

ЭЛЕКТРОНИКА, ФОТОНИКА, ПРИБОРОСТРОЕНИЕ
И СВЯЗЬ

УДК 51-74:621.382.2/.3

DOI: 10.17212/2782-2230-2023-1-9-25

**ФОРМИРОВАНИЕ СТУПЕНЧАТОГО СИГНАЛА
С МИНИМАЛЬНЫМИ УРОВНЯМИ ТРЕТЬЕЙ
ГАРМОНИКИ***

М.М. БАБИЧЕВ¹, Д.А. ГРИГОРЬЕВ²

¹ 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, старший преподаватель кафедры защиты информации. E-mail: babichev@corp.nstu.ru

² 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, лаборант кафедры защиты информации. E-mail: grigoriev_daniil@mail.ru

Одна из важных задач электронного приборостроения – создание мощных измерительных генераторов синусоидального сигнала, в частности, генераторов фиктивной мощности для испытания и проверки счетчиков электроэнергии. Такие генераторы обычно имеют цифровое управление. Широтно-импульсная модуляция (ШИМ) позволяет получить высокий коэффициент полезного действия (КПД). Однако при построении устройства на основе ШИМ возникает потребность в подавлении гармоник высших порядков. Для упрощения фильтрации сигнала повышают частоту переключения ключей в генераторе, что снижает его КПД. В работе представлен новый способ получения синусоидального сигнала с помощью сложения трех прямоугольных импульсных сигналов, имеющих частоту формируемой синусоиды, что позволяет подавить третью гармонику и фильтровать гармоники, начиная с пятой. Такой способ позволяет при высоком КПД и простом выходном фильтре формировать синусоиду с частотой не только 50 Гц, но и существенно более высокой.

Ключевые слова: генератор, синусоида, ШИМ, спектр, гармоника, фильтр, Electronics Workbench, моделирование

* Статья получена 17 февраля 2023 г.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в ряде задач, например при регулировке и поверке счетчиков электрической энергии используются мощные генераторы низкочастотных синусоидальных сигналов [21].

Для генерирования синусоидального сигнала с помощью цифровой управляющей схемы [1, 3, 11], формирователя сигнала ШИМ [12] и усилителя класса D с минимальным числом ключей и минимальным числом импульсов на период следует выбрать длительность импульсов и их размещение на периоде синусоидального сигнала так, чтобы:

- 1) была полностью подавлена третья гармоника;
- 2) значения пятой и седьмой гармоник были минимальными;
- 3) число импульсов на периоде синусоиды было минимальным.

Основное внимание уделяется минимизации третьей гармоники [20] по той причине, что ее сложнее фильтровать, чем гармоники более высоких порядков – 5, 7 и т. д. На выходе усилителя класса D ставится LC-фильтр [4] 2-го или более высокого порядка, что значит, что третья и более высокие гармоники подавляются в 4 и более раз, в то время как пятая гармоника – в 16 раз и более. Также разработчики стараются минимизировать коэффициент гармоник.

Выбирать большое число импульсов на период нецелесообразно, так как с ростом частоты переключения электронных ключей возрастают потери энергии [18]. С другой стороны, повышение частоты следования импульсов упрощает фильтрацию высших гармоник, что улучшает соотношение сигнал–шум [19].

1. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЗАДАЧИ

Для решения поставленной задачи найдем значение нижеприведенного сигнала.

$$\begin{aligned}
 \int_{\frac{\pi}{2}-\alpha_1}^{\frac{\pi}{2}+\alpha_1} \sin(nx) dx &= -\frac{1}{n} \cos(nx) \Big|_{\frac{\pi}{2}-\alpha_1}^{\frac{\pi}{2}+\alpha_1} = -\frac{1}{n} \left[\cos\left(\frac{\pi}{2} + \alpha_1\right) - \sin\left(\frac{\pi}{2} - \alpha_1\right) \right] = \\
 &= -\frac{1}{n} (-2) \left[\sin \frac{1}{2} \left(n \frac{\pi}{2} + n\alpha_1 + n \frac{\pi}{2} - n\alpha_1 \right) \sin \frac{1}{2} \left(n \frac{\pi}{2} + n\alpha_1 - n \frac{\pi}{2} + n\alpha_1 \right) \right] = \\
 &= \frac{2}{n} \sin\left(n \frac{\pi}{2}\right) \sin(n\alpha_1). \tag{1}
 \end{aligned}$$

Этот интеграл характеризует спектральный состав прямоугольного импульса, нечетно симметричного относительно полупериода, имеющего координаты центра $\pi/2$ и ширину импульса, равную $2\alpha_1$. Номер гармонической составляющей – n .

Далее можно найти некоторые пропорциональные составляющие спектра такого ШИМ-сигнала.

При $n = 1$

$$A_1 = 2 \sin\left(\frac{\pi}{2}\right) \sin(\alpha_1) = 2 \sin \alpha_1. \quad (2)$$

При $n = 2$ и аналогично для всех четных

$$A_2 = \sin(\pi) \sin(2\alpha_1) = 0. \quad (3)$$

При $n = 3$

$$A_3 = \frac{2}{3} \sin\left(\frac{3\pi}{2}\right) \sin(3\alpha_1) = -\frac{2}{3} \sin 3\alpha_1. \quad (4)$$

При $n = 5$

$$A_5 = \frac{2}{5} \sin\left(\frac{5\pi}{2}\right) \sin(5\alpha_1) = \frac{2}{5} \sin 5\alpha_1. \quad (5)$$

При $n = 7$

$$A_7 = \frac{2}{7} \sin\left(\frac{7\pi}{2}\right) \sin(7\alpha_1) = -\frac{2}{7} \sin 7\alpha_1. \quad (6)$$

При $n = 9$

$$A_9 = \frac{2}{9} \sin\left(\frac{9\pi}{2}\right) \sin(9\alpha_1) = \frac{2}{9} \sin 9\alpha_1, \quad (7)$$

где A_i ($i=1\dots9$) – величина, пропорциональная соответствующей гармонике. Рассмотрим следующие углы α_{1i} , которые либо в единичном варианте, либо в комбинации углов дают полное подавление третьей гармоники:

$$\alpha_{11} = \frac{\pi}{3}; \quad \alpha_{12} = \frac{\pi}{2}; \quad \alpha_{13} = \frac{\pi}{6}. \quad (8)$$

Подставляя последовательно (8) в выражения (2)–(7), получим:

1) для угла $\alpha_{11} = \frac{\pi}{3}$

$$A_{11} = 2 \sin \frac{\pi}{3} = \sqrt{3}; \quad A_{21} = 0;$$

$$A_{31} = -\frac{2 \sin \pi}{3} = 0; \quad A_{51} = \frac{2 \sin \frac{5\pi}{3}}{5} = \frac{-2 \sin \frac{\pi}{3}}{5} = -\frac{\sqrt{3}}{5}; \quad (9)$$

$$A_{71} = -\frac{2 \sin \frac{7\pi}{3}}{7} = -\frac{2 \sin \frac{\pi}{3}}{7} = -\frac{\sqrt{3}}{7};$$

$$A_{91} = \frac{2}{9} \sin \frac{9\pi}{3} = 0;$$

2) для угла $\alpha_{12} = \frac{\pi}{2}$

$$A_{12} = 2 \sin \frac{\pi}{2} = 2; \quad A_{22} = 0; \quad A_{32} = -\frac{2 \sin \frac{3\pi}{2}}{3} = \frac{2}{3};$$

$$A_{52} = \frac{2}{5} \sin \frac{5\pi}{2} = \frac{2}{5}; \quad A_{72} = -\frac{2}{7} \sin \frac{7\pi}{2} = \frac{2}{7}; \quad (10)$$

$$A_{92} = \frac{2}{9} \sin \frac{9\pi}{2} = \frac{2}{9};$$

3) для угла $\alpha_{13} = \frac{\pi}{6}$

$$A_{13} = 2 \sin \frac{\pi}{6} = 1; \quad A_{23} = 0; \quad A_{33} = -\frac{2 \sin \frac{3\pi}{6}}{3} = -\frac{2}{3};$$

$$A_{53} = \frac{2}{5} \sin \frac{5\pi}{6} = \frac{1}{5}; \quad (11)$$

$$A_{73} = -\frac{2}{7} \sin \frac{7\pi}{6} = \frac{1}{7}; \quad A_{93} = \frac{2}{9} \sin \frac{9\pi}{6} = -\frac{2}{9}.$$

Далее рассмотрим три варианта формирования синусоидального сигнала и оценим влияние гармоник 5, 7 и 9. Формирование ШИМ-сигнала U_1 в соответствии с (9):

$$U_1 = \sqrt{3} - \frac{\sqrt{3}}{5} - \frac{\sqrt{3}}{7} = \sqrt{3} \left(1 - \frac{1}{5} - \frac{1}{7} \right). \quad (12)$$

Формирование ШИМ-сигнала U_2 как суммирование (10) и (11):

$$U_2 = \left(2 + \frac{2}{3} + \frac{2}{5} + \frac{2}{7} + \frac{2}{9} \right) + \left(1 - \frac{2}{3} + \frac{1}{5} + \frac{1}{7} - \frac{2}{9} \right) = 3 + \frac{3}{5} + \frac{3}{7}. \quad (13)$$

Формирование ШИМ-сигнала U_3 в виде суммы (9), (10) и (11):

$$\begin{aligned} U_3 = U_1 + U_2 &= \sqrt{3} - \frac{\sqrt{3}}{5} - \frac{\sqrt{3}}{7} + 3 + \frac{3}{5} + \frac{3}{7} = \\ &= 3\sqrt{3} \left(1 + \frac{3 - \sqrt{3}}{5 \cdot 3\sqrt{3}} + \frac{3 - \sqrt{3}}{7 \cdot 3\sqrt{3}} \right). \end{aligned} \quad (14)$$

Для U_1 и U_2 коэффициент нелинейных искажений (КНИ_1 , КНИ_2) одинаков и равен (для первых девяти гармоник) 24 %, для U_3 равен 6 %. Отношение $\text{КНИ}_{1,2}$ к КНИ_3 после фильтра первого порядка следующее:

$$\frac{\text{КНИ}_1}{\text{КНИ}_3} = 15; \quad \frac{\text{КНИ}_2}{\text{КНИ}_3} = 7,5.$$

На рис. 1 приведены эпюры прямоугольных сигналов с углами α_{11} , α_{21} , α_{13} и их суммы. U_1 соответствует графику α_{11} ; U_2 – графику α_{12+13} ; U_3 – графику $\alpha_{11+12+13}$. Такие сигналы позволяют использовать минимально возможную частоту переключения электронных ключей, равную частоте формируемой синусоиды. Функциональная схема генератора синусоиды, использующего сигнал U_3 , показана на рис. 2.

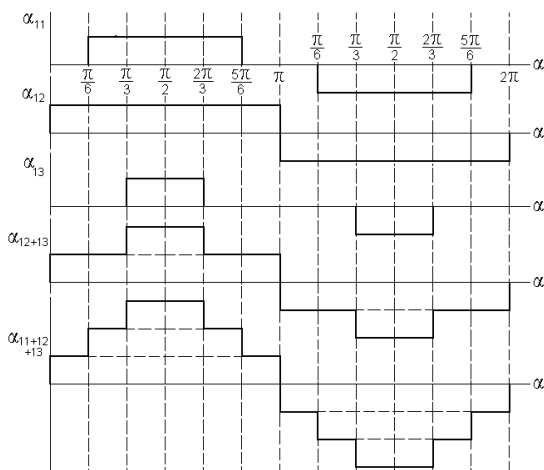


Рис. 1. Эпюры ступенчатых сигналов

Fig. 1. Plots of step signals

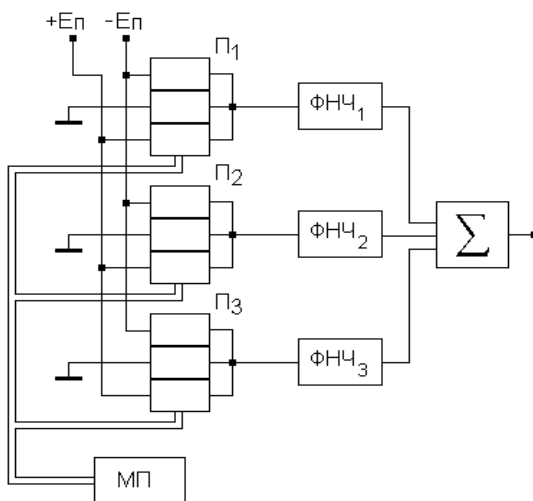


Рис. 2. Функциональная схема генератора синусоиды на основе шестиуровневого ступенчатого сигнала

Fig. 2. Functional diagram of a sine wave generator based on a 6-level step signal

Обозначения на рис. 2: Π_i – переключатели; $\Phi\text{НЧ}_i$ – фильтры низкой частоты; Σ – сумматор; МП – микропроцессор.

Микропроцессор управляет переключателями в соответствии с эякурами рис. 1. Фильтры низкой частоты выполняются на LC -элементах. Сумматор может быть выполнен на трансформаторе.

При исполнении данной схемы может быть использован один двухканальный источник питания.

Выводы из математической модели:

1) первый и второй варианты, т. е. (12) и (13), имеют одинаковые КНИ. В силу простоты первый вариант предпочтительнее, однако уступает второму в $\sqrt{3}$ раз по величине первой гармоники;

2) третий вариант (14) без учета амплитуд имеет меньший КНИ (примерно в 5 раз), чем первый и второй вариант, а также имеет бóльшую величину амплитуды первой гармоники в 3 раза, чем первый вариант, и в $\sqrt{3}$ раз бóльшую, чем второй вариант. Это позволяет увеличить выходную мощность усилителя класса D параллельного типа.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1. ФОРМИРОВАНИЕ СТУПЕНЧАТОГО СИГНАЛА

На первом этапе исследования было выбрано устройство, которое способно генерировать шестиуровневый ступенчатый сигнал. Возможностью формировать сигнал произвольной формы обладает двухканальный виртуальный осциллограф АКИП-72204А со встроенным генератором сигналов. Данный осциллограф работает под управлением приложения PicoScope v6, интерфейс представлен на рис. 3.

Сформируем с помощью инструмента «генератор произвольных сигналов» шестиступенчатый сигнал (на рис. 1 $\alpha_{11+12+13}$), задавшись 1024 отсчетами на период сигнала. Для этого запишем отсчеты одного периода сигнала в CSV-файл. Период состоит из двух полупериодов, в каждом 6 интервалов времени, итого 12. Один интервал равен $1024 / 12 = 85,3$ отсчетов. Пусть каждая ступень сигнала имеет по уровню 0,25 В. В таблице приведено описание формируемого сигнала.

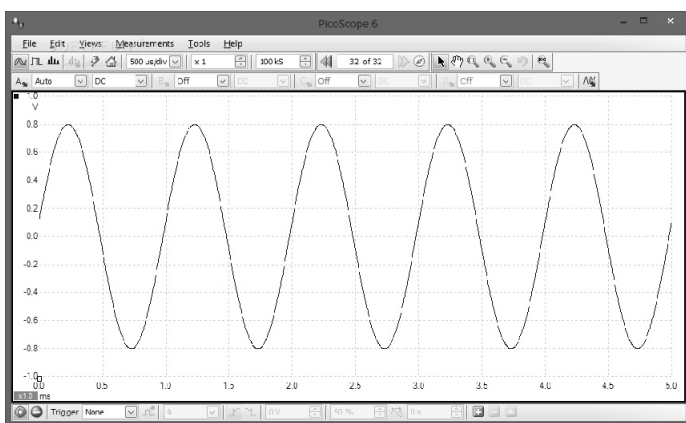


Рис. 3. Интерфейс программы PicoScope v6

Fig. 3. PicoScope v6 interface

Значения для формирования ступенчатого сигнала

Номера отсчетов	Уровень напряжения, В
0...85	0,25
86...171	0,5
172...341	0,75
342...426	0,5
427...512	0,25
513...597	−0,25
598...682	−0,5
683...853	−0,75
854...939	−0,5
940...1024	−0,25

На рис. 4 показан ступенчатый сигнал с частотой 1 кГц (такая частота была выбрана для удобства первоначального исследования), который в дальнейшем будет использоваться для гармонического анализа.

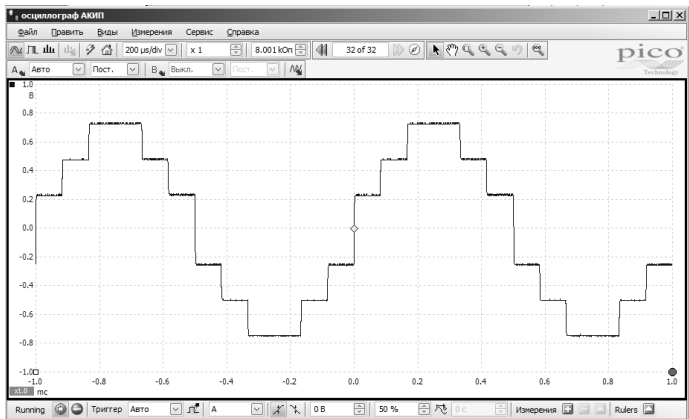


Рис. 4. Осциллограмма ступенчатого шестиуровневого сигнала

Fig. 4. Stepped 6-level Waveform

Если выбрать режим быстрого преобразования Фурье в программе Pico-Score, в спектре помимо основной гармоники видны пятая, седьмая и последующие нечетные гармоники, не кратные трем. Как видно на рис. 5, на частоте 1 кГц выражена основная гармоника, затем на частоте 3 кГц – существенно подавленная третья гармоника, на частоте 5 кГц – пятая гармоника, и так далее; четные гармоники также подавлены.

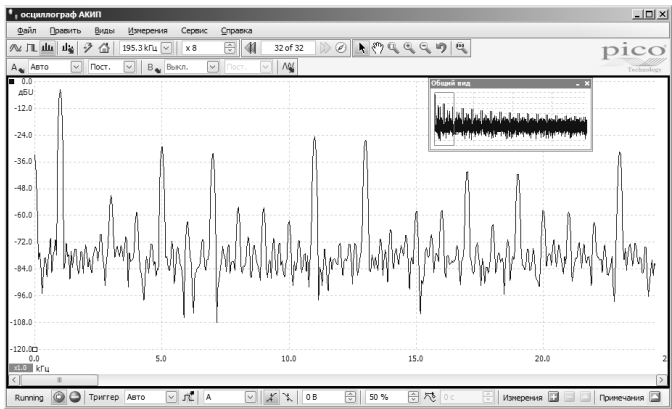


Рис. 5. Спектр ступенчатого сигнала

Fig. 5. Step signal spectrum

2.2. ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФНЧ ДЛЯ ПОДАВЛЕНИЯ ВЫСШИХ ГАРМОНИК

Исходя из рис. 5, в полученном сигнале требуется подавлять пятую гармонику и гармоники более высокого порядка. Для этого был использован ФНЧ второго порядка на основе емкости и индуктивности.

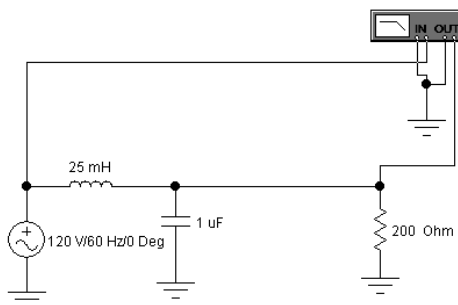


Рис. 6. Модель для оценки эффективности ФНЧ

Fig. 6. Model for evaluating the effectiveness of LPF

На рис. 6 показана модель данного фильтра, созданная в Electronics Workbench. Фильтр имеет частоту среза 1 кГц. С нагрузкой 200 Ом он имеет на частоте среза незначительное резонансное усиление. К нагрузке подключен виртуальный инструмент Bode Plotter – характериограф, отображающий АЧХ схемы.

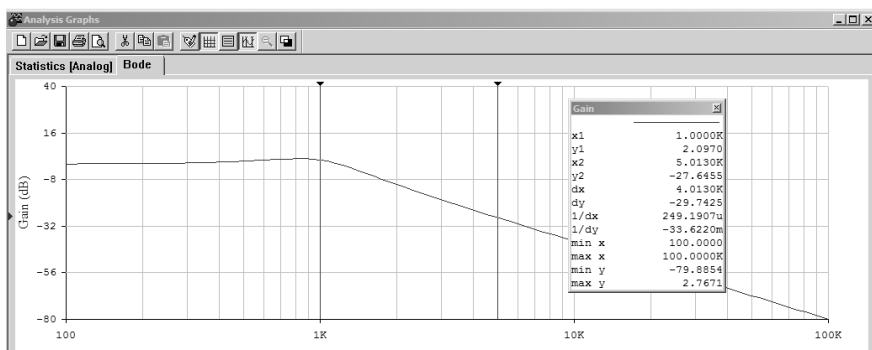


Рис. 7. Ослабление пятой гармоники

Fig. 7. Attenuation of the 5th harmonic

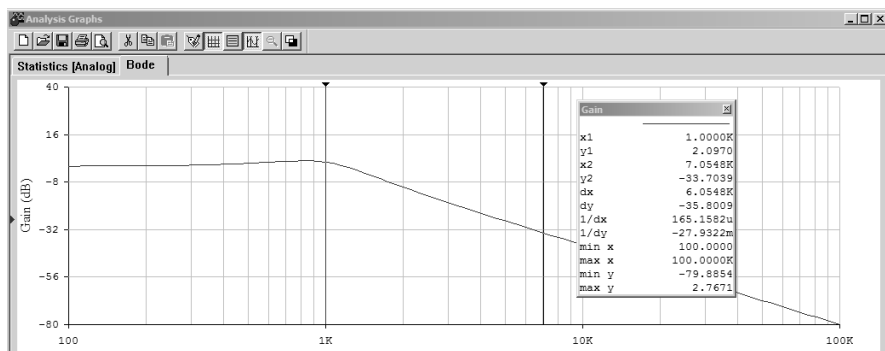


Рис. 8. Ослабление седьмой гармоники

Fig. 8. Attenuation of the 7th harmonic

Из рис. 7 и 8 видно, что третья, пятая и седьмая гармоники подавляются фильтром на частотах -22 , -29 и -35 дБ соответственно. Согласно рис. 5 основная гармоника имеет уровень -3 дБ, третья существенно подавлена: уровень -50 дБ; пятая и седьмая: уровень -30 и -33 дБ соответственно. Пройдя через фильтр, высшие гармоники дополнительно уменьшатся. Разница между первой и третьей гармониками достигнет 72 дБ, между первой и пятой – 59 дБ, между первой и седьмой – 68 дБ. Девятая гармоника подавлена; следующая большая гармоника, одиннадцатая, имеет уровень -25 дБ, но фильтр подавит ее уже на уровне 43 дБ, что на 68 дБ меньше основной гармоники.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Формирование шестиуровневого ступенчатого сигнала путем сложения трех прямоугольных сигналов с одинаковыми амплитудами, с длительностями и фазовыми сдвигами, указанными в настоящей статье, позволяет получить ступенчатую псевдосинусоиду с частотой, равной частоте прямоугольных сигналов. Было подтверждено, что у данного ступенчатого сигнала существенно подавлены гармоники, кратные трем, а также отсутствуют четные гармоники, что позволяет при помощи LC -фильтра низких частот 1-го или 2-го порядка получить синусоиду с коэффициентом гармоник существенно менее 6 %.

Предложенный способ формирования синусоидального сигнала отличается от традиционного ШИМ, формируемого при помощи пилообразного сигнала [17] тем, что частота переключения ключей равна частоте формируемой синусоиды, а не превышает ее во много раз. Это позволяет снизить потери энергии в электронных ключах.

Благодаря распределению мощности потерь в ключах на три однотипные мостовые схемы возможно получить достаточно большую выходную мощность генератора сигнала при относительно маломощных ключах.

В дальнейшем предполагается решить вопросы, связанные с практической реализацией задачи суммирования трех мощных прямоугольных сигналов для получения синусоиды на основе шестиуровневого ступенчатого сигнала.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Авторы выражают глубокую благодарность своему наставнику доктору технических наук, профессору, заслуженному изобретателю РФ Ю.А. Пасынкову (1939–2017), чьи идеи легли в основу настоящей статьи. Всегда будем Вас помнить, Юрий Алексеевич!

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Direct Digital Synthesis / K. Harrison, W. Fletcher, S. Le Roux, R. Song. – University of Cape Town Publ., 2017.
2. Fomichev Yu.M., Silushkin S.V., Larioshina I.A. Investigation converter circuit «Voltage-Current» for power calibrator // Journal of Physics: Conference Series. – 2015. – Vol. 671. – P. 012053.
3. Rospawan A., Simatupang J.W., Purnama I. A simple, cheap and precise microcontroller based DDS function generator // Journal of Electrical and Electronics Engineering. – 2019. – Vol. 3, iss. 2. – P. 118–121.
4. Harmonic current suppression strategy for grid-connected PWM converters with LCL filters / R. Zhao, Q. Li, H. Xu, Y. Wang, J.M. Guerrero // IEEE Access. – 2019. – Vol. 7. – P. 16264–16273.
5. Ponjavic M., Milic S. Switched capacitor compensation of supply distortion in class-D amplifiers // Electronics. – 2020. – Vol. 9, iss. 12. – P. 2197–2213.
6. Hybrid UP-PWM scheme for HERIC inverter to improve power quality and efficiency / Z. Tang, M. Su, Y. Sun, B. Cheng, Y. Yang, F. Blaabjerg, L. Wang // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2019. – Vol. 34, iss. 5. – P. 4292–4303.
7. DC-Link current harmonic mitigation via phase-shifting of carrier waves in paralleled inverter systems / S. Baburajan, H. Wang, D. Kumar, Q. Wang, F. Blaabjerg // Energies. – 2021. – Vol. 14. – P. 4229–4244.
8. Cascaded multilevel PV inverter with improved harmonic performance during power imbalance between power cells / A. Lashab, D. Sera, F. Hahn, L. Camurca, Y. Terliche, M. Liserre, J.M. Guerrero // IEEE Transactions on Industry Application. – 2020. – Vol. 56, iss. 3. – P. 2788–2798.

9. Устройство подавления высших гармоник тока / Н.Н. Вихорев, А.И. Чивенков, Д.А. Алешин, Е.А. Чернов // Инженерный вестник Дона. – 2018. – Т. 51, вып. 4. – С. 56–65.
10. Влияние нагрузочного импеданса на третьей гармонике и выходной емкости транзистора на КПД усилителя класса F_3 / А.П. Ефимович, М.Л. Павлов, Г.В. Мазаев, В.В. Данилов, В.А. Ступак // Донецкие чтения 2017: Русский мир как цивилизационная основа научно-образовательного и культурного развития Донбасса. – Донецк, 2017. – Т. 1. – С. 193–195.
11. Мендеров А. Сравнение функциональных генераторов и генераторов сигналов произвольной формы // Электроника: наука, технология, бизнес. – 2021. – № 9 (210). – С. 122–125.
12. Мишенин А.А., Лихолетов И.А. ШИМ-сигнал и ШИМ-контроллер, их назначение // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова. – Белгород: БГТУ, 2021. – С. 3373–3375.
13. Семенова Е.Ю., Климаш В.С. Исследование однофазных и трехфазных инверторов напряжения с ШИМ в среде MATLAB // Научно-техническое творчество аспирантов и студентов. – Комсомольск-на-Амуре, 2018 – Т. 1. – С. 438–440.
14. Бабичев М.М. Реализация метода адаптивного квантования в измерительных генераторах с цифровым управлением // Системы анализа и обработки данных. – 2021. – № 2 (82). – С. 121–134. – DOI: 10.17212/2782-2001-2021-2-121-134.
15. Максимов С.А., Пашинев В.В. Использование техники переноса спектра сигнала для селективного подавления блокирующих сигналов // Высокопроизводительные вычислительные системы и технологии. – 2018. – № 1 (8). – С. 35–39.
16. Зюзин А.М. Способ построения управляемого функционального генератора // Символ науки. – 2016. – № 6-1. – С. 55–60.
17. Бабичев М.М., Пасынков Ю.А. Особенности ШИМ-сигнала на основе пилообразного напряжения // Актуальные проблемы электронного приборостроения (АПЭП-2016): труды 13 Международной научно-технической конференции, Новосибирск, 3–6 окт. 2016 г.: в 12 т. – Новосибирск, 2016. – Т. 1, ч. 1. – С. 291–293.
18. Седьмое поколение IGBT от IR: снизим потери при переключении / АО «КОМПЭЛ». – 2011. – 21 декабря. – URL: <https://www.compel.ru/lib/54725> (дата обращения: 10.03.2023).
19. Разуваев Ю.Ю. Математическое моделирование усилителя мощности D-класса на основе широтно-импульсной модуляции // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Физика. Математика. – 2017. – № 2. – С. 46–53.

20. Способ уменьшения амплитуд высших гармоник в выходном напряжении частотного преобразователя / А.В. Стариков, С.Л. Лисин, О.С. Беляева, В.А. Кирдяшев // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2021. – Т. 29, № 1. – С. 120–132.

21. Пасынков Ю.А., Савиных М.А. Технологический контроль метрологических характеристик счетчиков электроэнергии на производстве // Научный вестник НГТУ. – 2018. – № 1 (70). – С. 177–188. – DOI: 10.17212/1814-1196-2018-1-177-188.

Бабичев Михаил Михайлович, старший преподаватель кафедры защиты информации Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – измерения интегральных характеристик периодических сигналов, измерения в электроэнергетике, способы уменьшения погрешности дискретности в генераторах фиктивной мощности, аналоговая схемотехника. E-mail: babichev@corp.nstu.ru

Григорьев Даниил Андреевич, лаборант кафедры защиты информации Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов – схемотехника, встраиваемые системы. E-mail: grigoriev_daniil@mail.ru

DOI: 10.17212/2782-2230-2023-1-9-25

Formation of a stepped signal with minimum levels of the third harmonic*

M.M. Babichev¹, D.A. Grigoriev²

¹ *Novosibirsk State Technical University, 20 Karl Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, senior lecturer of the Department of Information Security. E-mail: babichev@corp.nstu.ru*

² *Novosibirsk State Technical University, 20 Karl Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, laboratory assistant of the Department of Information Security. E-mail: grigoriev_daniil@mail.ru*

One of the important tasks of electronic instrumentation is the creation of powerful measuring generators of a sinusoidal signal, in particular, fictitious power generators for testing and verifying electricity meters. Such generators are usually digitally controlled. Get a high efficiency allows pulse-width modulation (PWM). However, when building a device based on PWM,

* Received 17 February 2023.

there is a need to suppress higher-order harmonics. To simplify signal filtering, the switching frequency of the keys in the generator is increased, which reduces its efficiency. The paper presents a new method for obtaining a sinusoidal signal by adding three rectangular pulse signals having the frequency of the generated sinusoid, which makes it possible to suppress the 3rd harmonic and filter the harmonics starting from the 5th. This method allows, with high efficiency and a simple output filter, to form a sinusoid with a frequency of not only 50 Hz, but also significantly higher. The authors express deep respect to their mentor, Honored Inventor of the Russian Federation, Professor Yu.A. Pasyukov (1939-2017), whose ideas formed the basis of this article. We will always remember you, Yuri Alekseevich!

Keywords: generator, sine wave, PWM, spectrum, harmonic, filter, Electronics Workbench, simulation

REFERENCES

1. Harrison K., Fletcher W., Le Roux S., Song R. *Direct Digital Synthesis*. University of Cape Town Publ., 2017.
2. Fomichev Yu.M., Silushkin S.V., Larioshina I.A. Investigation converter circuit «Voltage-Current» for power calibrator. *Journal of Physics: Conference Series*, 2015, vol. 671, p. 012053.
3. Rospawan A., Simatupang J.W., Purnama I. A simple, cheap and precise microcontroller based DDS function generator. *Journal of Electrical and Electronics Engineering*, 2019, vol. 3, iss. 2, pp. 118–121.
4. Zhao R., Li Q., Xu H., Wang Y., Guerrero J.M. Harmonic current suppression strategy for grid-connected PWM converters with LCL filters. *IEEE Access*, 2019, vol. 7, pp. 16264–16273.
5. Ponjavic M., Milic S. Switched capacitor compensation of supply distortion in class-D amplifiers. *Electronics*, 2020, vol. 9, iss. 12, pp. 2197–2213.
6. Tang Z., Su M., Sun Y., Cheng B., Yang Y., Blaabjerg F., Wang L. Hybrid UP-PWM scheme for HERIC inverter to improve power quality and efficiency. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2019, vol. 34, iss. 5, pp. 4292–4303.
7. Baburajan S., Wang H., Kumar D., Wang Q., Blaabjerg F. DC-Link current harmonic mitigation via phase-shifting of carrier waves in paralleled inverter systems. *Energies*, 2021, vol. 14, pp. 4229–4244.
8. Lashab A., Sera D., Camurca L., Terriche Y., Liserre M., Guerrero J.M. Cascaded multilevel PV inverter with improved harmonic performance during power imbalance between power cells. *IEEE Transactionson Industry Application*, 2020, vol. 56, iss. 3, pp. 2788–2798.
9. Vikhorev N.N., Chivenkov A.I., Aleshin D.A., Chernov E.A. Ustroistvo povdavlenniya vysshikh garmonik toka [Harmonic current suppression device]. *Inzhenernyi vestnik Dona = Engineering Journal of Don*, 2018, vol. 51, iss. 4, pp. 56–65.

10. Efimovich A.P., Pavlov M.L., Mazaev G.V., Danilov V.V., Stupak V.A. [The influence of the load impedance at the third harmonic and the output capacitance of the transistor on the efficiency of the class F_3 amplifier]. *Donetskie chteniya 2017: Russkii mir kak tsivilizatsionnaya osnova nauchno-obrazovatel'nogo i kul'turnogo razvitiya Donbassa* [Donetsk readings 2017: Russian world as the civilizational basis for scientific, educational and cultural development of Donbass]. Donetsk, 2017, vol. 1, pp. 193–195. (In Russian).
11. Menderov A. Sravnenie funktsional'nykh generatorov i generatorov signalov proizvol'noi formy [Comparison of function and arbitrary waveform generators]. *Elektronika: nauka, tekhnologiya, biznes = Electronics: Science, Technology, Business*, 2021, no. 9 (210), pp. 122–125.
12. Mishenin A.A., Likholetov I.A. [PWM signal AND PWM controller, their purpose]. *Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya molodykh uchenykh BGTU im. V.G. Shukhova* [International scientific and technical conference of young scientists of the Belarusian State Technical University V.G. Shukhov], Belgorod, 2021, pp. 3373–3375. (In Russian).
13. Semenova E.Yu., Klimash V.S. [Study of single-phase and three-phase voltage inverters with PWM in the MATLAB environment]. *Nauchno-tekhnicheskoe tvorchestvo aspirantov i studentov* [Scientific and technical creativity of graduate students and students], Komsomolsk-on-Amur, 2018, vol. 1, pp. 438–440. (In Russian).
14. Babichev M.M. Realizatsiya metoda adaptivnogo kvantovaniya v izmeritel'nykh generatorakh s tsifrovym upravleniem [Implementation of the adaptive quantization method in digitally controlled measuring generators]. *Sistemy analiza i obrabotki dannykh = Analysis and Data Processing Systems*, 2021, no. 2 (82), pp. 121–134. DOI: 10.17212/2782-2001-2021-2-121-134.
15. Maksimov S.A., Pashnev V.V. Ispol'zovanie tekhniki perenosy spektra signala dlya selektivnogo podavleniya blokiruyushchikh signalov [Using signal spectrum transfer technique to selectively suppress blocking signals]. *Vysokoproduktivnye vychislitel'nye sistemy i tekhnologii = High-performance computing systems and technologies*, 2018, no. 1 (8), pp. 35–39.
16. Zyuzin A.M. Sposob postroeniya upravlyаемого funktsional'nogo generatora [A method for constructing a controlled functional generator]. *Simvol nauki = Symbol of science*, 2016, no. 6-1, pp. 55–60.
17. Babichev M.M., Pasynkov Yu.A. [Specific characteristics of a PWM signal based on sawtooth voltage]. *Aktual'nye problemy elektronnoy priborostroeniya: trudy 13 Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoy konferentsii (APEP-2016)* [13th International Scientific-Technical Conference on Actual problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE-2016): proceedings]. Novosibirsk, 2016, vol. 1, pt. 1, pp. 291–293. (In Russian).

18. JSC "KOMPEL". *Sed'moe pokolenie IGBT ot IR: snizim poteri pri pereklyuchenii* [7th generation of IGBT from IR: reduce switching losses]. 2001, 21 December. Available at: <https://www.compel.ru/lib/54725> (accessed 10.03.2023).
19. Razuvaev Yu.Yu. Matematicheskoe modelirovanie usilitelya moshchnosti D-klassa na osnove shirotno-impul'snoi modulyatsii [Mathematical simulation of D-class power amplifier on basis of pulse width modulation]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Fizika. Matematika* = *Proceedings of Voronezh State University. Series: Physics. Mathematics*, 2017, no. 2, pp. 46–53.
20. Starikov A.V., Lisin S.L., Belyaeva O.S., Kirdyashev V.A. Spособ umen'sheniya amplitud vysshikh garmonik v vykhodnom napryazhenii chastotnogo preobrazovatelya [Method for reducing the amplitudes of higher harmonics in the output voltage of the frequency converter]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki* = *Vestnik of Samara State Technical University. Technical Sciences Series*, 2021, vol. 29, no. 1, pp. 120–132.
21. Pasinkov Y.A., Savinykh M.A. Tekhnologicheskii kontrol' metrologicheskikh kharakteristik schetchikov elektroenergii na proizvodstve [Technological control of metrological characteristics of electricity meters during production]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = *Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2018, no.1 (70), pp. 177–188. DOI: 10.17212/1814-1196-2018-1-177-188.

Для цитирования:

Бабичев М.М., Григорьев Д.А. Формирование ступенчатого сигнала с минимальными уровнями третьей гармоники // Безопасность цифровых технологий. – 2023. – № 1 (108). – С. 9–25. – DOI: 10.17212/2782-2230-2023-1-9-25.

For citation:

Babichev M.M., Grigoriev D.A. Formirovanie stupenchatogo signala s minimal'nymi urovnymi tret'ei garmoniki [Formation of a stepped signal with minimum levels of the third harmonic]. *Bezopasnost' tsifrovyykh tekhnologii* = *Digital Technology Security*, 2023, no. 1 (108), pp. 9–25. DOI: 10.17212/2782-2230-2023-1-9-25.