

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ МОЩНОСТИ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В МЕТРОЛОГИЧЕСКОМ ОБОРУДОВАНИИ

Р.Н. Мороз, асп., Ю.Ф. Тесик, докт. техн. наук

Институт электродинамики НАН Украины,  
пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина

*Рассмотрены источники напряжения и тока, предназначенные для воспроизведения параметров сети переменного тока, а также их принципы построения, приведены структурные схемы. Сделан обзор характеристик выходных усилителей мощности генераторов-калибраторов и метрологического оборудования. Показано, что существующие измерительные усилители мощности таких приборов имеют ряд недостатков при работе с нелинейной нагрузкой. Сформулированы задачи по их развитию для устранения недостатков. Библ. 20, рис. 7, табл. 3.*

**Ключевые слова:** метрологическое оборудование, воспроизведение, электроэнергия, показатели качества, измерительные усилители.

Электричество сегодня является одним из наиболее востребованных видов сырья во всем мире. Происходит постоянное развитие электроэнергетики, увеличение объемов ее производства и стоимости. Как любой товар, электричество должна соответствовать требуемому качеству. Показатели качества электричества (ПКЭ), их точность измерения нормируются ГОСТ 13109-97 [3] в СНГ и международным стандартом МЭК 61000-4-30. В свою очередь это ведет к возрастанию требований к точности учета электричества и измерения ПКЭ. Эти требования постоянно ужесточаются в странах Европы, США, России и в Украине. В связи с этим происходит замена ГОСТ 26035-83 на ГОСТ 30207-94 и ГОСТ 30206-94 на средства учета и ГОСТ 13109-67, ГОСТ 13109-87 на ГОСТ 13109-97. В результате можно полагать, что требования к метрологическим характеристикам средств учета электричества и измерений ПКЭ (далее СИ) будут ужесточаться.

Существует множество разных СИ, позволяющих измерять ПКЭ и вести учет электричества, но они, как и все остальные СИ, подвергаются проверке. Для проведения проверки и аттестации необходим источник напряжения и тока или специализированный генератор-калибратор (ГК), предназначенный для воспроизведения широкого ряда параметров фазных напряжений сети, токов, мощности и ПКЭ. Общая структурная схема включения ГК и СИ при проверке представлена на рис. 1, где обозначены: БУ – блок управления и обработки данных, СИ№1–СИ№k – СИ от 1 до k-го, ЭСИ – эталонное средство измерений.

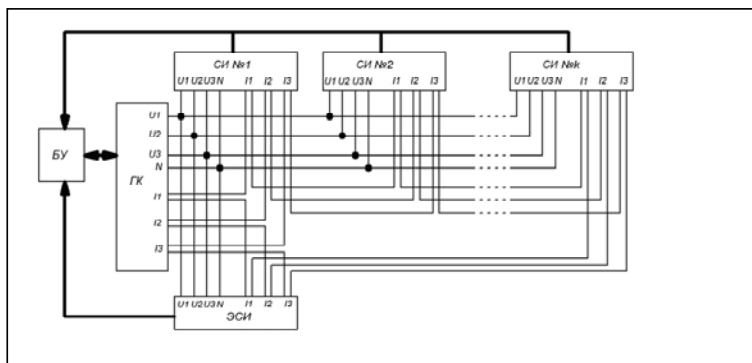


Рис. 1

На выходе генератора формируются фазные напряжения  $U_1$ ,  $U_2$ ,  $U_3$  и токи  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$ . Включение четырехпроводное с нейтралью  $N$ . Напряжения и токи подаются на СИ №1 – №k и эталонное СИ. Блок управления управляет ГК, считывает показания поверяемых и эталонного приборов, вычисляет погрешность измерения. Для проведения проверки СИ№1–№k эталонным СИ схема позволяет получить

«фантомную» активную мощность трехфазной сети  $P_{3ф}$ :

$$P_{3ф} = U_1 I_1 \cos \varphi_1 + U_2 I_2 \cos \varphi_2 + U_3 I_3 \cos \varphi_3, \quad (1)$$

где  $\cos \varphi$  – угол фазового сдвига между током и фазным напряжением. Следовательно, для высокой точности проверки необходимо устанавливать калиброванные значения параметров

$U, I, \varphi$ . При этом погрешность воспроизведения ПКЭ должна быть минимум в три раза меньше погрешности измерения согласно ГОСТ 22261-94 [2].

Все современные СИ являются электронными приборами. Соответственно они нуждаются в электропитании электронных цепей для функционирования. Несмотря на большое разнообразие СИ, многие из них получают электропитание по линиям измерений фазных напряжений. Электронные цепи блока питания представляют нелинейную нагрузку на линии фазных напряжений ГК. Нелинейный характер цепи определяется наличием в ней полупроводниковых нелинейных элементов (выпрямительных мостов, диодов, тиристоров и т.д.). Нелинейные электропотребители являются причинами гармонических искажений в результате сложения основной (1-й) гармоники номинальной частоты питающей сети с появившимися по разным причинам высшими гармониками. Обнаружено влияние многих СИ на выходные сигналы, что ухудшает параметры качества тестового сигнала (рис. 2).

Наличие искажений вносит погрешность в калибровку СИ, так как алгоритмы работы и их конструктивное исполнение предполагают отсутствие искажений. Коэффициент искажения синусоидальности (КИС) кривой напряжения  $K_U$  и его уровень ограничены стандартами [2, 3]. Поэтому ГК должен обеспечивать работу на нелинейную нагрузку с минимальным коэффициентом нелинейных искажений  $K_U$ . Возрастающее количество СИ также требует увеличения выходной мощности каналов воспроизведения напряжения и тока. Увеличение выходной мощности каналов напряжения позволяет проводить поверку или калибровку большего количества СИ одновременно. А их высокий класс точности ужесточает требования к искажениям синусоидальности (работа на нелинейную нагрузку) и стабильности сигнала. Современные СИ позволяют пропускать прямые токи в 200 А. Отсюда и требования к ГК обеспечивать токи такой амплитуды.

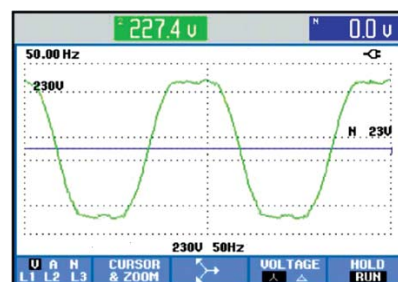


Рис. 2

Генераторы-калибраторы в настоящее время промышленно выпускают многие российские и зарубежные фирмы. К сожалению, в Украине они серийно не производятся. Рассмотрим ГК, доступные на рынке. Проанализируем их структуру, принципы работы, характеристики, способность работать с нелинейной нагрузкой и удовлетворять указанным выше требованиям. Детально рассмотрим выходные усилители, формирующие сигналы тока и напряжения на нагрузке. Основные метрологические характеристики выходных усилителей представлены в табл. 1 и 2. Необходимо отметить, что калибраторы – дорогостоящее оборудование – от 0,24 млн грн. (российский ГК «Энергоформа 3.3») до 0,7 млн грн. (зарубежный одноканальный ГК Fluke 6100А, а для трехфазной системы необходимы три блока). Они имеют значительную массу и габариты.

Трехфазный калибратор «Парма ГС8.031» переменного напряжения (ООО «Парма», г. Санкт-Петербург) имеет каналы напряжения А, В и С, соединённые по схеме «звезда» с общей точкой О, формирует сигналы переменного напряжения сложной формы, состоящие из синусоидального сигнала основной частоты и  $n$ -х гармонических составляющих [6]. Структурная схема представлена на рис. 3.

Персональный компьютер (ПК) с программным обеспечением предназначен для управления работой генератора, собранного в едином блоке. Модуль связи (МС) обеспечивает связь генератора с компьютером по интерфейсу USB. Модуль управления (МУ) производит загрузку параметров генерируемых сигналов, передает коды мгновенных значений выходных сигналов в цифроаналоговый преобразователь (ЦАП) и формирует временные параметры выходных сигналов. ЦАП преобразует последовательные коды с модуля управления. Усилители напряжения (УН) усиливают напряжение с ЦАП до необходимого уровня. Блок питания (БП) вырабатывает напряжение питания для работы всех узлов генератора. Каналы тока отсутствуют.

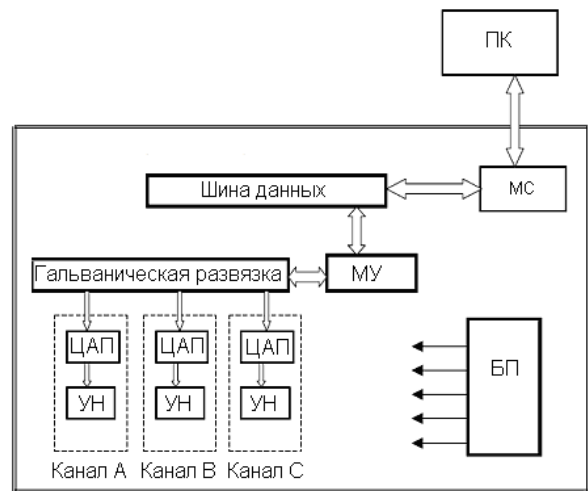


Рис. 3

Парма ГС8.033 – трехфазный калибратор, который формирует сигналы переменного напряжения и тока сложной формы, состоящие из синусоидального сигнала основной частоты и  $n$ -х гармонических составляющих. Он может применяться для проведения поверочных и регулировочных работ, осуществляемых в процессе производства и эксплуатации приборов, измеряющих параметры трех- или однофазной системы напряжений и токов. Управление работой ГК производится с помощью панели управления через клавиатуру (Кл) и жидкокристаллический индикатор (ЖКИ), так как модуль управления содержит процессор, а также с помощью компьютера [8]. Структурная схема представлена на рис. 4.

Принцип работы подобный предыдущему, но этот ГК имеет каналы выхода тока. Усилители тока (УТ) усиливают сигналы тока от ЦАП до необходимого уровня.

Трёхфазный программируемый источник переменного тока и напряжения «Энергоформа 3.3» (ООО НПП «Марс-энерго», г. Санкт-Петербург) предназначен для формирования трех- или однофазной системы токов и напряжений в соответствии с программируемой цифровой моделью сигнала. Он может применяться при проверке: СИ активной, реактивной и полной мощностей и энергии; СИ показателей качества электроэнергии в соответствии с ГОСТ 13109-97; СИ действующего значения напряжения и тока промышленной частоты [7]. Управление такое же, как у калибратора «Парма ГС8.033», но имеет интерфейс RS-232. Структурная схема аналогична схеме, представленной на рис. 4.

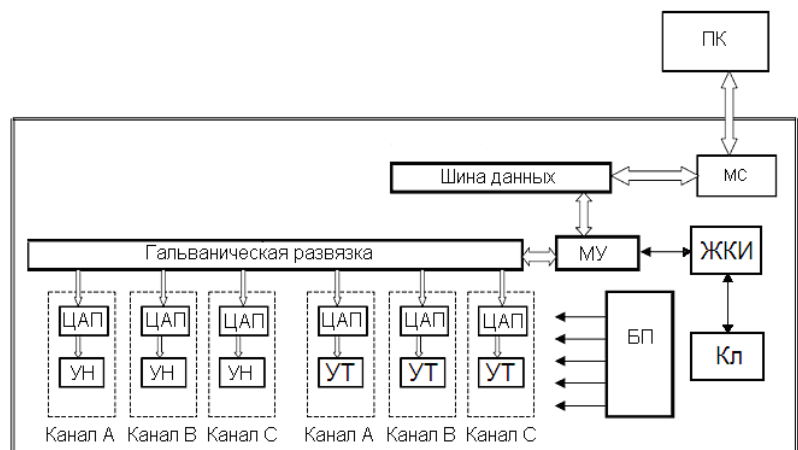


Рис. 4

Работа источника, как и предыдущих, основана на использовании принципа ЦАП. Усилители напряжения представляют собой три высоковольтных операционных усилителя (ОУ) с полевыми транзисторами на выходе. Все три канала собраны на одной плате, на которой также находится блок питания выходных транзисторов  $\pm 350$  В. На выходе каждого канала напряжения установлены предохранители 0,25 А. Усилителями тока являются мощные операционные усилители с отрицательной обратной связью по току, которая снимается с образцового шунта. Усилители каждого канала собраны на отдельных платах вместе со своими блоками питания. Управление диапазонами по току и напряжению осуществляется команда-

ми модуля управления, поступающими на реле, которые переключают шунты. Исполнение модульное в блоке.

Энергоформа 3.1 – трехфазный генератор, используемый в составе установки поверочной универсальной «УППУ-МЭ 3.1К», имеет три канала для формирования токов и напряжений одно- и трехфазной сети переменного тока. Он отличается от предыдущего ГК более мощными усилителями, поэтому состоит из блоков. Структурная схема и принцип работы аналогичны приведенным.

В состав установки «УППУ-МЭ 3.1К» входят три блока усилителей тока УТ-3.1, каналы А, В и С. Сигналы, задающие форму и величину выходного тока и напряжения, с выходов генератора-синтезатора «Энергоформа-3.1» поступают на входы усилителей тока и напряжения фаз А, В, С соответственно. Блок усилителей напряжения УН-3.1 состоит из трех независимых усилителей напряжения по каналам А, В и С [12].

Калибратор «Ресурс-К2» (фирма «Энерготехника», г. Пенза) воспроизводит выходные электрические сигналы переменного напряжения и тока трехфазной системы с произвольно задаваемыми значениями ПКЭ для формируемых напряжений, аналогичными для параметров токов [9]. Структурная схема и принцип работы такие же, как ГК «Энергоформа 3.3», но отсутствует ручное управление. Калибратор «Ресурс-К2» отличается блоком усилителей с программируемым коэффициентом усиления, который осуществляет предварительное усиление и регулирование выходных напряжений. Усилители имеют два значения коэффициента усиления, обеспечивая два диапазона выходных напряжений и токов. Выходные усилители имеют двухканальную структуру: мощный трансформаторный силовой канал и прецизионный. В их состав входят предварительные, а также мощные выходные усилители. Три трансформатора напряжения обеспечивают требуемые значения выходных напряжений, а три трансформатора тока – требуемые значения выходных токов. Исполнение моноблочное.

Таблица 1

Характеристики усилителей	Генераторы						
	Парма ГС8.031	Парма ГС8.033	Энергоформа 3.3	Энергоформа 3.1	Ресурс-К2	ЦУ6800И	ЦУ6800М
Действующее значение фазного напряжения $U_I$ , В и пределы допускаемой основной погрешности, %	0 – 316,8 $\pm(0,02+0,01 \cdot ( 220/U_1-1 ))$	10 – 308 $\pm(0,016+0,0015 \cdot ( 220/U_1-1 ))$	20 – 240 $\pm 2$	20 – 480 $\pm(1,0+0,5 \cdot ((60/U_1-1)) \pm(1,0+0,5 \cdot ((220/U_1-1))$	1 – 316,8 $\pm(0,05+0,01 \cdot ( U_{ном}/U_1-1 ))$ $U_{ном}=100$ или $220$ В	13 – 420 $\pm 0,1$	20 – 288 $\pm 0,33$ В
Действующее значение силы переменного тока $I_I$ , А и пределы допускаемой основной погрешности, %	Отсутствуют каналы тока	0,05 – 7 $\pm(0,1+0,002 \cdot (7/I_1-1))$	0,05 – 7 $\pm 2$	0,002 – 50 (или 100) $\pm(1,0+0,5 \cdot (50/I_1-1))$	0,001 – 7,5 $\pm(0,05+0,01 \cdot ( I_{ном}/I_1-1 ))$ $I_{ном}=1$ или $5$ А	0,005 – 10 (100 А с сети) $\pm 0,1$	0,001 – 10 $\pm 0,11$
Нестабильность напряжения / тока за минуту, не более, %	Нет данных / —	Нет данных / нет данных	0,03	$\pm 0,02$	Нет данных / нет данных	$\pm 0,1$	$\pm 0,01/\pm 0,1$
КИС напряжения $K_U$ / тока $K_I$ , %	0.01 (нет данных)	0.01 (нет данных)	1 (на линейном)	2 (нет данных)	0,01/0,05 (нет данных)	$\leq 2$ , как в сети, без стаби-	$\leq 1$ (нет данных)

(вид нагрузки)			сопротивлений)			лизации (нет данных)	
Частота основной гармоники $f$ , Гц	45 – 55	45 – 55	45,7 – 55	45 – 70	45 – 65	37,5 – 62,5	47,5 – 63
Количество гармоник, $n$	2 – 40	2 – 40	2 – 40	2 – 40	2 – 40	100 – 1000 Гц	1
Максимальная выходная мощность УН $P_{Umax}, /UT P_{Imax}, В \cdot А$	10/ —	15/31	10/5	15/50	15/14	25/17,5 или (200 В·А без стабилизации)	20/15
Усилители напряжения/тока	Нет данных / —	Нет данных / нет данных	Высоковольтный ОУ/низковольтный ОУ	Нет данных/нет данных	Аналоговые усилители с трансформаторным выходом	Усилители в режиме В с трансформаторными выходами	Усилители с ШИМ и трансформаторными выходами
Масса ГК, кг	8	10	12		35		40
Цена, млн. грн.	0,3	0,4	0,24	0,48 – 0,68	0,3	0,8	0,45

Установка «ЦУ6800И» (ЗАО «Энергомера», г. Ставрополь) предназначена для регулирования и поверки СИ. Она формирует номинальные значения выходных величин фазных напряжений и токов, задание производится вручную при помощи переключателей и регуляторов. Устанавливаемые номинальные значения частот выходных стабилизированных синусоидальных сигналов соответствуют значениям 50, 100, 200, 400, 500, 1000 Гц. Диапазон плавного регулирования частоты не менее  $\pm 25\%$ . В отличие от предыдущих генераторов установка не может формировать гармонические составляющие. Конструктивно она состоит из пульта управления, блоков напряжения и тока, стенов. Поверяемые приборы подключаются на стенд. Стабилизированные выходные напряжения формируются блоками напряжения ИНЕС.423146.006-03 [4] и тока ИНЕС.423146.005-03 [5]. Нестабилизированные выходные напряжения и токи формируются пультом управления с помощью трансформаторов и автотрансформаторов от сети. Частота тока равна частоте сети питания [10]. Структурная схема установки показана на рис. 5. Структурные схемы и принцип работы блоков напряжения и тока подобны описанным выше ГК и отличаются тем, что не могут управляться с компьютера.

Для обеспечения совместной работы блоков с выхода генератора блока напряжения подаются импульсы, синхронизирующие работу генератора блока тока. Выходной каскад усилителей напряжения и тока собран по мостовой схеме и работает в режиме В, охвачен обратной связью по постоянному и переменному токам, имеет защиту от перегрузки. Для обеспечения требуемой стабильности выходных токов напряжения с измерительных трансформаторов подаются на схемы стабилизации, расположенные в усилителе. Измерительные трансформаторы предназначены для получения напряжения, пропорционального выходному току, которое используется для осуществления обратной связи по выходному току. Изменение значения выходного тока производится путем переключения обмоток измерительных и выходных трансформаторов и регулирования значения опорного напряжения. Конструктивно блоки напряжения и тока выполнены в законченных приборных блоках.

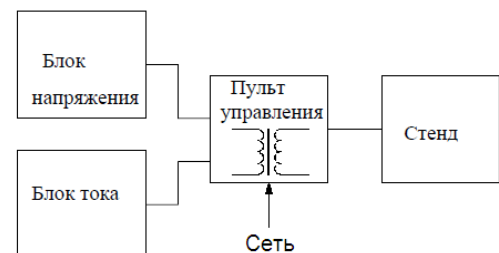


Рис. 5

Измерительные трансформаторы предназначены для получения напряжения, пропорционального выходному току, которое используется для осуществления обратной связи по выходному току. Изменение значения выходного тока производится путем переключения обмоток измерительных и выходных трансформаторов и регулирования значения опорного напряжения. Конструктивно блоки напряжения и тока выполнены в законченных приборных блоках.

ЦУ6800М – установка, которая обеспечивает поверку средств измерений мощности и энергии, воспроизводя калиброванный сигнал электрической мощности и выдачу заданного количества электрической энергии, состоит из базового блока и стенда [11]. В отличие от ЦУ6800 она имеет автоматический режим. Воспроизводит только основную частоту стабилизированного тока до 10 А. Структурная схема базового блока установки и принцип работы аналогичны ГК «Энергоформа 3.3». Выходные усилители представляют собой усилители с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ). Выходной сигнал с усилителей подается на блок трансформаторов, который согласует усилители мощности с нагрузкой.

Далее представим зарубежные ГК следующим оборудованием.

Многофункциональный генератор Fluke 6100A (фирма Fluke, Нидерланды) обеспечивает однофазные электрические сигналы (для расширения токового диапазона применяется дополнительный усилитель тока Fluke 6101A) с параметрами, необходимыми для тестирования и поверки измерительного оборудования; воспроизводит искажения электрического сигнала, такие как гармонические искажения, изменение фазы, пульсации и изменения напряжения, перенапряжения и т.д. Чтобы сформировать трёхфазную систему напряжений, необходимо добавить вспомогательные блоки Fluke 6101A, которые управляются пользовательским интерфейсом главного блока 6100A. Они отличаются от основного отсутствием пользовательского интерфейса. Управление калибратором и задание параметров выходных сигналов осуществляются через встроенный компьютер с программным обеспечением [15].

Одноместная система для испытаний средств учета электроэнергии MTS 301 (фирма Zera, Германия) содержит питающий генератор тока, напряжения MTS 301 и настольную измерительную систему [18]. Источник тока и напряжения SPE 120.3 входит в состав поверочной установки МТЕ-Е (фирма МТЕ, Швейцария) для испытаний и поверки СИ. Выходные усилители напряжения и усилители тока работают по принципу ШИМ [19]. Калибратор С300 (фирма Calmet, Польша) используется для регулирования, контроля и проверки СИ. Он представляет собой трехфазный источник питания переменного тока и напряжения с программируемым значением гармоник [16], обеспечивает трехфазные сигналы напряжения и тока сложной формы, состоящие из синусоидального сигнала основной частоты и  $n$ -х гармонических составляющих. Управление производится при помощи компьютера с программным обеспечением через интерфейс RS 232. В документации зарубежных генераторов-калибраторов нет структурных схем, кроме 4500Fх. Но исходя из описания принципа работы, структуры и функциональных возможностей, можно полагать, что они сходны с представленной на рис. 4.

Генератор переменного напряжения и тока 4500Fх (фирма California Instruments, США) обеспечивает однофазные электрические сигналы только основной частоты. Чтобы сформировать трёхфазную систему напряжений, необходимо добавить еще два генератора 4500Fх, которые будут работать синхронизированно от основного. Управление осуществляется вручную с помощью внутреннего контроллера через встроенную клавиатуру [14]. Структурная схема генератора показана на рис. 6.

Программируемый цифровой генератор (ПЦГ) формирует гармонические сигналы для усилителя напряжения и тока (УТ1 и УТ2), сигналы управления и измерения.

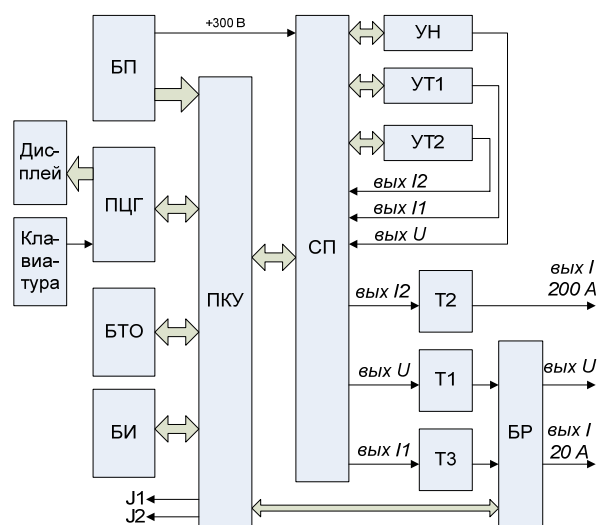


Рис. 6

Таблица 2

Характеристики усилителей	Генераторы				
	Fluke 6100A	MTS 301	SPE 120.3	C300B	4500Fx
Действующее значение фазного напряжения $U_L$ , В и пределы допускаемой основной погрешности, %	1 – 1008 ±0,01	0 – 320 ±0,01	30 – 300 ±0,05	0,5 – 560 ±0,05	0 – 270 ±0,02
Действующее значение силы переменного тока $I_L$ , А и пределы допускаемой основной погрешности, %	0,01 – 80 ±0,01	0,001 – 120 ±0,01	0,001 – 200 ±0,05	0,005 – 120 ±0,05	0,02 – 200 ±0,05
Нестабильность напряжения/тока за минуту, не более, %	Нет данных	Нет данных	±0,025	Нет данных	±0,04 В/ ±0,05 % за 24 ч.
КИС напряжения $K_U$ /тока $K_I$ , % (вид нагрузки)	0,1/0,316 (на линейном сопротивлении)	0,5 (на линейном сопротивлении)	0,5 (на линейном сопротивлении)	0,5 (нет данных)	< 1/≤ 1,5 (на линейном сопротивлении)
Частота основной гармоники $f$ , Гц	16 – 850	40 – 70	45 – 65	45 – 70	4 – 66
Количество гармоник, $n$	2 – 100	2 – 10	2 – 20	2 – 31	1
Максимальная выходная мощность УН $P_{Umax}$ , /УТ $P_{Imax}$ , В·А	50/160	30/200	600/600	35/60	1500/1500
Применяемые усилители напряжения/тока	Нет данных	Нет данных	Усилители с ШИМ	Нет данных	Усилители с ШИМ с трансформаторным выходом
Масса ГК, кг	30	80	100	34	75
Цена ГК, млн. грн.	0,7	2,5	1,5	0,5	1,2

Он содержит микропроцессор, ЦАП для получения гармонического сигнала, аналого-цифровой преобразователь (АЦП) для измерений и подключен к плате контроля и управления (ПКУ), обеспечивающей управление, передачу сигналов и контроль функциональности. К ней подключены блоки токового ограничения (БТО), питания, реле (БР), индикации (БИ) и силовая плата (СП). С цифрового генератора гармонические сигналы проходят через платы контроля и силовую, поступая на усилители напряжения и тока (УТ1 или УТ2), которые работают в ключевом режиме (усилители с ШИМ) на частоте 200 кГц. Силовые каскады питаются от постоянного напряжения 300 В.

Выходные сигналы с усилителей передаются на силовую плату, а затем на первичные обмотки трансформаторов напряжения Т1 и тока Т2, Т3. Вторичные обмотки трансформаторов Т1, Т3 коммутируются блоком реле на выходные зажимы соответственно требуемому диапазону. Блок токового ограничения обеспечивает защиту выходных усилителей от перегрузки по выходному току и управляет коэффициентом усиления усилителей. Синхронизация блоков производится через разъемы J1 и J2.

Проанализировав характеристики ГК российского производства, можно утверждать, что они имеют ряд недостатков и не в полной мере соответствуют стандартам. Рассмотрим только те, которые относятся к усилителям тока и напряжения.

Генератор «Парма ГС8.031» не имеет каналов тока, соответственно не может использоваться для поверки и аттестации СИ с каналами тока. Он обладает самой низкой выходной мощностью, равной 10 В·А. В соответствии со стандартами IEC1036 (1996-9), ГОСТ 13109-

97 суммарная потребляемая мощность в цепи напряжения, включая источник питания, не должна превышать в номинальном режиме 2 Вт и 10 В·А. Очень часто номинальное значение потребляемой мощности составляет 7 В·А. Поэтому метрологические характеристики при граничной и к тому же нелинейной нагрузке будут сильно ухудшены. Коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения, равный 0,01 %, один из лучших, но не указан вид нагрузки. Из приведенных выше данных можно заключить, что она должна быть линейная и может применяться только для поверки СИ ПКЭ по напряжению с внешним питанием. Парма ГС8.033, Ресурс-К2 имеют каналы тока, но максимальное значение воспроизведения тока ограничено на уровне 7 А. Они имеют высокую стабильность и точность выходных сигналов. КИС кривой напряжения на уровне 0,01 %, но вид нагрузки не указан. Так как выходная мощность усилителя напряжения равна 15 В·А, как было показано, заявленные характеристики могут быть гарантированы только на линейной нагрузке. Пределы погрешности соответствуют стандарту [3] с учетом того, что погрешность воспроизведения ПКЭ в три раза меньше погрешности измерения [2], т.е. не более 0,17 %. Генераторы могут использоваться для аттестации СИ только с внешним питанием. Установки «Энергоформа 3.3», «Энергоформа 3.1», «ЦУ6800И», «ЦУ6800М» из-за высокой погрешности воспроизведения фазного напряжения (от 1 до 2 % при требуемой 0,17 %) в соответствии с [2, 3] не пригодны для аттестации и поверки СИ ПКЭ и средств учета электроэнергии с измерителем ПКЭ. В установках «ЦУ6800И», «ЦУ6800М» нет возможности задавать гармоники, существует также высокий КИС кривой напряжения (2 %) и небольшая (максимально 25 ВА) выходная мощность усилителей. Из этого следует вывод, что метрологические характеристики ГК гарантируются только на линейной нагрузке. В описании ГК «Энергоформа 3.3» указывается, что заявленное значение искажений гарантируется на линейном сопротивлении. К достоинствам установки «Энергоформа 3.1» можно отнести максимальный выходной ток в 100 А. Такой же выходной ток может обеспечить «ЦУ6800И», но только без стабилизации через трансформатор тока из электросети с большой погрешностью, низкой стабильностью, высоким КИС кривой тока, равным значению сети (> 4 %). Поэтому ее нельзя применять для поверки и аттестации СИ высокого класса, тем более измеряющих ПКЭ.

Зарубежные ГК имеют лучшие характеристики. Fluke 6100A, MTS 301, SPE 120.3, C300B, 4500Fх обладают низкой погрешностью воспроизведения выходных напряжений и токов (0,01...0,05 %), высокой стабильностью, более высокой выходной мощностью (35...1500 ВА), воспроизводят токи высокой амплитуды (80...200 А). Они могут использоваться для поверки и аттестации СИ ПКЭ и средств учета электроэнергии высокого класса согласно стандартам [2, 3], кроме 4500Fх. В 4500Fх нет возможности воспроизводить гармоники. ГК создают низкий КИС кривых напряжений (0,1...1 %) и токов (0,3...1 %) гарантированно только на линейной нагрузке. Таким образом, соблюдение заявленных характеристик не гарантируется при подключении СИ с питанием от линий напряжения. К недостаткам можно отнести также то, что зарубежное оборудование значительно дороже российского, но как преимущество – имеет меньшие габариты при большей выходной мощности.

Таким образом, проанализировав характеристики всех перечисленных ГК, можно отметить, что обеспечение заявленных метрологических характеристик выходных усилителей гарантируется только на линейной нагрузке.

Обобщим принципы построения ГК, исходя из структурных схем (рис. 3 – 6) и описаний. На основании этих данных составлена общая структурная схема, которая упрощенно представлена на рис. 7. Узлы, которые являются основными во всех этих приборах, следующие: модуль управления (может содержать в себе процессор, порт подключения к компьютеру, органы управления (клавиатура, дисплей кнопки, переключатели и т.д.), ЦАП, усилители (напряжения и/или тока), блок питания. Принцип работы заключается в следующем. Модуль управления по команде с компьютера или органов управления генерирует цифровой код, который поступает на ЦАП, на выходе которого образуется аналоговый сигнал низкого уровня. Генерирование сигналов для воссоздания напряжений и токов электросети происходит на основе цифроаналогового преобразования, второе название – прямой цифровой синтез



(DDS – Direct Digital Synthesis) [13]. Затем полученный сигнал усиливается усилителем напряжения или тока. Выходные сигналы подаются на нагрузку прямо или через трансформаторы. Усилители могут быть как аналоговые, так и ключевые с ШИМ, которые более эффективны. Блок питания формирует необходимые напряжения питания. Многофазность генератора обеспечивается соответствующим количеством ЦАП и усилителей напряжения и тока. Устройства с небольшой выходной мощностью построены в одном конструктивном блоке, с высокой – в виде отдельных блоков.

Следует заметить, что даже идеально синтезированный сигнал ЦАП может быть заметно ухудшен при усилении выходным усилителем низкого класса. Характеристики ГК и метрологического оборудования сильно зависят от характеристик усилителей и нагрузки. Поэтому необходимо применять измерительные усилители мощности, которые будут с минимальными отклонениями воспроизводить величины из выражения (1) с низким значением искажений  $K_U$  не только на линейном сопротивлении, но и на нелинейной нагрузке.

Изучению и разработке систем на основе цифрового синтеза посвящен ряд работ, например [1, 17, 19]. Но вопросам исследования и разработке измерительных усилителей, работающих с нелинейной нагрузкой, уделено недостаточно внимания [20]. Подтверждение этому – рассмотренные генераторы. Исходя из изложенного, данное направление является перспективным и важным.

В табл. 3 приведен итог сравнительного анализа характеристик усилителей на соответствие параметрам согласно ГОСТ 13109-97 и ГОСТ 30206-94 с учетом ГОСТ 22261-94 (знак «+» означает, что генератор обеспечивает нужный параметр, знак «-» – нет). Сравнительный анализ характеристик усилителей (табл. 1, 2) показывает, что существующие ГК не удовлетворяют требованиям аттестации, поверки СИ ПКЭ и учета электроэнергии в полной мере (табл. 3), не обеспечивают заявленные характеристики на нелинейных нагрузочных цепях СИ. Поэтому актуальными являются рассмотрение и разработка принципов построения измерительных усилителей высокой мощности, работающих на нелинейную нагрузку, с высокими показателями точности и стабильности, низким коэффициентом искажений. Это позволит создать калибратор, полностью соответствующий требованиям табл. 3, обеспечит серийное внедрение в Украине, а также будет гарантировать более низкую стоимость и составит конкуренцию импортному метрологическому оборудованию.

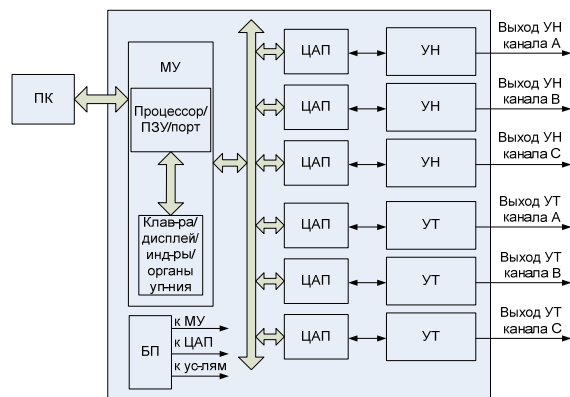


Рис. 7

Таблица 3

Требуемые параметры выходных усилителей	Генераторы											
	Парма ГС8.031	Парма ГС8.033	Энерго-форма 3.3	Энерго-форма 3.1	Ресурс-К2	ЦУ 6800И	ЦУ 6800М	Fluke 6100А	MTS 301	SPE 120.3	С300 В	4500 Fx
Действующее значение фазного напряжения $U_I$ , от 22 до 323 В	-	-	-	+	-	+	-	+	-	-	+	-
Относительная погрешность воспроизведения $\leq 0,17\%$	+	+	-	-	+	+	-	+	+	+	+	+
Действующее значение силы переменного тока $I_I$ , от 1 мА до 200 А	Нет каналов тока	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	+
Относительная погрешность воспроизведения $\leq 0,17\%$	Нет каналов тока	+	-	-	+	+	-	+	+	+	+	+
КИС напряжения и тока $\leq 0,5\%$	+	+	-	-	+	-	-	+	+	+	+	-
Частота первой гармоники $f$ , от 45 до 55 Гц	+	+	-	+	+	+	-	+	+	+	+	-
Гармонический состав сигнала 40 гармоник	+	+	+	+	+	-	-	+	-	-	-	-
Нелинейный вид нагрузки	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

На основании проведенной работы можно утверждать, что наиболее перспективной схемой выходных каскадов являются бестрансформаторные усилители с использованием цифрового режима (например, ШИМ преобразования). Это обеспечивает высокий КПД, большую выходную мощность, меньшие габариты, массу и стоимость. Такие усилители поддерживают заданные параметры сигналов синусоидальной и сложной формы на нелинейной нагрузке.

1. Коровина О.А. Калибратор показателей качества электроэнергии: Дис. ... канд. техн. наук. – М., 2010. – 218 с.
2. ГОСТ 22261-94. Межгосударственный стандарт. Средства измерений электрических и магнитных величин. Общие технические условия. – Минск: Изд-во стандартов, 1995.
3. ГОСТ 13109-97. Межгосударственный стандарт. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – Минск: Изд-во стандартов, 1998.
4. Блок напряжения. Паспорт. - [http://www.energomera.ru/documentations/voltage\\_p.pdf](http://www.energomera.ru/documentations/voltage_p.pdf)
5. Блок тока. Паспорт. [http://www.energomera.ru/documentations/current\\_p.pdf](http://www.energomera.ru/documentations/current_p.pdf)

6. *Генератор* напряжения многофункциональный «Парма ГС8.031». Руководство по эксплуатации. - [http://www.parma.spb.ru/sites/default/files/Rukovodstvo\\_po\\_ekspluatacii\\_GS\\_8.031.pdf](http://www.parma.spb.ru/sites/default/files/Rukovodstvo_po_ekspluatacii_GS_8.031.pdf)
7. *Источник* переменного тока и напряжения трехфазный программируемый «Энергоформа 3.3». Руководство по эксплуатации [http://www.mars-ergo.ru/files/catalog/9/manual\\_EF33\\_red7.pdf](http://www.mars-ergo.ru/files/catalog/9/manual_EF33_red7.pdf)
8. *Калибратор* напряжения и тока многофункциональный «Парма ГС8.033». Руководство по эксплуатации. - [http://www.parma.spb.ru/sites/default/files/Rukovodstvo\\_po\\_ekspluatacii\\_GS\\_8.033.pdf](http://www.parma.spb.ru/sites/default/files/Rukovodstvo_po_ekspluatacii_GS_8.033.pdf)
9. *Калибраторы* переменного тока «Ресурс-К2». Руководство по эксплуатации. - <http://www.entp.ru/documentation/K2/2/download?PHPSESSID=1916a76953d42973c94cf4c766f08c54>
10. *Установка* для поверки и регулировки счетчиков электроэнергии ЦУ6800. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. - [http://www.energomera.ru/documentations/cu6800\\_to.pdf](http://www.energomera.ru/documentations/cu6800_to.pdf)
11. *Установка* для поверки и регулировки счетчиков электроэнергии ЦУ6800М. Руководство по эксплуатации. - [http://www.energomera.ru/documentations/cu6804m\\_re.pdf](http://www.energomera.ru/documentations/cu6804m_re.pdf)
12. *Установка* поверочная универсальная «УППУ-МЭ 3.1к». Руководство по эксплуатации - [http://www.mars-ergo.ru/files/catalog/1/manual\\_UPPU31K\\_red2.pdf](http://www.mars-ergo.ru/files/catalog/1/manual_UPPU31K_red2.pdf)
13. *A Technical Tutorial* on Digital Signal Synthesis Analog Devices Inc 1999. - [http://www.analog.com/static/imported-files/tutorials/450968421DDS\\_Tutorial\\_rev12-2-99.pdf](http://www.analog.com/static/imported-files/tutorials/450968421DDS_Tutorial_rev12-2-99.pdf)
14. *Instruction manual* 4500Fx -[http://www.elgar.com/products/FX/downloads/FX\\_User\\_Manual\\_3009-961-RvD.PDF](http://www.elgar.com/products/FX/downloads/FX_User_Manual_3009-961-RvD.PDF)
15. *The Fluke6100A* Electrical Power Standard - [http://assets.fluke.com/manuals/6100a\\_umeng0600.pdf](http://assets.fluke.com/manuals/6100a_umeng0600.pdf)
16. *Three Phase Power Calibrator and Power Engineering Devices Tester.* <http://www.calmet.com.pl/pdf/C300%20data%20sheet.pdf>
17. *Olencki A., Szmytkiewicz J., Urbascki K.* Voltage and current calibrators / Measurements models system and design //WKJ, 2007. – P. 77–94.
18. *Single position meter testing system* MTS 301 - ZERA GmbH [http://www.zera.de/fileadmin/dl/meter\\_test/en/MTS301\\_PROS\\_EXT\\_GB\\_V101.pdf](http://www.zera.de/fileadmin/dl/meter_test/en/MTS301_PROS_EXT_GB_V101.pdf)
19. *Static three phase power source* Version 200A [http://mte.ch/data/files/SPE\\_120\\_3\\_200A%20english.pdf](http://mte.ch/data/files/SPE_120_3_200A%20english.pdf)
20. *Zajec P., Nastran J.* Power calibrator using switched mode voltage source // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, august 2000. – Vol. 49, No. 4.

УДК 621.317

**Р.М. Мороз**, асп., **Ю.Ф. Тесик**, докт. техн. наук

Институт электродинамики НАН України,

пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна

**Порівняльний аналіз характеристик вимірювальних підсилювачів потужності, застосованих в генераторах-калібраторах та метрологічному обладнанні**

*Розглянуто джерела напруги та струму, призначені для відтворення параметрів мережі змінного струму, а також їх принципи побудови, наведено структурні схеми. Проведено огляд вихідних підсилювачів потужності генераторів-калібраторів та метрологічного обладнання. Зазначено, що існуючі вимірювальні підсилювачі потужності таких приладів мають ряд недоліків при роботі з нелінійним навантаженням. Сформовано завдання щодо їх розвитку для усунення недоліків. Бібл. 20, рис. 7, табл. 3.*

**Ключові слова:** метрологічне обладнання, відтворення, електроенергія, показники якості, вимірювальні підсилювачі.

**R.M. Moroz, Yu.F. Tesyk**

Institute of Electrodynamics National Academy of Science of Ukraine,

Peremogy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine

**Review of performance measuring power amplifiers applied in generators-calibrators and metrological equipment**

*The sources of voltage and current to be reproduced AC parameters, and their principles of construction, structural schemes and the review of the output amplifiers of generators-calibrators and metrology equipment are presented. Indicated that existing measuring amplifiers of these devices have a number of drawbacks when dealing with non-linear load. Ideas of their development to resolve these problems are offered. References 20, figures 7, tables 3.*

**Key words:** metrological equipment, reproducing, electric power, energy, indexes of quality, precision measuring power amplifier.

Надійшла 3.10.2013

Received 3.10.2013