УДК 621.314 DOI: https://doi.org/10.18664/1994-7852.162.2016.78381

ДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ С ДВУХСТОРОННЕЙ ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ

Канд. техн. наук Е. Я. Ивакина

ДИНАМІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ З ДВОСТОРОННЬОЮ ШИРОТНО-ІМПУЛЬСНОЮ МОДУЛЯЦІЄЮ

Канд. техн. наук К. Я. Івакіна

DYNAMIC PROPERTIES AUTOMATIC CONTROL SYSTEM WITH TWO-WAY PULSE WIDTH MODULATION

Phd. tehn. K. Ivakina

В работе выполнены исследования динамических свойств системы автоматического регулирования импульсного преобразователя постоянного напряжения с двухсторонней широтно-импульсной модуляцией. Показано отличие динамических процессов, протекающих в системе регулирования с двухсторонней широтно-импульсной модуляцией, от аналогичных процессов с односторонней широтно-импульсной модуляцией.

Ключевые слова: *импульсный преобразователь постоянного напряжения, замкнутая структура, двухсторонняя широтно-импульсная модуляция, импульсная модель, процесс конечной длительности, фактор пульсаций, условия устойчивости.*

В роботі виконані дослідження динамічних властивостей системи автоматичного регулювання імпульсного перетворювача постійної напруги з двосторонньою широтно-імпульсною модуляцією. Показано відмінність динамічних процесів, що протікають в системі регулювання з двосторонньою широтно-імпульсною модуляцією, від аналогічних процесів з односторонньою широтно-імпульсною модуляцією.

Ключові слова: *імпульсний перетворювач постійної напруги, замкнута структура, двостороння широтно-імпульсна модуляція, імпульсна модель, процес кінцевої тривалості, фактор пульсацій, умови стійкості.*

The paper is devoted to theoretical and experimental studies of dynamic processes of a closed structure comprising a transmitter with two-way pulse width modulation with a further comparison with similar processes at the single-sided modulation.

The work carried out studies of the dynamic properties of the system of automatic control of pulsed DC voltage converter with two-way PWM. Displaying Unlike dynamic processes taking place in the regulatory system with two-way pulse width modulated by similar processes with single-sided PWM.

Keywords: *pulsed DC converter, a closed structure, a two-way pulse width modulation, pulse pattern, the process of finite duration, ripple factor, the stability conditions.*

Вступление. Создание высокоэффективных систем автоматического регулирования, содержащих полупроводниковые преобразователи электрической энергии, связано с динамическими свойствами преобразователя.

Анализ последних достижений и публикаций. Динамические характеристики преобразователя постоянного напряжения с односторонней широтно-импульсной модуляцией в режиме непрерывного и прерывистого токов нагрузки достаточно полно изложены в ряде работ, среди которых следует отметить [1-4].

В работе [1] приведена импульсная модель преобразователя постоянного тока с односторонней модуляцией. Исследованы динамические процессы с учетом дискретности преобразователя и режимов его работы.

В [2, 3, 10] получены импульсные модели преобразователя постоянного тока с односторонней широтно-импульсной модуляцией с учетом модулирующего воздействия на входное напряжение. С применением данных моделей исследованы замкнутые системы автоматического регулирования выходной координаты преобразователя.

В [4] приведены результаты исследований динамических характеристик системы регулирования, содержащей выпрямитель с односторонней широтно-импульсной модуляцией.

Анализ результатов исследований, приведенных в перечисленных работах, указывает на то, что применение односторонней широтно-импульсной модуляции сужает зону устойчивости замкнутой системы.

В [5,6] приведена импульсная модель преобразователя с двухсторонней широтно-импульсной модуляцией. Данный вид модуляции позволяет расширить диапазон регулирования выходного напряжения преобразователя, что особенно важно с повышением её частоты.

Определение цели и задачи исследований. Цель работы – теоретические и экспериментальные исследования динамических процессов замкнутой структуры, содержащей преобразователь с двухсторонней широтно-импульсной модуляцией, с дальнейшим сравнением с аналогичными процессами при односторонней модуляции.

Обобщенная схема системы автоматического регулирования изображена на рис. 1. Силовая схема преобразователя состоит из коммутатора V и возвратного диода VD. Управление коммутатором осуществляется системой управления СУ, в которой осуществляется двухсторонняя широтно-импульсная модуляция. Регулирование выходного напряжения $U_н$ выполняется регулятором напряжения РН. Звено К1 в цепи обратной связи служит для согласования величины $U_н$ и $U_з$.

Основная часть исследований. Преобразователь постоянного напряжения с двухсторонней широтно-импульсной модуляцией при малых отклонениях управляющего воздействия $\Delta U_y(t)$ представляет собой амплитудно-импульсный модулятор второго рода. Модель преобразователя содержит два импульсных элемента [5] с периодом квантования, равным периоду широтно-импульсной модуляции (см. рис. 2). Один из импульсных элементов имеет запаздывания квантования входного импульса широтно-импульсной модуляции. Приведенные непрерывные части содержат информацию о статическом K_o и динамических F_1 и F_2 коэффициентах передачи.

Особенностью импульсной модели является наличие двух факторов пульсаций, вызываемые наличием двух точек встречи опорного сигнала $U_{оп}(t)$ и сигнала управления $U_y(t)$ (см. рис. 3).

Первая точка встречи определяет время t_1 , а вторая – t_2 . Факторы пульсаций в точках встречи определяются выражением [6,7]

$$F_i^{-1} = 1 - \frac{\dfrac{dU_y(t_i)}{dt}}{\dfrac{dU_{оп}(t_i)}{dt}}, \qquad (1)$$

где $\frac{dU_y(t_i)}{dt}$ и $\frac{dU_{on}(t_i)}{dt}$ - левосторонние значения производной сигналов управления $U_y(t)$ и опорного $U_{on}(t)$ относительно точек встречи t_1 и t_2.

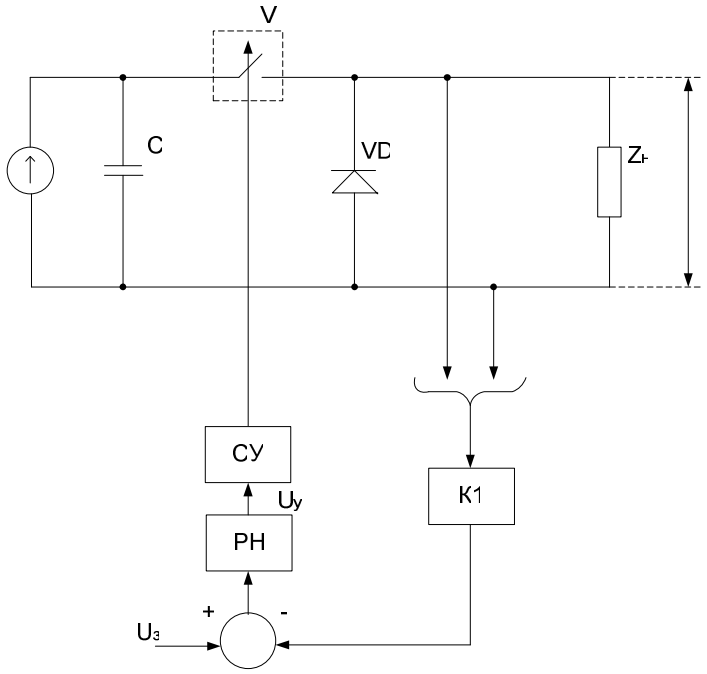

Рис. 1. Обобщенная схема системы автоматического регулирования

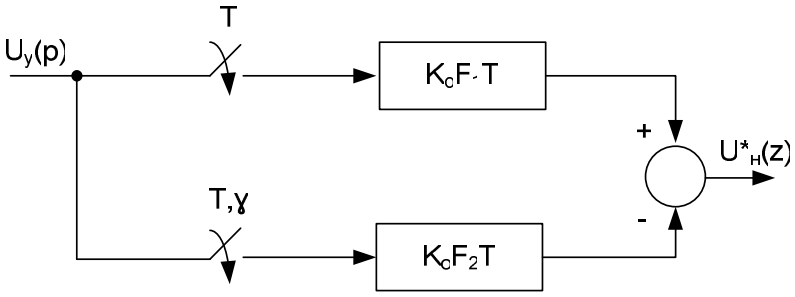

Рис. 2. Импульсная модель

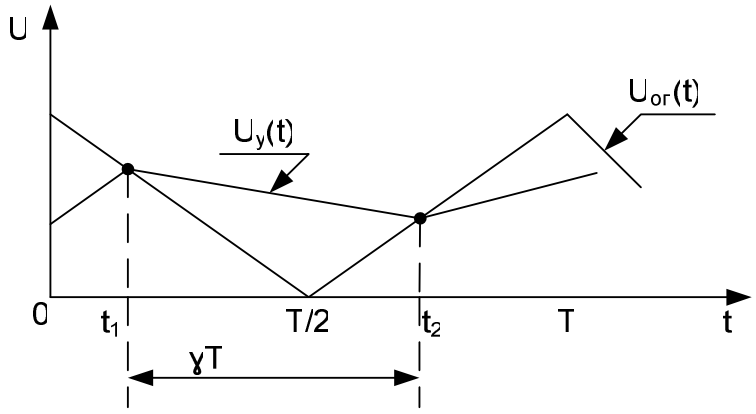

Рис. 3. Эпюры напряжений ШИМ

В силу того, что факторы пульсаций F_1 и F_2 связаны между собой, следует ожидать изменения их влияния на динамические процессы замкнутой системы относительно аналогичных процессов при односторонней широтно-импульсной модуляции. Для исследования данной предпосылки рассмотрим замкнутую систему автоматического регулирования выходного напряжения выпрямителя с ШИМ с интегрированным регулятором

$$G(\varphi) = \frac{1}{T_i p}, \tag{2}$$

позволяющим реализовать предельное быстродействие.

Структурная схема рассматриваемой системы изображена на рис. 4.

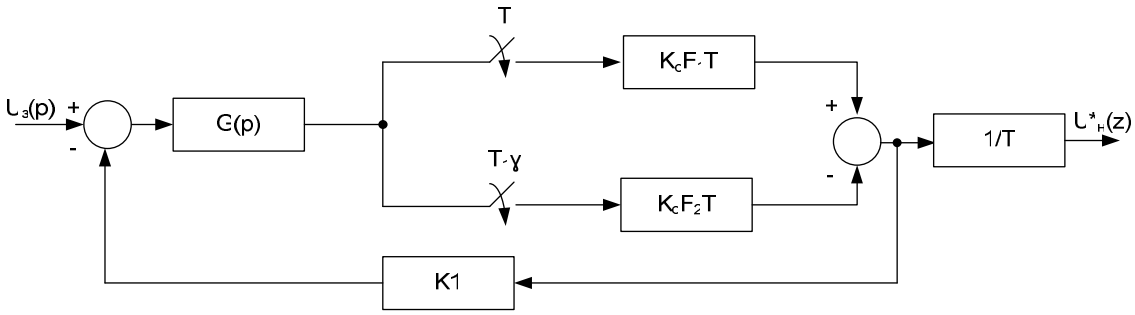

Рис. 4. Система автоматического регулирования напряжения

С учетом [8] связь между входным и выходным сигналом замкнутой системы

$$U_H^*(z,\xi) = \frac{\left[U_3 G^*(z,\xi)\cdot F_1 - z^{-1}\cdot U_3 G^*(z,1+\delta-\gamma)F_2\right]K_0}{1+\left[-G^*(z,\xi)\cdot F_1 + z^{-1}\cdot G^*(z,1+\delta-\gamma)F_2\right]K_0 T K_1}, \tag{3}$$

где $0 \le \delta \le \gamma$.

Характеристическое уравнение при $\delta = \gamma$ имеет вид

$$1-\left[G^*(z,\gamma)\cdot F_1 - z^{-1}G^*(z,1)\cdot F_2\right]K_1 K_0 T = 0. \tag{4}$$

В соответствии с [9]

$$G^*(z,\xi) = z_\xi\left\{\frac{1}{T_1 p}\right\} = \frac{1}{T_1}\cdot\frac{z}{z-1}. \tag{5}$$

С учетом (5) характеристическое уравнение (4), записанное в канонической форме, принимает вид

$$z\left(1-\frac{T}{T_1}\cdot F_1\cdot K_1 K_0\right) + \frac{T}{T_1}\cdot K_1 K_0 F_2 - 1 = 0. \tag{6}$$

Совместив полюса характеристического уравнения (6) с началом z–плоскости, получим условия процесса конечной длительности

$$\frac{T_1}{T} = F_1 \cdot K_0 \cdot K_1; \qquad \frac{T_1}{T} = F_2 \cdot K_0 \cdot K_1. \tag{7}$$

Из (7) следует, что строгая реализация условий процесса конечной длительности достигается для величины регулированного параметра преобразователя γ, при которой $F_1 = F_2$.

Согласно с [7], получим выражение для факторов пульсаций

$$F_1^{-1} = 1 + K_1 K_0 \cdot \gamma \frac{T}{2T_1}; \tag{8}$$

$$F_2^{-1} = 1 + K_1 K_0 \cdot \gamma \frac{T}{2T_1}(1-\gamma). \tag{9}$$

Совместное решение уравнений (8) и (9) дает значение величины регулируемого параметра $\gamma = 0{,}5$ преобразователя, соответствующее реализации в системе автоматического регулирования процесса конечной длительности.

Из (6) с учетом $\gamma = 0{,}5$ получим выражение значения для постоянной времени регулятора

$$T_1 = \frac{3}{4} K_0 K_1 \cdot T. \tag{10}$$

Для оценки динамических свойств системы регулирования с двухсторонней широтно-импульсной модуляцией рассмотрим ее реакцию на входное ступенчатое воздействие $U_3(t) = 1(t)$.

Z-преобразование полинома числителя выражения (2) имеет вид

$$U_3 G^*(z,\xi) = z_\xi \left\{ \frac{1}{T_1 p^2} \right\} = \left[\frac{z\xi T}{z-1} + \frac{z \cdot T}{(z-1)^2} \right] \cdot \frac{1}{T_1}. \tag{11}$$

Подставив в выражение для выходного сигнала замкнутой системы (2) z- преобразование (5) и (11), а также выполнив преобразования с учетом (7), (8) и (10), получим

$$U_H^*(z)\Big|_{\xi=0} = \frac{1}{K_1(z-1)}, \tag{12}$$

где $K_1 = \frac{1}{K_0}$.

Разложение (12) в степенной ряд Лорана описывает переходной процесс в системе

$$U_H(nT) = K_0(z^{-1} + z^{-2} + z^{-3} + ... + z^{-n}). \tag{13}$$

Из (13) следует, что переходной процесс заканчивается за один тактовый интервал импульсного элемента, что соответствует порядку передаточной функции приведенной непрерывной части.

Условие устойчивости системы имеет вид

$$\frac{T_1}{T} > \frac{K_0 \cdot K_1 (F_1 + F_2)}{2}. \tag{14}$$

На рис. 5 приведена граница устойчивости, полученная в результате решения трансцендентного уравнения (14) с учетом выражений для факторов пульсаций (8) и (9).

Из рис. 5 следует значительно более слабая зависимость границы устойчивости

системы с двухсторонней широтно-импульсной модуляцией от регулируемого параметра γ по сравнению с односторонней.

На рис. 6 приведена имитационная модель системы автоматического регулирования выходного напряжения импульсного преобразователя постоянного напряжения. Частота широтно-импульсной модуляции принята равной 1000 Гц, при которой период дискретности $T = 1 \cdot 10^{-3} C$. Согласно с формулой (10) при $K_0 \cdot K_1 = 1$, постоянная времени регулятора $T = 0{,}75 \cdot 10^{-3} C$.

На рис. 7 приведена осциллограмма выходного сигнала регулятора напряжения, подтверждающая реализацию в системе регулирования процессы конечной длительности.

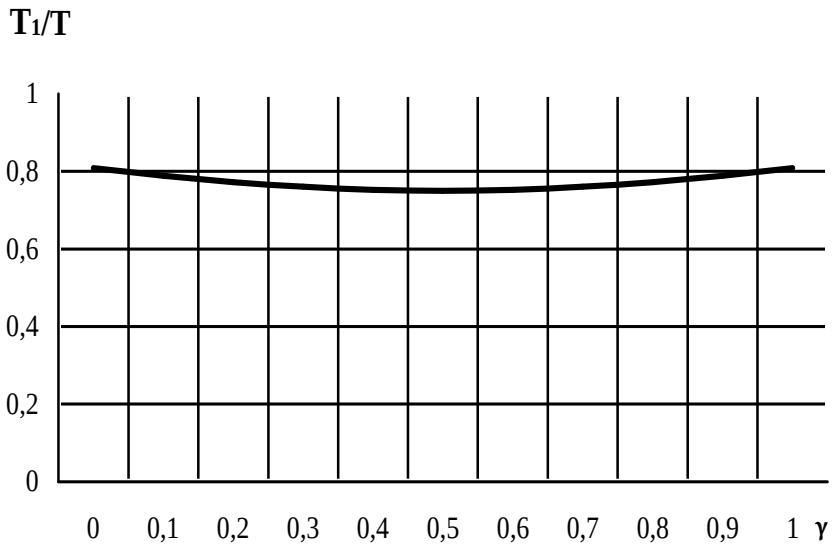

Рис. 5. Граница устойчивости

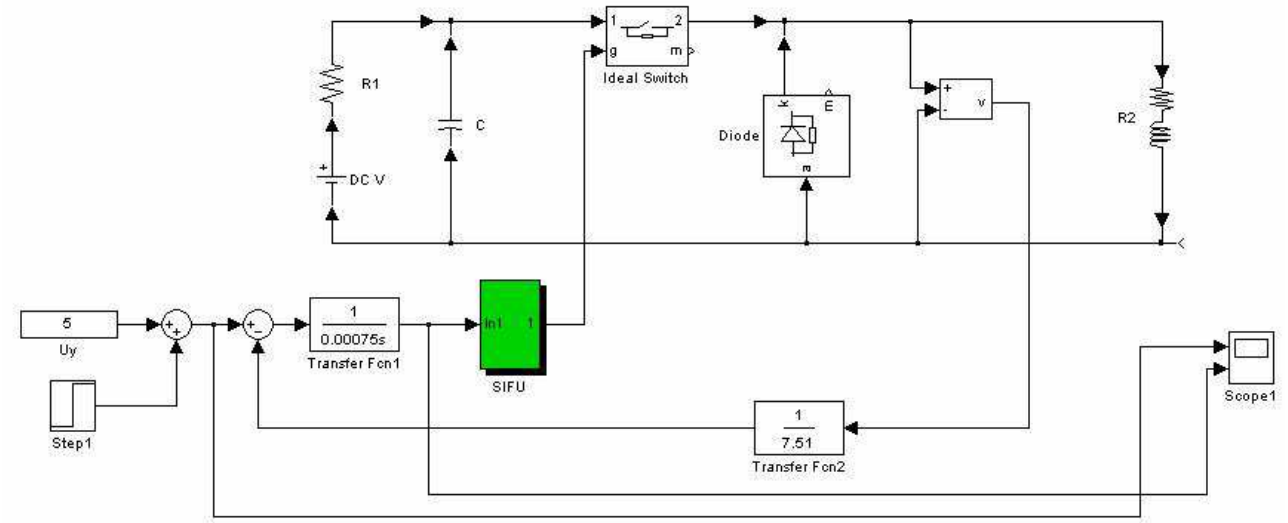

Рис. 6. Имитационная модель САР выходного напряжения импульсного преобразователя

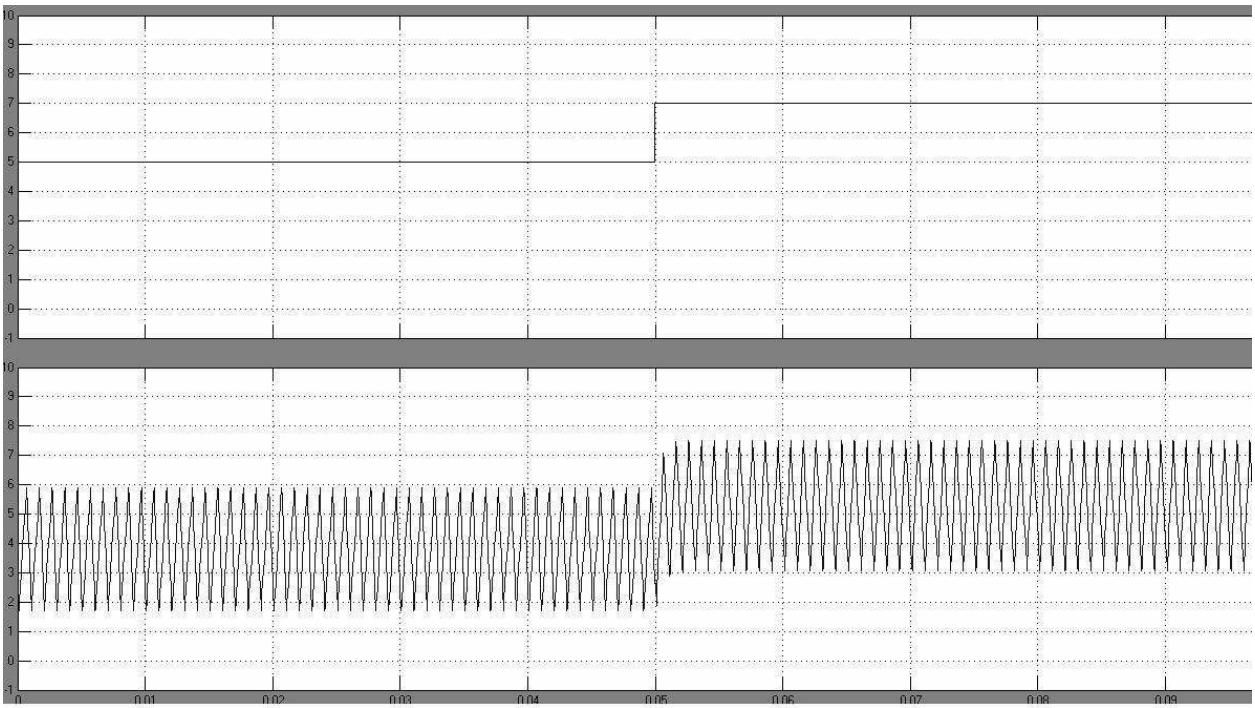

Рис. 7. Осциллограмма выходного сигнала регулятора

Выводы из исследования и перспективы, дальнейшее развитие в данном направлении. Результаты исследований позволяют сделать вывод, что предложенная в [5] импульсная модель преобразователя постоянного напряжения с двухсторонней широтно-импульсной модуляцией позволяет с достаточной точностью описывать динамические процессы замкнутой системы.

Список использованных источников

1. Чикотило, И. И. Исследование устойчивости и переходных режимов тиристорных широтно-импульсных преобразователей в быстродействующих замкнутых системах [Текст]: дис… канд. техн. наук 05.09.12 / И.И. Чикотило. – Харьков, 1979. – 239 с.
2. Щербак, Я. В. Теоретические основы и методы регулирования субгармоник полупроводниковых преобразователей электроэнергии [Текст]: дис… д-ра техн. наук 05.09.12 / Я.В. Щербак. – Харьков, 2001. – 408 с.
3. Щербак, Я. В. Широтно-импульсный преобразователь с широтно-импульсной модуляцией второго рода в условиях несимметрии [Текст] / Я. В. Щербак // Технічна електродинаміка. – К., 1999. – №1. – С. 31-35.
4. Ивакина, Е. Я. Анализ динамических процессов системы автоматического регулирования напряжения преобразователя с ШИМ [Текст] / Е. Я.Ивакина // Зб. наук. праць Укр. держ. акад. залызнич. трансп. – Харків: УкрДАЗТ, 2013. – Вип. 142. – С. 151-156.
5. Щербак, Я. В. Импульсная модель выпрямителя с двухсторонней широтно-импульсной модуляцией в режиме непрерывного тока [Текст] / Я.В. Щербак, Е.Я. Ивакина, В.В. Панченко // Вісник нац. техн. університету „ХПІ”. – Харків: НТУ „ХПІ”, 2015. – Вип. 12(1121).

6. Bjaresten N. A. The Statik Converter as a High-Speed Power Amplifier / N. A Bjaresten //Direct Current. - 1963. - Vol.6. - P.154-165.

7. Щербак, Я. В. Фактор пульсаций системы автоматического регулирования с двухсторонней широтно-импульсной модуляцией [Текст] / Я. В. Щербак, Е. Я. Ивакина, В. В. Панченко // Зб. наук. праць Укр. держ. ун-ту залызнич. трансп. – Харків: УкрДУЗТ, 2015. – Вип. 153. – С. 113-120.

8. Бесекерский, В. А. Теория систем автоматического регулирования [Текст] / В.А. Бесекерский, Е. П. Попов. – М.: Наука, 1975. – 767 с.

9. Джури, Э. Импульсные системы автоматического регулирования [Текст] / Э. Джури. – М.: Физматиздат, 1963. – 455 с.

10. Davoudi, A. Computer-Aided Dynamic Characterization of Fourth-Order PWM DC–DC Converters / A. Davoudi, J. Jatskevich, P. L. Chapman // IEEE Transactions on Circuits and SystemsII: Express Briefs. 2008. - vol. 55, Is.10. - p. 1021-1025.

Рецензент д-р техн. наук, профессор В. Г. Ягуп

Івакіна Катерина Яківна, кандидат технічних наук, кафедра електричного транспорту Харківського національного університету міського господарства ім. О.М. Бекетова. Тел.(097)96-66-372.
E-mail: ivakina_katya@mail.ru.

Ivakina Katerina, PhD. Sc., Department electric of transport O.M.Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. Tel. (097)96-66-372. E-mail: ivakina_katya@mail.ru.

Стаття прийнята 22.06.2016 р.