

## ИСПЫТАТЕЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР СИГНАЛОВ ПРОИЗВОЛЬНОЙ ФОРМЫ

© 2023 г. В. М. Пиксаев<sup>а</sup>, Д. И. Зайчиков<sup>а</sup>, Д. В. Пьянзин<sup>б,\*</sup>

<sup>а</sup>ПАО «Электровыпрямитель»

Россия, 430001, Республика Мордовия, Саранск, ул. Пролетарская, 126

<sup>б</sup>Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва  
Россия, 430005, Республика Мордовия, Саранск, ул. Большевикская, 68

\*e-mail: ryanzin-dv@yandex.ru

Поступила в редакцию 01.07.2022 г.

После доработки 05.09.2022 г.

Принята к публикации 18.10.2022 г.

Представлены результаты разработки трехканального генератора сигналов произвольной формы с функцией программируемого источника питания для настройки и отладки плат систем автоматического управления преобразовательными устройствами, требующими синхронизации с сетью. Особенности устройства являются возможность имитации трехфазной искаженной сети для проверки и настройки синхронизации плат управления, а также наличие гальванической развязки между тремя каналами, что позволяет использовать генератор в качестве источника питания трехфазных цепей. Генератор обеспечивает формирование выходных сигналов для каждого из каналов в диапазоне напряжений  $\pm 25$  В с максимальным током до 2 А. Частотный диапазон переменных сигналов генератора 0.01–10 кГц. В настоящее время генератор применяется на ПАО «Электровыпрямитель» для имитации провалов, искажений сети и перекосов фаз, для настройки систем фазовой автоподстройки частоты, а также аналоговых и цифровых фильтров.

DOI: 10.31857/S003281622302009X, EDN: PXUQVZ

### ВВЕДЕНИЕ

При разработке, макетировании и наладке систем управления различными электропреобразовательными устройствами, требующими синхронизации от электрической сети, разработчики очень часто сталкиваются с проблемой имитации различных искажений сети, а также аварийных событий, таких как обрыв или перекося одной и более фаз [1]. Примерами таких электропреобразовательных устройств являются управляемые выпрямители, активные выпрямители с коррекцией коэффициента мощности, устройства плавного пуска, ведомые сетью инверторы, преобразователи частоты с переводом электродвигателя на сеть и т.п. [2, 3].

При синхронизации или питании устройств от реальной электрической сети имитация искажений заданной формы является непростой задачей, так как использование стандартных генераторов сигналов не решает указанной проблемы. Как правило, при использовании стандартных генераторов разработчик сталкивается со следующими проблемами: имеющиеся в широком потреблении генераторы содержат один или два канала, что недостаточно при имитации трехфазной сети; использование трех независимых генераторов затруднительно из-за сложности их синхронизации

между собой; функционал генераторов не позволяет получить необходимые формы сигналов. В настоящее время в продаже появились трехканальные генераторы сигналов, но их каналы имеют гальваническую связь, что накладывает определенные ограничения при их использовании, кроме того, выходная мощность каналов таких генераторов, как правило, ограничена.

Для решения вышеперечисленных задач был разработан трехканальный генератор сигналов произвольной формы с гальванически развязанными каналами, обеспечивающий также функции программируемого источника питания.

### УСТРОЙСТВО И РАБОТА ГЕНЕРАТОРА

Разработанное устройство представляет собой трехканальный генератор сигналов произвольной формы с функцией программируемого источника питания. Важнейшей функцией устройства является возможность имитации трехфазной искаженной сети для проверки и настройки синхронизации плат управления. Особенностью генератора является также наличие гальванической развязки между тремя каналами, что позволяет использовать его в качестве источника питания трехфазных цепей или цепей с отдельным пита-

Таблица 1. Основные электрические характеристики генератора

Наименование параметра	Значение параметра
Количество независимых каналов	3
Максимальный диапазон изменения выходного напряжения, В	от $-25$ до $+25$
Шаг установки выходного напряжения, В	0.1
Максимальный продолжительный ток одного канала, А	2
Минимальное напряжение изоляции между каналами, кВ	1
Частотный диапазон переменных сигналов, кГц	0.01–10
Относительная погрешность частоты переменного сигнала, не более	$10^{-2}\%$
Напряжение питания генератора, В	230 ( $\pm 10\%$ )
Частота питающей сети, Гц	40–70
Интерфейс связи с персональным компьютером	USB
Габаритные размеры (Д $\times$ Ш $\times$ В), мм	431 $\times$ 203 $\times$ 129

нием. Кроме того, указанная особенность позволяет подключать каналы последовательно для создания сигналов большей амплитуды. Генератор обеспечивает формирование выходных сигналов для каждого из каналов в диапазоне напряжений  $\pm 25$  В с максимальным током до 2 А.

Управление параметрами генерируемых сигналов может осуществляться с помощью как клавиатуры, расположенной на передней панели прибора, так и персонального компьютера с применением разработанного программного обеспечения. Для подключения к компьютеру используется USB-интерфейс. Для индикации выбранного режима работы и параметров генерируемого сигнала используются жидкокристаллические дисплеи. Генератор удовлетворяет требованиям электромагнитной совместимости, поскольку используется в непосредственной близости к чувствительным к электромагнитным помехам цепям.

Основные электрические характеристики генератора приведены в табл. 1.

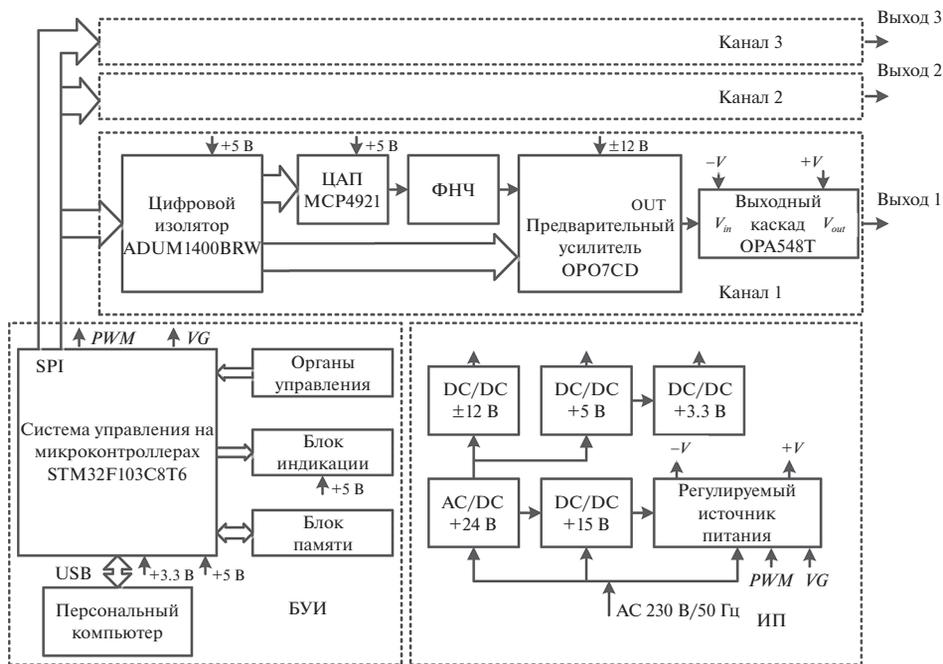
Структурно устройство состоит из трех функциональных узлов (рис. 1):

- 1) блока управления и индикации (БУИ);
- 2) трех идентичных блоков формирования выходных аналоговых сигналов (каналы 1–3);
- 3) источника питания.

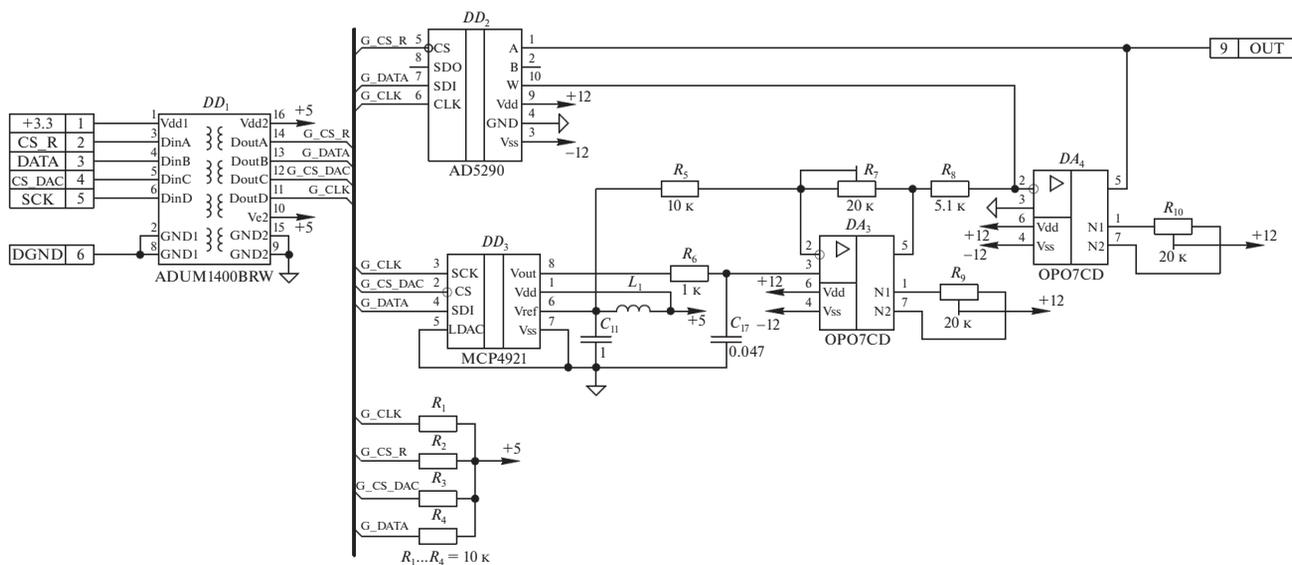
Блок управления и индикации построен на основе двух микроконтроллеров STM32F103C8T6. Задачами первого микроконтроллера (ведущий) являются формирование заданной формы сигналов на выходах генератора, управление напряжением питания выходных каскадов трех генерирующих каналов (каналы 1–3), запись и чтение информации из внешней энергонезависимой памяти по протоколу SPI, контроль пятикнопочной клавиатуры и органов управления (энкодеры), обмен данными со вторым микроконтроллером (ведомый) по протоколу SPI и персональным компью-

тером по USB. В устройстве реализован метод генерации сигналов, основанный на преобразовании массива точек, заданных в цифровой форме первым микроконтроллером блока управления и индикации, в аналоговый сигнал с помощью цифроаналогового преобразования (ЦАП) [4]. В каналах 1–3 выполняется преобразование цифрового сигнала с БУИ в аналоговый с дальнейшим его усилением. Второй микроконтроллер осуществляет обмен данными с ведущим микроконтроллером, обрабатывает все принятые команды верхнего уровня, управляет светодиодной индикацией и тремя жидкокристаллическими индикаторами устройства, на которые выводятся параметры формируемых сигналов и режимы работы по каждому генерирующему каналу.

Рассмотрим особенности построения блока формирования выходных аналоговых сигналов на примере канала 1. На рис. 2 приведена принципиальная схема канала 1. На вход канала с блока управления и индикации по интерфейсу SPI поступают закодированные двоичным кодом отсчеты сигнала, заданные пользователем. Цифровой изолятор  $DD_1$  (ADUM1400BRW) обеспечивает гальваническую развязку между блоком БУИ и соответствующим выходным каналом генератора, а также выполняет функцию ретранслятора, т.е. восстанавливает фронты принятого цифрового сигнала. Далее сигнал поступает на ЦАП  $DD_3$  (MCP4921), после которого с помощью фильтра нижних частот ФНЧ ( $R_6, C_{17}$ ) выполняется фильтрация высокочастотных составляющих спектра аналогового сигнала, появившихся в результате преобразования. Поскольку в схеме используется однополярный ЦАП, на выходе ФНЧ формируется однополярный сигнал. С помощью вычитателя (дифференциальный каскад на микросхеме  $DA_3$  (OP07CD)) получаем двуполярный сигнал. Данный сигнал поступает на инвертирующий усилитель [5]  $DA_4$  (OP07CD) с регулируемым ко-



**Рис. 1.** Структурная схема генератора. ФНЧ – фильтр нижних частот; ЦАП – цифроаналоговый преобразователь; БУИ – блок управления и индикации; ИП – источник питания; DC/DC – преобразователь постоянного напряжения в постоянное; AC/DC – преобразователь переменного напряжения в постоянное; *PWM* – сигнал задания значения напряжения управления; *VG* – сигнал задания напряжения выходного каскада генератора;  $\pm V$  – напряжения питания выходного каскада генератора.



**Рис. 2.** Принципиальная схема блока формирования сигнала канала 1.

эффицентом усиления. Коэффициент усиления изменяется посредством задания величины сопротивления цифрового резистора  $DD_2$  (AD5290) по интерфейсу SPI с блока управления и индикации. Это необходимо для изменения уровня выходного сигнала генератора по команде пользователя. Далее сигнал подается (выход OUT) на выходной каскад генератора (вход  $V_{in}$ ).

Выходной каскад (рис. 3) выполняет усиление аналогового сигнала до заданного уровня, а также согласует выходное сопротивление с нагрузкой. Каскад построен на основе мощного операционного усилителя  $DA_1$  (OPA548T), включенного по инвертирующей схеме. Данная микросхема разработана специально для применения в линейных блоках питания. Усилитель имеет также спе-

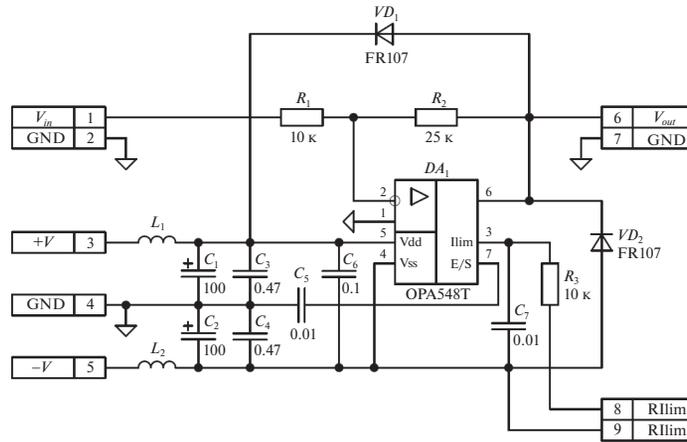


Рис. 3. Принципиальная схема выходного каскада канала 1.

циальные входы разрешения и ограничения тока (вход 3 микросхемы), что позволило реализовать в устройстве функции выключения генерации каналов и ограничения максимального уровня выходного тока, а также защиту от короткого замыкания на выходе. Выходной каскад работает в линейном режиме, что позволяет избежать появления высокочастотных помех на выходе генератора. Однако недостатком линейных схем является низкий коэффициент полезного действия и, как следствие, большая рассеиваемая тепловая мощность на основном элементе выходного каскада. Для уменьшения данного недостатка и снижения тепловых потерь на ОРА548Т в схеме используется управляемый источник питания. Уровень напряжения питания операционного усилителя (входы +V и -V) может изменяться в следующих пределах: от -28 до -7 В – нижнее значение напряжения; от +7 до

+28 В – верхнее значение. Значение напряжения задается БУИ в зависимости от генерируемого уровня выходного напряжения. Это позволяет уменьшить падение напряжения на выходном каскаде и снизить рассеиваемую тепловую мощность.

### ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ ГЕНЕРАТОРА

Источник питания формирует гальванически развязанные, регулируемые напряжения для формирования выходных сигналов, а также для питания внутренних цепей генератора.

Разработка источника питания выполнялась с учетом ряда требований:

- 1) для питания выходных каскадов каналов 1–3 необходим регулируемый источник питания;

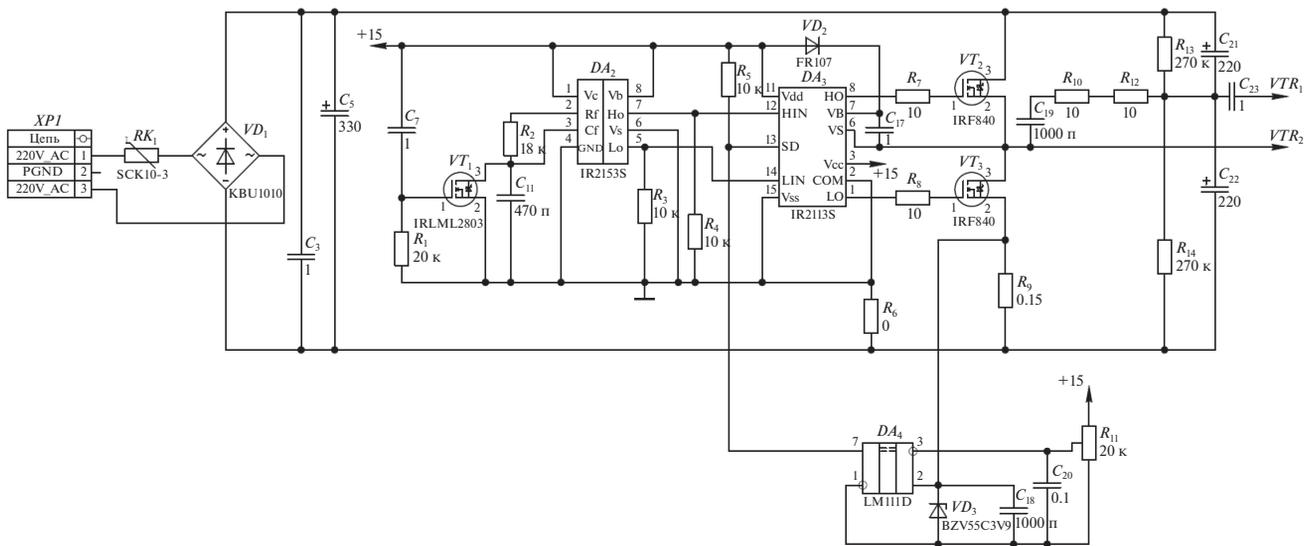


Рис. 4. Принципиальная схема полумостового инвертора источника питания.

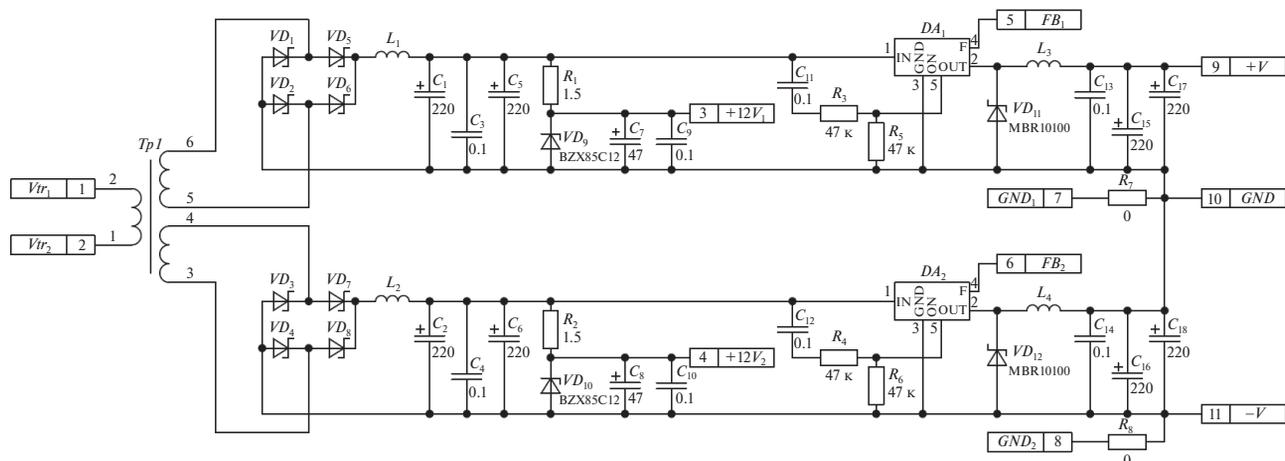


Рис. 5. Принципиальная схема блока формирования регулируемого напряжения.  $DA_1, DA_2$  – LM2596HVGT-AC;  $VD_1$ – $VD_8$  – SR5100.

2) маломощная часть каналов 1–3 должна иметь независимый источник, так как напряжение питания выходных каскадов изменяется в широком диапазоне и может выходить за границы допустимых значений;

3) поскольку блок управления и индикации гальванически развязан от каналов 1–3, данному блоку также необходим отдельный источник питания.

Для формирования регулируемых напряжений питания выходных каскадов каналов 1–3 (напряжения  $+V$  и  $-V$ ) применяется схема полумостового инвертора [2] (рис. 4). Напряжение электрической сети выпрямляется диодным мостом  $VD_1$  (KBU1010), фильтруется конденсаторами  $C_3$  и  $C_5$  и подается на полумостовую схему на транзисторах  $VT_2, VT_3$  (IRF840). Управление полумостовой схемой выполняется специализированными драйверами  $DA_2$  (IR2153S) и  $DA_3$  (IR2113S). Напряжение с полумостового инвертора подается на первичную обмотку высокочастотного трансформатора  $Tp1$  (входы  $Vtr_1$  и  $Vtr_2$ ) блока формирования регулируемого напряжения (рис. 5). Частота преобразования составляет 84 кГц. Трансформатор выполнен на сердечнике ER 35/20/11 [6] (материал N87), число витков первичной обмотки 25, каждая из вторичных обмоток содержит по 8 витков. Для намотки обмоток использовался провод ПЭТВ-2 сечением  $0.35 \text{ мм}^2$ .

Напряжения со вторичных обмоток данного трансформатора выпрямляются и регулируются независимо друг от друга, при этом последовательное соединение данных регуляторов образует двухполярный источник питания. В качестве регулятора напряжения применяется микросхема LM2596HVGT-ADJ, представляющая собой понижающий DC/DC-преобразователь, выходное

напряжение которого можно регулировать путем изменения напряжения  $U_{VFB}$  на входе 4-обратной связи микросхемы. Регулирование осуществляется микроконтроллером блока управления и индикации генератора. Схема управления напряжением обратной связи (рис. 6) формирует заданное напряжение, согласно выражению [7]

$$U_{VFB} = 1.23 \text{ В} + U_{VG} \frac{10}{85} - U_{PWM},$$

где  $U_{VG}$  – напряжение выходного каскада генератора (вход  $VG$  на схеме);  $U_{PWM}$  – напряжение управления (диапазон изменения 0–3.3 В), оно формируется микроконтроллером с использовани-

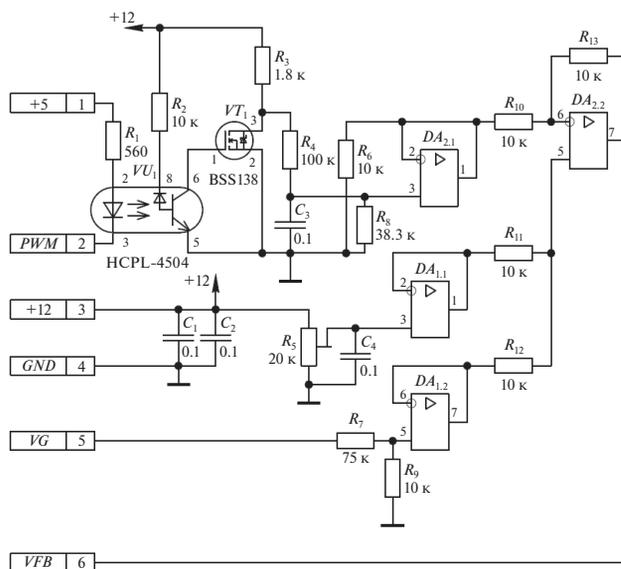


Рис. 6. Схема управления напряжением обратной связи.

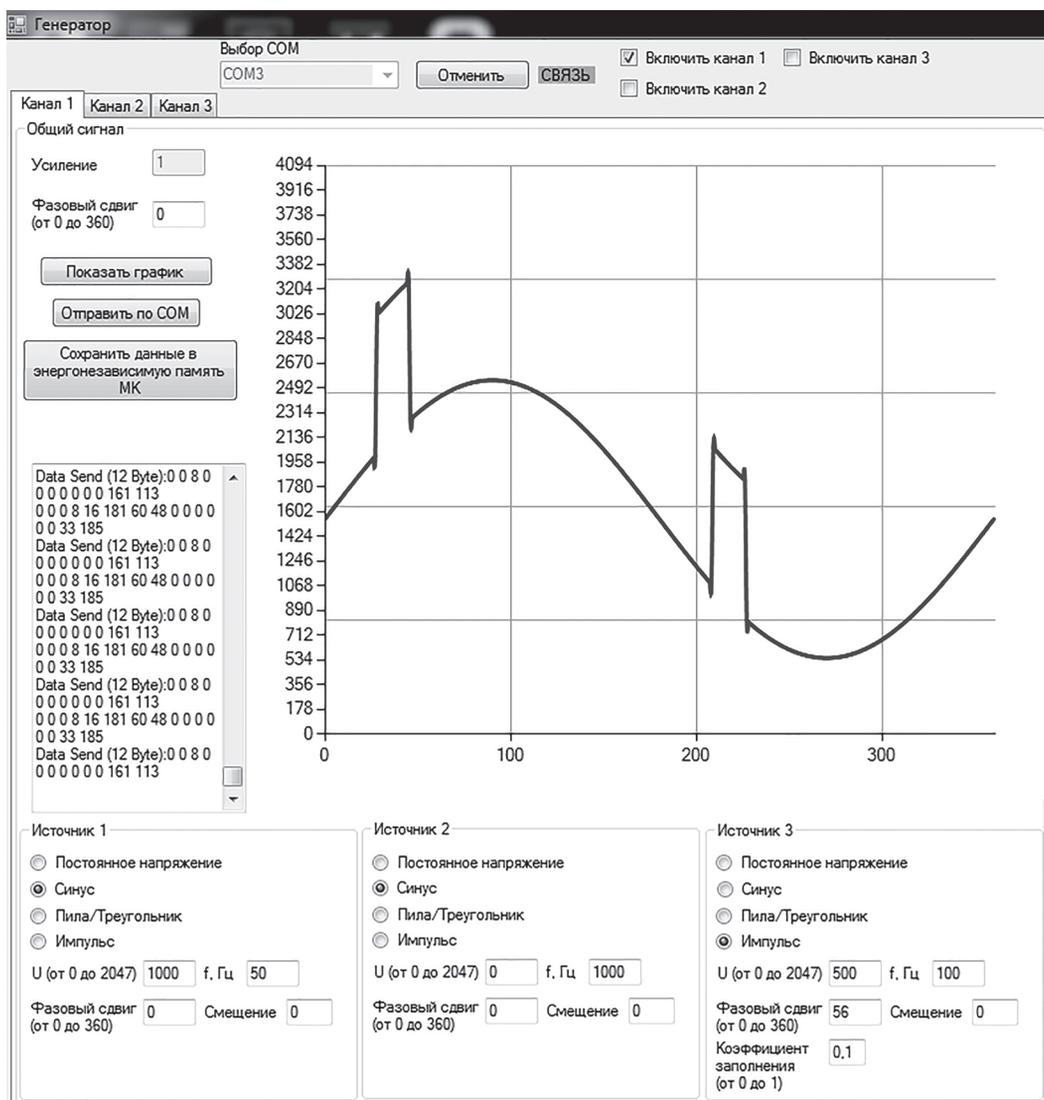


Рис. 7. Интерфейс программного обеспечения генератора.

ем широтно-импульсной модуляции (вход *PWM* на схеме).

Схема состоит из дифференциального каскада  $DA_{2,2}$ , на инвертирующий вход которого подается напряжение  $U_{PWM}$ , а на неинвертирующий – сумма опорного напряжения 1.23 В и напряжения  $U_{VG}$ , умноженного на соответствующий коэффициент 10/85. Опорное напряжение задается потенциометром  $R_5$ , коэффициент 10/85 – делителем напряжения на элементах  $R_7$  и  $R_9$ . В схеме применяется операционный усилитель LM258.

Помимо регулируемого напряжения питания выходных каскадов каналов 1–3, источник питания генератора формирует также напряжения +24, +15, ±12, +5, +3.3 В (см. рис. 1). Напряжение +24 В формируется из сетевого напряжения с применением AC/DC-преобразователя. Исполь-

зовался стандартный источник питания мощностью 24 Вт. Из напряжения +24 В непосредственно формируются +15 В (питание драйверов регулируемого источника питания), ±12 В (питание операционных усилителей маломощной части каналов 1–3) и +5 В (питание цифровой части генератора) с применением DC/DC-преобразователей на микросхемах FD003-S, AM1/4L-2415D-N и AM6T-2405SZ соответственно. Для питания цифровой части генератора также используется напряжение +3.3 В, которое преобразуется из +5 В с применением микросхемы LF33-CV.

## ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ГЕНЕРАТОРА

Разработанный генератор может работать как с подключением к персональному компьютеру,

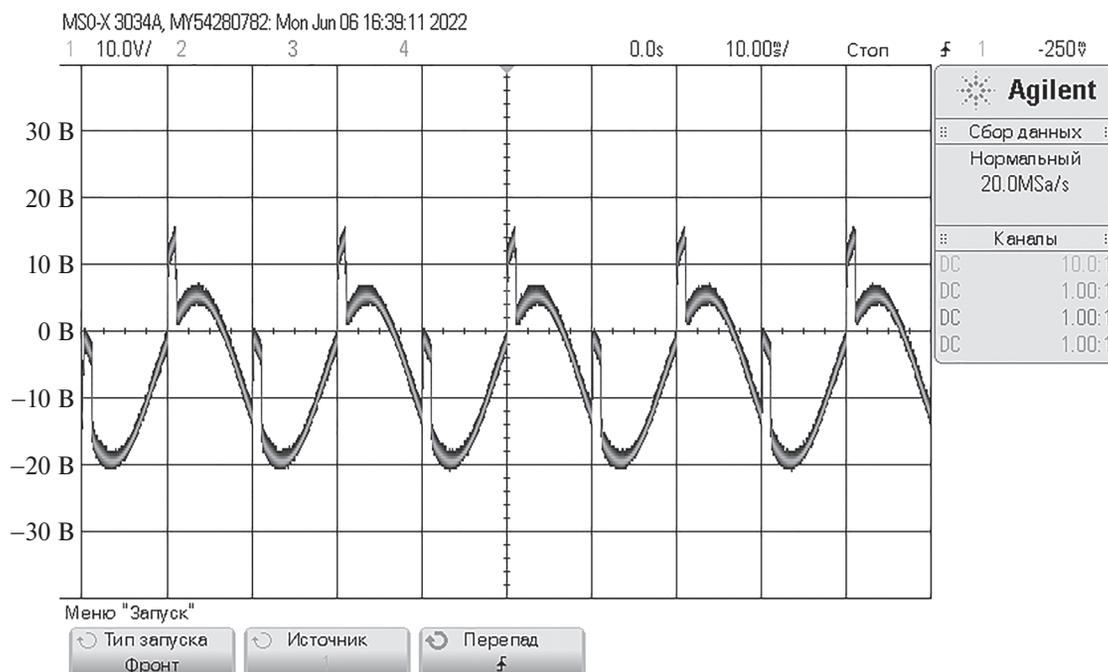


Рис. 8. Пример сгенерированного сигнала.

так и независимо. При работе генератора без подключения к персональному компьютеру могут формироваться следующие формы сигналов по каждому каналу:

- прямоугольные импульсы с изменением амплитуды, частоты, скважности и фазы относительно других каналов;
- треугольный сигнал с изменением амплитуды, частоты, коэффициента пропорциональности между длительностями нарастания и спада, фазы относительно других каналов;
- синусоидальный сигнал с изменением амплитуды, частоты и фазы относительно других каналов;
- сигнал белого шума с изменением амплитуды и возможностью его наложения на стандартные формы сигналов;
- сигнал, предварительно переданный с компьютера и сохраненный в энергонезависимой памяти устройства.

При подключении к компьютеру через USB-интерфейс функциональные возможности генератора значительно расширяются. С помощью разработанного программного обеспечения (рис. 7) можно сгенерировать и передать в энергонезависимую память устройства практически любую форму сигнала, ограниченную лишь максимальной частотой дискретизации генератора (10 кГц) и разрядностью цифроаналогового преобразователя (12 разрядов, т.е. 4096 уровней квантования).

На рис. 8 приведен пример сгенерированного сигнала.

Сформированная на компьютере форма сигнала для каждого канала в виде массива данных отправляется в микроконтроллер. При необходимости сформированные формы сигналов можно сохранить в энергонезависимой памяти устройства и использовать их уже без подключения к компьютеру.

Максимальная частота дискретизации генератора составляет 10 кГц и ограничена скоростью обмена по интерфейсу последовательной передачи данных SPI. Поскольку все три генерирующих канала получают данные по одной шине SPI, скорость обмена делится между тремя каналами. Таким образом, при отключении одного канала частота дискретизации возрастает до 15 кГц, а при одном включенном канале – до 30 кГц. Дальнейшее увеличение частоты дискретизации ограничено возможностью микроконтроллера (как по объему оперативной памяти, так и по скорости обработки данных). Отсюда можно сделать вывод о большом потенциале устройства в плане дальнейшей модернизации. При использовании программируемых логических интегральных схем с внешней оперативной памятью имеется возможность добиться частоты дискретизации в несколько мегагерц. Возможно расширение функционала программы для компьютера, например получение массива данных для генерации сигналов из таблиц формата Excel и т.п.

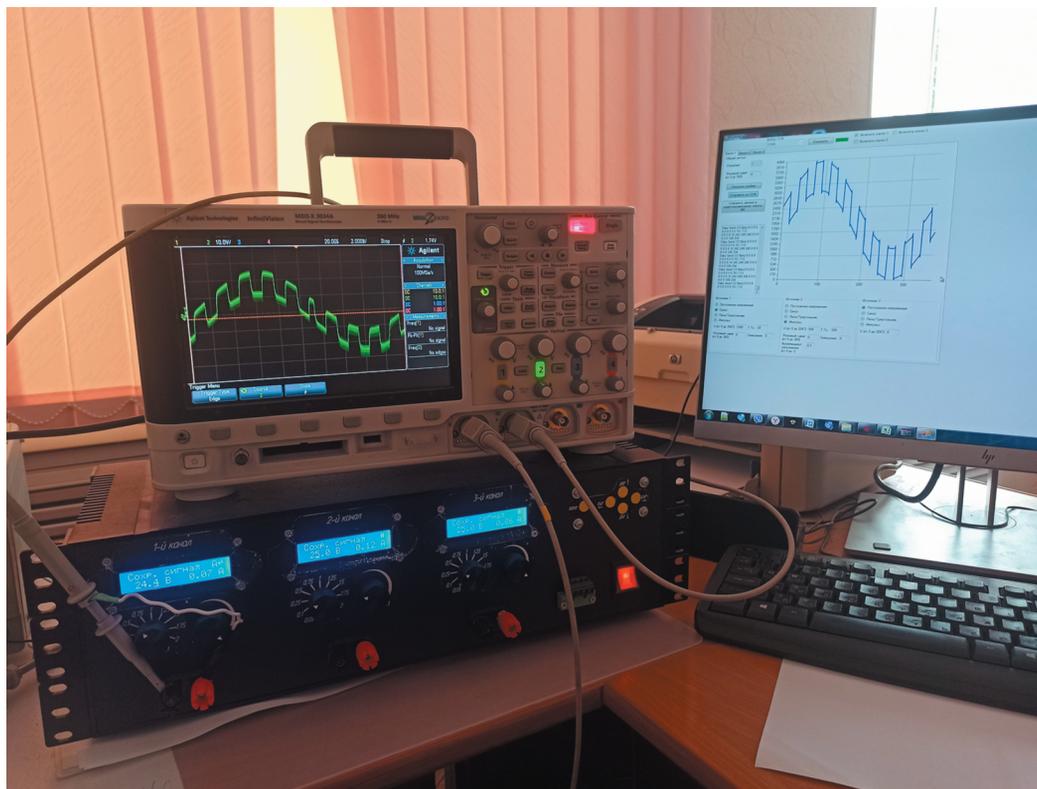


Рис. 9. Фотография генератора в составе испытательного стенда.



Рис. 10. Фотография генератора с открытой верхней крышкой.

На рис. 9 приведена фотография генератора в составе испытательного стенда, а на рис. 10 показан внешний вид устройства с открытой верхней крышкой.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан трехканальный генератор сигналов произвольной формы с функцией программируемого источника питания для настройки и отладки плат систем автоматического управления преобразовательными устройствами, требующими синхронизации с сетью. В настоящее время данный генератор применяется для решения следующих задач при испытаниях аппаратов на ПАО “Электровыпрямитель”: имитации провалов, искажений сети и перекосов фаз; настройки систем фазовой автоподстройки частоты; настройки аналоговых и цифровых фильтров. Частоты дискретизации генератора 10 кГц вполне достаточно для решения большинства задач, связанных с

имитацией сетей частотой 50 Гц. Кроме того, отмечен большой модернизационный ресурс данного устройства в плане увеличения функциональных возможностей и частоты дискретизации.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Куско А., Томпсон М.* Качество энергии в электрических сетях / Пер. с англ. А.Н. Рабодзея. М.: Додэка-XXI, 2008.
2. *Милешин В.И.* Транзисторная преобразовательная техника. М.: Техносфера, 2005.
3. *Бурков А.Т.* Электронная техника и преобразователи. Учеб. для вузов трансп. М.: Транспорт, 1999.
4. *Потехин В.А.* Схемотехника цифровых устройств: учеб. пособие для вузов. Томск: В-Спектр, 2012.
5. *Carter B., Mancini R.* Op Amps for Everyone: Newnes. 5th edition. 2017.
6. [https://www.tdk-electronics.tdk.com/inf/80/db/fer/er\\_35\\_20\\_11.pdf](https://www.tdk-electronics.tdk.com/inf/80/db/fer/er_35_20_11.pdf)
7. <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm2596.pdf>