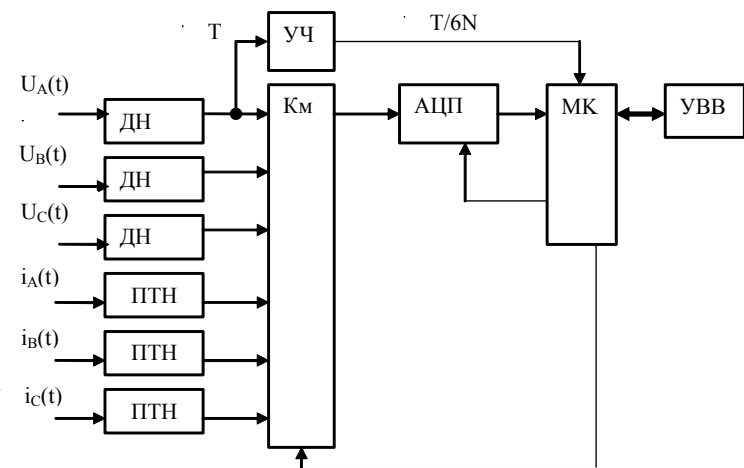


Рис. 3

рованных мгновенных значений напряжений и токов. Естественно, решить поставленную задачу измерения если не всех, то хотя бы большинства параметров одним устройством можно только с помощью микропроцессорной техники. Вопрос заключается в рациональном выборе структурной схемы измерительного прибора, адекватных алгоритмов измерения и микроконтроллеров (МК), способных реализовать эти алгоритмы.

Структурная схема подобного устройства (рис. 3) включает в себя входные преобразователи (делители напряжения (ДН) и трансформаторные преобразователи ток-напряжение (ПТН)), аналоговый коммутатор Км, усилитель с управляемым коэффициентом усиления, аналого-цифровой преобразователь

(АЦП). В качестве АЦП используется либо АЦП, встроенный в МК, либо внешний быстродействующий 16-ти битный АЦП [2]. Для синхронизации моментов запуска АЦП используется программно-аппаратный умножитель частоты (УЧ), реализованный с помощью внутренних периферийных устройств МК [3]. Для каждого входного сигнала на периоде берется N выборок (использовались значения $N=32$ для приборов на основе МК i87C196KD и MSP430F1611, и $N=128$ для МК dsPIC33FJ256GP506).

Для повышения быстродействия использована многопоточная модель обработки сигналов – часть обработки привязана к прерываниям УЧ, часть – к последнему импульсу в конце периода. Часть обработки проводится только при выводе информации на индикатор или при запросе данных из ПЭВМ. Анализ различных алгоритмов показал, что наибольшее быстродействие обеспечивается при предварительном накоплении мгновенных значений сигналов в соответствующем массиве ЗУ в МК и последующей их обработкой по отдельности для каждого измеряемого параметра. Так, например, для МК MSP430F1611 одновременное измерение действующих значений и параметров первой гармоники занимает примерно 16 мс, а если добавляется измерение коэффициентов несинусоидальности – то не более 32 мс.

Изложенные принципы легли в основу построения образцового счетчика электроэнергии (СЭЭ) и многофункционального мультиметра, объединение которых в единый прибор удалось осуществить благодаря применению микроконтроллеров.

В качестве мультиметра может быть использован прибор СТО-3, выпускаемый фирмой “ЭЛВИН” (Украина, г. Киев), в котором заложены принципы построения, изложенные в [2]. Данный мультиметр позволяет измерять углы сдвига фаз напряжений и токов относительно угла сдвига фазы напряжения в фазе “А”, т.е. по его показаниям можно восстановить векторную диаграмму трехфазных систем тока и напряжения.

Вся система управляется от ПЭВМ через последовательный интерфейс RS232, который обеспечивает связь с МФГ, мультиметром и другим оборудованием через адаптер токовой петли (АТП). Программа, загруженная в ПЭВМ, обеспечивает задание нужных значений выходных сигналов МФГ для каждой точки поверки путем занесения соответствующих данных в МФГ, контроль выходных параметров МФГ при помощи мультиметра и еще целый ряд задач, не относящихся к теме данной работы.

Так как известны задаваемые параметры сигналов и их измеренные значения, которые реально получены на выходах МФГ, то можно внести коррекцию в данные, которые поступают из ПЭВМ в МФГ таким образом, чтобы минимизировать погрешности его выходных сигналов [4]. Последовательность управления МФГ от ПЭВМ, необходимая для коррекции параметров выходных сигналов МФГ, представлена на рис. 4. Обозначения X, Y, Z, K соответствуют структурам, которые описывают параметры сигналов в соответствующих точках схемы. Заданные значения сигналов МФГ X после корректировки принимают значения Y и поступают в МФГ. Выходные сигналы МФГ Z измеряются мультиметром. На основании значений Z и Y рассчитываются поправочные коэффициенты K , которые используются в следующем цикле подстройки входных параметров МФГ.

Элементы структур X, Y, Z, K можно представить в виде совокупности амплитуд и фаз $A_{Xn}, \varphi_{Xn}, A_{Yn}, \varphi_{Yn}, A_{Zn}, \varphi_{Zn}, A_{Kn}, \varphi_{Kn}$ параметров в соответствующих точках схемы на рис. 3, где $n = 0...5$ – индекс фазы МФГ, соответствующий каналам $U_a, I_a, U_b, I_b, U_c, I_c$. Расчет поправочных коэффициентов и коррекция пересылаемых в МФГ данных производятся по формулам:

$$A_{Kn} = A_{Yn} / A_{Zn}$$

;

$$\varphi_{Kn} = \varphi_{Yn} - \varphi_{Zn};$$

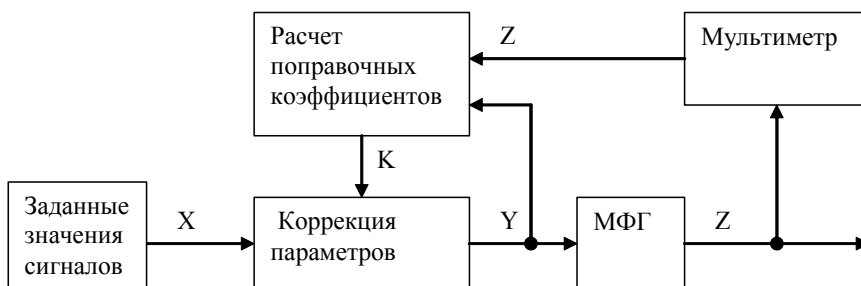


Рис. 4

(5)

$$A_{Yn} = A_{Xn} A_{Kn}; \quad \varphi_{Yn} = \varphi_{Xn} + \varphi_{Kn}; \quad (6)$$

Отметим, что A_{Yn} , φ_{Yn} в формуле (5) соответствуют прошедшему циклу управления МФГ, а A_{Yn} , φ_{Yn} в формуле (6) – новому циклу.

Данные, полученные в (6), дополнительно корректируются – углы сдвига фаз приводятся к диапазону $0...360^\circ$, амплитуды ограничиваются максимальными допустимыми значениями (естественно, при поверке прибора с входным диапазоном 100 В на его вход не рекомендуется подавать напряжение больше 120 В). Затем эти данные переносятся в МФГ и выдерживается двухсекундная пауза, для того чтобы завершились переходные процессы. После этого считываются измерительные данные из мультиметра и заносятся в структуру Z .

Цикл измерения выходных параметров МФГ, вычисление поправочных коэффициентов K и коррекцию данных, посылаемых в МФГ, можно повторить несколько раз, до тех пор, пока погрешности задания сигналов не достигнут приемлемых значений. После нескольких циклов коррекции значения выходных сигналов МФГ сходятся к установившемуся значению, так как значения коэффициентов передачи каналов в смежных интервалах коррекции мало отличаются друг от друга. Незначительное изменение этих коэффициентов возможно из-за нелинейности усилителя или из-за временной нестабильности. В идеальном случае при линейных усилителях или при незначительном изменении уровня сигналов уравнивание системы происходит за один цикл. Реально, особенно при переключении между поверяемыми точками, уровни сигналов для которых отличаются в десятки раз, может потребоваться от двух до пяти циклов итераций, причем, как показали наблюдения, практически уже сразу после первой итерации погрешности задания сигналов не превышают 1 %, а после завершения уравнивания – погрешности задания сигналов примерно равны 0.1 %.



Рис. 5

Точность задания сигналов полностью определяется погрешностью образцового мультиметра, так как в процессе управления системой выходные сигналы МФГ стремятся принять заданные значения, а погрешность задания этих сигналов оценивается по показаниям образцового прибора. Как показывает опыт, создание образцового прибора в большинстве случаев более простая задача, чем создание калибратора с аналогичными метрологическими характеристиками.

В результате проведенных исследований в Украине впервые

были созданы рабочие эталоны мощности и электрической энергии 1-, 2- и 3-го разрядов, цифровой многофазный управляемый генератор, многоканальный определитель погрешностей и опытный образец автоматизированной поверочной установки, фото которой приведено на рис. 5.

1. Карасинский О.Л., Тесик Ю.Ф. Многофазный генератор для моделирования параметров трехфазной сети // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України. Електротехніка'2001: 36. наук. пр. – К.: ІЕД НАНУ, 2001. – С. 98–104.
2. Карасинский О.Л., Тесик Ю.Ф. Микропроцессорный измерительный преобразователь параметров электрических сетей // Техн. електродинаміка. – 2003. – №5. – С. 69–75.
3. Карасинский О.Л., Тесик Ю.Ф. Программно-аппаратная реализация умножителей частоты // Электронное моделирование. – 2002. – №1. – С. 119–124.
4. Карасинский О.Л., Тесик Ю.Ф., Шувалов Г.И., Коломиец Е.А. Алгоритм калибровки многофазного генератора для моделирования параметров трехфазной сети // Техн. електродинаміка. – 2006. – № 5. – С. 77–79.