

УДК 621.314

ФАКТОР ПУЛЬСАЦИЙ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ С ДВУХСТОРОННЕЙ ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ

Доктор техн. наук Я.В. Щербак, канд. техн. наук Е.Я. Ивакина, инженер В.В. Панченко

ФАКТОР ПУЛЬСАЦІЙ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ З ДВОСТОРОННЬОЮ ШИРОТНО – ІМПУЛЬСНОЮ МОДУЛЯЦІЄЮ

Доктор техн. наук Я.В. Щербак, канд. техн. наук К.Я. Івакіна, інженер В.В. Панченко

FACTOR PULSATIONS AUTOMATIC REGULATION WITH TWO-WAY PULSE WIDTH MODULATION

Dr. Sci. Sciences Y.V. Shcherbak, Cand. of techn. sciences K.Y. Ivakina, engineer V.V. Panchenko

Получены аналитические зависимости для фактора пульсаций системы автоматического регулирования содержащей преобразователь с двухсторонней ШИМ.

Показано, что преобразователь с двухсторонней ШИМ имеет два фактора пульсаций. Выражения для факторов пульсаций получены разложением передаточной функции приведенной непрерывной части на элементарные звенья с дальнейшим применением импульсной модели и применением математического аппарата z-преобразования.

Ключевые слова. Выпрямитель, широтно-импульсная модуляция, замкнутая система автоматического регулирования, импульсная модель, приведенная непрерывная часть, z – преобразование.

Одержано аналітичні залежності які визначають фактор пульсацій системи автоматичного регулювання яка має перетворювач з двосторонньою ШИМ. Показано, що перетворювач з двосторонньою ШИМ має два фактора пульсацій. Вирази для факторів пульсацій одержано шляхом розкладу передавальної функції приведеної неперервної частини на елементарні ланки з подальшим застосуванням імпульсної моделі та математичного апарату z-перетворення.

Ключові слова. Випрямляч, широтно – імпульсна модуляція, замкнута система автоматичного регулювання, імпульсна модель, приведена неперервна частина, z – перетворення.

The authors obtained analytical dependences for the pulsation factor of the automatic control system containing a rectifier with double-sided pulse-width modulation. It is shown that a rectifier with double-sided pulse-width modulation has two pulsation factors. The expressions for pulsation factors are obtained through the expansion of the transfer function of the reduced continuous part into elementary units with the further usage of the impulse model and mathematical apparatus of z-transformation. It is determined that fluctuating component of the rectifier output voltage produces changes of pulsation factors on every digit-time slot of a pulse-width modulator.

Keywords. Rectifiers, pulse - width modulation, a closed system of automatic control, impulse model, reduced continuous part, z-transformations.

Введение. На входе системы управления преобразователем электрической энергии, содержащегося в замкнутой системе автоматического регулирования, наряду с гладкой составляющей, содержится переменная составляющая. Переменная составляющая вызывается дискретным характером преобразования электрической энергии. Период переменной составляющей и ее гармонический состав определяется

принципом работы преобразователя Π и свойством приведенной непрерывной части $W(p) = G(p) \cdot H(p)$ системы автоматического регулирования (см. рис.1). Попадая на вход преобразователя переменная составляющая сигнала управления $U_y(t)$ вызывает изменение его коэффициента передачи.

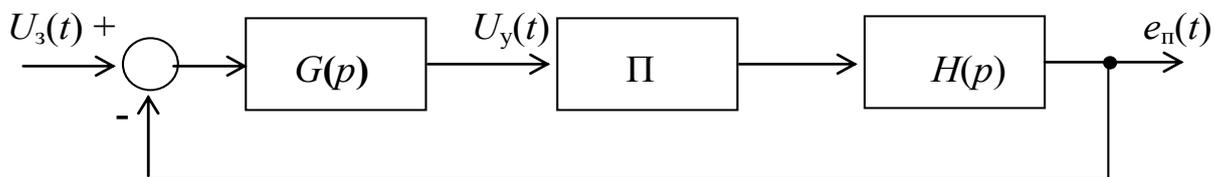


Рис.1. Обобщенная структурная схема САР с преобразователем

Изменение коэффициента передачи преобразователя учитывается фактором пульсаций $F [1]$

$$F^{-1} = 1 - \frac{\frac{dU_y(t)}{dt}}{\frac{dU_{on}(t)}{dt}}, \quad (1)$$

где $\frac{dU_y(t)}{dt}$ и $\frac{dU_{on}}{dt}$ - левосторонние значения произведения сигналов управления

$U_y(t)$ и опорного сигнала $U_{on}(t)$ относительно точки встречи.

Постановка проблемы в общем виде и ее связь с важными научными и практическими заданиями. Как следует из (1), основной задачей вычисления фактора пульсаций является определение производной от пульсирующей составляющей сигнала управления на n -том тактовом интервале преобразователя, что связано с определением реакции приведенной непрерывной части системы автоматического регулирования на выходной сигнал преобразователя.

Анализ последних исследований и публикаций. Методы определения фактора пульсаций для разных видов преобразователей электрической энергии в симметричном и несимметричном режимах, в режимах непрерывного и прерывистого

токов нагрузки рассмотрены в работах [1,2,3]. В этих работах рассмотрено нахождение фактора пульсаций систем автоматического регулирования, содержащих тиристорный выпрямитель и преобразователь постоянного напряжения с односторонней широтно-импульсной модуляцией.

Основная часть исследования. В данной работе рассматривается фактор пульсаций системы, содержащей выпрямитель в котором регулирование выходного напряжения выполняется с помощью широтно-импульсной модуляции (ШИМ) [4].

Процесс формирования выходного напряжения выпрямителя с ШИМ поясняется рис.2.

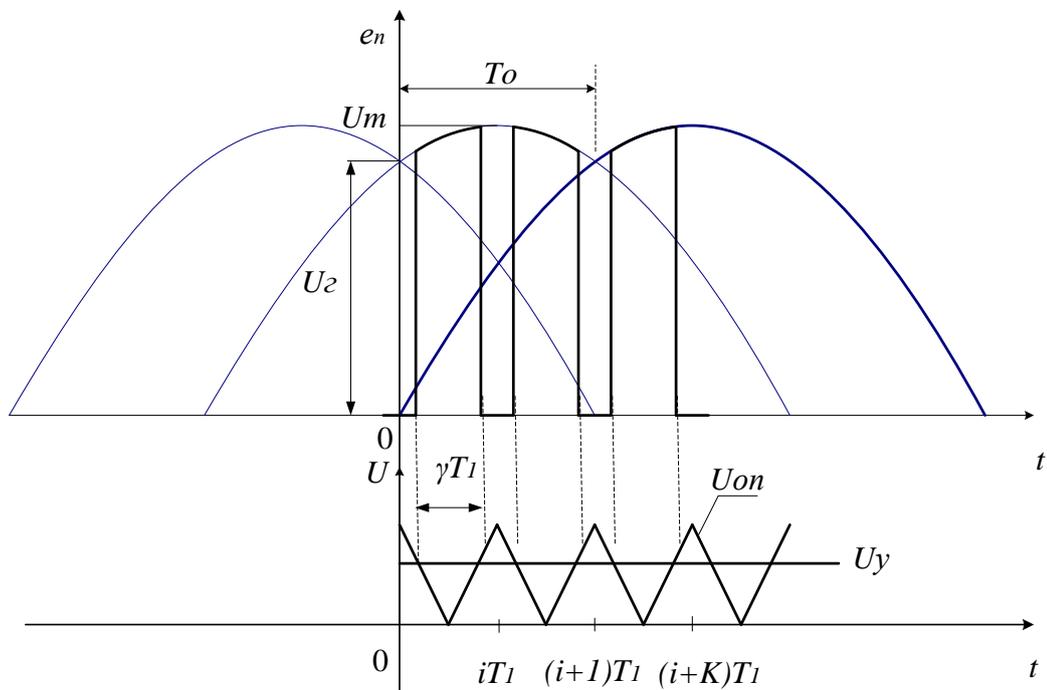


Рис.2. Выходное напряжение выпрямителя с двухсторонней ШИМ

В широтно-импульсном модуляторе с двухсторонним опорным сигналом на тактовом интервале содержатся две точки встречи сигнала управления $U_y(t)$ с опорным сигналом $U_{on}(t)$ (см. рис.3)

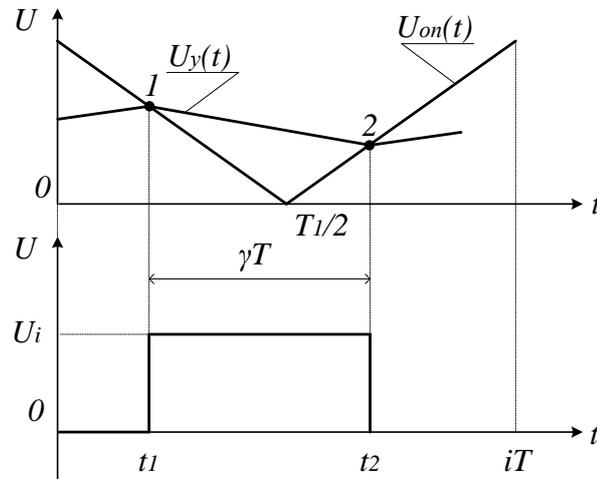


Рис. 3. Диаграммы напряжений ШИМ с двухсторонним опорным сигналом

Первая точка встречи определяет время t_1 , а вторая – t_2 . Из рис.3 следует, что для определения фактора пульсаций необходимо иметь левосторонние, относительно точки встречи, значения производных сигнала управления и опорного сигнала.

Для определения производных сигнала управления воспользуемся методом эквивалентных импульсных моделей [5]. Метод эквивалентных импульсных моделей базируется на применении математического

аппарата исследования импульсных систем. Он позволяет получить квазиустановившийся процесс в системе в замкнутой форме.

Представим в соответствии с [2, 6] передаточную функцию приведенной непрерывной части системы автоматического регулирования, содержащую выпрямитель с ШИМ, в виде суммы элементарных аperiodических звеньев

$$W(p) = \frac{K_j}{T_j p + 1}. \tag{2}$$

Обобщенная структурная схема, отображающая процесс формирования реакции приведенной непрерывной части, изображена на рис.4.

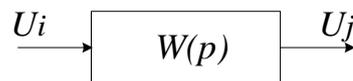


Рис.4. Обобщенная структурная схема формирования реакции приведенной непрерывной части

На входе приведенной непрерывной части действует импульсная последовательность U_i . Пульсационная составляющая выходного напряжения U_n (см. рис.2) вызывает амплитудно-импульсную модуляцию первого рода

(АИМ-1) импульсной последовательности выходного напряжения выпрямителя. В [7] показано, что переход от АИМ-1 к амплитудно-импульсной модуляции второго рода (АИМ-2) характеризуется для рабочих

часто ШИМ погрешностью не импульсной последовательности
 превышающей 0,2%. вольтодобавочного преобразователя на
 Переход от АИМ-1 к АИМ-2 последовательность прямоугольных
 характеризуется заменой реальной выходной импульсов

$$U_i = U_m \sin[\theta_m + (i - 1)] \frac{\theta_o}{K_o} + \theta_{i1}. \quad (3)$$

Аналитическое выражение для широтно-импульсного преобразователя
 выходного импульса вольтодобавочного удобно получить с помощью суперпозиции
 преобразователя на i -ом тактовом интервале двух ступенчатых функций, как это показано
 на рис.6.

$$U_{i1}(t) = U_i(t) - U_i(t - \gamma T_i). \quad (4)$$

Перейдя в (4) к операторной форме, получим

$$U_i(p) = \frac{1 - e^{-\gamma T_p}}{p} U_j(p). \quad (5)$$

С учетом выражений (2) и (5) получим передаточную функцию приведенной
 непрерывной части эквивалентной импульсной системы

$$W(p) = \frac{1}{p(T_j p + 1)} - \frac{e^{-\gamma T_p}}{p(T_j p + 1)}. \quad (6)$$

Формуле (6) соответствует приведенная на рис.5 структурная схема эквивалентной
 импульсной модели

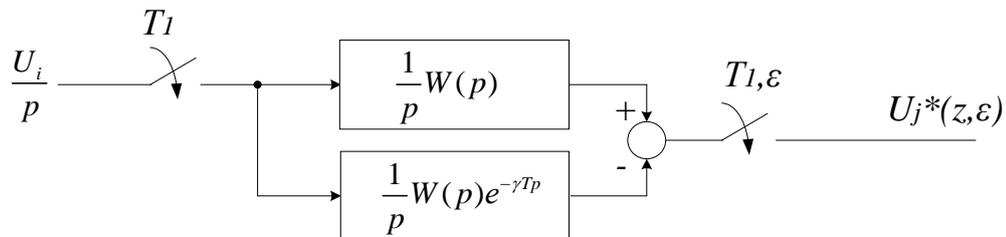


Рис. 5. Структурная схема эквивалентной импульсной модели

Из структурной схемы следует, что информация о реакции приведенной непрерывной части на выходную импульсную последовательность выпрямителя с ШИМ формируется двумя параллельными каналами. В одном из каналов осуществляется задержка информации на $t = \gamma T_1$. Из структурной схемы получаем выражение для выходного сигнала, записанное в форме модифицированного z-преобразования [8, 9]

$$U_j^*(z, \epsilon) = Z_\epsilon \left\{ \frac{U_i}{p} \right\} G^*(z, \epsilon), \quad (7)$$

где $G^*(z, \varepsilon) = Z_\varepsilon \left\{ \frac{W(p)}{p} - \frac{W(p)}{p} e^{-\gamma T p} \right\}$.

В соответствии с [8] получим

$$Z_\varepsilon \left\{ \frac{W(p)}{p} \right\} = K_j \left(\frac{z}{z-1} - \frac{z \cdot e^{-\varepsilon \frac{T_1}{T_j}}}{z - e^{-\varepsilon \frac{T_1}{T_j}}} \right), \quad Z \left\{ \frac{U_i}{p} \right\} = K_j \frac{z}{z-1}. \quad (8)$$

Квазиустановившееся значение выходного сигнала приведенной непрерывной части при изменении параметра ε в диапазоне $0 \leq \varepsilon \leq \gamma$ определим, как

$$U_j^*(\varepsilon T_1) = \lim_{z \rightarrow 1} \frac{z-1}{z} U_j^*(z, \varepsilon) = U_i K_j \left(1 - \frac{z - e^{-\frac{T_1}{T_j}}}{z - e^{-\varepsilon \frac{T_1}{T_j}}} e^{-\frac{T_1}{T_j}} \right). \quad (9)$$

Во время паузы между входными импульсами, когда $\gamma \leq \varepsilon \leq 1$, выходной сигнал равен

$$U_j^*(\varepsilon T_1) = U_i K_j \frac{e^{\frac{\gamma T_1}{T_j}} - 1}{z - e^{-\frac{T_1}{T_j}}} e^{-\frac{\varepsilon T_1}{T_j}}. \quad (10)$$

Для получения выражений, определяющих законы изменений производных сигнала управления замкнутой системы, определим:

когда $0 \leq \varepsilon \leq \gamma$

$$Z_\varepsilon \{p \cdot G(P)\} = \frac{K_j}{T_j} \left[\frac{z \cdot e^{-\varepsilon \frac{T_1}{T_j}}}{z - e^{-\frac{T_1}{T_j}}} - \frac{e^{-(1+\varepsilon-\gamma) \frac{T_1}{T_j}}}{z - e^{-\frac{T_1}{T_j}}} \right] = \frac{K_j}{T_j} \left[\frac{(z - e^{-\frac{T_1}{T_j}}) e^{-\frac{T_1}{T_j}}}{z - e^{-\frac{T_1}{T_j}}} \right]. \quad (11)$$

когда $\gamma \leq \varepsilon \leq 1$

$$Z_\varepsilon \{p \cdot G(P)\} = \frac{K_j}{T_j} \left[\frac{z \cdot e^{-\varepsilon \frac{T_1}{T_j}}}{z - e^{-\frac{T_1}{T_j}}} - \frac{z \cdot e^{-(\varepsilon-\gamma) \frac{T_1}{T_j}}}{z - e^{-\frac{T_1}{T_j}}} \right] = \frac{K_j}{T_j} \left[\frac{z \cdot e^{-\varepsilon \frac{T_1}{T_j}} (1 - e^{\frac{\gamma T_1}{T_j}})}{z - e^{-\frac{T_1}{T_j}}} \right]. \quad (12)$$

На основании теоремы о дифференцировании в области оригинала [6] из (11) и (12), получим:

$$\left. \frac{dU_y}{d\varepsilon T_1} \right|_{0 \leq \varepsilon \leq \gamma} = \lim_{Z \rightarrow 1} \frac{U_i K_j}{T_j} \left[\frac{(z - e^{-\frac{(1-\gamma)T_1}{T_j}} - \varepsilon \frac{T_1}{T_j})}{z - e^{-\frac{T_1}{T_j}}} \right] = \frac{U_i K_j}{T_j} \cdot \frac{1 - e^{-\frac{(1-\gamma)T_1}{T_j}} - \varepsilon \frac{T_1}{T_j}}{1 - e^{-\frac{T_1}{T_j}}}, \quad (13)$$

$$\left. \frac{dU_y}{d\varepsilon T_1} \right|_{\gamma \leq \varepsilon \leq 1} = \lim_{Z \rightarrow 1} \frac{U_i K_j}{T_j} \cdot \frac{z \cdot e^{-\varepsilon \frac{T_1}{T_j}} (1 - e^{\gamma \frac{T_1}{T_j}})}{z - e^{-\frac{T_1}{T_j}}} = \frac{U_i K_j}{T_j} \cdot \frac{(1 - e^{\gamma \frac{T_1}{T_j}}) e^{-\varepsilon \frac{T_1}{T_j}}}{1 - e^{-\frac{T_1}{T_j}}}. \quad (14)$$

На интервале $0 \leq t_1 \leq T_1/2$ опорный сигнал изменяется по закону

$$U_{OП}(t) = U_{OП\max} \left(1 - \frac{2t_1}{T_1}\right), \quad (15)$$

а на интервале $T_1/2 \leq t_2 \leq T_1$

$$U_{OП}(t) = U_{OП\max} \left(\frac{2t_2}{T_1} - 1\right). \quad (16)$$

Учитывая, что $\varepsilon T_1 = t$ из (15) и (16) получим значения производных опорного сигнала: для $0 \leq t_1 \leq T_1/2$

$$\frac{dU_{OП}(t)}{dt} = \frac{-2U_{OП\max}}{T_1}; \quad (17)$$

для $T_1/2 \leq t_2 \leq T_1$

$$\frac{dU_{OП}(t)}{dt} = \frac{2U_{OП\max}}{T_1}. \quad (18)$$

Подставив полученные выражения для производных сигнала управления (13), (14) и опорного сигнала (17), (18) в общее выражение для фактора пульсаций (1) получим:

$$F_1^{-1} \Big|_{t=iT_1} = 1 - K_i K_j \frac{T_1}{2T_j} \cdot \frac{(1 - e^{\gamma \frac{T_1}{T_j}}) e^{-\frac{T_1}{T_j}}}{1 - e^{-\frac{T_1}{T_j}}}; \quad (19)$$

$$F_2^{-1} \Big|_{t=iT_1(1+\gamma)} = 1 + K_i K_j \frac{T_1}{2T_j} \cdot \frac{e^{-\gamma \frac{T_1}{T_j}} - e^{-\frac{T_1}{T_j}}}{1 - e^{-\frac{T_1}{T_j}}}, \quad (20)$$

где $K_i = \frac{U_i}{U_{оп\max}}$ - статический коэффициент передачи выпрямителя с ШИМ на i -ом

тактовом интервале широтно-импульсного преобразователя.

Выводы из исследования, многоконтурных систем автоматического регулирования и систем со сложной передаточной функцией приведенной в данном направлении.

Полученные выражения во многом непрерывной части. В этих случаях являются общими так, как позволяют целесообразно применение предложенной в вычислять фактор пульсаций [10] методики.

Список использованных источников

1. Bjaresten, N. The Statik Converter as a High-Speed Power Amplifier [Text]/ N. Bjaresten // Direct Current.-1963.-Vol.6.-P.154-165.
2. Шипилло, В.П. Фактор пульсаций в системах регулирования с вентильными преобразователями [Текст] / В.П. Шипилло, Ю.С. Зинин // Электричество.- 1977.-№3.- С.86-89.
3. Шипилло, В.П. Устойчивость замкнутой системы с широтно-импульсным преобразователем [Текст] / В.П. Шипилло, И.И. Чикотило // Электричество.- 1978.- №1.- С.50-53.
4. Розанов, Ю.К. Основы силовой электроники [Текст] / Ю.К. Розанов // Энергоатомиздат,1992.-296с.
5. Щербак, Я.В. Анализ электромагнитных процессов ШИП применением эквивалентных импульсных моделей [Текст] / Я.В. Щербак // Інформаційно- керуючі системи на залізничному транспорті.- 2000. - №6. - С.89-95.
6. Конторович, М.И. Операционное исчисление и процессы в электрических цепях [Текст] / М.И. Конторович // Сов. Радио, 1975. - 319с.
7. Ивакина, Е. Я. Повышение качества электрической энергии тяговой подстанции постоянного тока в замкнутых структурах [Текст] / Е.Я. Ивакина // Автореф. дис ... канд. техн. наук: 05.09.03/ ХНТУСХ им. П. Василенка.- Харьков, 2014. – с.25
8. Джури, Э. Импульсные системы автоматического регулирования [Текст] / Э. Джури // Физматиздат, 1963. – 455с.
9. Бесекерский, В.А. Теория систем автоматического регулирования [Текст] / В.А. Берсеркский, Е.П. Попов // М.: Наука, 1975.-767с.
10. Щербак, Я.В. Фактор пульсаций многоконтурных дискретных систем автоматического регулирования [Текст] / Я.В. Щербак // Технічна електродина-міка.- Київ, 1998.-№4.-С.41-43.

Щербак Яків Васильович, доктор техн. наук, кафедра автоматизованих систем електричного транспорту Українського державного університету залізничного транспорту. E-mail: Sherbak47@mail.ru.

Ивакіна Катерина Яківна, канд. техн. наук, кафедра електричного транспорту Харківського національного університету міського господарства ім. О.М. Бекетова.

E-mail: ivakina_katya@mail.ru.

Панченко Владислав Вадимович, кафедра автоматизованих систем електричного транспорту Українського державного університету залізничного транспорту.

E-mail: vlad-zmyov@mail.ru.

Shcherbak Yakov Vasilyevich, Dr. Sc. Sciences, Department of the automated systems of electric transport Ukrainian State University of Railway Transport.

E-mail: Sherbak47@mail.ru.

Ivakina Katerina Yakivna, candidate tehnicny Sciences. Department electric of transport Kharkiv National University of Municipal Management named after A.N. Beketova.

E-mail: ivakina_katya@mail.ru.

Panchenko Vladyslav Vadymovych, Department of the automated systems of electric transport Ukrainian State University of Railway Transport

E-mail: vlad-zmyov@mail.ru.

Стаття поступила 20.05.2015