

Устройства аналоговой и цифровой электроники

УДК 62 – 83:681.51(075.8)

СТАТИЧЕСКИЕ И ДИНАМИЧЕСКИЕ СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МНОГОЗОННОГО ИНТЕГРИРУЮЩЕГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ С ЧАСТОТНО-ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ*

О.Г. Брылина

Статья посвящена анализу статических и динамических спектральных характеристик интегрирующего преобразователя с многозонной частотно-широотно-импульсной модуляцией.

Дается понятие статического и динамического спектра выходного сигнала многозонного преобразователя, приведена его структурная схема и временные диаграммы сигналов, а также основные расчетные соотношения. Анализ спектральных характеристик проводился в среде MatLab+Simulink при воздействии на вход многозонного преобразователя постоянного и гармонического входного сигнала с переменной амплитудой и частотой, изменяющейся в широком диапазоне. Характеристики представлены в виде пространств статического и динамического спектрального состояния многозонного преобразователя, показаны графики его переходных процессов.

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

Ключевые слова: многозонный развертывающий преобразователь, частотно-широотно-импульсная модуляция, статические и динамические спектральные характеристики, интегратор, релейный элемент, модуляционная зона.

Методика спектрального анализа

Спектральные характеристики любой импульсной системы, в том числе и многозонного интегрирующего развертывающего преобразователя (МРП), например, с частотно-широотно-импульсной модуляцией (ЧШИМ) [1 – 7] (рис. 1 а) складываются из следующих составляющих.

При наличии постоянного входного воздействия $X_{ВХ}$ (рис. 1, б) спектр выходных импульсов МРП (рис. 1, в) содержит первую гармонику $F_{Г(1)}(X_{ВХ})$, зависящую от уровня $X_{ВХ}$, и высшие гармоники $F_{Г(i)}(X_{ВХ})$, определяемые геометрией выходных импульсов МРП и законом модуляции. Зона $\Delta_0(X)$ между $F_{Г(1)}(X_{ВХ})$ и самой низкочастотной составляющей из серии $F_{Г(i)}(X_{ВХ})$ будет зависеть от начальной частоты собственных несущих колебаний f_0 МРП при $X_{ВХ} = 0$ и изменяться по мере роста амплитуды входного сигнала $X_{ВХ}$. В дальнейшем данный тип характеристик, когда речь идет о преобразовании постоянного или инфранизкочастотного сигнала управления, будем называть *статическими спектральными характеристиками*.

При наличии динамической, например, гармонической, составляющей $X_{\sim}(t)$ (рис. 1, г) работа МРП будет подчиняться известной теореме В.А. Котельникова [8], называемой в ряде зарубежных изданий «теоремой отсчетов» [9], суть которой заключается в том, что достоверное преобразование импульсной системой сигнала $X_{\sim}(t)$ возможно только при условии, когда его частота F_{\sim} не будет превышать $0,5f_0$ (область достоверной передачи частот ОДП). В этом случае в спектре выходных импульсов ИС появляется составляющая $F_{Г(2)}[X_{\sim}(t)]$ (рис. 1, д).

Если $F_{\sim} > 0,5f_0$, то МРП становится преобразователем спектра входного воздействия, переходя в режим замедленной дискретизации сигнала $X_{\sim}(t)$, при котором отсчеты $m[T_i]$ (рис. 1, ж) берутся системой медленнее, чем это необходимо для достоверного восстановления из потока выходных импульсов динамического сигнала $X_{\sim}(t)$ (область частот замедленной дискретизации ОЗД). В итоге на выходе МРП формируется низкочастотный сигнал $Y_{ВЫХ}(t)$ (рис. 1, ж). Весь комплекс составляющих $F_{З_i}[X_{\sim}(t)]$ спектра замедленной

* Госзадание Регистрационный номер: 7.3552.2011 23.35.2011 Исследование и создание новых ресурсо-энергосберегающих электродвигателей и силовых вентиляльных преобразователей для промышленных технологических комплексов, объектов ЖКХ и сельского хозяйства.

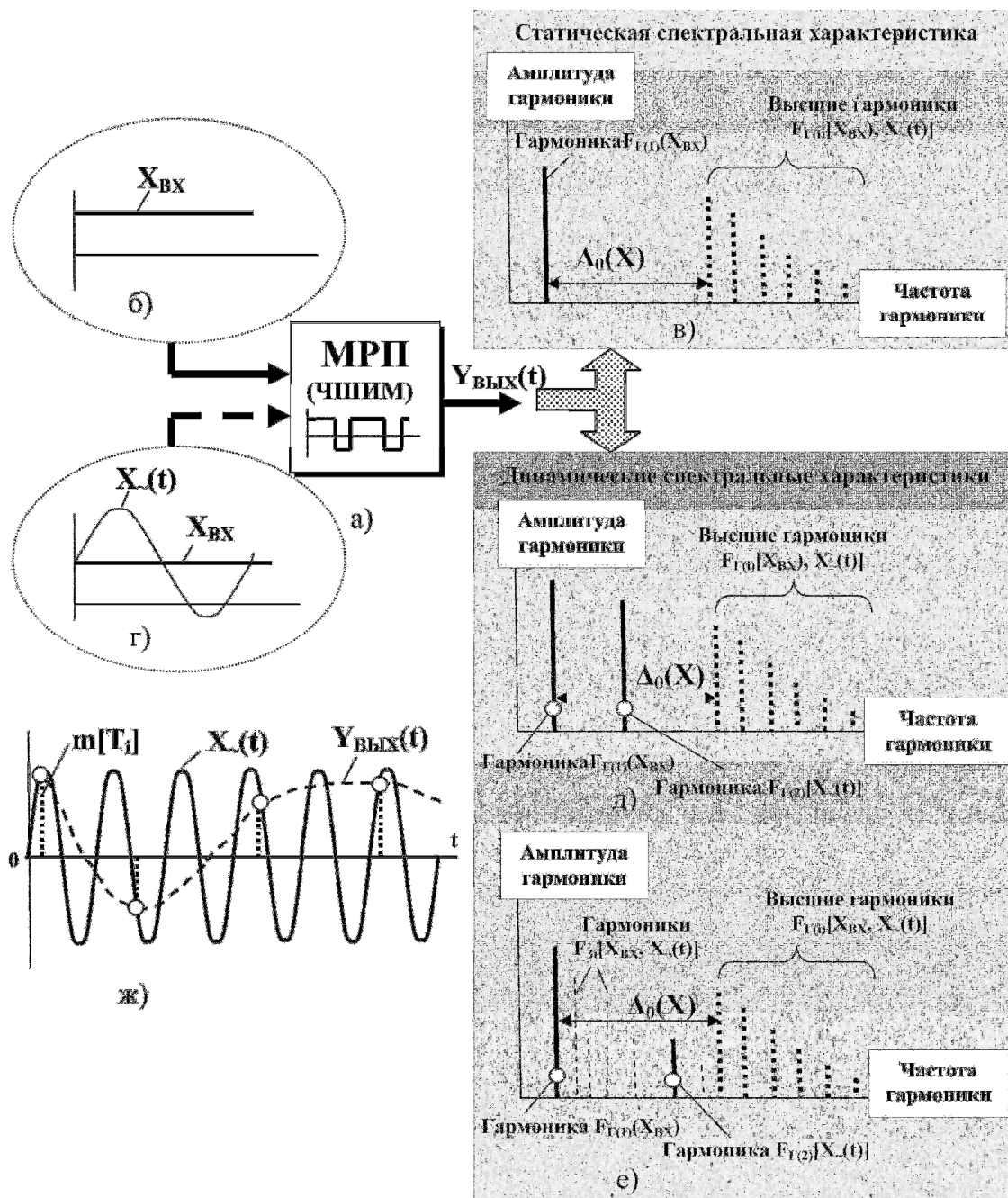


Рис. 1. Диаграммы сигналов «Вход – выход» (б, г, ж) МРП (а) и обобщенный вид его статической (в) и динамической (д, е) спектральных характеристик

дискретизации (рис. 1, е) находится в области Δ_0 и по частоте, как правило, меньше $F_{\Gamma(2)}[X_{\text{м}}(t)]$. Кроме того, составляющая $F_{\Gamma(2)}[X_{\text{м}}(t)]$ в ряде случаев полностью подавляется сигналом замедленной дискретизации.

Спектральные характеристики при наличии составляющей $X_{\text{м}}(t)$, изменяющейся в широком частотном диапазоне, превосходящем в том числе и частоту несущих колебаний МРП, в дальнейшем будем называть *динамическими спектральными характеристиками*.

Основную опасность для систем регулирования технологическими объектами на практике представляют низкочастотные составляющие $F_{\Gamma(2)}[X_{\text{м}}(t)]$, примыкающие к $F_{\Gamma(1)}(X_{\text{ВХ}})$, так как они не различимы на фоне полезного сигнала управления и, следовательно, не поддаются фильтрации. Поэтому представляет интерес анализ спектральных характеристик МРП с позиций оценки свойств частотно-широотно-импульсной модуляции в области частот замедленной дискретизации входных динамических воздействий.

Структурная схема и принцип действия МРП

Структурная схема МРП (рис. 2, а) содержит сумматоры $\Sigma 1$ и $\Sigma 2$, интегратор И с передаточной

характеристикой вида $W(p) = \frac{1}{T_{И}p}$, где $T_{И}$ – постоянная времени интегрирования и релейные элементы РЭ1 – РЭ3 с симметричными относительно «нуля» порогами переключения, удовлетворяющими условию $|\pm b_1| < |\pm b_2| < |\pm b_3|$. Здесь индекс при «b» соответствует порядковому номеру РЭ. Амплитуда выходных импульсов каждого из РЭ_i меняется в пределах $\pm A/n$ (рис. 2, а, г), где $n \geq 3, 5, 7, \dots$ – нечетное число релейных элементов в МРП. Максимальный выходной сигнал МРП составляет $\pm A$ (рис. 2, в). В режиме автоколебаний всегда находится РЭ с минимальным значением порогов переключения, т. е. в данном случае РЭ1. Остальные РЭ работают в статическом состоянии $+A/n$ или $-A/n$. По мере увеличения входного сигнала МРП последовательно переходит из младшей $\pm A/n$ в более старшую модуляционную зону. При этом выходные импульсы $Y_{ВЫХ}(t)$ МРП складываются из импульсного потока текущей модуляционной зоны и постоянной составляющей предшествующих модуляционных зон (рис. 2, в).

В дальнейшем при исследовании статического спектра МРП анализировался непосредственно выходной сигнал $Y_{ВЫХ}(t) = f(X_{ВХ})$ [8 – 13]. Анализ динамического спектра МРП проводился при условии, что момент времени выделения средней составляющей $Y_0 = f[X_{ВХ} + X_{\cdot}(t)]$

(рис. 2, б) импульсов $Y_{ВЫХ}(t)$ соответствует окончанию текущего интервала дискретизации T_0 (рис. 2, в), имеющего составляющие (рис. 2, в)

$$t_1 = \frac{2\bar{b}_1 T_{И}}{(2Z_i - 1)n^{-1} - \bar{X}_{ВХ}},$$

$$t_2 = \frac{2\bar{b}_1 T_{И}}{\bar{X}_{ВХ} - (2Z_i - 3)n^{-1}},$$

и осуществляется с помощью цифрового фильтра ЦФ (рис. 2, а), реализующего алгоритм вида

$$Y_0 = (-1)A[(2Z_i - 3) + 2\gamma]n^{-1} = -\bar{X}_{ВХ}. \quad (1)$$

Здесь $\bar{X}_{ВХ} = |X_{ВХ} / A|$ – нормированное значение постоянной составляющей входного сигнала МРП; $\bar{b}_1 = |b_1 / A|$ – нормированное значение порога переключения РЭ1; $Z_i = 1, 2, 3, \dots$ – порядковый номер модуляционной зоны, где $i = 1, 2, 3, \dots$ – целое число, причем общее количество «k» модуляционных зон в МРП равно $k = (2n-1)/2$; $\gamma = t_1 / (t_1 + t_2)$ – скважность выходных импульсов МРП (рис. 2, в).

Применение ЦФ позволяет исключить из результирующих спектральных характеристик составляющие, обусловленные непосредственно импульсной формой сигнала $Y_{ВЫХ}(t)$, и сосредоточиться на гармониках, порождаемых только эффектом замедленной дискретизации сигнала $X_{\cdot}(t)$.

При анализе считалось, что коэффициент передачи МРП и ЦФ равен единице, а число релейных элементов соответствует минимальной величине $n = 3$, что, с одной стороны, упрощает вычислительную часть исследований, а с другой – не

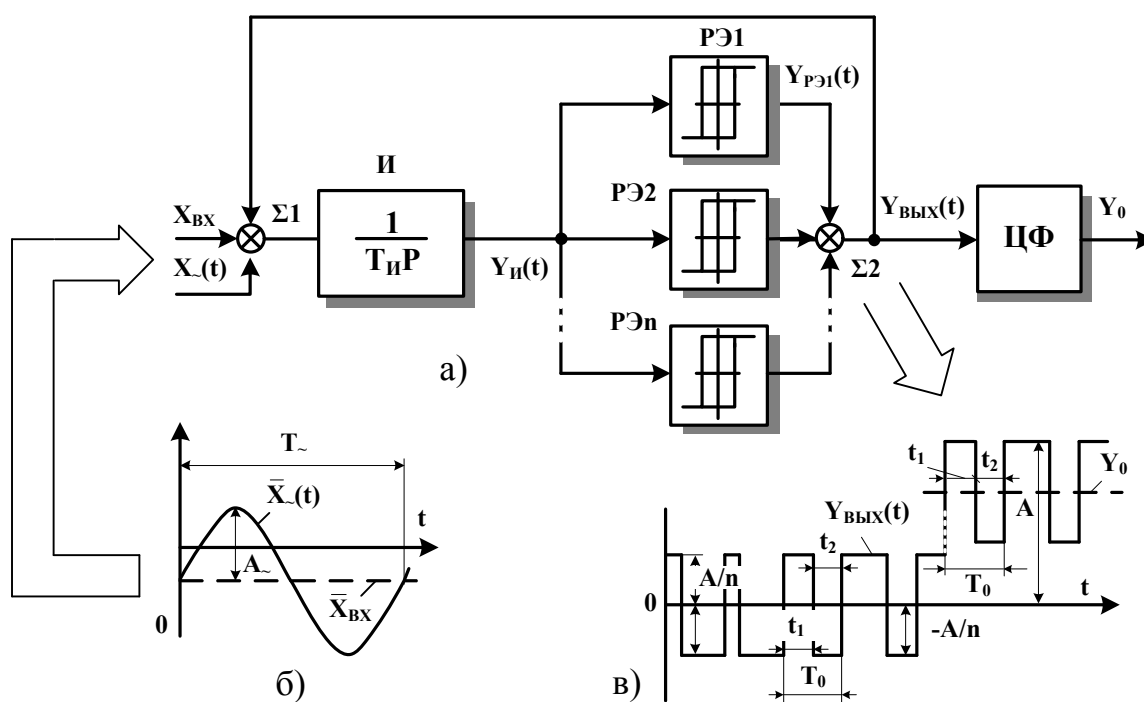


Рис. 2. Структурная схема (а), временные диаграммы сигналов (б, г) многозонного интегрирующего разветвляющего преобразователя

влияет на общие закономерности поведения МРП при работе с динамическим воздействием.

Далее в тексте и на рисунках, кроме ранее принятых, введены следующие обозначения:

$\bar{Y}_0 = |Y_0/A|$ – нормированное среднее значение импульсов на выходе ЦФ;

$f_{0|\bar{X}_{ВХ}=0} = T_{0|\bar{X}_{ВХ}=0}^{-1}$ – частота выходных импульсов МРП при нулевом значении сигнала на информационном входе;

$\bar{f}_0 = |f_0/f_{0|\bar{X}_{ВХ}=0}|$ – нормированная частота $f_0 = T_0^{-1}$ выходных импульсов МРП;

$\bar{A}_{\Gamma(i)} = |A_{\Gamma(i)}/A|$ – нормированная амплитуда $A_{\Gamma(i)}$ i -й гармоники выходного сигнала МРП при наличии и отсутствии ЦФ;

$\bar{F}_{\Gamma(i)} = |f_{\Gamma(i)}/f_{0|\bar{X}_{ВХ}=0}|$ – нормированные значения частоты $f_{\Gamma(i)}$ i -й гармоники выходного сигнала МРП соответственно;

$i = 1, 2, 3, \dots$ – целое число;

$\bar{A}_\sim = |A_\sim/A|$, $\bar{F} = |f_\sim/f_{0|\bar{X}_{ВХ}=0}|$ – нормированное значение амплитуды A_\sim и частоты f_\sim гармонического входного сигнала $X_\sim(t)$ соответственно.

Статические спектральные характеристики

Пространство спектрального состояния $\bar{A}_{\Gamma(i)} = f(\bar{F}_{\Gamma(i)}, \bar{f}_0)$ выходного сигнала МРП без учета цифрового фильтра ЦФ, его проекция на плоскость переменных $(\bar{F}_{\Gamma(i)}, \bar{f}_0)$ и модуляционная характеристика МРП $\bar{f}_0 = f(\bar{X}_{ВХ})$ при изменении сигнала управления $\bar{X}_{ВХ}$ в пределах первой модуляционной зоны показаны на рис. 3, а, б, в соответственно.

Проведенный анализ показал, что в любой модуляционной зоне характер спектра выходного сигнала МРП идентичен первой модуляционной зоне. Исключение составляет только амплитуда

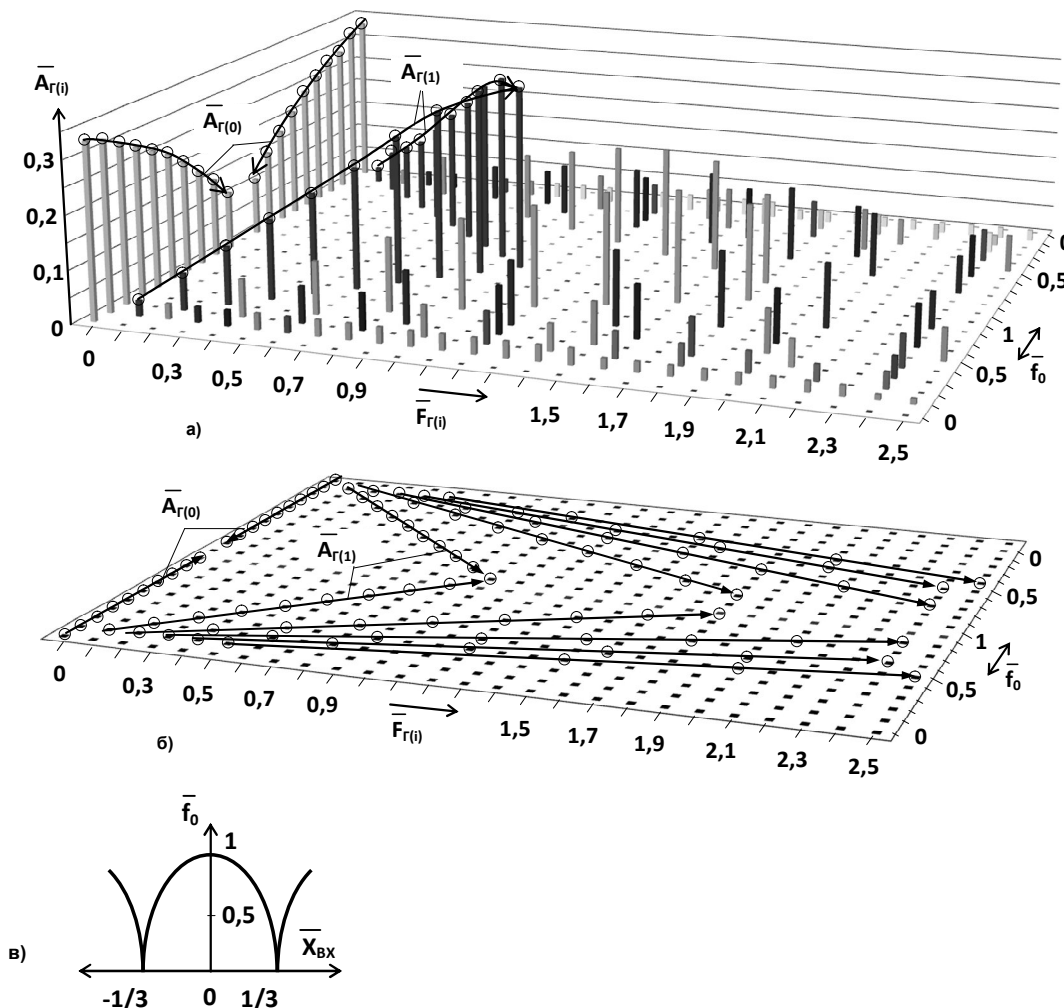


Рис. 3. Пространство спектрального состояния МРП $\bar{A}_{\Gamma(i)} = f(\bar{F}_{\Gamma(i)}, \bar{f}_0)$ (а), его проекция на плоскость переменных $(\bar{F}_{\Gamma(i)}, \bar{f}_0)$ (б) и модуляционная характеристика $\bar{f}_0 = f(\bar{X}_{ВХ})$ (в) для первой модуляционной зоны ($-1/3 < \bar{X}_{ВХ} < 1/3$)

нулевой гармоники, которая увеличивается пропорционально величине $\bar{X}_{ВХ}$.

При этом:

1. Уровень и частотный спектр гармоник выходного сигнала МРП зависит от постоянной составляющей на информационном входе $\bar{X}_{ВХ}$ (рис. 2, а, б), под действием которой меняется частота \bar{f}_0 автоколебаний МРП (рис. 2, в). С ростом $\bar{X}_{ВХ}$ и соответствующим снижением частоты \bar{f}_0 (рис. 3, в) происходит пропорциональное увеличение амплитуды нулевой гармоники $\bar{A}_{Г(0)}$ (рис. 3, а) и одновременное уменьшение первой гармоники $\bar{A}_{Г(1)}$ (рис. 3, а). Огибающая по максимумам гармоник $\bar{A}_{Г(0)}$ и $\bar{A}_{Г(1)}$ описывает часть ветви параболы в соответствии с модуляционной характеристикой МРП (рис. 3, б);

2. Максимальная амплитуда первой гармоники $\bar{A}_{Г(1)}$ соответствует «середине» каждой модуляционной зоны (рис. 3, а), где скважность импульсов равна $\gamma = 0,5$, при которой нормированная частота автоколебаний МРП имеет максимальное значение $\bar{f}_0 = 1$ (рис. 3, б). Здесь спектральный состав выходного сигнала МРП, как известно [14, 15], содержит все нечетные гармоники, монотонно убывающие по амплитуде:

$$\bar{A}_Г = \frac{4A}{\pi n} (\sin(\omega t) + \frac{1}{3} \cdot \sin(3\omega t) + \frac{1}{5} \cdot \sin(5\omega t) + \dots + \frac{1}{n} \cdot \sin(n\omega t)). \quad (2)$$

Здесь: $\omega = 2\pi\bar{f}_0$ – угловая частота сигнала на выходе МРП.

3. Для МРП с произвольным числом релейных элементов (n) частота на выходе определяется в соответствии с выражением (3):

$$\bar{f}_0 = (2Z_i - 1 - n\bar{X}_{ВХ}) (n\bar{X}_{ВХ} - 2Z_i + 3). \quad (3)$$

В частности, при $n = 3$ ($Z_i = 1, -1/3 < X_{ВХ} < 1/3$) частота на выходе МРП равна $\bar{f}_0 = 1 - 9\bar{X}_{ВХ}^2$.

Поэтому характерной особенностью МРП является уменьшение с ростом $\bar{X}_{ВХ}$ по параболическому закону частоты выходных импульсов \bar{f}_0 (рис. 3, в), в результате чего весь частотный спектр гармоник смещается вправо по оси $\bar{F}_{Г(i)}$. С точки зрения силовых преобразователей, ЧШИМ уступает ШИМ [15–17] по причине роста массогабаритных показателей сглаживающего фильтра [8, 18, 19], применяемого для подавления высших гармоник в выходном сигнале вентиля преобразователя. Однако ЧШИМ способствует уменьшению коммутационных потерь в силовых ключах в

среднем на 20–40 % по сравнению с широтно-импульсной модуляцией [3, 20, 21].

Динамические спектральные характеристики

Динамические спектральные характеристики $\bar{A}_{Г(i)} = f(\bar{F}, \bar{F}_{Г(i)}, \bar{A}_\sim = 0,1)$ (рис. 4), определяемые при наличии ЦФ (рис. 2, а) для первой и второй модуляционной зоны МРП при условии $\bar{X}_{ВХ} = 0$ (рис. 4, а), $\bar{X}_{ВХ} = 0,8$ (рис. 4, в) и $\bar{A}_\sim = 0,1$, показали, что характер распределения гармоник по плоскости $(\bar{F}, \bar{F}_{Г(i)})$ и их уровень не зависят от порядка модуляционной зоны, а отличаются лишь уровнем нулевой гармоники, пропорциональной $\bar{X}_{ВХ} = 0$.

Характеристики $\bar{A}_{Г(i)} = f(\bar{F}, \bar{F}_{Г(i)}, \bar{A}_\sim = 0,1)$ позволяют следующие выводы.

1. Из проекции фрагмента $\bar{A}_{Г(i)} = f(\bar{F}, \bar{F}_{Г(i)}, \bar{A}_\sim = 0,1)$ на плоскость $(\bar{F}, \bar{F}_{Г(i)})$ (рис. 4 б) видно, что наибольший уровень гармоник при воздействии сигнала $X_\sim(t)$ проявляется на двух частотах, назовем их условно $\bar{F}_{Г(i)}$ и $\bar{F}_{Г(j)}$:

$$\begin{aligned} \bar{F}_{Г(i)} &= \bar{F} - p(2Z_i - 1 - n\bar{X}_{ВХ}) \times \\ &\times (n\bar{X}_{ВХ} - 2Z_i + 3) = \bar{F} - p\bar{f}_0; \quad (4) \\ \bar{F}_{Г(j)} &= (p+1)\bar{f}_0 - \bar{F}, \quad (5) \end{aligned}$$

где \bar{f}_0 – нормированная частота в соответствии с выражением (3); $p = 0, 1, 2, \dots$ – целое число, причем

$$\begin{cases} p = 0, \text{ если } \bar{F} < \bar{f}_0; \\ p = 1, \text{ если } \bar{f}_0 < \bar{F} < 2\bar{f}_0; \\ \vdots \\ p = r, \text{ если } r\bar{f}_0 < \bar{F} < (r+1)\bar{f}_0. \end{cases} \quad (6)$$

В частности, если частота гармонического сигнала $X_\sim(t)$ равна $F = 1150$ Гц, а частота на выходе МРП равна $f_0 = 1000$ Гц, то с учетом выражения (6) $p = 1$, так как $\bar{f}_0 < \bar{F} < 2\bar{f}_0$ и наибольший уровень гармоник выходного сигнала МРП будет при частотах 150 Гц и 850 Гц (см. проекцию спектра $\bar{A}_{Г(i)} = f(\bar{F}, \bar{F}_{Г(i)}, \bar{X}_{ВХ} = 0)$ на плоскость переменных $(\bar{F}, \bar{F}_{Г(i,j)})$ на рис. 4, б).

2. Из графиков переходных процессов (рис. 5) видно, что в ОДП ($\bar{F} \leq 0,5$) на выходе ЦФ формируется ступенчатый сигнал с достаточной степенью точности повторяющий входное гармоническое воздействие $X_\sim(t)$ (рис. 5, а; $\bar{F} = 0,05$).

3. Область частот $0,2 < \bar{F} < 0,5$ соответствует работе МРП в режиме паразитной амплитудной модуляции, возникающей вследствие

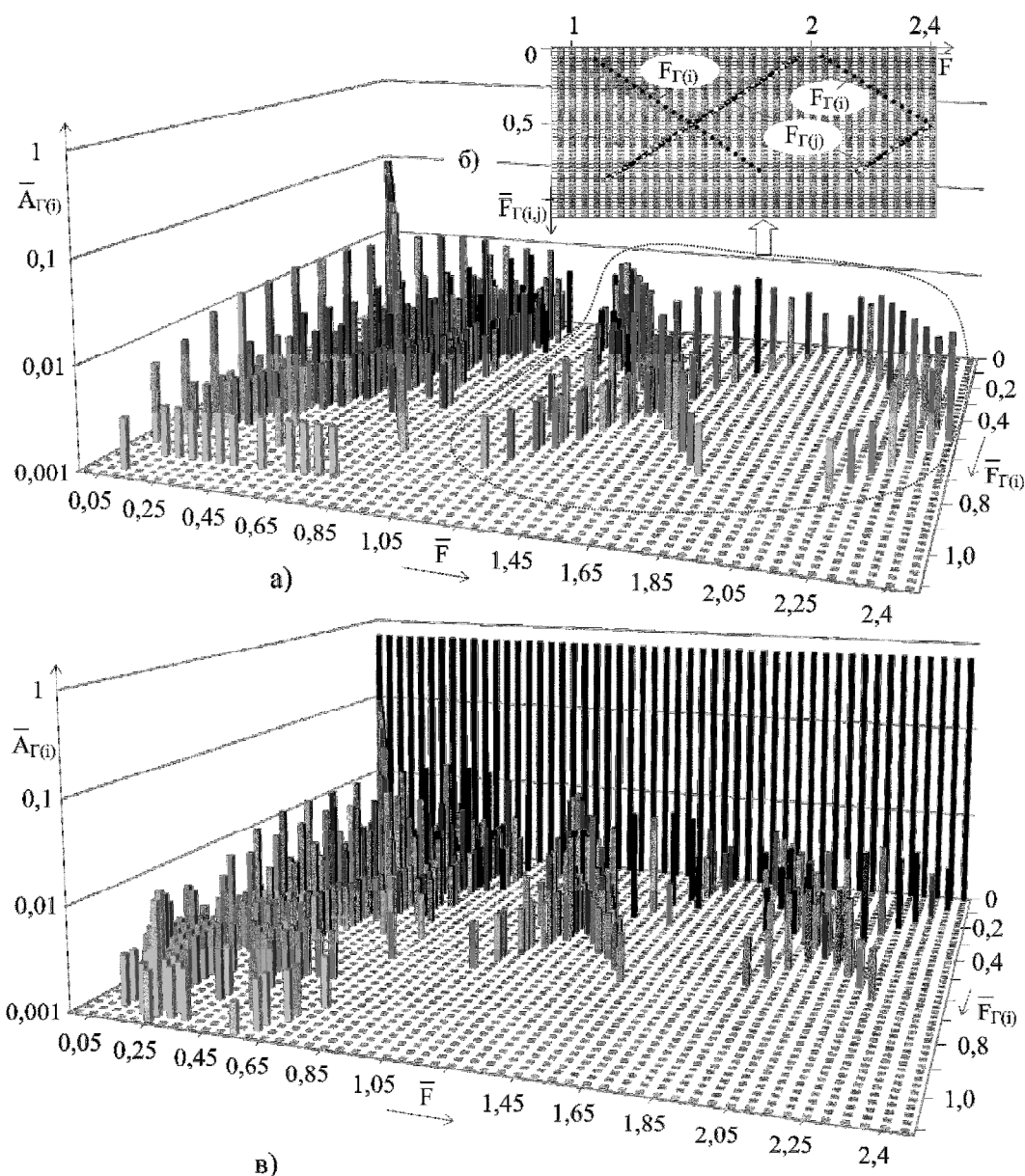


Рис. 4. Пространство динамического спектрального состояния МРП $\bar{A}_{Г(t)} = f(\bar{F}, \bar{F}_{Г(t,i)}, \bar{A}_- = 0,1)$ при $\bar{X}_{вх} = 0$ (а), $\bar{X}_{вх} = 0,8$ (в) и проекция его фрагмента на плоскость переменных $(\bar{F}, \bar{F}_{Г(t,i)})$ (б)

«набега» фазы несущих автоколебаний по отношению к динамической составляющей $X_-(t)$. Так, при $\bar{F} = 0,45$ (рис. 5, б) частота сигнала $Y_0[m]$ соответствует частоте сигнала $X_-(t)$, но при этом координата $Y_0[m]$ модулирована по амплитуде более низкочастотным, чем $X_-(t)$ воздействием.

4. В ОЗД (при $\bar{F} > 0,5$) (рис. 5, в) наблюдается значительное снижение уровня дискретных значений $Y_0[m]$, что обусловлено явлением втягивания в синхронизм с внешним воздействием частоты собственных автоколебаний МРП [22]. В

этом случае интервал дискретизации T_0 импульсов $Y_{ВЫХ}(t)$ изменяется таким образом, что на нем в зависимости от частоты входного гармонического воздействия всегда укладывается целое число периодов сигнала $\bar{X}_-(t)$, имеющих среднее нулевое значение. Как следствие, амплитуда гармоник $\bar{A}_{Г(t)}$ в ОЗД значительно уменьшается по сравнению с ОДП (рис. 5, а). Это говорит о высокой помехоустойчивости МРП и о целесообразности его применения в системах управления ВП с высоким уровнем помех в каналах передачи информации [23–26].

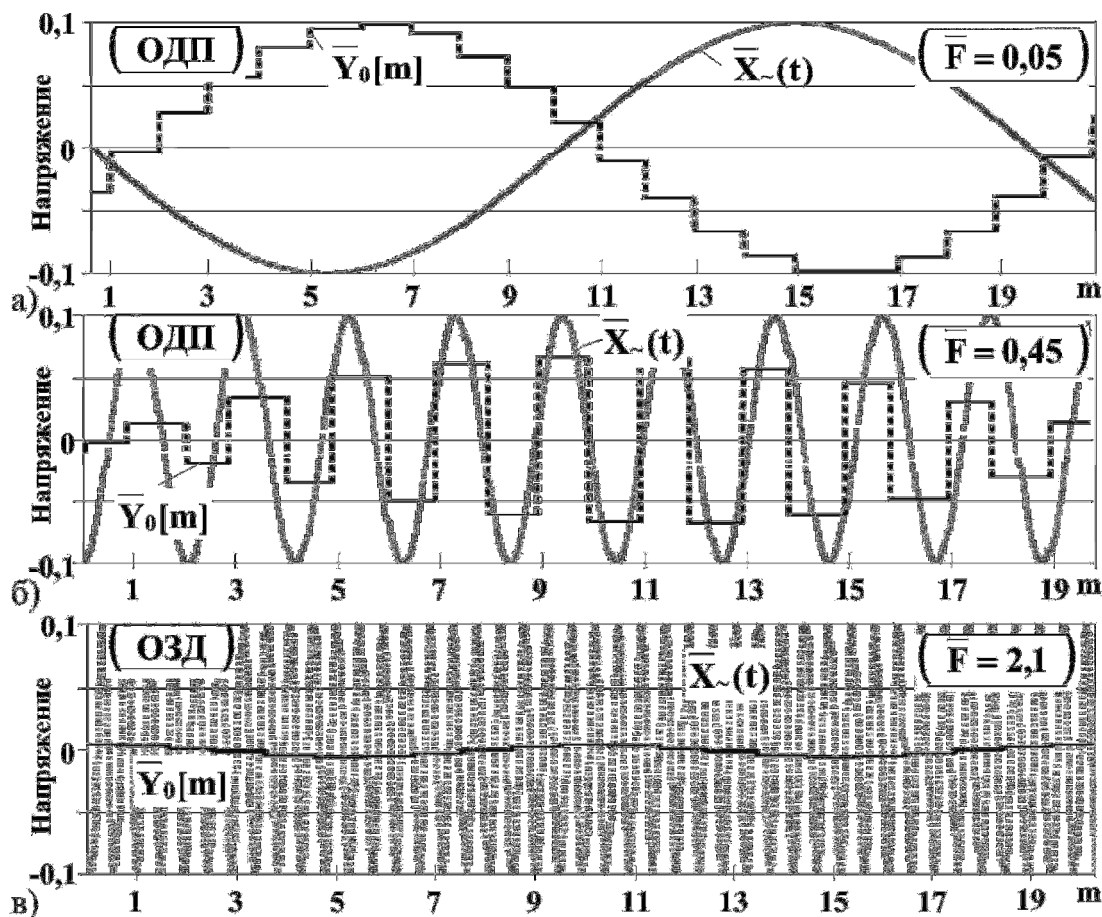


Рис. 5. Графики переходных процессов МРП с ЦФ на выходе при $\bar{X}_{вх} = 0$

5. Из характеристик $\bar{A}_{Г(i)} = F(\bar{F}_{Г(i)}, \bar{F}, \bar{A}_{\sim} = 0,1)$ видно, что в области частот $0,9 \leq \bar{F} \leq 1,1$ наблюдается эффект «автоподстройки» частоты автоколебаний МРП под частоту динамического входного воздействия $\bar{X}_{\sim}(t)$ (см. рис. 4, а, б), когда амплитудный уровень гармоник $\bar{A}_{Г(i)}$ во всем частотном диапазоне $\bar{F}_{Г(i)}$, за исключением первой гармоники $\bar{A}_{Г(1)}$, равен нулю (рис. 4, а, в).

Литература

1. 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.
2. Брылина, О.Г. Спектральные характеристики двухтактных однозонных и многозонных развертывающих преобразователей / О.Г. Брылина // Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 3: Тула: Изд-во ТулГУ, 2010. – Ч. 2. – С. 69–75.
3. Брылина, О.Г. Спектральные характеристики многозонного частотно-широкоимпульсного регулятора переменного напряжения / О.Г. Брылина, Л.И. Цытович, А.В. Тюгаев // Труды 15 международной науч.-техн. конф. «Элек-

троприводы переменного тока». – Екатеринбург, 2012. – С. 93–96.

4. The integrating AC regulator with interval-code synchronization for thermoregulating systems / L.I. Tsytoich, R.M. Rakhmatulin, M.M. Dudkin et al. // Science, Technology and Higher Education: materials of the international research and practice conference, Vol. II, Westwood, December 11th–12th, 2012. – Westwood – Canada: Publishing office Accent Graphics communications, 2012. – P. 559–566.

5. Пат. 2346376 Российская Федерация, МПК Н 02 К 19/24. Синхронная реактивная машина / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, К.М. Виноградов, А.Н. Горожанкин, С.А. Чупин. – № 2007126685. – Заявл. 12.07.07; опубл. 10.02.09, Бюл. № 4.

6. Электропривод с синхронным реактивным двигателем независимого возбуждения / Ю.С. Усынин, Н.Д. Монюшко, Г.В. Караваяев, М.А. Григорьев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2001. – Вып. 1. – № 4(4). – С. 70–76.

7. 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.

8. Хьюлсман, Л.П. Активные фильтры / Л.П. Хьюлсман; пер. с англ. под ред. И.Н. Теплоука. – М.: Мир, 1972. – 516 с.
9. 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.
10. Герман-Галкин, С.Г. Matlab & Simulink. Проектирование механотронных систем на ПК/ С.Г. Герман-Галкин. – СПб.: КОРОНА-Век, 2008. – 368 с.
11. Совместное применение физического и виртуального моделирования при изучении устройств преобразовательной техники / М.В. Гельман, Р.З. Хусаинов, О.Г. Терещина, М.М. Дудкин // Электромеханика. Известия вузов. – Новочеркасск, 2007. – Вып. 5. – С. 62–65.
12. Брылина, О.Г. Регуляторы переменного напряжения с частотно-широотно-импульсной модуляцией / О.Г. Брылина // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2012. – Вып. 17. – № 16. – С. 26–30.
13. Брылина, О.Г. Имитационное моделирование однозонного частотно-широотно-импульсного регулятора переменного напряжения / О.Г. Брылина // Народное хозяйство. Вопросы инновационного развития. – М.: Изд-во МИИ «Наука», 2013. – Т. 1. – С. 126–129.
14. Бронштейн, И.Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов: учеб. пособие / И.Н. Бронштейн, К.А. Семендяев. – СПб.: Лань, 2009. – 608 с.
15. Modeliranje i operativno testiranje modulacije širine impulsa kod vremena ubrizgavanja za motor paljen pomoću svjećice [Modelling and operational testing of pulse-width modulation at injection time for a spark-ignition engine] / I. Hiticas, D. Marin, L. Mihon // Tehnicki Vjesnik. – 2013. – 20 (1). – P. 147–153.
16. Anishev, E.Yu. Specific features of the application of the frequency converters in power electric drives of circulation pumps / E.Yu. Anishev, G.B. Lazarev // Russian Electrical Engineering. – 2007. – Vol. 78. – № 10. – P. 560–564.
17. Удельные показатели электропривода с синхронным реактивным двигателем независимого возбуждения / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, К.М. Виноградов, А.Н. Горожанкин // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2008. – Вып. 9. – № 11(111). – С. 52–53.
18. Цытович, Л.И. Дискретно перестраиваемый в функции электрического сигнала фильтр на основе многозонного интегрирующего развертывающего преобразователя / Л.И. Цытович, О.Г. Терещина // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2005. – Вып. 6. – № 9. – С. 114–116.
19. Asadi, M. Hybrydowy filtr mocy z elektromagnetycznym filtrem aktywnym [A hybrid active power filter comprising an active electromagnetic filter] / M. Asadi, A.R. Jalilian // Przegląd Elektrotechniczny. – 2012. – 88 (10 A). – P. 205–212.
20. Динамические спектральные характеристики развертывающих преобразователей с широтно-импульсной модуляцией / М.М. Дудкин, Л.И. Цытович, О.Г. Брылина // Практическая силовая электроника. – 2012. – № 4 (48). – С. 49–55.
21. Jiang, M.-C. A single-phase soft-switching unipolar PWM rectifier / M.-C. Jiang, H.-K. Fu, K.-Y. Lu // Applied Mechanics and Materials. – 2013. – 284–287. – P. 2439–2444.
22. Терещина, О.Г. Анализ динамических характеристик многозонного интегрирующего развертывающего преобразователя с частотно-нулевым сопряжением модуляционных зон / О.Г. Терещина // Электротехнические системы и комплексы: межвуз. сб. науч. тр. / под ред. С.И. Лукьянова. – Магнитогорск: МГТУ им. Т.И.Носова, 2006. – Вып. 13. – С. 146–155.
23. Реверсивный тиристорный преобразователь для систем управления с питанием от сети с нестандартными параметрами / Л.И. Цытович, Р.М. Рахматулин, М.М. Дудкин, А.В. Качалов // Практическая силовая электроника. – 2009. – № 2 (34). – С. 35–41.
24. Fan, J. Substrate switching noise analysis and layout/circuit considerations in monolithic power converters / J. Fan, T. Harrison // IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, ECCE 2012. – P. 2610–2615.
25. Brylina, O. Electric drive of centrifugal mechanisms with parallel channels of regulation on the basis of multizone sweep converter / O. Brylina, L. Tsytoovich // Materiały IX Międzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji «Strategiczne pytania światowej nauki – 2013». Vol. 30. Techniczne nauki. Budownictwo i architektura. – Przemysł, 2013. – P. 55–58.
26. Semiconductor converters for connection between autonomous generator and industrial grid / E.I. Sokol, Y.P. Goncharov, A.V. Eresko et al. // Technical Electrodynamics. – 2012. – (3). – P. 67–68.

Брылина (Терещина) Олеся Геннадьевна, кандидат технических наук, доцент кафедры электропривода и автоматики промышленных установок, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, teolge@mail.ru.

Static and Dynamic Spectral Characteristics of Multi-zone Integrate Converter with Frequency-width-pulse Modulation

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

The analysis of static and dynamic spectral characteristics of the integrate converter with multi-zone frequency-width-pulse modulation is considered in this article.

The concept of static and dynamic spectral of the output signal of the multi-zone converter is given. The structure chart of the multi-zone converter, its time diagrams and main analytical expressions are reduced.

Researchers of the spectral characteristics are made with using a mathematical software MatLab + Simulink. The direct and harmonic signal with variable amplitude and frequency in a wide range are given on the input of the multi-zone converter. The simulation results are presented in the form of the spaces of a static and dynamic state of the multi-zone converter and graphs of transition process.

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, frequency-width-pulse modulation, static and dynamic spectral characteristics, integrator, relay element, modulation zone.

References

1. Martyashin A.I., Shakhov E.K., Shlyandin V.M., *Preobrazovately elektricheskikh parametrov dlya system kontrolya i izmereniya [Converters of Electrical Parameters for Systems of Control and Measurement]*, Moscow, 1967, 390 p.
2. Brylina O.G. Spectral Characteristics of the Two-Stroke One-Zone and Multi-Zone Sweeping Converters [Spektralnye kharakteristiki dvukhtaknykh odnozonnnykh i mnogozonnnykh razvertvyvayushchikh preobrazovately]. *Izvestiya TulGU. Technical sciences*, 2010, no. 3, part 2, pp. 69–75.
3. Brylina O.G., Tsytovich L.I., Tyugaev A.V. Spectral Characteristics of the Multi-Zone Frequency-Width-Pulse AC Voltage Regulator. *Proceeding of 15 International Scientific-Technical Conference «Alternating current electrical drives»*, Yekaterinburg, 2011, pp. 93–96.
4. Tsytovich L.I. Rakhmatulin R.M., Dudkin M.M., Brylina O.G., Tugaev A.V. The Integrating AC Regulator With Interval-Code Synchronization for Thermoregulating Systems. *Science, Technology and Higher Education: materials of the international research and practice conference*, Vol. II, Westwood, Canada, 2012, pp. 559–566.
5. Usynin U.S., Grigorev M.A., Vinogradov K.M., Gorozhankin A.N., Chupin S.A. Synchronous Reluctance Machine [Sinkhronnaya reaktivnaya mashina], patent 2346376, 2007.
6. Usynin U.S., Moniuszko N.D., Karavaev G.V., Grigorev M.A. The Electric Drive with the Field Regulated Reluctance Machine. *Bulletin of the South Ural State University. Series "Power Engineering"*, 2001, no. 4 (4), pp. 70–76.
7. 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 online, 22 March, 2013*.
8. Khyulsman L.P. *Aktivnye filtry [Active Filters]*, Translated from English by edited I.N. Teplyuka. Moscow, 1972, 516 p.
9. Bissell C. Vladimir Aleksandrovich Kotelnikov: Pioneer of the Sampling Theorem, Cryptography, Optimal Detection, Planetary Mapping... History of Communications. *Communications Magazine, IEEE*, 2009, № 10, pp. 24–32.
10. German-Galkin S.G. Matlab & Simulink. *Proektirovanie mekhanotronnykh system na PK [Matlab & Simulink. Design of Mechatronic Systems on PC]*. St. Petersburg, 2008. 368 p.
11. Gelman M.V., Khusainov R.Z., Tereshchina O.G., Dudkin M.M., Joint Application of Physical and Simulation While Studying Converter Devices. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanik.*, 2007, no 5, pp. 62–65.
12. Brylina O.G. AC Voltage Regulators with Frequency-Width-Pulse Modulation, *Bulletin of the South Ural State University. Series Power Engineering*, 2012, no.16, pp. 26–30.
13. Brylina O.G. Imitation Modeling of the One-Zone Frequency-Width-Pulse AC Voltage Regulator [Imitatsionnoe modelirovanie odnozonnogo chastotno-shirotno-impulsnogo regulatora peremennogo napryazheniya]. *Narodnoe khozaystvo. Voprosy innovatsionnogo razitiya*, 2013, part. 1, Moscow, pp. 126–129.

14. Bronshteyn I.N., Semendyaev K.A. *Spravochnik po matematike dlya inzhenerov i uchashchikhsya vtuzov [Handbook of Mathematics for Engineers and Students of Higher Technical]*. St. Petersburg, 2009. 608 p.
15. 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]. *Tehnicki Vjesnik* 20(1), 2013, pp. 147–153.
16. Anishev E.Yu., Lazarev G.B. Specific Features of the Application of the Frequency Converters in Power Electric Drives of Circulation Pumps, *Russian Electrical Engineering*. 2007, vol.78. no. 10. pp. 560–564.
17. Usynin U.S., Grigorev M.A., Vinogradov K.M., Gorozhankin A.N. Specific Indicators of the Electric Drive with The Field Regulated Reluctance Machine. *Bulletin of the South Ural State University. Series "Power Engineering"*, 2008, no. 11 (111), pp. 52–53.
18. Tsytovich L.I., Tereshchina O.G. Discretely Tunable in the Function of Electrical Signal Filter Based on Multi-Zone Integrating Sweeping Converter. *Bulletin of the South Ural State University. Series "Power Engineering"*, 2005, no. 9. pp. 114–116.
19. Asadi M., Jalilian A.R. Hybrydowy filtr mocy z elektromagnetycznym filtrem aktywnym [A Hybrid Active Power Filter Comprising an Active Electromagnetic Filter]. *Przegląd Elektrotechniczny*, 88 (10 A), 2012, pp. 205–212.
20. Dudkin M.M., Tsytovich, L.I., Brylina O.G. Dynamic Spectral Performances of Scanning Converters With Pulse-Width Modulation. *Practical Power Electronics*. 2012, no 4 (48). pp. 49–55.
21. Jiang M.-C. Fu H.-K., Lu K.-Y. A Single-Phase Soft-Switching Unipolar PWM Rectifier. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, pp. 2439–2444.
22. Tereshchina O.G. Analysis of Dynamic Characteristics of the Multi-Zone Integrating Sweeping Converter with a Frequency-Zero Conjugation of Modulation Zones [Analiz dinamicheskikh kharakteristik mnogozonnogo integriruyushchego razvertyvayushchego preobrazovatelya s chastotno-nulevym sopryazheniem modulyatsionnikh zon]. *Mezhvuzovskij sbornik nauchnyh trudov «Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы» [Interuniversity Collection of Scientific Papers "Electrical Systems and Complexes"]*, Magnitogorsk, MGTU, 2006. vol. 13. pp. 146–155.
23. Tsytovich L.I., Rakhmatulin R.M., Dudkin M.M., Kachalov A.V. Reversing Thyristor Converter for Control Systems Which Supply from Networks with Time-Varying Parameters. *Practical Power Electronics*. 2009, no. 2 (34). pp. 35–41.
24. Fan J., Harrison T. Substrate Switching Noise Analysis and Layout/Circuit Considerations in Monolithic Power Converters. *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, 2012, pp. 2610–2615.
25. Brylina O., Tsytovich L. Electric Drive of Centrifugal Mechanisms with Parallel Channels of Regulation on the Basis of Multizone Sweep Converter. *Materiały IX Międzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji «Strategiczne pytania światowej nauki - 2013»*, vol. 30. Techniczne nauki. Przemysł. 2013. pp. 55–58.
26. Sokol E.I., Goncharov Y.P., Eresko A.V., Zamaruev V.V., Ivakhno V.V., Krivosheev S.Y., Rodin N.Y., (...), Lobko A.V. Semiconductor Converters for Connection between Autonomous Generator and Industrial Grid. 2012. *Technical Electrodynamics* (3), pp. 67–68.

Поступила в редакцию 05.03.2013 г.