

# Устройства аналоговой и цифровой электроники

УДК 62-83:681.51(075.8)

## ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ПЕРЕДАЧИ ГАРМОНИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ В МНОГОЗОННЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ С ДВУХТАКТНОЙ ШИРОТНО-И ЧАСТОТНО-ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ

О.Г. Брылина

Приводятся результаты сопоставительного анализа качества передачи гармонического сигнала в двухтактных многозонных разветвляющих преобразователях (МРП) с различными законами модуляции. Рассматриваются МРП с широтно-импульсной модуляцией и с частотно-широотно-импульсной модуляцией. Приведены структурные схемы, временные диаграммы сигналов преобразователей при гармоническом входном воздействии, основные расчетные соотношения, а также характеристики, полученные в результате моделирования в среде Matlab+Simulink.

Результаты исследований могут представлять интерес для специалистов в области силовой и информационной электроники, электропривода и автоматизации технологических процессов.

*Ключевые слова:* многозонный разветвляющий преобразователь, широтно-импульсная модуляция, частотно-широотно-импульсная модуляция, временные диаграммы, коэффициент гармоник, релейный элемент, ключевой элемент.

### Введение

В настоящее время в системах промышленной автоматики широкое распространение получили регулируемые силовые преобразователи с широтно- (ШИМ) и частотно-широотно-импульсной модуляцией (ЧШИМ) [1–5]. При этом, как правило, в основном используется однозонная ШИМ или ЧШИМ, когда выходные импульсы имеют фиксированное значение амплитуды [1–4].

Исследования, проведенные на кафедре электропривода ЮУрГУ (НИУ), показали перспективность многозонной ШИМ и ЧШИМ, позволяющей с высокой эффективностью решать целый комплекс технических задач по повышению метрологических и эксплуатационных характеристик импульсных преобразователей информации [5–8].

При многозонной модуляции максимальный диапазон  $\pm A$  выходного сигнала преобразователя разделяется на несколько ( $n$ -е число) поддиапазонов (модуляционных зон МЗ), в пределах которых преобразование входного воздействия  $X_{ВХ}$  осуществляется в соответствии с заданной модуляционной характеристикой  $f_0 = f(X_{ВХ})$ , где  $f_0$  – частота выходных импульсов преобразователя [6]. Переход многозонного преобразователя (МРП) из одной модуляционной зоны в другую осуществляется, когда амплитуда входного сигнала превышает заданное для данной модуляционной зоны значение. Подобная структура МРП в целом ряде случаев позволяет при сохранении повышенных энергетических показателей и помехоустойчивости получить более широкую полосу пропускания частот по сравнению с однозонной модуляцией.

Многообразие принципов построения МРП [5–8] диктует необходимость сравнительного анализа качества преобразования на их основе динамического, в частности, гармонического сигнала, например, по критерию коэффициента гармоник выходных импульсов, чему и посвящена данная работа. Анализ проводился на базе пакета Matlab+Simulink.

### Структурные схемы и принцип действия разветвляющих преобразователей

Наибольшее распространение в системах автоматики получили многозонные преобразователи с широтно-импульсной (МРП-ШИМ) (рис. 1, а) [3, 4, 9] и частотно-широотно-импульсной модуляцией (МРП-ЧШИМ) (рис. 2, а; 3) [6–8].

В состав МРП-ШИМ входят генератор пилообразного напряжения (сигнала разветки) ГПН, сумматоры  $\Sigma 1, \Sigma 2$ , безгистерезисный релейный элемент РЭ и ключевые элементы  $K1 - Kp$  с зоной нечувствительности  $\pm C_i$ . Выходной сигнал РЭ меняется дискретно в пределах  $-A/(p+1) \leq Y_{РЭ}(t) \leq A/(p+1)$  (рис. 1, б), а ключевых элементов – в пределах  $0 \leq Y_{K_i}(t) \leq |2A/(p+1)|$  (рис. 1, в), где  $\pm A$  – максимальная амплитуда выходного сигнала  $Y_{ВЫХ}(t)$ ,  $p$  – число ключевых элементов МРП-ШИМ. В МРП-ШИМ число модуляционных зон определяется в соответствии с выражением  $Z = p + 1$ .

В дальнейшем ограничимся числом  $p = 2$ , что обеспечивает  $Z = 3$ . В дальнейшем модуляционные зоны обозначаются как МЗ<sub>1</sub>, МЗ<sub>2</sub>, МЗ<sub>3</sub>.

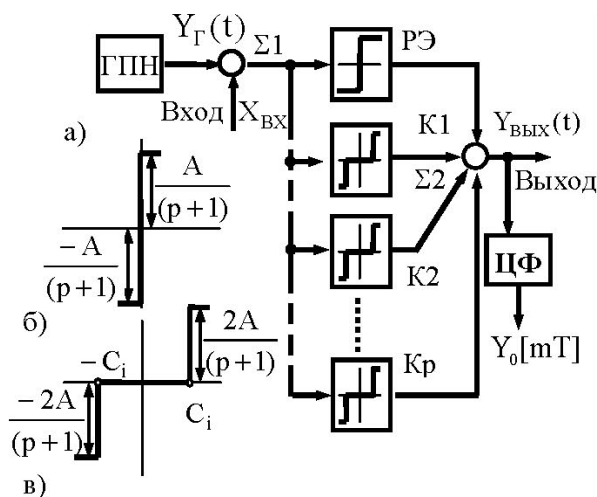


Рис. 1. Структурная схема многозонного преобразователя МРП-ШИМ

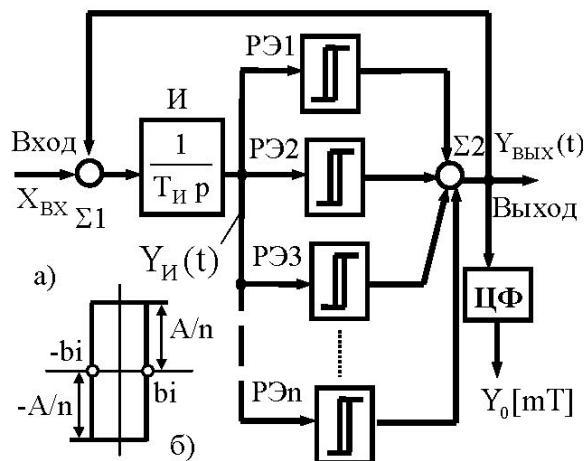


Рис. 2. Структурная схема многозонного преобразователя МРП-ЧШИМ

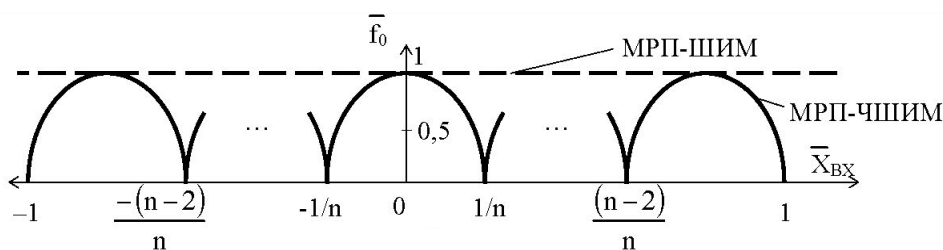


Рис. 3. Модуляционные характеристики многозонных преобразователей

В МРП-ШИМ происходит непосредственное сравнение сигнала развертки  $Y_{Г}(t)$  с нулевым уровнем или с некоторым заранее заданным пороговым уровнем  $C_i$  с последующей фиксацией момента времени выполнения равенства  $Y_{Г}(t) = 0$  или  $Y_{Г}(t) = C_i$  путем дискретного изменения знака и/или уровня выходного сигнала  $Y_{ВЫХ}(t)$  МРП-ШИМ.

В дальнейшем считаем, что пороговые уровни ключевых элементов  $K1 - K2$  удовлетворяют условию  $|C_1| < |C_2|$ , причем  $|C_2| - |C_1| = \Delta C = A_{Г}$ , где  $A_{Г}$  – амплитуда сигнала с выхода ГПН.

Для выделения среднего значения  $Y_0[mT_0]$  из потока импульсов  $Y_{ВЫХ}(t)$  на выходе МРП-ШИМ установлен цифровой фильтр (ЦФ), где  $m = 1, 2, 3, \dots$  – целое число, соответствующее порядковому номеру интервала дискретизации  $T_0$  (периоду следования) выходных импульсов многозонного преобразователя.

В качестве динамического воздействия был выбран гармонический сигнал  $\bar{X}_{\sim}(t) = \bar{A}_{\sim} \sin \omega t$  с нормированной амплитудой  $\bar{A}_{\sim} = |A_{\sim}/A| = 0,8$ , что приводит к формированию на выходе преобразователя сигнала во всех (в данном случае в трех) модуляционных зонах (рис. 4). Происходит это по причине последовательных переключений РЭ,  $K1, K2$  в «положительное» с последующим возвратом

в «отрицательное» состояния (см. рис. 4) и т. д. В результате входной гармонический сигнал  $\bar{X}_{\sim}(t) = \bar{A}_{\sim} \sin \omega t$  восстанавливается на выходе МРП-ШИМ в виде «ступенчатого» сигнала  $Y_0[mT_0]$ . Величина «ступеньки» равна среднему значению выходных импульсов за  $m$ -й период их следования. Дискретное изменение  $Y_0[mT_0]$  происходит по завершению соответствующего интервала дискретизации МРП-ШИМ, когда между входным сигналом и средним значением выходных импульсов существует однозначная связь и ЦФ в состоянии вычислить постоянную составляющую выходных импульсов.

МРП-ЧШИМ представляет собой замкнутую интегрирующую автоколебательную систему (см. рис. 2, а). В ее состав входят сумматоры  $\Sigma1$  и  $\Sigma2$ , интегратор  $И$  с передаточной характеристикой вида  $W(p) = \frac{1}{T_{И} p}$ , где  $T_{И}$  – постоянная времени

интегрирования и релейные элементы  $PЭ1 - PЭn$  с симметричными относительно «нуля» порогами переключения, удовлетворяющими условию  $|\pm b_1| < |\pm b_2| < \dots < |\pm b_n|$ . Здесь индекс при  $b$  соответствует порядковому номеру РЭ. Амплитуда выходных импульсов каждого из РЭи меняется в пределах  $Y_{PЭi} = \pm A / n$  (рис. 2, б), где  $n \geq 3, 5, 7, \dots$  – нечетное число. Максимальный выходной сигнал

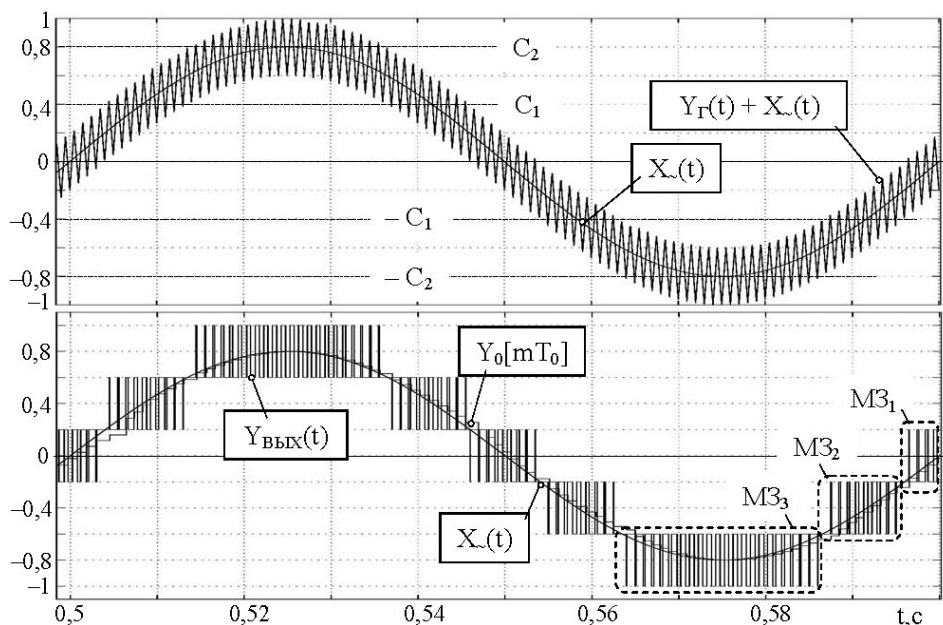


Рис. 4. Временные диаграммы сигналов МРП-ШИМ при гармоническом входном воздействии с нормированной амплитудой  $\bar{A}_~(t) = 0,8$

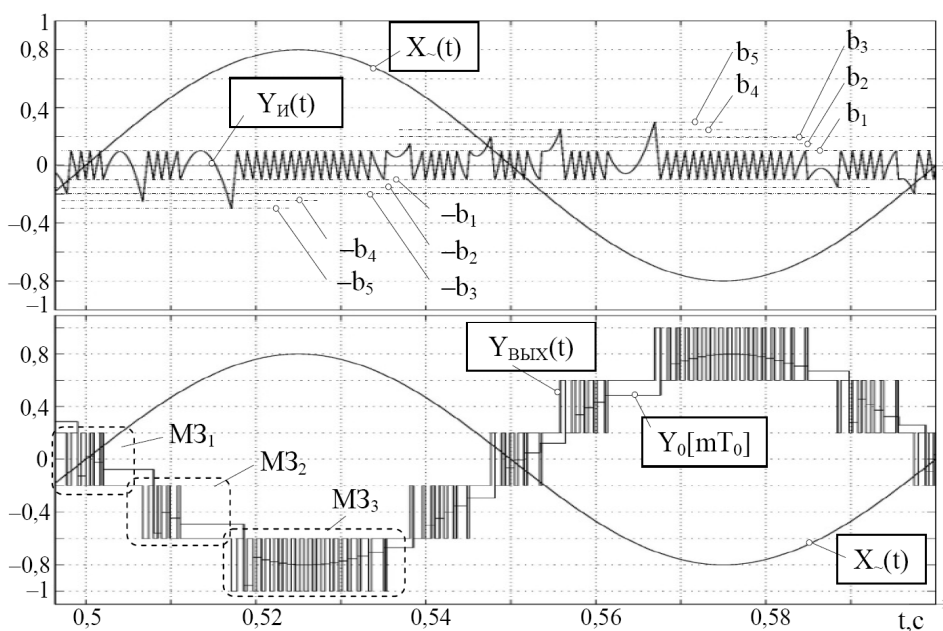


Рис. 5. Временные диаграммы сигналов МРП-ЧШИМ при гармоническом входном воздействии с амплитудой  $\bar{A}_~(t) = 0,8$

МРП-ЧШИМ равен  $\pm A$  (см. рис. 2, б). В режиме автоколебаний всегда находится РЭ с минимальным значением порогов переключения, в данном случае РЭ1. Остальные РЭ работают в статическом состоянии  $A/n$  или  $-A/n$  (см. рис. 2, б). Ограничимся числом релейных элементов  $n = 5$ , что, в соответствии с выражением  $Z = (n+1)/2 = 3$ , обеспечивает, как и в МРП-ШИМ, три модуляционные зоны.

При гармоническом сигнале  $\bar{X}_~(t) = \bar{A}_~ \sin \omega t$  на входе МРП-ЧШИМ преобразователь последо-

вательно переходит из первой (МЗ<sub>1</sub>) в более старшие модуляционные зоны (МЗ<sub>2</sub> и МЗ<sub>3</sub>), а затем обратно. Происходит это в результате последовательной с ростом амплитуды сигнала  $\bar{X}_~(t)$  перерождения РЭ2, РЭ3 под действием выходного сигнала  $Y_И(t)$  интегратора И (см. рис. 2). Полезная составляющая  $Y_0[mT_0]$  выходных импульсов  $Y_ВЫХ(t)$  МРП-ЧШИМ складывается из среднего значения импульсного потока текущей модуляционной зоны и постоянной составляющей предшествующих модуляционных зон (рис. 5).

В результате координата  $Y_0[mT_0]$  выходного сигнала  $Y_{ВЫХ}(t)$  МРП-ЧШИМ пропорциональна величине  $\bar{X}_\sim(t)$  (см. рис. 5) и инверсна по отношению к этому входному воздействию.

Принципиальное различие между МРП-ШИМ и МРП-ЧШИМ наглядно показывает модуляционная характеристика  $\bar{f}_0 = f(\bar{X}_{ВХ})$ , которая не зависит от входного сигнала  $\bar{X}_{ВХ}$  и постоянна во всем диапазоне его изменения для МРП-ШИМ и имеет точки с  $\bar{f}_0 = 0$  (частотно-нулевое сопряжение модуляционных зон) – для МРП-ЧШИМ (см. рис. 3). Здесь  $\bar{X}_{ВХ} = X_{ВХ}/A$  – нормированная величина входного сигнала,  $\bar{f}_0 = |f_0/f_{0|\bar{X}_{ВХ}=0}|$  – нормированная частота  $f_0 = T_0^{-1}$  выходных импульсов преобразователя;  $f_{0|\bar{X}_{ВХ}=0} = T_{0|\bar{X}_{ВХ}=0}^{-1}$  – частота выходных импульсов преобразователей при нулевом значении сигнала на входе.

**Теоретическая часть**

В соответствии с ГОСТ 13109–97 [10], качество выходного сигнала оценивают по коэффициенту гармоник  $K_\Gamma$ , определяемому по формуле

$$K_\Gamma = \sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} A_{(k)}^2} / A_{(1)}, \tag{1}$$

где  $A_{(1)}$  и  $A_{(k)}$  – амплитуда первой и k-х гармоник выходного сигнала МРП.

Анализ проводился в среде Matlab+Simulink [11] в соответствии с выражением (1) для диапазона частот  $\bar{f}_\sim \leq 0,1$ , что соответствует реальной полосе пропускания импульсных преобразователей с ШИМ и ЧШИМ при гармоническом входном воздействии [12, 13]. Здесь  $\bar{f}_\sim = |f_\sim/f_{0|\bar{X}_{ВХ}=0}|$  – нормированное значение частоты  $f_\sim$  гармонического входного сигнала  $X_\sim(t)$ .

При малых значениях амплитуды  $\bar{A}_\sim$  (рис. 6, а) характеристики  $K_\Gamma = f(\bar{f}_\sim)$  для МРП-ШИМ и МРП-ЧШИМ практически идентичны. Это является следствием того, что в данном диапазоне входного сигнала модуляционные характеристики для этих преобразователей фактически совпадают (см. рис. 3).

Когда же амплитуда динамического входного сигнала существенно возрастает (рис. 6, б), частота следования выходных импульсов в МРП-ЧШИМ «в среднем» падает, а переход из одной модуляционной зоны в другую сопровождается задержкой, обусловленной временем переключения соответствующего из релейных элементов РЭ2, РЭ3. Это приводит к тому, что величина  $K_\Gamma$  для МРП-ЧШИМ существенно возрастает. Здесь МРП-ЧШИМ проигрывает преобразователям типа МРП-ШИМ по качеству преобразования динамического сигнала.

Однако не следует забывать, что МРП-ЧШИМ является замкнутой системой с интегратором в прямом канале регулирования, что обеспечивает его высокую статическую точность и помехоустойчивость.

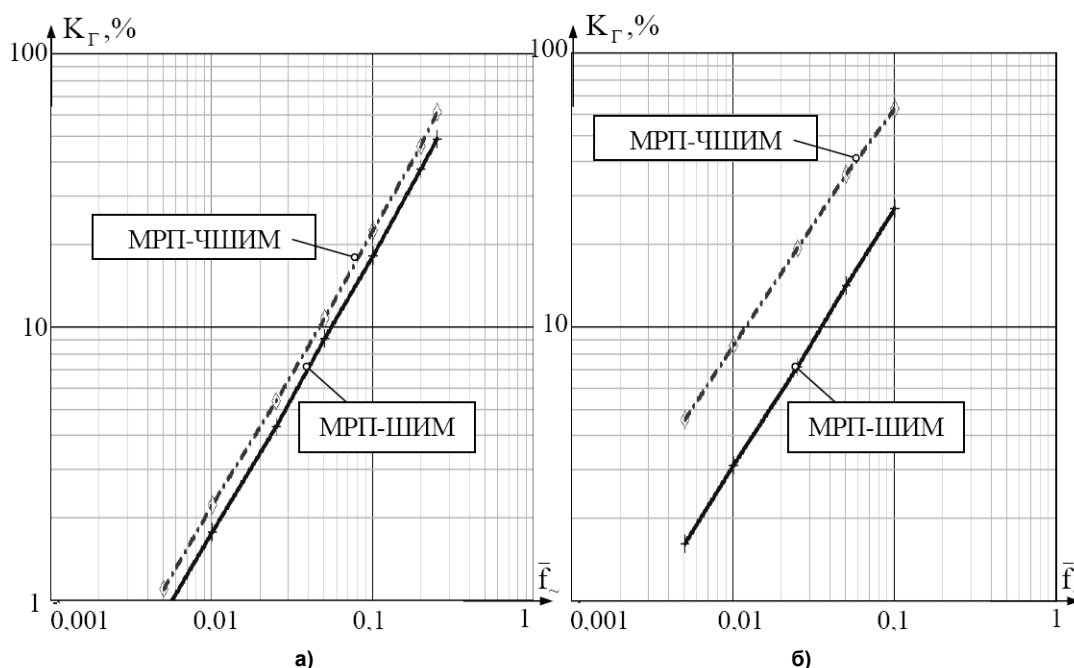


Рис. 6. График зависимости коэффициента гармоник выходного сигнала от относительной частоты гармонического входного воздействия при нормированной амплитуде гармонического сигнала  $\bar{A}_\sim = 0,1$  (а) и  $\bar{A}_\sim = 0,8$  (б)

### Выводы

1. Минимальным коэффициентом гармоник  $K_{\Gamma}$  во всем рабочем диапазоне частот  $\bar{f}_{\omega}$  обладает МРП-ШИМ.

2. В преобразователях с ЧШИМ коэффициент гармоник  $K_{\Gamma}$  больше, так как частота  $\bar{f}_0$  выходных импульсов подобных МРП снижается с ростом амплитуды гармонического сигнала. Поэтому количество отсчетов, необходимых для восстановления гармонического выходного сигнала, оказывается меньше чем в преобразователях с ШИМ, где частота  $\bar{f}_0$  остается постоянной во всем диапазоне изменения входного воздействия.

3. При работе с динамическим воздействием большой амплитуды, когда оказываются задействованными все модуляционные зоны, коэффициент гармоник  $K_{\Gamma}$  всех преобразователей возрастает, так как амплитуда дискретизации сигнала  $Y_0[mT_0]$  по уровню также увеличивается. При этом в МРП-ЧШИМ  $K_{\Gamma}$  возрастает значительно по сравнению с МРП-ШИМ по причине наличия в модуляционной характеристике точек частотно-нулевого сопряжения модуляционных зон.

### Литература

1. *High-speed three-dimensional shape measurement for dynamic scenes using bi-frequency tripolar pulse-width-modulation fringe projection* Original / Chao Zuo, Qian Chen, Guohua Gu et al. // *Optics and Lasers in Engineering, In Press, Corrected Proof, Available online*, 22 March, 2013.

2. Hiticas, I. *Modeliranje i operativno testiranje modulacije širine impulsa kod vremena ubrizgavanja za motor paljen pomoću svjećice* / I. Hiticas, D. Marin, L. Mihon // *Tehnički vjesnik*. – 2013. – Vol. 20, no. 6. – P. 147–153.

3. Мартяшин, А.И. *Преобразователи электрических параметров для систем контроля и измерения* / А.И. Мартяшин, Э.К. Шахов, В.М. Шляндин. – М.: Энергия, 1967. – 390 с.

4. Кобзев, А.В. *Многозонная импульсная модуляция. Теория и применение в системах преобразования параметров электрической энергии* /

А.В. Кобзев. – Новосибирск: Наука, 1979. – 304 с.

5. *Потери в регулируемых электроприводах при разных законах управления* / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, А.Н. Шишков и др. // *Вест. Юж.-Урал. гос. ун-та. Сер. «Энергетика»*. – 2010. – Вып. 13, № 14 (190). – С. 47–51.

6. Брылина, О.Г. *Статические и динамические спектральные характеристики многозонного преобразователя с частотно-широотно-импульсной модуляцией* / О.Г. Брылина // *Вест. Юж.-Урал. гос. ун-та. Сер. «Энергетика»*. – 2013. – Т. 13, № 1. – С. 70–79.

7. *Analog-digital converter with integrating in-phase amplitude-frequency-pulse modulation for switched drive systems* / L.I. Tsytoich, O.G. Brylina, M.M. Dudkin et al. // *Russian Electrical Engineering*. – 2013. – Vol. 84, iss. 5. – P. 244–249.

8. *Adaptive interval-code integrating synchronization of control systems for power converters* / L.I. Tsytoich, O.G. Brylina, M.M. Dudkin, R.M. Rakhmatulin // *Russian Electrical Engineering*. – 2013. – Vol. 84, iss. 3. – P. 122–128.

9. *Новый алгоритм широтно-импульсной модуляции выходного напряжения трехфазного автономного инвертора с нейтральной точкой* / В.И. Сенько, С.А. Лебедеенко, А.П. Калиниченко и др. // *Техническая электродинамика*. – 1994. – № 1. – С. 13–18.

10. ГОСТ 13109–97. *Электрическая энергия. Электромагнитная совместимость. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения*. – М.: Госстандарт, 1998.

11. Герман-Галкин, С.Г. *Matlab & Simulink. Проектирование механотронных систем на ПК* / С.Г. Герман-Галкин. – СПб.: КОРОНА-Век, 2008. – 368 с.

12. Хьюлсман, Л.П. *Активные фильтры* / Л.П. Хьюлсман; пер. с англ. под ред. И.Н. Теплюка. – М.: Мир, 1972. – 516 с.

13. Bissell, C. *Vladimir Aleksandrovich Kotelnikov: pioneer of the sampling theorem, cryptography, optimal detection, planetary mapping... History of Communications. Communications Magazine, IEEE*. – 2009. – № 10. – P. 24–32.

**Брылина Олеся Геннадьевна**, канд. техн. наук, доцент кафедры «Электропривод и автоматика промышленных установок», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, тел.: 8(351)2679321, e-mail: teolge@mail.ru.

*Поступила в редакцию 6 октября 2013 г.*

**EVALUATION OF THE QUALITY OF THE HARMONIC SIGNAL  
TRANSMISSION IN MULTI-ZONE CONVERTERS WITH PUSH-PULL  
WIDTH-PULSE AND FREQUENCY-WIDTH-PULSE MODULATION**

O.G. Brylina, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation, teolge@mail.ru

The results of a comparative analysis of transmission quality of the harmonic signal in push-pull multi-zone sweep converters with the modulation of two types are considered in this article. Multi-zone sweep converters with width-pulse modulation and frequency-width-pulse modulation are shown. The structure charts of the multi-zone converters, its time diagrams for harmonic input signal, main analytical expressions and characteristics obtained as a result of a modeling in Matlab + Simulink are given.

This article may interest specialists in the field of power and information electronics, of the electric drive and automation of technological processes.

*Keywords: multi-zone sweep converter, width-pulse modulation, frequency-width-pulse modulation, time diagrams, harmonic factor, relay element, key element.*

**References**

1. Zuo Chao, Chen Qian, Zuo Chao, Gu Guohua, Feng Shijie, Feng Fangxiaoyu, Li Rubin, Shen Guochen. High-Speed Three-Dimensional Shape Measurement for Dynamic Scenes Using Bi-Frequency Tripolar Pulse-Width-Modulation Fringe Projection Original, *Optics and Lasers in Engineering, In Press, Corrected Proof, Available at 22 March*, 2013.
2. Hiticas I., Marin D., Mihon L. Modeliranje i operativno testiranje modulacije širine impulsa kod vremena ubrizgavanja za motor paljen pomoću svjeće [Modeling and Operational Testing of Pulse-Width Modulation at Injection Time for a Spark-Ignition Engine]. *Tehnicky Vjesnik* 20(1), 2013, pp. 147–153.
3. Martyashin A.I., Shakhov E.K., Shlyandin V.M. *Преобразователи электрических параметров для систем контроля и измерения* [Converters of Electrical Parameters for Systems of Control and Measurement]. Moscow, 1967. 390 p.
4. Kobzev A.V. *Многозонная импульсная модуляция. Теория и применение в системах преобразования параметров электрической энергии* [Multi-Zone Pulse Modulation. Theory and Application in Systems of Conversion of Electric Energy Parameters]. Novosibirsk, 1979. 304 p.
5. Usynin Yu.S., Grigorev M.A., Shishkov A.N. [The Losses in the Regulated Electric Drives with Different Control Laws]. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2010, iss. 13, no. 14 (190), pp. 47–51. (in Russ.)
6. Brylina O.G. [Static and Dynamic Spectral Characteristics of Multi-zone Integrate Converter with Frequency-width-pulse Modulation]. *Bulletin of the South Ural State University. Series Power Engineering*, 2013, vol. 13, no. 1, pp. 70–79. (in Russ.)
7. Tsytoich L.I., Brylina O.G., Dudkin M.M., Rakhmatulin R.M., Tyugaev A.V. Analog-Digital Converter with Integrating in-Phase Amplitude-Frequency-Pulse Modulation for Switched Drive Systems. *Russian Electrical Engineering*, 2013, no. 84 (5), pp. 244–249.
8. Tsytoich L.I., Brylina O.G., Dudkin M.M., Rakhmatulin R.M. Adaptive Interval-Code Integrating Synchronization of Control Systems for Power Converters. *Russian Electrical Engineering*, 2013, no. 84 (3), pp. 122–128.
9. Senko V.I., Lebedenko S.A., Kalichenko A.P., Fan Kuok Zung, Fan Huang Vin. Noviy algoritm shirotno-impulsnoy modulyatsii vikhodnogo napryazhenie trekhfaznogo avtonomnogo invertora s neytralnoy tochko [New Algorithm of Pulse-Width-Modulation of Output Voltage of Three-Phase Autonomous Inverter with Neutral Point]. *Technical Electrodynamics*, 1994, no.1, pp. 13–18.
10. GOST 13109-97. *Elektricheskaya energiya. Elektromagnitnaya sovmestimost'. Normy kachestva elektricheskoy energii v sistemakh elektrosnabzheniya obshchego naznacheniya* [State Standard 13109-97. Electrical Energy. Electro Magnetic Compatibility. Quality Standards of Electric Energy in the Supply Systems of General Purpose]. Moscow, Gosstandart Publ., 1998. (in Russ.)
11. German-Galkin S.G. *Matlab & Simulink. Proektirovanie mekhanotronnykh system na PK* [Matlab & Simulink. Design of Mechatronic Systems on PC]. St. Petersburg, KORONA-Vek. Publ., 2008. 368 p.
12. Teplyuka I.N. (ed.), Khyulsman L.P. *Aktivnye filtry* [Active Filters]. Moscow, Mir Publ., 1972. 516 p.
13. Bissell C. Vladimir Aleksandrovich Kotelnikov: Pioneer of the Sampling Theorem, Cryptography, Optimal Detection, Planetary Mapping. History of Communications. *Communications Magazine, IEEE*, 2009, no. 10, pp. 24–32.

Received 6 October 2013