



РАЗРАБОТКА ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ВЫСШИХ ГАРМОНИК ДЛЯ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА ПРОМЫШЛЕННОЙ ЧАСТОТЫ*

*Р.А. Амерханов¹, Э.А. Бекиров², М.М. Асанов²,
И.В. Шеметов², П.Ю. Босько²*

¹ФГБОУ ВО «Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина»
д. 13, ул. Калинина, Краснодар, Краснодарский край, 350004, Россия
тел.: +7 (861) 221-58-54, e-mail: energyksay@mail.ru
²ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского»
д. 4, проспект Академика Вернадского, г. Симферополь, Республика Крым, 295007, Россия
тел.: +7 (365) 254-50-36

doi: 10.15518/isjaee.2018.13-15.149-156

Заключение совета рецензентов: 10.05.18 Заключение совета экспертов: 15.05.18 Принято к публикации: 18.05.18

Работа посвящена проблеме определения наличия высших гармоник в силовой сети. Отмечено негативное влияние высших гармоник напряжения и тока на элементы систем электроснабжения и линии связи. В ходе проведенных исследований было разработано электронное устройство для анализа высших гармоник силовой сети солнечных электростанций, работающих по принципу разложения функции в ряд Фурье. Основным элементом устройства является плата Arduino на микроконтроллере Atmega328p. Для корректной работы устройства было создано соответствующее программное обеспечение. Результатом моделирования работы предлагаемого устройства является набор величин гармоник исследуемого сигнала в удобном для дальнейшего анализа виде.

Ключевые слова: солнечная энергетика; солнечные электростанции; высшие гармоники; переменный ток.

THE DEVELOPMENT OF ELECTRONIC DEVICES FOR MEASURING THE HIGHER HARMONICS FOR SOLAR POWER PLANTS OF ALTERNATING CURRENT OF INDUSTRIAL FREQUENCY

R.A. Amerhanov¹, E.A. Bekirov², M.M. Asanov², I.V. Shemetov², P.Yu. Bosko²

¹Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin
13 Kalinin St., Krasnodar, Krasnodar Reg., 350004, Russia
tel.: +7 (861) 221 58 54, e-mail: energyksay@mail.ru
²V.I. Vernadsky Crimean Federal University
4 Academic Vernadsky Av., Simferopol, Republic of Crimea, 295007, Russia
tel.: +7 (365) 254 50 36

doi: 10.15518/isjaee.2018.13-15.149-156

*Амерханов Р.А., Бекиров Э.А., Асанов М.М., Шеметов И.В., Босько П.Ю. Разработка электронных устройств для измерения высших гармоник для солнечных электростанций переменного тока промышленной частоты // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE). 2018;(13-15):149-156.

The paper is devoted to the problem of determining the higher harmonics presence in a power network. The paper notes the negative influence of higher harmonics of voltage and current on the power supply system's elements and communication lines. During the research, a device has been developed to analyze the higher harmonics of the power network. The main element of the device is the Arduino board on the Atmega328p microcontroller. For the correct operation of the device, the corresponding software has been created. The result of modeling of the proposed device operation is a set of harmonic values of the investigated signal in a form suitable for further analysis.

Keywords: solar energy; solar power stations; higher harmonics; alternating current.



*Роберт
Александрович
Амерханов
Robert Amerkhanov*

Сведения об авторе: д-р техн. наук, профессор кафедры «Электротехника, теплотехника и возобновляемые источники энергии» Кубанского государственного аграрного университета имени И.Т. Трубилина.

Образование: Краснодарский институт пищевой промышленности (1960 г.).

Область научных интересов: энергосбережение естественных ресурсов при использовании нетрадиционных и возобновляемых источников энергии в агропромышленном комплексе.

Публикации: около 500.

h-index (РИНЦ): 15

h-index (Скопус): 3

Information about the author: D.Sc. in Engineering, Professor at the Department of Electric Technology, Heat Technology and Renewable Sources of Energy, Kuban State Agrarian University.

Education: Krasnodar Institute of Food Industry, 1960.

Research interests: energy saving of natural resources under usage of non-traditional and renewable sources of energy in agro-industrial complex.

Publications: more than 500.

SPIN-код: 4139-7234

Scopus ID: 55480629300



*Эскендер Алимович
Бекиров
Eskender Bekirov*

Сведения об авторе: д-р техн. наук; профессор, заведующий кафедрой электроэнергетики и электротехники, Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского.

Образование: Казахский политехнический институт (1974 г.).

Область научных интересов: возобновляемые источники энергии; обработка статистических данных.

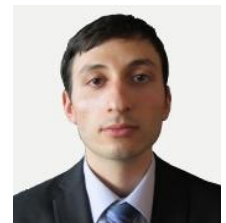
Публикации: 210.

Information about the author: D.Sc. in Engineering, Professor, Head of the Electrical Energy and Electrical Engineering Department, V.I. Vernadsky Crimean Federal University.

Education: Kazakh Polytechnic Institute 1974.

Research interests: renewable energy sources; statistical data processing.

Publications: 210.



*Марлен Мустафаевич
Асанов
Marlen Asanov*

Сведения об авторе: канд. физ.-мат. наук, доцент, кафедра электроэнергетики и электротехники, Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского.

Образование: Национальный авиационный университет, Киев, Украина (2007 г.).

Область научных интересов: возобновляемые источники энергии; обработка статистических данных; анализ надежности; математическое моделирование.

Публикации: 55.

Information about the author: Ph.D. in Physics and Mathematics, Associate Professor at the Electrical Energy and Electrical Engineering Department, V.I. Vernadsky Crimean Federal University.

Education: National Aviation University, Kyiv, Ukraine, 2007.

Research interests: renewable energy sources; statistical data processing; reliability analysis; mathematical modeling.

Publications: 55.



*Илья Владимирович
Шеметов
Ilya Shemetov*

Сведения об авторе: магистрант, кафедра электроэнергетики и электротехники, Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского.

Образование: Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского (2017 г.).

Область научных интересов: возобновляемые источники энергии.

Information about the author: Master, Electrical Energy and Electrical Engineering Department, V.I. Vernadsky Crimean Federal University.

Education: V.I. Vernadsky Crimean Federal University 2017.

Research interests: renewable energy sources.





Павел Юрьевич Боско
Pavel Bosko

Сведения об авторе: магистрант, кафедра электроэнергетики и электротехники, Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского.

Образование: Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского (2017 г.).

Область научных интересов: возобновляемые источники энергии.

Information about the author: Master, Electrical Energy and Electrical Engineering Department, V.I. Vernadsky Crimean Federal University.

Education: V.I. Vernadsky Crimean Federal University, 2017.

Research interests: renewable energy sources.

1. Введение

Приборы и оборудование с нелинейными характеристиками являются источниками высших гармоник в электрической сети, присутствие которых искажает форму тока или напряжения, что означает наличие возмущений в распределительной сети и ухудшение качества поставляемой электроэнергии [1].

Среди нелинейных нагрузок можно выделить следующие примеры: промышленное оборудование (сварочные машины, электродуговые печи, индукционные печи и выпрямители); преобразователи частоты для асинхронных двигателей или двигателей постоянного тока; источники бесперебойного питания; офисное оборудование (компьютеры, фотокопировальные машины, факсимильные аппараты и др.); бытовые электроприборы (телевизоры, микроволновые печи, люминесцентные лампы); некоторые устройства с магнитным насыщением (трансформаторы).

Высшие гармоники напряжения и тока оказывают влияние на элементы систем электроснабжения и линии связи [2]. Основными формами воздействия высших гармоник на системы электроснабжения являются:

- увеличение токов и напряжений высших гармоник вследствие резонансов;
- снижение эффективности процессов генерации, передачи, использования электроэнергии;

– старение изоляции электрооборудования и сокращение вследствие этого срока службы этого оборудования;

– ложная работа оборудования.

Приборы для анализа гармонического состава сети созданы и активно применяются [3–6].

Цель данной работы заключалась в разработке прибора для обнаружения высших гармоник в сети переменного тока, обладающего высокой степенью точности и низкой стоимостью компонентов.

На солнечной электростанции прибор будет установлен на выходе инверторов для мониторинга параметров.

В соответствии с заданной целью были определены следующие задачи:

1. Изучить простые методы анализа несинусоидального сигнала.
2. Разработать принципиальную схему прибора для анализа несинусоидального сигнала.
3. Разработать программную прошивку прибора.

Поскольку наличие высших гармоник в электрической сети является отрицательным явлением, следовательно, задачи по их выявлению и анализу являются первостепенными.

Предлагаемое авторами данной статьи устройство является цифровым, следовательно, обладает высокой точностью и чувствительностью, информация представляется в удобном для восприятия и дальнейшего анализа виде, имеет собственное программное обеспечение для корректной работы, а его стоимость невысока.

Список обозначений	
<i>Буквы латинского алфавита</i>	
a_0, a_n, b_n	Коэффициенты Фурье периодической функции
f	Частота
$f(x)$	Периодическая функция
<i>Нижние индексы</i>	
вх	Входящий
дет	Детектируемый
дис	Дискретизация
сет	Сетевой
<i>Аббревиатуры</i>	
LCD	Liquid crystal display
АЦП	Аналогово-цифровой преобразователь



2. Основная часть

2.1. Теоретические основы анализа несинусоидальных сигналов

Изначально для обнаружения высших гармоник в силовой сети было решено использовать упрощенное преобразование Фурье – быстрое преобразование Хартли [7]. Для отладочной платы Arduino уже написана библиотека, позволяющая проводить данное преобразование [8]. Библиотека FHT (Fast Hartley Transform) позволяет произвести спектральный анализ входящего сигнала. Практика показала, что присутствующие гармоники высших частот корректно обнаруживаются, если их амплитудное значение сопоставимо с максимальной амплитудой сигнала. При значениях амплитуд высших гармоник в 5–10 раз меньше, они уже слабо отличимы от фона. Это и послужило причиной для отказа от данного метода.

Поскольку главная задача работы – анализ сигнала на наличие гармоник, в данном случае интерес представляют только частоты, кратные 50 Гц. Для этих целей отлично подойдет метод разложения функции в тригонометрический ряд Фурье.

Любую периодическую функцию $f(x)$ можно разложить в ряд:

$$f(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos(nx) + b_n \sin(nx)), \quad (1)$$

где

$$a_0 = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x) dx, \quad (2)$$

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x) \cos(nx) dx, \quad (3)$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x) \sin(nx) dx. \quad (4)$$

Числа a_0 , a_n и b_n называются коэффициентами Фурье функции $f(x)$. В ходе разложения в ряд Фурье необходимо найти указанные коэффициенты. Принцип вывода формул для определения коэффициентов заключается в следующем: из-за ортогональности \sin и \cos , а также ввиду того что их произведение при интегрировании будет равно нулю, если умножить правую часть на $\cos(nx)$ и проинтегрировать, то в ноль обратятся все слагаемые кроме одного. Из полученного равенства выводится формула для a_n и аналогично для b_n [9].

Если коэффициенты a_n и b_n равны нулю, значит, в анализируемой функции отсутствует $\sin(nx)$ и $\cos(nx)$. Это и будет главным критерием в детектировании высших гармоник.

2.2. Принципиальная схема прибора и аппаратные ограничения

В качестве вычислительной мощности была выбрана отладочная плата Arduino на микроконтроллере Atmega 328p благодаря низкой стоимости, функциональности и простоте в работе. Технические характеристики представлены в табл. 1 [10].

Таблица 1
Технические характеристики платы Arduino на Atmega 328p

Table 1
Technical specifications of the Arduino board on Atmega 328p

Рабочее напряжение	5 В
Напряжение питания	7 ÷ 12 В
Цифровые входы/выходы	14
Аналоговые входы	6
Flash-память	32 КБ
SRAM	2 КБ

Первым аппаратным ограничением является оперативная память. Разрешение встроенного АЦП составляет 10 бит или 1 024 ед. Для того чтобы не потерять глубину дискретизации, приходится использовать переменные типа `int`, 2 байта. Такая размерность дает диапазон от –32 768 до 32 767. Доступная оперативная память содержит 2 048 байт, таким образом, $2\,048/2 = 1\,024$ байт – максимальный объем массива, хранящего мгновенные значения амплитуд с выхода АЦП. Интересующий нас участок – от 0 до 2π или $1/50 = 0,02$ с. Максимальная частота дискретизации $f_{\text{диск}} = 1\,024/0,02 = 51\,200$ Гц. По теореме Котельникова получаем максимальную детектируемую частоту $f_{\text{дет}} = 51\,200/2 = 25\,600$ Гц. Однако при заполнении оперативной памяти свыше 75 % микроконтроллер может работать нестабильно, также необходимо выделить место под другие глобальные переменные. На считывание значения с АЦП и записи в массив тратится время, максимальная частота уменьшается. На практике при использовании задержки между считываниями в 5 мкс, с учетом времени исполнения кода за 0,02 с удается снять 550 значений: $f_{\text{диск}} = 550/0,02 = 27\,500$ Гц, $f_{\text{дет}} = 27\,500/2 = 13\,750$ Гц.

Вторым аппаратным ограничением является глубина дискретизации. Как говорилось ранее, разрешение встроенного АЦП составляет 1 024 ед., а диапазон входного напряжения от 0 до 5 В. Следовательно, сетевое напряжение с амплитудой $A_{\text{сет}} = 220 \cdot \sqrt{2} = 310$ В нужно понизить активным делителем напряжения до приемлемого значения $A_{\text{вх}} = 5/2 = 2,5$ В. В таком случае АЦП будет захватывать всю волну, но есть вероятность потери значений около `max` и `min`. В симуляции использовалась главная амплитуда 2 В. Полученные максимальное и минимальное значения с выхода АЦП при чистом синусоидальном сигнале амплитудой 2 В составляют 969 и 150 единиц соот-



ответственно. Фактическая глубина дискретизации составляет $969 - 150 = 819$ единиц.

На практике максимальный порядковый номер полученного коэффициента при его амплитуде $A_{\text{вх гар}} = 5 \text{ мВ}$, $0,25 \%$ от $A_{\text{вх}}$ или $1,5 \text{ В}$ на стороне 220 В равен 50 , частота соответствующей гармоники $f_{\text{дет}} = 50 \cdot 50 = 2500 \text{ Гц}$. Предел последовательного выведения первых 50 гармоник обусловлен оперативной памятью. Для точного подсчета коэффициенты Фурье необходимо хранить в массиве типа float, 4

байта. При объеме массива в 200 байт глобальные переменные используют 2034 байт (99%) динамической памяти. Последовательное выведение гармоник с 50 по 100 плохо сказывается на микроконтроллере, программа перезагружается, устройство работает некорректно. Как предсказывал расчет, это существенно меньше 13750 Гц .

Симуляция работы устройства проводилась в программном комплексе Proteus 8. Схема устройства приведена на рис. 1.

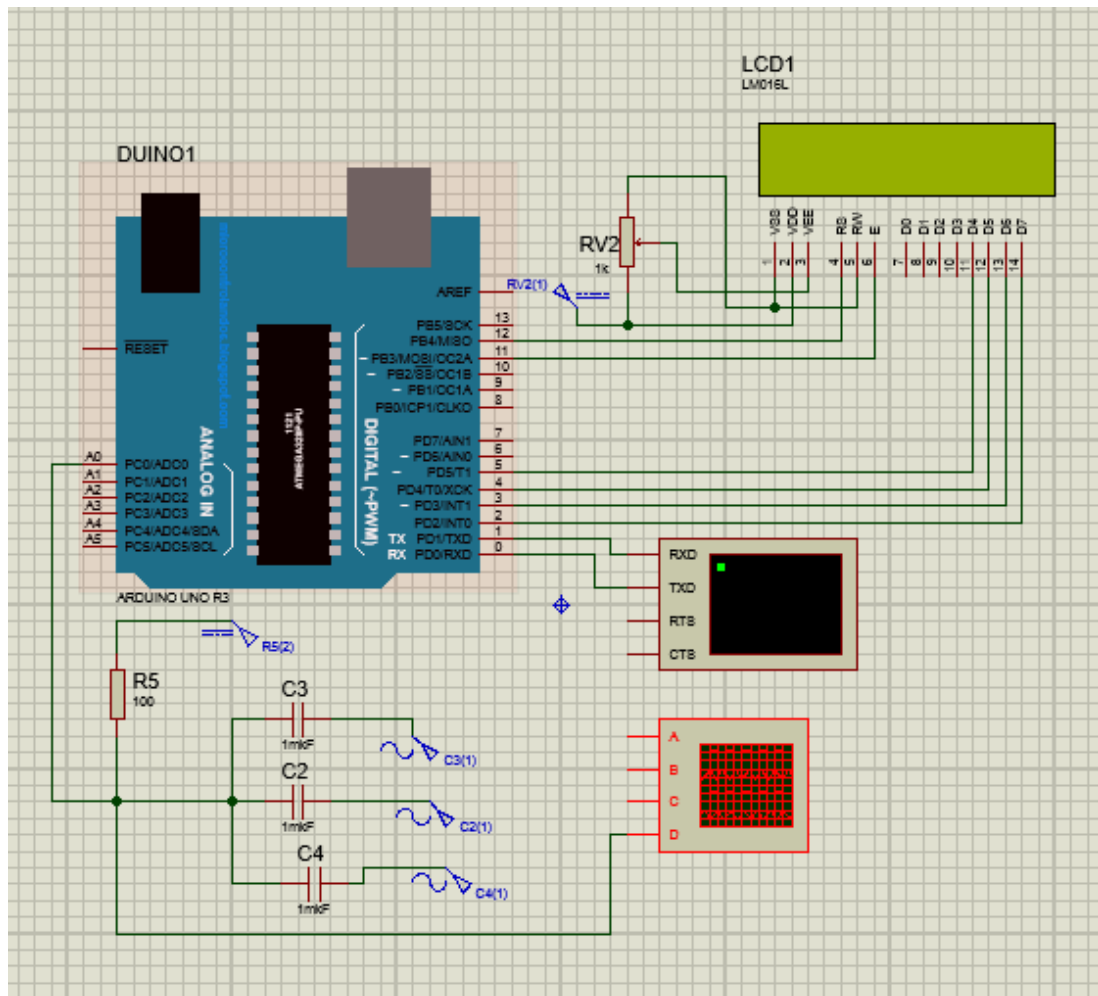


Рис. 1 – Схема прототипа прибора для анализа гармоник силовой сети:

сверху слева – отладочная плата ArduinoUno; сверху справа – двухстрочный LCD-дисплей; снизу слева – 3 осциллятора и источник постоянного напряжения; снизу справа – монитор COM-порта и осциллограф

Fig. 1 – The diagram of the prototype device for the power network harmonics analysis: above left is the ArduinoUno debug board; on the top right is a two-line LCD display; on the bottom left there are 3 oscillators and a constant voltage source; on the bottom right is a COM port monitor and an oscilloscope

Три генератора синусоидальных сигналов подключены через конденсаторы емкостью 1 мкФ к аналоговому пину 0 , параллельно, через сопротивление, подключен источник постоянного напряжения. Максимальный диапазон колебаний осцилляторов составляет от -2 В до 2 В , поэтому напряжение после конденсаторов поднимается источником постоянного напряжения на $2,5 \text{ В}$, чтобы уложится в диапазон входных напряжений аналогового входа от 0 до 5 В (вход АЦП).

На схеме присутствуют монитор порта и осциллограф. Осциллограф служит для визуальной оценки, а монитор порта – для удобного вывода большого количества значений (это необходимо в процессе разработки).

На LCD-дисплее отображаются детектируемые гармоники в максимально удобном для восприятия виде.

3. Результаты симуляции прибора

Анализ данных с монитора порта приведен на рис. 2. Абсолютная погрешность захвата значений для анализа не превышает 5 мкс. Первое и последнее

значения в интервале практически совпадают. Успешно детектируются гармоники со следующими амплитудами (на стороне входа с АЦП) и частотами: 2 В, 50 Гц; 100 мВ, 500 Гц; 5 мВ; 600 Гц.

```

t=20008
n=546
data[0]=432
data[n-1]=432
min=421
max=704
zero=562
172.25 || 0.00 || 0.00 || 0.00 || 0.00 || 0.00 || 0.00 || 0.00 || 0.00 || 0.00 || 7.61 || 0.00 || 0.42 || 0.00 || 0.00 || 0.00 ||

t=19992
n=546
data[0]=426
data[n-1]=425
min=422
max=705
zero=563
165.32 || 0.00 || 0.00 || 0.00 || 0.00 || 0.00 || 0.00 || 0.00 || 0.00 || 0.00 || 9.60 || 0.00 || 0.33 || 0.00 || 0.00 || 0.00 ||

t=19992
n=546
data[0]=521
data[n-1]=520
min=422
max=705
zero=563
173.33 || 0.34 || 0.00 || 0.00 || 0.00 || 0.00 || 0.00 || 0.00 || 0.00 || 0.00 || 8.26 || 0.00 || 0.54 || 0.00 || 0.00 || 0.00 ||
    
```

Рис. 2 – Скриншот окна терминала. Характеристика собранных данных и детектируемый ряд первых 15-ти гармоник
 Fig. 2 – Screenshot of the terminal window. The characteristic of the collected data and the detectable line of the first 15 harmonics

На рис. 3 представлены неотфильтрованные данные. Заметный шум в районе 2-ой гармоники (отмечен красной рамкой). В самом худшем случае шум дости-

гает значения в 0,32 % от максимальной амплитуды. При учете этого удастся удачно отфильтровать остальные гармоники. Результат удовлетворительный.

157.60	0.32	0.19	0.08	0.09	0.02	0.03	0.10	0.10	6.91	0.12	0.51	0.13	0.04	0.07
165.29	0.17	0.06	0.03	0.08	0.04	0.02	0.05	0.23	9.66	0.25	0.39	0.06	0.02	0.02
190.76	0.32	0.13	0.12	0.06	0.08	0.09	0.10	0.20	7.72	0.20	0.35	0.04	0.03	0.05
191.51	0.25	0.11	0.06	0.06	0.07	0.03	0.08	0.09	7.93	0.12	0.39	0.03	0.07	0.04
191.69	0.32	0.11	0.14	0.10	0.10	0.11	0.13	0.20	8.28	0.12	0.44	0.04	0.03	0.05
187.04	0.26	0.08	0.08	0.11	0.06	0.07	0.02	0.13	9.61	0.14	0.42	0.03	0.03	0.05
190.64	0.42	0.22	0.18	0.15	0.16	0.11	0.10	0.23	7.46	0.15	0.31	0.08	0.10	0.07
187.96	0.40	0.20	0.17	0.13	0.09	0.10	0.16	0.21	9.51	0.15	0.43	0.04	0.02	0.03
158.92	0.21	0.10	0.05	0.09	0.06	0.00	0.13	0.20	8.74	0.17	0.40	0.05	0.04	0.01
184.18	0.46	0.31	0.21	0.17	0.18	0.18	0.13	0.22	6.87	0.15	0.53	0.04	0.05	0.03
141.44	0.20	0.04	0.11	0.04	0.02	0.03	0.08	0.12	8.40	0.11	0.37	0.04	0.04	0.03
174.27	0.18	0.12	0.04	0.03	0.03	0.02	0.03	0.13	7.82	0.13	0.51	0.11	0.06	0.04
187.43	0.36	0.20	0.11	0.11	0.15	0.06	0.13	0.25	9.52	0.20	0.46	0.04	0.05	0.05
191.41	0.29	0.12	0.07	0.10	0.06	0.03	0.07	0.04	7.70	0.16	0.45	0.05	0.03	0.09
190.60	0.45	0.16	0.12	0.05	0.04	0.05	0.01	0.17	7.68	0.21	0.36	0.09	0.09	0.05
183.76	0.52	0.19	0.06	0.09	0.09	0.02	0.15	0.29	7.78	0.34	0.30	0.07	0.07	0.06
189.38	0.31	0.17	0.15	0.12	0.14	0.11	0.15	0.18	9.24	0.10	0.49	0.06	0.03	0.02
149.87	0.35	0.07	0.02	0.04	0.08	0.07	0.13	0.26	9.53	0.31	0.28	0.06	0.04	0.04
186.04	0.32	0.20	0.11	0.12	0.11	0.12	0.11	0.18	8.56	0.13	0.53	0.03	0.06	0.07
192.96	0.27	0.15	0.11	0.05	0.10	0.15	0.07	0.12	8.11	0.18	0.42	0.05	0.04	0.01
177.35	0.30	0.11	0.05	0.04	0.03	0.03	0.01	0.10	9.58	0.18	0.33	0.09	0.06	0.07

Рис. 3 – Скриншот окна терминала. Неотфильтрованные показатели амплитуд гармоник
 Fig. 3 – Screenshot of the terminal window. Unfiltered amplitudes of harmonics

Успешная детекция предельно возможных гармоник амплитудой 10 мВ с частотами 1 900 Гц и 2 150 Гц наглядно показана на рис. 4. Колебания 2 В, 50 Гц присутствуют, фильтр отсутствует.



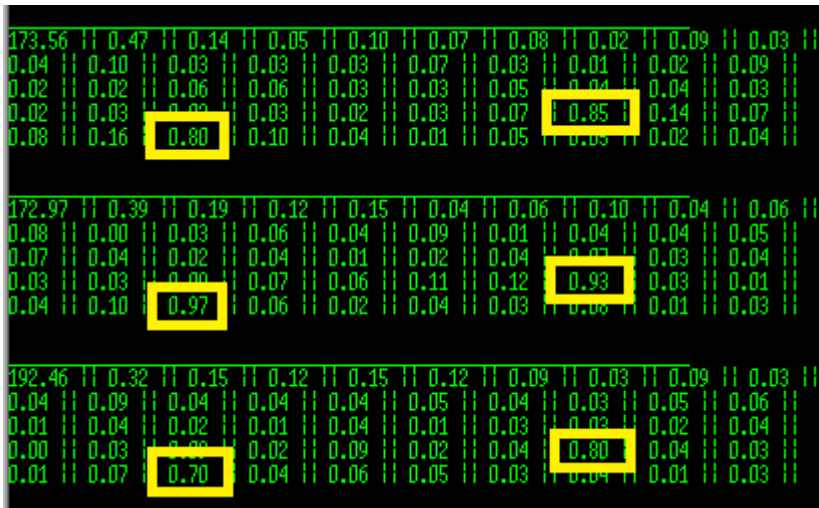


Рис. 4 – Определение гармоник с частотами, близкими к предельно возможным
Fig. 4 – Determination of harmonics with frequencies close to the maximum possible

Для быстрой и удобной оценки присутствующих гармоник информация выводится на LCD-дисплей (рис. 5): 10 гармоник на строчку, порядковые номе-

ра совпадают. Зафиксированные частоты, помимо 50 Гц, – 400 Гц и 800 Гц.

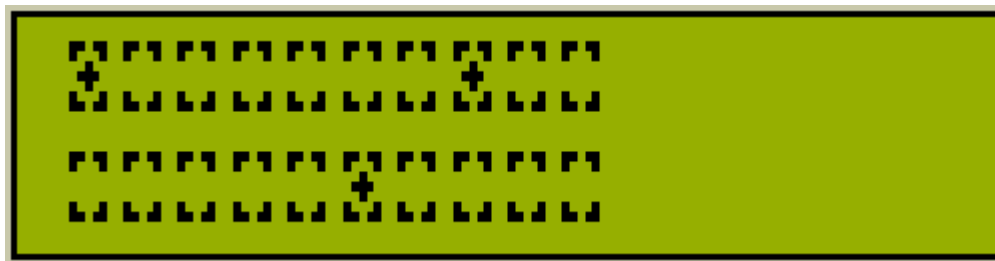


Рис. 5 – Индикация присутствующих гармоник на LCD-дисплее
Fig. 5 – Indication of the harmonics present on the LCD display

4. Заключение

Вопросам качества электрической энергии уделяется значительное внимание, о чем свидетельствует проведенный литературный анализ. В ходе выполнения работы отмечено, что присутствие высших гармоник напряжения и тока, источником которых является нелинейная нагрузка, отрицательно сказывается на качестве электрической энергии в промышленной сети. Это ведет к большим экономическим потерям поставщиков электрической энергии, а также к снижению надежно-

сти, долговечности компонентов сети. Генерируемая возобновляемыми источниками, в частности солнечными электростанциями, электрическая энергия также должна соответствовать требованиям по ее качеству. Для непрерывного мониторинга параметров напряжения и тока на выходе инверторов солнечной электростанции и выявления наличия высших гармоник был разработан прибор, функционирующий по принципу разложения функции в ряд Фурье. Выполнено моделирование работы прибора и приведены его результаты. Полученные возможности прибора отражены в табл. 2.

Основные характеристики разработанного прибора

Таблица 2

The main characteristics of the developed device

Table 2

Максимальный порядковый номер обнаруживаемой гармоники	50
Максимальная частота обнаруживаемой гармоники	2 500 Гц
Минимальная амплитуда обнаруживаемой гармоники	0,5 мВ на стороне 0 ÷ 5 В, 1,5 В на стороне 220
Время детекции одной гармоники	1 с
Стоимость главных электронных компонентов без учета доставки	216 руб.

Список литературы

[1] Измерение и устранение гармоник. Выпуск № 30. Техническая коллекция SchneiderElectric, 2009. – 48 с.

[2] Саенко, Ю.Л. Методы компенсации реактивной мощности в сетях с нелинейными нагрузками / Ю.Л. Саенко, Т.К. Бараненко, Е.В. Бараненко // Вестник Приазовского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2013. – Вып. 26. – С. 204–210.

[3] Жежеленко, И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промышленных предприятий / И.В. Жежеленко: 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 331 с.

[4] Asiminoaei, L. Evaluation of harmonic detection methods for active power filter applications / L. Asiminoaei, F. Blaabjerg, S. Hansen // Proceedings of Twentieth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2005 “APEC 2005”. – P. 635–641.

[5] Довгун, А.А. Автоматизация расчета высших гармоник в электрических сетях промышленных предприятий с нелинейной нагрузкой / А.А. Довгун [и др.] // Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого. – 2016. – №3. – С. 46–52.

[6] Durdhavale, S.R. A Review of Harmonics Detection and Measurement in Power System / S.R. Durdhavale, D.D. Ahire // International Journal of Computer Applications. – 2016. – Vol. 143. – No. 10. – P. 42–45.

[7] Bracewell, R.N. Computing with the Hartley Transform / R.N. Bracewell // Computers in Physics. – 1995. – Vol. 9 (4). – P. 373–379.

[8] ArduinoFHTlibrary [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://wiki.openmusiclabs.com/wiki/ArduinoFHT>. – Заглавие с экрана. – (Дата обращения: 01.05.2018).

[9] Анго, А. Математика для электро- и радиоинженеров / А. Анго; пер. с фр. под ред. К. С. Шифрина. – М.: Наука, 1964. – 772 с.

[10] ArduinoUnoRev3 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://store.arduino.cc/usa/arduino-uno-rev3>. – Заглавие с экрана. – (Дата обращения: 01.05.2018).

References

[1] Measurement and elimination of harmonics: Issue 30. Technical collection of Schneider Electric (Izmerenie i ustranenie garmonik: vypusk 30. Tekhnicheskaya kolleksiya Schneider Electric), 2009, 48 p.

[2] Saenko Yu.L., Baranenko T., Baranenko E.V. Methods for compensating reactive power in networks with nonlinear loads (Metody kompensacii reaktivnoi moshchnosti v setyah s nelinejnymi nagruzkami). *Bulletin of the Priazov State Technical University. Series: Engineering science*, 2013;26:204–210 (in Russ.).

[3] Zhezhelenko I.V. Higher harmonics in power supply systems of industrial enterprises (Vysshie garmoniki v sistemah elektrosnabzheniya promyshlennyh predpriyatii). Moscow: Energoatomizdat, 2000, 331 p. (in Russ.).

[4] Asiminoaei L., Blaabjerg F., Hansen S. Evaluation of harmonic detection methods for active power filter applications. *Proceedings of Twentieth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2005 “APEC 2005”*, pp. 635–641.

[5] Dovgun A.A., Alferov.A.A. , AlferovaT.V. , Rudenko Yu.A. Automation of higher harmonics calculation in electrical networks of industrial enterprises with nonlinear load (Avtomatizaciya rascheta vysshih garmoniki v elektricheskikh setyah promyshlennyh predpriyatii s nelinejnoi nagruzkoi). *Bulletin of P.O. Suhoy GGTU*, 2016;(3):46–52 (in Russ.).

[6] Durdhavale S.R., Ahire D.D.A Review of Harmonics Detection and Measurement in Power System. *International Journal of Computer Applications*, 2016;143(10):42–45.

[7] Bracewell, R.N. Computing with the Hartley Transform. *Computers in Physics*, 1995:9(4):373–379.

[8] ArduinoFHTlibrary [E-resource]. Available on: <http://wiki.openmusiclabs.com/wiki/ArduinoFHT> (05.01.2018).

[9] Anjo A. Mathematics for electric and radio engineers (Matematika dlya elektro- i radioinzhenerov). Moscow: Nauka Publ., 1964, 772 p.

[10] ArduinoUnoRev3 [E-resource]. – Available on: <https://store.arduino.cc/usa/arduino-uno-rev3> (05.01.2018).

Транслитерация по BSI

