

УДК 62 1.314.5

## РАЗВЕРТЫВАЮЩИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ С ОДНОТАКТНОЙ ШИРОТНО- И ЧАСТОТНО-ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ

*Л.И. Цытович, М.М. Дудкин, О.Г. Брылина,  
Н.М. Сапрунова, Н.А. Логинова*

В статье рассматриваются принципы построения интегрирующих развертывающих преобразователей (РП) с однотоктной широтно-импульсной модуляцией первого и второго рода (ШИМ-1, ШИМ-2), а также с частотно-широотно-импульсной модуляцией (ЧШИМ). Приведены структурные схемы РП, временные диаграммы их сигналов, расчетные соотношения и результаты сравнения ШИМ и ЧШИМ с точки зрения диапазона регулирования и энергетических показателей.

Ключевые слова: интегрирующий развертывающий преобразователь, широтно-импульсная модуляция, частотно-широотно-импульсная модуляция, однотоктная модуляция, интегратор, релейный элемент.

### Введение

Развертывающие преобразователи (РП) [1, 2] средней и большой мощности целесообразно выполнять с однотоктной модуляцией [3], обеспечивающей повышенные энергетические показатели развертывающей системы, а также улучшение показателей ее надежности [4, 5].

Кроме того, полоса равномерного пропускания частот РП, где они имеют свойства, близкие к линейной системе, во многом зависит не только от закона модуляции, но и от инерционности выходного сглаживающего фильтра  $\Phi$ , предназначенного для выделения полезной составляющей выходных импульсов РП. При этом уровень пульсаций сигнала на выходе  $\Phi$ , характеризующий ошибку преобразования развертывающей системой входного воздействия, зависит как от вида передаточной функции  $\Phi$ , так и от реализуемого в РП закона модуляции, причем инерционность  $\Phi$  существенно ограничивает полосу пропускания РП по сравнению с ее предельным значением, известным из теоремы В.А. Котельникова [6].

Одним из путей приближения реальной полосы пропускания РП к ее теоретическому значению и повышения их надежности является преобразование двухтактной (биполярной) модуляции в однотоктную (однополярную).

Ниже рассматриваются различные структуры РП с широтно- (ШИМ) и частотно-широотно-импульсной модуляцией (ЧШИМ) и анализируются их свойства.

### Теоретическая часть

РП, структурная схема которого показана на рис. 1а, представляет собой классический вариант развертывающего преобразователя с ШИМ первого рода (ШИМ-1), реализующий принцип «вертикального» управления при развертывающем преобразовании с выборкой мгновенных значений информативного входного сигнала [7].

В состав РП входят интегратор И с постоянной времени  $T_{И1}$ , релейный элемент РЭ с неинвертирующей петлей гистерезиса, сумматор  $\Sigma$ , нелинейный элемент НЭ с зоной нечувствительности  $\pm 2C$ , а также элементы с односторонней проводимостью В1, В2. В дальнейшем принимаем, что переключение РЭ происходит при пороговых уровнях 0 и  $4b$ . Импульсы на выходе РЭ и НЭ меняются дискретно в пределах  $\pm A$ . Блоки И, РЭ, В1, В2 в совокупности образуют генератор пилообразного сигнала  $Y_{И1}(t)$  с линейно нарастающим и дискретно спадающим фронтами (рис. 1б). Линейный фронт «пилы» формируется под действием импульса отрицательной полярности  $Y_P(t)$  с выхода РЭ (рис. 1в), когда в открытом состоянии находится элемент В1.

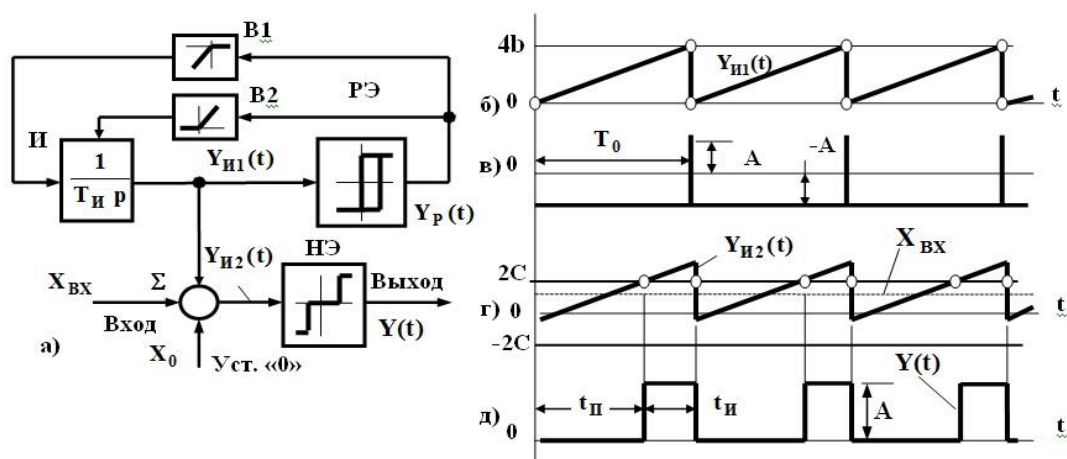


Рис. 1. Развертывающий преобразователь с одноканальной ШИМ-1 (а) и временные диаграммы его сигналов (б–д)

После переключения РЭ в состояние  $+A$  открывается В2 и происходит установка нулевых начальных условий в интеграторе И (рис. 1б, в). С помощью опорного сигнала  $X_0$ , подаваемого на вход  $\Sigma$ , производится симметрирование сигнала  $Y_{И1}(t)$  таким образом, чтобы он находился «внутри» зоны нечувствительности  $\pm 2C$ , что при нулевом значении сигнала управления  $X_{ВХ}$  обеспечивает отсутствие импульсов на выходе РП. Под действием  $X_{ВХ}$  происходит «вертикальное» смещение развертки  $Y_{И1}(t)$  относительно порогов включения НЭ (рис. 1г, сигнал  $Y_{И2}(t)$ ), что влечет

за собой появление на выходе РП однополярных импульсов  $Y(t)$  (рис. 1д), где их длительность  $t_{И}$  и интервал паузы  $t_{П}$  определяются величиной  $X_{ВХ}$ .

Задний фронт сигнала  $Y(t)$  фиксирован во времени дискретным участком сигнала «пилы»  $Y_{И1}(t)$ , а период (частота) выходных импульсов РП постоянна и не зависит от величины  $X_{ВХ}$ . Модуляционная  $t_{И} = f(X_{ВХ})$ ,  $t_{П} = f(X_{ВХ})$ ,  $T_0 = f(X_{ВХ})$  и амплитудная  $Y_0 = f(X_{ВХ})$  характеристики РП при условии  $\bar{b} = \bar{C}$  определяются как:

$$t_{И} = 4\bar{b}T_{И1}\bar{X}_{ВХ}; \quad t_{П} = 4\bar{b}T_{И1}(1 - \bar{X}_{ВХ}); \quad T_0 = t_{И} + t_{П} = 4\bar{b}T_{И1};$$

$$Y_0 = A \frac{t_{И}}{T_0} = A\bar{X}_{ВХ}; \quad \bar{b} = \left| \frac{b}{A} \right|; \quad \bar{X}_{ВХ} = \left| \frac{X_{ВХ}}{4C} \right|; \quad 0 \leq \bar{X}_{ВХ} \leq 1,0; \quad \bar{b} = \bar{C}, \quad (1)$$

где здесь и далее:  $\bar{b}$ ,  $\bar{C}$  – нормированные значения порогов переключения РЭ и зоны нечувствительности НЭ соответственно;  $\pm 4C$  – допустимый диапазон изменения входного сигнала, когда РП работает на линейном участке своей статической характеристики.

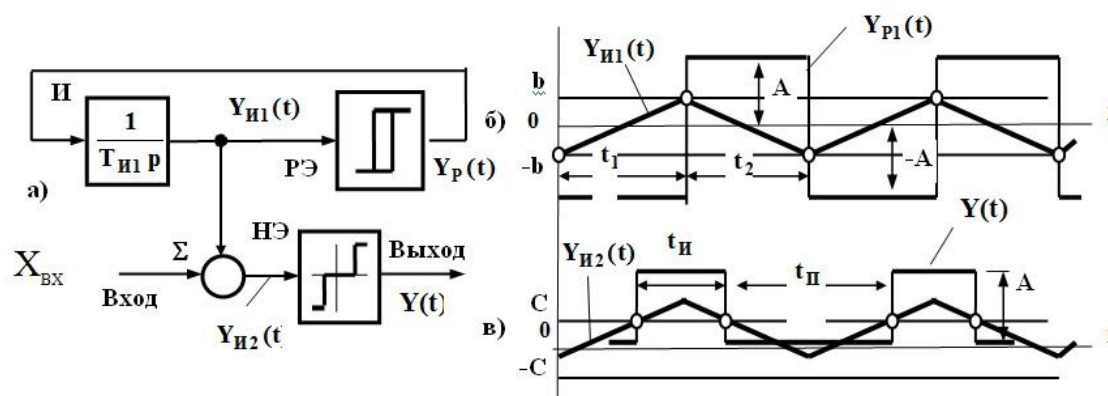


Рис. 2. Развертывающий преобразователь с однотактной ШИМ-2 (а) и временные диаграммы его сигналов (б, в)

Однотактный РП с ШИМ второго рода (ШИМ-2) [8] (рис. 2а), также реализующий принцип развертывающего преобразования с выборкой мгновенных значений входного сигнала, отличается от РП на рис. 1а формой сигнала развертки  $Y_{И1}(t)$  (рис. 2б), которая имеет вид симметричной относительно нулевого уровня «пилы» и формируется с помощью автоколебательного контура И, РЭ. Амплитуда сигнала  $Y_{И1}(t)$  ограничивается порогами переключения  $\pm b$  РЭ. НЭ выполнен с зоной нечувствительности  $\pm C$  и переходит в состояние  $+A$  или  $-A$  при наличии сигнала  $X_{ВХ}$  и выполнении условия  $|Y_{И2}(t)| > C$  (рис. 2в). Модуляционная и амплитудная характеристики РП идентичны характеристикам (1) РП на рис. 1а. При этом линейный диапазон изменения входного сигнала РП находится в пре-

делах  $\pm 2C$ . Отличие РП на рис. 2а состоит в том, что при ШИМ-2 под действием сигнала  $X_{ВХ}$  происходит смещение во времени как переднего, так и заднего фронтов выходных импульсов  $Y(t)$ .

Рассмотренные РП с выборкой мгновенных значений входного сигнала являются наиболее быстродействующими среди многообразия принципов построения РП, однако, с точки зрения помехоустойчивости, относятся к разряду неблагоприятных широтно-импульсных систем.

РП на рис. 3а представляет собой частотно-широтно-импульсную систему с комбинированным принципом развертывающего преобразования, при котором реализуется как интегрирующее развертывающее преобразование, так и развертывающее преобразование с выборкой мгновенных значений сигнала управления.

В состав РП входят сумматоры  $\Sigma 1$ ,  $\Sigma 2$ , интегратор И, релейный элемент РЭ, инверторы Ин.1, Ин.2 и нелинейный ключевой элемент НЭ. Автоколебательный канал  $\Sigma 1$ , И, РЭ выполняет функции интегрирующего развертывающего преобразователя, где в интервале  $t_1$  скорость изменения сигнала  $Y_{И1}(t)$  определяется разностью координат  $X_{ВХ}$  и  $Y_P(t)$  (рис. 3б), а в интервале  $t_2$  – зависит от суммы этих воздействий. РЭ переключается при условии  $|Y_{И1}(t)| \geq |b|$ , причем  $|b| = |C|$ , что исключает при  $X_{ВХ} = 0$  появление на выходе РП импульсов  $Y(t)$ .

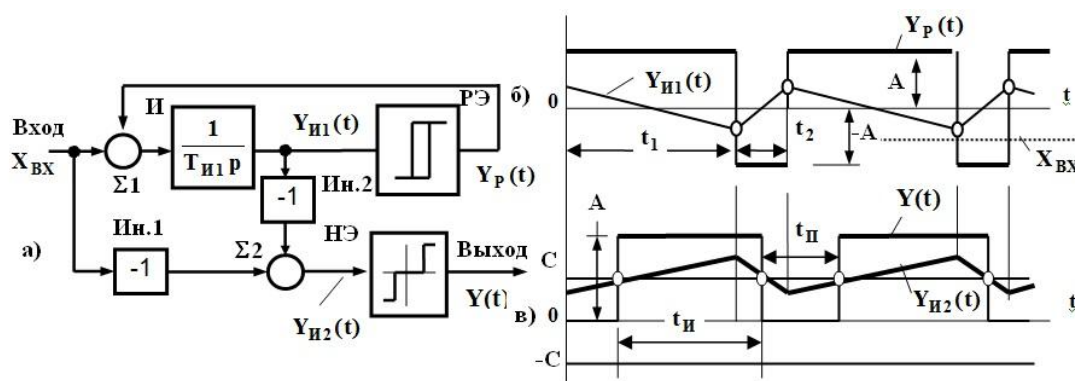


Рис. 3. Развертывающий преобразователь с одноктактной ЧШИМ и комбинированным принципом управления (а) и временные диаграммы его сигналов (б, в)

Таким образом, под действием входного сигнала с помощью канала  $\Sigma 1$ , И, РЭ изменяется производная развертки  $Y_{И1}(t)$  и достигается режим ЧШИМ. Далее, входной сигнал РП воздействует на сумматор  $\Sigma 2$ , перемещая «вертикально» относительно порогов включения НЭ сигнал  $Y_{И1}(t)$  (рис.3. в), реализуя тем самым принцип развертывающего преобразования с выборкой мгновенных значений сигнала управления. При этом меняется как частота выходных импульсов РП, так и их относительная продолжи-

тельность (скважность). Линейный диапазон изменения входного сигнала со стороны автоколебательного каскада равен  $\pm A$ , а по отношению к входу сумматора  $\Sigma$  составляет  $\pm 2C$ . В дальнейшем считаем, что  $|A| = |2C|$ .

Инверторы Ин.1, Ин.2. не являются обязательной принадлежностью структуры РП, а введены в нее лишь с целью устранения инверсии среднего значения  $Y_0$  выходных импульсов  $Y(t)$  и приведения схемы в идентичные условия по отношению к ранее рассмотренным РП. Модуляционная и амплитудная характеристики РП определяются соотношениями (2):

$$\begin{aligned} t_1 &= \frac{2\bar{b}T_{И1}}{1-\bar{X}_{ВХ}}; \quad t_2 = \frac{2\bar{b}T_{И1}}{1+\bar{X}_{ВХ}}; \quad t_C = \frac{4\bar{b}T_{И1}\bar{X}_{ВХ}}{1-\bar{X}_{ВХ}^2}; \quad t_{II} = \frac{4\bar{b}T_{И1}}{1-\bar{X}_{ВХ}^2}(1-\bar{X}_{ВХ}); \\ T_0 &= \frac{4\bar{b}T_{И1}}{1-\bar{X}_{ВХ}^2}; \quad Y_0 = A \frac{t_{II}}{T_0} = A\bar{X}_{ВХ}; \\ (\bar{b} = \left| \frac{b}{A} \right|) &= \left( \bar{C} = \left| \frac{C}{A} \right| \right); \quad 0 \leq \bar{X}_{ВХ} \leq 1,0; \quad \bar{X}_{ВХ} = \left| \frac{X_{ВХ}}{A} \right| = \left| \frac{X_{ВХ}}{2C} \right|. \end{aligned} \quad (2)$$

Данный принцип построения РП имеет более высокие энергетические показатели, чем РП с ШИМ, но уровень его помехоустойчивости мало чем отличается от помехоустойчивости РП на рис. 1 и рис. 2, так как сигналы помех могут беспрепятственно поступать на вход НЭ и приводить к его ложным включениям.

Практически аналогичными модуляционной и амплитудной характеристиками (2), при условии представления переходной функции апериодического звена первого порядка линейной зависимостью, обладает интегрирующий РП с ЧШИМ, показанный на рис. 4а.

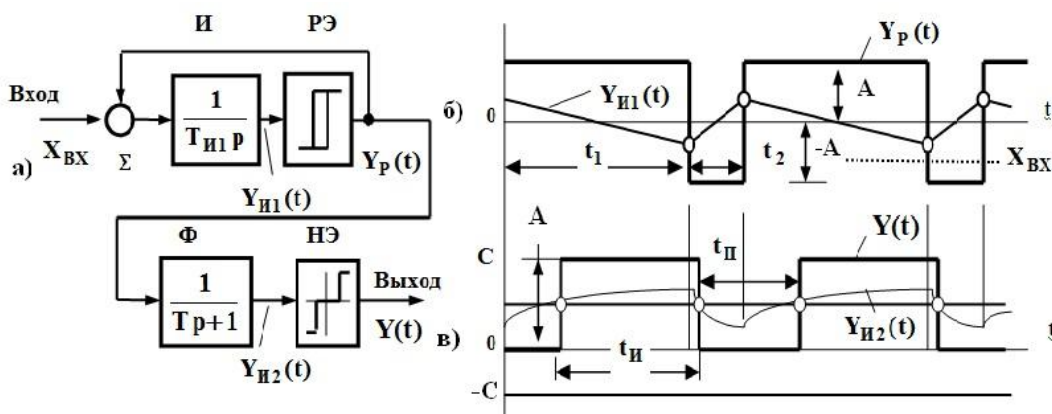


Рис. 4. Интегрирующий развертывающий преобразователь с однопulse ЧШИМ (а) и временные диаграммы его сигналов (б, в)

Здесь входной сигнал с помощью автоколебательного тракта  $\Sigma$ , И, РЭ преобразуется в импульсы  $Y_P(t)$  с двухтактной (биполярной) ЧШИМ (рис. 4б), которые затем поступают на апериодический фильтр  $\Phi$  первого порядка и сглаживаются. При этом постоянная времени фильтра  $\Phi$  выбирается

таким образом, чтобы при  $X_{ВХ} = 0$  амплитуда пульсаций  $Y_{И2}(t)$  его выходного сигнала, выполняющих функции второго сигнала развертки, удовлетворяла бы условию  $|Y_{И2}(t)| = |C|$ , что обеспечивает выключенное состояние НЭ.

В основе принципа управления РП лежит свойство независимости амплитуды сигнала пульсаций  $Y_{И2}(t)$  на выходе апериодического фильтра первого порядка от частоты и скважности выходных импульсов двухтактного автоколебательного каскада  $\Sigma$ , И, РЭ [6, 9]. Под действием сигнала  $X_{ВХ}$  пульсации  $Y_{И2}(t)$  на выходе Ф смещаются «вертикально» относительно порогов переключения НЭ на величину, пропорциональную среднему значению импульсов  $Y_p(t)$  (рис.4 в), что вызывает появление сигнала  $Y(t)$  с частотой, равной частоте импульсов  $Y_p(t)$ , и скважностью, определяемой величиной  $X_{ВХ}$ . Допустимый диапазон изменения входного сигнала РП составляет  $\pm A$ . Обладая высокой степенью помехоустойчивости, свойственной интегрирующим развертывающим системам, данный РП уступает ранее рассмотренным по динамическим возможностям, которые резко ограничиваются из-за фильтра Ф в прямом канале регулирования.

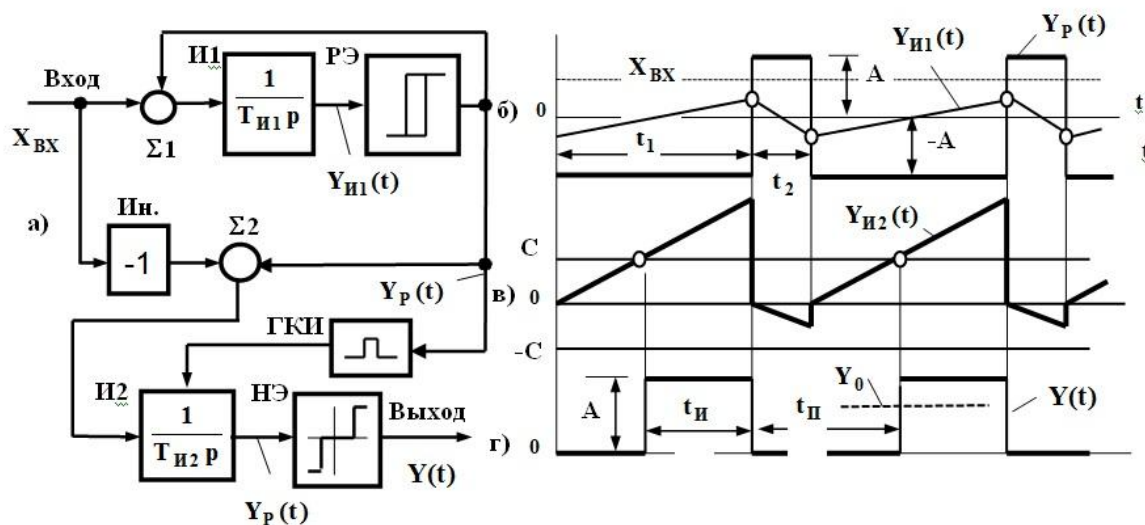


Рис. 5. Интегрирующий развертывающий преобразователь с однопulse ЧШИМ (а) и временные диаграммы его сигналов (б – г)

Компромиссной структурой интегрирующего РП, обеспечивающей высокую помехоустойчивость процесса преобразования входного сигнала при динамических характеристиках системы, определяемых частотой ее несущих автоколебаний, является преобразователь (рис. 5а), содержащий, кроме автоколебательного звена  $\Sigma 1$ ,  $\Pi 1$ , РЭ и ключевого элемента НЭ, инвертор Ин., сумматор  $\Sigma 2$ , интегратор  $\Pi 2$  и генератор «коротких» импульсов ГКИ.



В интервале  $t_1$  (рис. 5б) на вход И2 подается суммарный сигнал  $-A - X_{ВХ}$ , а в интервале  $t_2$  – разность напряжений  $A - X_{ВХ}$ . Установка нулевых начальных условий в И2 происходит под действием выходных импульсов ГКИ малой длительности синхронно с фронтами сигнала  $Y_p(t)$  (рис. 5б, в). В результате на выходе НЭ формируются однополярные импульсы (рис. 5г), амплитудная и модуляционная характеристики которых имеют вид (2) при условии  $\bar{C}T_{И2} = 2\bar{b}T_{И1}$ ,  $\bar{C} = \left| \frac{C}{A} \right|$ ,  $\bar{b} = \left| \frac{b}{A} \right|$ ,  $\bar{X}_{ВХ} = \left| \frac{X_{ВХ}}{A} \right|$ , где  $T_{И2}$  – постоянная времени интегратора И2.

Сравним рассмотренные РП с ШИМ и ЧШИМ с точки зрения диапазона регулирования, который ограничивается минимальным значением времени паузы  $t_{II}$  между импульсами  $Y(t)$ , нормируемым временем коммутации силовых ключей на выходе НЭ.

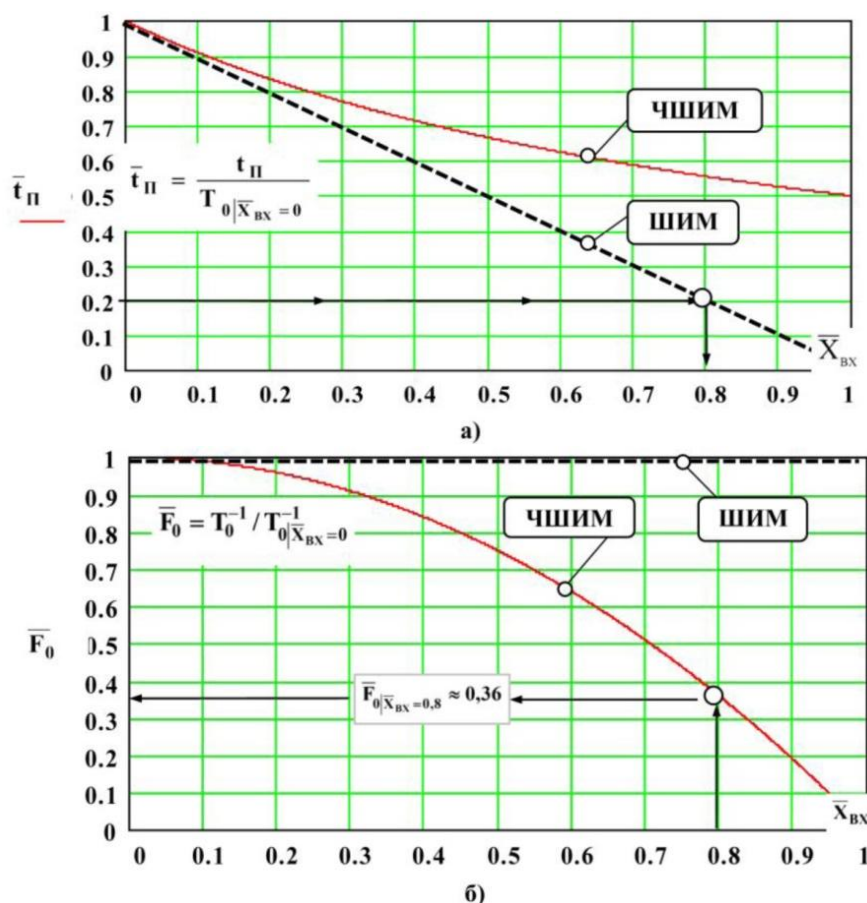


Рис. 6. Зависимости  $\bar{t}_{II} = f(\bar{X}_{ВХ})$  (а) и  $\bar{F}_0 = f(\bar{X}_{ВХ})$  (б) для развертывающих преобразователей с широтно- и частотно-широотно-импульсной модуляцией

Для РП с ШИМ зависимость  $\bar{t}_{\Pi} = f(\bar{X}_{BX})$  (рис. 6 а) линейно спадает с ростом уровня сигнала управления, а при ЧШИМ в пределе стремится к значению  $\bar{t}_{\Pi} = 0,5$ , где  $\bar{t}_{\Pi} = t_{\Pi} / T_{0|\bar{X}_{BX}=0} = t_{\Pi} / 4bT_{И}$  – нормированное значение интервала паузы между импульсами выходного сигнала РП. Если предположить, что максимально допустимым значением является  $\bar{t}_{\Pi} = 0,2$ , то РП с ШИМ может работать только в пределах 80 % линейного участка амплитудной характеристики  $Y_0 = f(X_{BX})$ . При аналогичных начальных условиях, в РП с ЧШИМ может быть использовано практически 100 % рабочего участка характеристики  $Y_0 = f(X_{BX})$ , так как в пределе ( $\bar{X}_{BX} = 1,0$ ) величина интервала паузы стремится к величине  $\bar{t}_{\Pi} = 0,5$ . Таким образом, ЧШИМ обеспечивает не только более широкий диапазон регулирования, но и позволяет выбрать начальное значение частоты несущих колебаний, от которых зависят динамические возможности РП, гораздо выше, чем при ШИМ.

С точки зрения энергетических показателей силовых РП частотно-широотно-импульсная модуляция также превосходит ШИМ, так как с ростом амплитуды входного сигнала частота выходных импульсов РП с ЧШИМ падает (рис. 6б) и потери на переключения силовых ключей НЭ уменьшаются.

Для ШИМ эти потери постоянны и не зависят от уровня сигнала управления (за исключением случая  $\bar{X}_{BX} = 0$ , где эти потери при любом виде модуляции равны нулю из-за отсутствия выходных импульсов РП). Однако здесь следует учитывать то обстоятельство, что с уменьшением частоты несущих колебаний происходит пропорциональное снижение полосы пропускания РП.

Так, в диапазоне  $0 \leq \bar{X}_{BX} < 1,0$  (рис. 6б) предельная полоса пропускания РП с ШИМ составит  $0,5\bar{F}_0$ , а для ЧШИМ, например, при  $\bar{X}_{BX} = 0,8$  будет равна  $0,5\bar{F}_{0|\bar{X}_{BX}=0,8} \approx 0,18$ , где  $\bar{F}_0 = T_0^{-1} / T_{0|\bar{X}_{BX}=0}^{-1}$  – нормированная частота несущих колебаний РП. В результате для того, чтобы «уравнять» динамические возможности РП с ШИМ и ЧШИМ при максимальном уровне входного сигнала (в данном случае  $\bar{X}_{BX} = 0,8$ ) начальная частота несущих колебаний РП с ЧШИМ должна быть практически в три раза выше частоты выходных импульсов РП с ШИМ. Таким образом, если приоритетным параметром РП является его полоса пропускания, то энергетические показатели ШИМ оказываются намного лучше, чем в РП с ЧШИМ.

### Выводы

1. С позиций допустимого диапазона коммутации силовых ключей преобразователи с ЧШИМ значительно превосходят широко-импульсные системы. Так РП с ШИМ может работать только в пределах 80 % (макси-



мум 90 %) линейного участка амплитудной характеристики «вход – выход», а в РП с ЧШИМ возможно использование практически 100 % рабочего участка этой характеристики.

2. Энергетические показатели силовых РП с ЧШИМ превосходят аналогичные характеристики РП с ШИМ, так как с ростом амплитуды входного сигнала частота выходных импульсов при ЧШИМ падает и потери на переключения силовых ключей уменьшаются.

3. Если приоритетным параметром РП является его полоса пропускания, то энергетические показатели ШИМ оказываются намного лучше, чем при ЧШИМ, так как для получения требуемой полосы пропускания системы с ЧШИМ необходимо начальную частоту несущих колебаний выбирать примерно в три раза выше, чем в РП с ШИМ.

#### 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. Дудкин, М.М. Элементы информационной электроники систем управления вентилями преобразователями: монография / М.М. Дудкин, Л.И. Цытович. – Челябинск: Изд. центр ЮУрГУ, 2011. – 362с.

3. Развертывающие преобразователи с однокантной широтно- и частотно-широтной импульсной модуляцией / Л.И. Цытович, В.И. Абушаев, М.М. Дудкин, О.Г. Терещина // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2004. – Вып. 5. – № 4(33). – С. 62–68.

4. Шахов, Э.К. Интегрирующие развертывающие преобразователи напряжения / Э.К. Шахов, В.Д. Михотин. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 142 с.

5. Дудкин, М.М. Динамические характеристики развертывающего преобразователя с частотно-широтной импульсной модуляцией / М.М. Дудкин, О.Г. Брылина, Л.И. Цытович // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2014. – Вып. 14. – № 3. – С. 46–52.

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

7. Мануковский, Ю.М. Широтно-регулируемые автономные транзисторные преобразователи частоты / Ю.М. Мануковский, А.В. Пузаков. – Кишинев: Штинца, 1990. – 150 с.

8. Перельмутер, В.М. Системы управления тиристорными электроприводами постоянного тока / В.М. Перельмутер, В.А. Сидоренко. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 302 с.

9. Брылина О.Г. Влияние закона широтно- и частотно-широтной импульсной модуляции на уровень пульсаций выходного сигнала апериодического звена первого порядка / О.Г. Брылина // Электротехника. – 2014. – № 10. – С. 18–23.

[К содержанию](#)