

УДК 621.314.5

## К АНАЛИЗУ АДДИТИВНОЙ ОШИБКИ МНОГОЗОННОГО РАЗВЕРТЫВАЮЩЕГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ С ЧАСТОТНО-ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ

*О.Г. Брылина*

Статья посвящена анализу аддитивной погрешности многозонного интегрирующего развертывающего преобразователя с частотно-широотно-импульсной модуляцией выходного сигнала. Анализируются погрешности, обусловленные входным током и ЭДС смещения «нуля» операционного усилителя интегратора. Приведены структурная схема, временные диаграммы сигналов МРП и аналитические выражения для расчета его амплитудной и модуляционной характеристик.

Ключевые слова: статическая погрешность, входной ток, ЭДС смещения «нуля», многозонный интегрирующий развертывающий преобразователь, частотно-широотно-импульсная модуляция, интегратор, релейный элемент.

### Введение

Многозонные интегрирующие развертывающие преобразователи (МРП) являются перспективным классом импульсных преобразователей [1], с помощью которых возможно комплексное решение задач в области повышения помехоустойчивости, временной и температурной стабильности характеристик, ремонтпригодности и автоматического резервирования каналов передачи информации, энергетических показателей силового электрооборудования автоматизированных электроприводов и систем технологической автоматики [2–5].

Одним из показателей качества многозонного развертывающего преобразования, характеризующим его метрологические показатели, является погрешность, вызванная аддитивными составляющими ошибки интегратора, среди которых основными являются временная и температурная нестабильность входного тока и ЭДС смещения «нуля» операционного усилителя [6, 7].

### Теоретическая часть

В состав МРП (рис. 1) входят сумматоры  $\Sigma 1$ ,  $\Sigma 2$ , интегратор И с передаточной характеристикой вида  $W(p) = \frac{1}{T_{и}p}$  (где  $T_{и}$  – постоянная времени интегрирования) и нечетное число  $n \geq 3$  релейных элементов РЭ1 – РЭn,

с симметричными относительно нулевого уровня порогами переключения  $|\pm b_1| < |\pm b_2| < \dots < |\pm b_n|$ , где индекс при «b» соответствует порядковому номеру РЭ. Выходные сигналы РЭ меняются дискретно в пределах  $\pm A/n$ . Число модуляционных зон МРП равно  $k = (n + 1)/2$ . Режим автоколебаний в МРП всегда возникает в тракте РЭ, имеющего наименьшее значение порогов переключения. Переход МРП из одной модуляционной зоны в другую определяется величиной сигнала управления на его информационном входе. Подробно режимы работы МРП рассмотрены в работе [1].

Учитывая, что независимо от порядка модуляционной зоны, автоколебания в МРП всегда возникают в тракте РЭ, обладающего минимальными значениями порогов переключения [1], то для анализа статических режимов многозонный преобразователь можно представить в виде однозонной системы (рис. 1), состоящей из сумматора  $\Sigma 1$ , интегратора и релейного элемента, который имеет минимальное значение зоны неоднозначности из группы РЭ1...РЭn.

Временные диаграммы сигналов МРП при влиянии входного тока и ЭДС смещения «нуля» ОУ интегратора показаны на рис. 2. Приведенный к входу МРП результирующий сигнал дрейфа  $X_{др}$  воспринимается устройством как эквивалентное изменение входного сигнала  $X_{ВХ}$ , что приводит к отклонению интервала дискретизации  $T_{0(e)}^{(i)}$  и постоянной составляющей  $Y_{0(e)}^{(i)}$  импульсов  $Y_{p1}(t)$  от их требуемых значений  $T_0$  и  $Y_0$  соответственно.

Основными характеристиками МРП являются амплитудная  $Y_0 = f(X_{ВХ})$  и модуляционная  $f_0 = f(X_{ВХ})$  [1]. Где  $Y_0$  – среднее значение и  $f_0 = 1/T_0$  – частота выходных импульсов МРП. Исходная система уравнений для любой  $i$ -ой модуляционной зоны МРП показана в табл. 1 уравнение (1).  $z_i = 1, 2, 3, \dots$  обозначен порядковый номер модуляционной зоны.

Эквивалентные схемы интегрирующего каскада с учетом ЭДС  $e$  и тока  $\Delta i$ , на основании которых была получена система уравнений (1) также приведены в таблице 1 на рис. 1 и рис. 2.

Для первой модуляционной зоны  $z = 1$  систему (1) можно представить в виде уравнений 2–9, табл. 1.

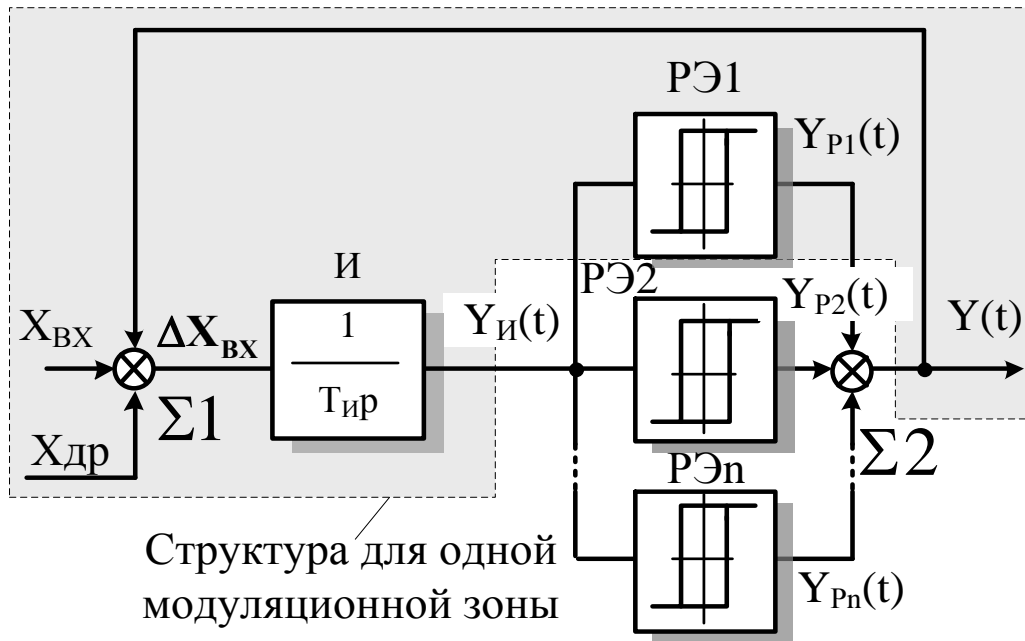


Рис. 1. Структурная схема МРП

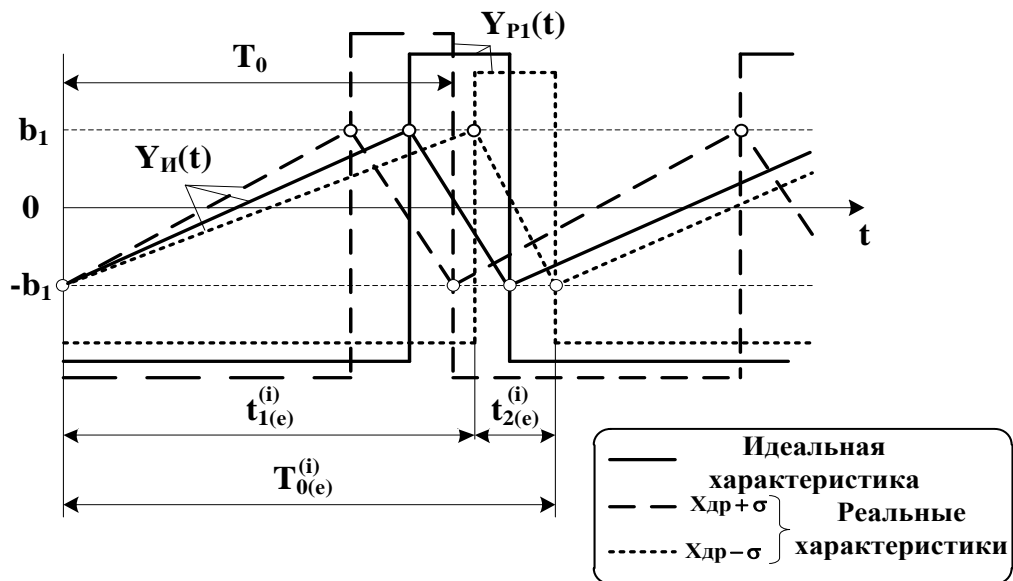
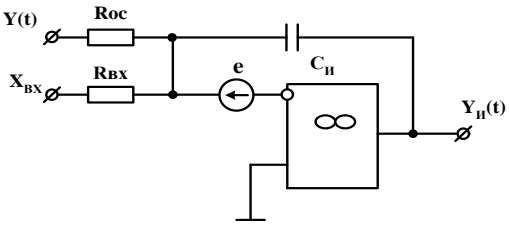
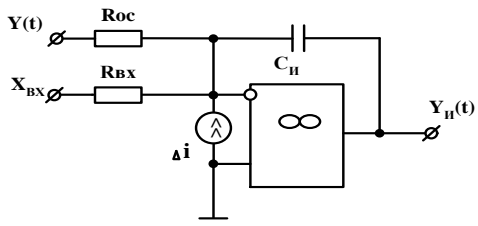


Рис. 2. Временные диаграммы сигналов МРП

Таблица 1

К анализу погрешности МРП с учетом входного тока  
и ЭДС смещения «нуля» ОУ интегратора

Система уравнений для i-ой модуляционной зоны МРП	
$\left\{ \begin{aligned} t_{1(e)}^{(i)} &= \frac{2\bar{b}_1 T_{И}}{2z_i - 1 - (\bar{X}_{ВХ} \pm \sigma)}; & t_{2(e)}^{(i)} &= \frac{2\bar{b}_1 T_{И}}{\bar{X}_{ВХ} \pm \sigma - 2z_i - 1}; \\ T_{0(e)}^{(i)} &= t_{1(e)}^{(i)} + t_{2(e)}^{(i)}; & \delta T_0^{(i)} &= 1 - \frac{T_{0(e)}^{(i)}}{T_0}; \\ Y_{0(e)}^{(i)} &= -A \left( \frac{2t_{1(e)}^{(i)}}{T_{0(e)}^{(i)}} - 1 \right); & \delta Y_{0(e)}^{(i)} &= 1 - \frac{Y_{0(e)}^{(i)}}{Y_0} \end{aligned} \right. \quad (1)$	
Эквивалентная схема интегратора с учетом ЭДС смещения «нуля» МРП	Эквивалентная схема интегратора с учетом входного тока МРП
 <p>Рис. 1</p>	 <p>Рис. 2</p>
Интервал дискретизации для n = Z = 1	
$T_{0(e)}^{(1)} = \frac{4\bar{b}_1 T_{И}}{1 - \bar{X}_{ВХ}^2} \cdot \frac{1 \mp \frac{\sigma_1 (2\bar{X}_{ВХ} \pm \sigma_1)}{1 - \bar{X}_{ВХ}^2}}{1 - \bar{X}_{ВХ}^2}, \quad (2)$	$T_{0(i)}^{(1)} = \frac{4\bar{b}_1 T_{И}}{1 - \bar{X}_{ВХ}^2} \cdot \frac{1 \mp \frac{\sigma_2 (2\bar{X}_{ВХ} \pm \sigma_2)}{1 - \bar{X}_{ВХ}^2}}{1 - \bar{X}_{ВХ}^2}, \quad (6)$
Отклонение интервала дискретизации для первой модуляционной зоны	
$\delta T_{0(e)}^{(1)} = \mp \frac{\sigma_1 (2\bar{X}_{ВХ} \pm \sigma_1)}{1 - (\bar{X}_{ВХ} \pm \sigma_1)^2}, \quad (3)$	$\delta T_{0(i)}^{(1)} = \mp \frac{\sigma_2 (2\bar{X}_{ВХ} \pm \sigma_2)}{1 - (\bar{X}_{ВХ} \pm \sigma_2)^2}, \quad (7)$
Среднее значение импульсов Y(t) за время T <sub>0(e)</sub>	Среднее значение импульсов Y(t) за время T <sub>0(i)</sub>
$Y_{0(e)}^{(1)} = -(\bar{X}_{ВХ} \pm e) \frac{R_{ОС}}{R_{ВХ}}, \quad (4)$	$Y_{0(i)}^{(1)} = -\left( \frac{R_{ОС}}{R_{ВХ}} \cdot \bar{X}_{ВХ} \pm \Delta i \cdot R_{ОС} \right), \quad (8)$
Ошибка среднего значения выходных импульсов Y(t) МРП	
$\delta Y_{0(e)}^{(1)} = \mp e \frac{R_{ОС}}{R_{ВХ}} \cdot \frac{1}{A}. \quad (5)$	$\delta Y_{0(i)}^{(1)} = \mp \left( \Delta i \cdot \frac{R_{ОС}}{A} \right). \quad (9)$

### Выводы

Анализируя полученные зависимости, можно сделать следующие выводы.

1. Из соотношений (2 и 6, табл. 1), где знак «+» при  $\sigma_1 = |\delta Y_{0(e)}|$  (см. выражение 4, табл. 1) и  $\sigma_2 = |\delta \bar{Y}_{0(i)}|$  (см. выражение 8, табл. 1) соответствует случаю согласного действия сигналов  $X_{BX}$  и  $e$ ,  $\Delta i$ , видно, что отклонение  $\delta T_{0(e)}, \delta T_{0(i)}$  увеличивается с ростом  $\bar{X}_{BX}$  и  $\sigma_1$ .

2. Графики зависимостей  $|\delta T_{0(e)}| = |\delta T_{0(i)}| = |\delta T_{0(e,i)}| = f(\bar{X}_{BX})$  при фиксированных значениях  $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_{1,2}$  (рис. 3б) показывают существенное влияние аддитивной ошибки звена И не только на статические, но и на динамические характеристики МРП, определяемые частотой его автоколебаний. Причем, количественные показатели отклонения  $|\delta T_{0(e,i)}|$  (на рис. 3а, б) не являются предельными и зависят от конкретного соотношения величин  $e$ ,  $\Delta i$  и  $\bar{X}_{BX}$ .

Так, диапазону  $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_{1,2} = 10^{-5} - 10^{-3}$ , при  $R_{OC} = 10^5$  Ом соответствуют пределы измерения входного тока ОУ интегратора  $\Delta i = (1-100)10^{-9}$  А или, например, при  $e = \text{const} = 10^{-3}$  В диапазон коэффициента передачи МРП  $k_{\Pi} = 0.1 - 10$  [8-10].

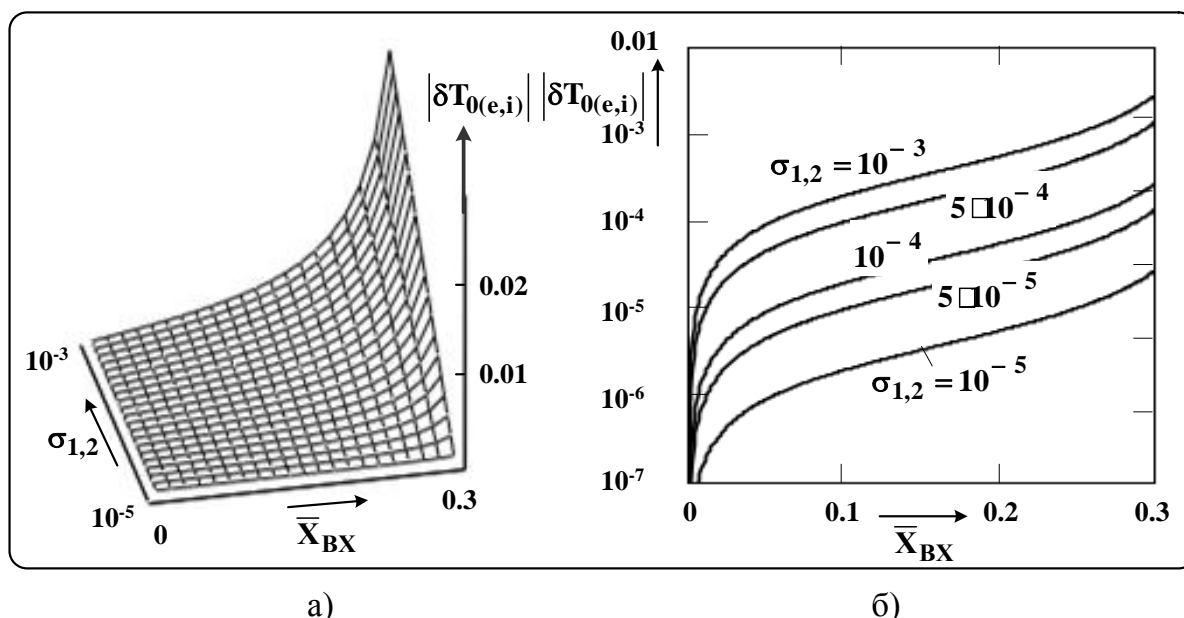


Рис. 3. Пространство статического состояния  $|\delta T_{0(e,i)}| = f(\bar{X}_{BX}, \sigma_{1,2})$  (а) и зависимости  $|\delta T_{0(e,i)}| = f(\bar{X}_{BX})$  при фиксированных значениях  $\sigma_{1,2}$  (б) для  $i$ -ой модуляционной зоны МРП

3. Ошибка среднего значения  $\delta\bar{Y}_{0(e)}$  выходных импульсов  $Y(t)$  МРП зависит от величины дрейфовых параметров  $\pm e$  и  $\pm i$ , как у обычного операционного усилителя [9, 11].

4. Зависимости, приведенные на рис. 3 характерны для любой модуляционной зоны МРП. Отклонение интервала дискретизации  $|\delta T_{0(e,i)}|$  и ошибка среднего значения выходных импульсов  $|\delta Y_{(e,i)}|$  в пределах каждой модуляционной зоны при использовании ОУ общепромышленного назначения [9, 12-14] не превышают величины  $10^{-2} - 10^{-3}$ .

Для снижения уровня аддитивной ошибки интегратора целесообразно применять в МРП высокоточные ОУ [9-11] с автокоррекцией дрейфовых параметров. Однако при этом предельная частота автоколебаний МРП не будет превышать  $10^4$  Гц из-за сравнительно низкого быстродействия подобных ОУ.

#### Библиографический список

1. Брылина, О.Г. Многозонное развертывающее преобразование в системах автоматизации технологическими процессами: монография / О.Г. Брылина, Л.И. Цытович. – Челябинск; Изд. центр ЮУрГУ, 2014. – 202 с.
2. Tsytoich, L.I. The way of logical data transmission along a single-wire communication line on the basis of multizone frequency-width-pulse modulation / L.I. Tsytoich, O.G. Brylina, A.V. Tygaev // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2015. – Вып. 15. – № 1. – С. 34–40.
3. Цытович, Л.И. О динамике многозонного интегрирующего регулятора с частотно-нулевым сопряжением модуляционных зон / Л.И. Цытович, О.Г. Брылина // Электротехника. – 2014. – № 7. – С. 17–25.
4. Брылина, О.Г. Частотно-широкоимпульсные энерго-ресурсосберегающие регуляторы переменного напряжения для термоэлектронагревательных систем и комплексов / О.Г. Брылина // Труды XVII Международного форума по проблемам науки, техники и образования. – М.: Академия наук о Земле, 2013. – С. 90–92.
5. Брылина, О.Г. Система электроприводов с комбинированным плавно-дискретным управлением в параллельных каналах регулирования / О.Г. Брылина, Л.И. Цытович // Электропривод, электротехнологии и электрооборудование предприятий. Сб. науч. трудов I международной (IV всероссийской) науч. технич. конференции. – Уфа: Нефтегазовое дело, 2013, – С. 6–8.
6. Волович, Г.И. Схемотехника аналоговых и аналогово-цифровых электронных устройств / Г.И. Волович. – М.: ИД «Додэка-XXI», 2005. – 527 с.
7. Цытович, Л.И. Разработка, исследование и применение развертывающих операционных усилителей в системах управления электроприводами: дис. ... канд. техн. наук / Л.И. Цытович. – Челябинск: ЧПИ, 1978. – 281 с.

8. Промэлектроника. Каталог 2014. Электронные компоненты для производства. – URL: <http://promelec.ru>.
9. Микросхемы АЦП и ЦАП: справочник / подгот. Г.И. Волович, В.Б. Ежов; отв. ред. Т.Е. Брод. – М.: Додэка-XXI, 2005. – 431 с.
10. Применение интегральных микросхем памяти: справочник / А.А. Дерюгин, В.В. Цыркин, В.Е. Красовский и др.; под ред. А.Ю. Гордонова, А.А. Дерюгина. – М.: Радио и связь, 1994 – 232 с.
11. Рипейко, В.В. Цветовые и кодовые обозначения радиоэлементов. Диоды, транзисторы, интегральные схемы, приборы индикации, таблицы аналогов / В.В. Рипейко – Воронеж: Транспорт, 1995. – 247 с.
12. Ежов, В.Б. Отечественные полупроводниковые приборы и зарубежные аналоги: справочник / В.Б. Ежов, Б.Л. Перельман. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: НТЦ МИКРОТЕХ, 2005. – 180 с.
13. Турута, Е.Ф. 3500 микросхем усилителей мощности низкой частоты и их аналоги: справочник / Е.Ф. Турута. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: ДМК Пресс, 2005. – 347 с.
14. Зарубежные микросхемы, транзисторы, тиристоры, диоды + SMD: A.Z: справочник / Под ред. С.Л. Корякина-Черняка. – 3-е изд., перераб. и доп. – СПб.: Наука и Техника, Т.1: Электронные компоненты. – М., 2005. – 649 с.

[К содержанию](#)