

**А. В. КИПЕНСКИЙ**, канд. техн. наук, профессор, НТУ «ХПИ»;  
**Е. И. КОРОЛЬ**, канд. техн. наук, НТУ «ХПИ».

### АНАЛИЗ НА КООРДИНАТНОЙ ПЛОСКОСТИ РЕГУЛИРОВОЧНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ИМПУЛЬСНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО НАПРЯЖЕНИЯ С РЕГУЛЯТОРАМИ ПО ВХОДНОМУ ВОЗМУЩЕНИЮ

При регулировании постоянного напряжения с помощью импульсных преобразователей (ИП) наиболее часто используется метод широтно-импульсной модуляции (ШИМ), поскольку он позволяет получить на выходе преобразователя напряжение заданного качества с меньшими затратами на подавление гармонических составляющих [1-3]. При этом связь между выходным напряжением  $U_{\text{ВХ}}$  преобразователя и его входным напряжением  $U_{\text{ВЫХ}}$  может быть определена через коммутационную функцию  $U_{\text{ВЫХ}} = S \cdot U_{\text{ВХ}}$ , где  $S = 1$  на интервале проводимости коммутатора и  $S = 0$ , когда коммутатор разомкнут. Для обеспечения высокого качества выходного напряжения ИП целесообразно использовать методы комбинированного регулирования [1, 4]. Такое регулирование предполагает наличие двух контуров регулирования: по отклонению и по возмущению. Основными возмущениями для преобразователей постоянного напряжения являются нестабильность входного напряжения и его низкочастотные пульсации, которые не полностью подавляются входным фильтром и не компенсируются регулятором по отклонению в силу инерционности соответствующей обратной связи.

Для обеспечения инвариантности выходного напряжения ИП к изменениям входного напряжения в свое время были разработаны аналоговые системы управления вертикального типа. Поскольку среднее значение коммутационной функции в таких системах определяется выражением  $S = u_{\text{У}} / U_{\text{МОП}}$ , где  $u_{\text{У}}$  – напряжение управления,  $U_{\text{МОП}}$  – амплитуда опорного пилообразного напряжения, то очевидно, что для решения задачи инвариантности достаточно ввести в коммутационную функцию множитель  $1/U_{\text{ВХ}}$ . Первоначально для реализации обратной пропорциональной зависимости между входным напряжением и напряжением управления использовались узлы гиперболической нелинейности [5, 6]. Основными недостатками этих узлов являлось то, что они не обеспечивали инвариантности коэффициента усиления отрицательной обратной связи к изменениям входного напряжения. Кроме того, с повышением скорости изменения входного напряжения увеличивалась погрешность формирования выходного сигнала узла, что было обусловлено инерционностью его выходного фильтра [7].

Устранить указанные недостатки удалось путем применения аналоговых перемножителей (делителей) сигналов [8]. Поскольку коммутационная функция определяется двумя переменными, то условия инвариантности могут быть достигнуты путем деления напряжения управления на сигнал, пропорциональный входному напряжению [9], либо – путем умножения на этот сигнал опорного пилообразного напряжения. Второй вариант был обеспечен аналогово-цифровой системой управления, где в качестве перемножителя использовался ЦАП, а опорный сигнал формировался счетчиком, суммирующим тактовые импульсы [10]. В последующем были разработаны системы, реализующие принципы прямого микропроцессорного управления и обеспечивающие инвариантность выходного напряжения ИП к изменениям его входного напряжения.

Цель настоящей работы состояла в анализе регулировочных характеристик импульсных преобразователей с широтно-импульсным методом регулирования постоянного напряжения и микропроцессорными системами импульсного управления, содержащими регуляторы по входному возмущению различных типов.

Схема ИП постоянного напряжения с микропроцессорной системой импульсного управления (МПСИУ) и регулятором по входному возмущению (РВВ) первого типа представлена на рис. 1. Управляющее воздействие  $N$  формируется здесь с учетом сигнала задания  $Y_3$  и сигнала обратной связи по отклонению  $Y_{\text{ОСО}}$  выходного параметра нагрузки  $Z_{\text{Н}}$  в виде некоторой функции  $N = F_1(Y_3, Y_{\text{ОСО}})$ . В работе [11] было показано, что для компенсации входных возмущений достаточно входное напряжение  $U_{\text{ВХ}}$  с помощью датчика напряжения (ДН) и АЦП преобразовать в цифровой код  $Y_{\text{ОСВ}}$  сигнала обратной связи по возмущению, а затем использовать этот сигнал для корректировки управляющего воздействия по выражению

$$M_1 = N / Y_{\text{ОСВ}} \quad (1)$$

В схеме ИП, приведенной на рис. 1, выходной сигнал датчика входного напряжения ДН будет определяться выражением

$$U_{\text{Д1}} = k_1 U_{\text{ВХ}} \quad (2)$$

где  $k_1$  – коэффициент передачи датчика входного напряжения, значение которого может быть однозначно определено при номинальном значении входного напряжения  $U_{\text{ВХ(Н)}}$

$$k_1 = U_{\text{Д1(Н)}} / U_{\text{ВХ(Н)}} \quad (3)$$

При этом на выходе АЦП будет формироваться цифровой код числа  $Y_{\text{ОСВ}}$ , значение которого определим как

$$Y_{\text{ОСВ}} = k_{\text{АЦП}} U_{\text{Д1}} \quad (4)$$

где  $k_{\text{АЦП}}$  – коэффициент преобразований АЦП, который при номинальном входном напряжении будет определяться выражением

© Кипенский А.В., Король Е.И., 2015

$$k_{АЦП} = Y_{ОСВ(H)} / U_{Д1(H)}, \quad (5)$$

а значение числа  $Y_{ОСВ(H)}$  в этом случае найдем как отношение

$$Y_{ОСВ(H)} = N_{(H)} / M_{1(H)}. \quad (6)$$

Поскольку при номинальном входном напряжении корректировка управляющего воздействия не требуется, т.е. можно положить  $N_{(H)} = M_{1(H)}$ , следовательно,  $Y_{ОСВ(H)} = 1$ .

С учетом принципа формирования сигнала обратной связи по возмущению, управляющее воздействие после корректировки может быть представлено в виде

$$M_1 = N / k_1 k_{АЦП} U_{ВХ} = \frac{N}{\frac{U_{Д1(H)}}{U_{ВХ(H)}} \cdot \frac{1}{U_{Д1(H)}} \cdot U_{ВХ}} = \frac{NU_{ВХ(H)}}{U_{ВХ}} \quad 7$$

Анализ регулировочной характеристики рассмотренного ИП, выполним графоаналитическим методом с использованием координатной плоскости, особенностью которой является то, что по всем осям квадрантов устанавливают такие же знаки, как и в первом квадранте (рис. 2). Для начала выражение (7) представим в относительных единицах

$$M_1^* = M_1 / M_{1MAX}, \quad N^* = N / N_{MAX},$$

где  $N_{MAX} = M_{1MAX} = 2^n - 1$ ,  $n$  – разрядность чисел  $N$  и  $M_1$ , а  $U_{ВХ}^* = U_{ВХ} / U_{ВХ(H)}$ , а полученную зависимость

$$M_1^* = N^* / U_{ВХ}^*, \quad (8)$$

построим в четвертом квадранте координатной плоскости при трех значениях  $U_{ВХ}^*$  (рис. 2, совокупность прямых 4).

Для формирования управляющих импульсов  $u_y$  в МПСИУ используется цифро-импульсный преобразователь (ЦИП) и широтно-импульсным законом преобразования (ШИП), который реализует метод регулируемого среза [12]. Длительность управляющих импульсов при этом будет определяться выражением

$$\tau_{y1} = M_1 \cdot T_{ТИ1}, \quad (9)$$

где  $T_{ТИ1} = T_M / (2^n - 1)$  период следования тактовых импульсов, используемых для выполнения ЦИ-преобразований,  $T_M$  – период модуляции выходного напряжения ИП.

С учетом (9) выражение для среднего значения коммутационной функции будет иметь вид

$$S_1 = M_1 \cdot T_{ТИ1} / T_M. \quad (10)$$

Используя относительные единицы, выражение (10) перепишем в виде

$$S_1 = M_1^*. \quad (11)$$

и представим полученную зависимость прямой 3 в третьем квадранте координатной плоскости (рис. 2).

Зависимость выходного напряжения ИП от среднего значения коммутационной функции имеет вид

$$U_{ВЫХ1} = S_1 U_{ВХ}. \quad (12)$$

Во втором квадранте координатной плоскости для трех значений входного напряжения строим зависимость (12), представленную в относительных единицах

$$U_{ВЫХ1}^* = S_1 U_{ВХ}^*, \quad (13)$$

где  $U_{ВЫХ1}^* = U_{ВЫХ1} / U_{ВЫХ1MAX(H)}$ ;  $U_{ВЫХ1MAX(H)} = U_{ВХ(H)}$ .

Для получения в графическом виде регулировочной характеристики ИП с РВВ первого типа совместим в первом квадранте координатной плоскости (рис. 2) абсциссы прямой 4 и соответствующие ординаты прямых 2. Из полученного графика видно, что регулировочная характеристика ИП оказывается линейной, возрастающей и инвариантной к изменениям входного напряжения.

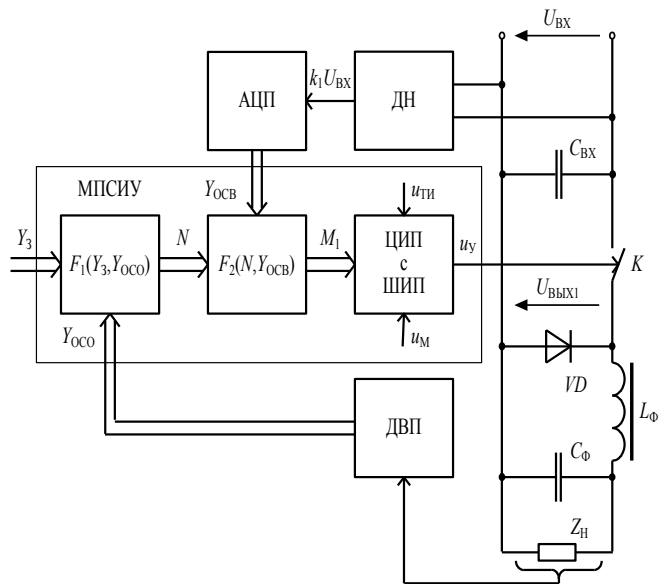


Рис. 1 Импульсный преобразователь постоянного напряжения с микропроцессорной системой импульсного управления и регулятором по входному возмущению первого типа

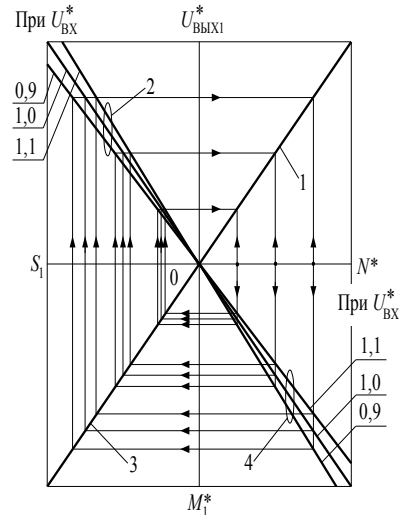


Рис. 2 Анализ регулировочных характеристик импульсного преобразователя постоянного напряжения с регулятором по входному возмущению первого типа

Аналитическое выражение для прямой 1 может быть получено из выражения для прямой 3 (см. выражение (11)), поскольку прямая в первом квадранте координатной плоскости может быть получена из прямой в третьем квадранте, если ее повернуть относительно начала координат (точка 0) на угол  $\pi$ . Переходные уравнения при этом будут иметь вид

$$S_1 = N^*, M_1^* = U_{ВЫХ1}^* \quad (14)$$

а выражение для регулировочной характеристики ИП может быть записано как

$$U_{ВЫХ1}^* = N^* \quad (15)$$

Последнее выражение можно переписать в абсолютных единицах

$$U_{ВЫХ1} = U_{ВЫХ\ MAX(H)} N / N_{MAX} = U_{ВХ(H)} N / N_{MAX} \quad (16)$$

В ИП с РВВ второго типа инвариантность регулировочной характеристики обеспечивается за счет тактирования ЦИП с ШИП импульсами, следующими с частотой, пропорциональной входному напряжению [13]. Для обеспечения такого технического решения достаточно выходной сигнал ДН подключить ко входу преобразователя напряжение-частота (ПНЧ), а выход последнего – к тактовому входу ЦИП с ШИП (см. рис. 3). При этом следует установить соотношение  $M_2 = N$  (или в относительных единицах  $M_2^* = N^*$ ).

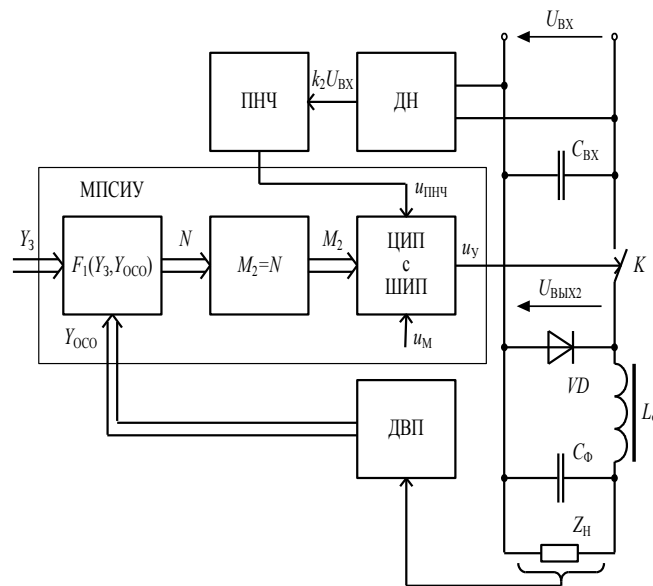


Рис. 3 Импульсный преобразователь постоянного напряжения с микропроцессорной системой импульсного управления и регулятором по входному возмущению второго типа

В приведенной схеме напряжение на выходе датчика входного напряжения будет определяться выражением

$$U_{Д2} = k_2 U_{ВХ} \quad (17)$$

где  $k_2$  – коэффициент передачи датчика входного напряжения, значение которого при номинальном входном напряжении  $U_{ВХ(H)}$  может быть определено как

$$k_2 = U_{Д2(H)} / U_{ВХ(H)} \quad (18)$$

При этом выражение для определения частоты следования импульсов на выходе ПНЧ будет иметь вид

$$f_{ПНЧ} = k_{ПНЧ} U_{Д2} \quad (19)$$

где  $k_{ПНЧ}$  – коэффициент преобразований ПНЧ, значение которого также может быть определено при номинальном входном напряжении

$$k_{ПНЧ} = f_{ПНЧ(H)} / U_{Д2(H)} \quad (20)$$

$f_{ПНЧ(H)}$  – частота выходного сигнала ПНЧ, которая при номинальном значении входного сигнала должна определяться выражением

$$f_{ПНЧ(H)} = (2^n - 1) / T_M \quad (21)$$

С учетом (21) выражение (20) можно переписать в виде

$$k_{ПНЧ} = (2^n - 1) / T_M U_{Д2(H)} \quad (22)$$

Длительность управляющих импульсов, формируемых ЦИП с ШИП при указанном способе его тактирования (т.е. с учетом реальных отклонений входного напряжения  $U_{ВХ}$ ), будет определяться выражением

$$\tau_{y2} = M_2 T_{\text{ПНЧ}} = \frac{M_2}{k_2 \cdot k_{\text{ПНЧ}} \cdot U_{\text{ВХ}}} \quad (23)$$

Для анализа регулировочной характеристики ИП в четвертом квадранте координатной плоскости (рис. 4) построим в относительных единицах зависимость числа  $M_2$  от  $N$ , которая имеет вид прямой линии 4.

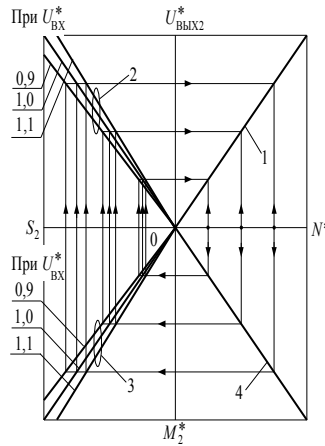


Рис. 4 Анализ регулировочных характеристик импульсного преобразователя постоянного напряжения с регулятором по входному возмущению второго типа

Зависимость среднего значения коммутационной функции от числа  $M_2$  с учетом принципа формирования длительности управляющих импульсов (см. выражение (23)), будет иметь вид

$$S_2 = \frac{M_2}{T_M \cdot k_2 \cdot k_{\text{ПНЧ}} \cdot U_{\text{ВХ}}} \quad (24)$$

или в относительных единицах

$$S_2 = \frac{M_2^* (2^n - 1)}{T_M \cdot \frac{U_{\text{Д2(Н)}}}{U_{\text{ВХ(Н)}}} \cdot (2^n - 1) \cdot U_{\text{ВХ}}^* \cdot U_{\text{ВХ(Н)}}} = \frac{M_2^*}{U_{\text{ВХ}}^*} \quad (25)$$

Полученную зависимость представим в графическом виде в третьем квадранте координатной плоскости при трех значениях входного напряжения (см. рис. 4, совокупность прямых 3).

Далее во втором квадранте координатной плоскости при трех значениях входного напряжения строим зависимость выходного напряжения ИП от среднего значения коммутационной функции (см. рис. 4, прямые 2), которая имеет вид

$$U_{\text{ВЫХ2}} = S_2 \cdot U_{\text{ВХ}} \quad (26)$$

или в относительных единицах

$$U_{\text{ВЫХ2}}^* = S_2 \cdot U_{\text{ВХ}}^* \quad (27)$$

Для получения в графическом виде регулировочной характеристики ИП с РВВ второго типа, совместим в первом квадранте координатной плоскости (рис. 4) абсциссы прямой 4 и соответствующие ординаты прямых 2. Из полученного графика видно, что регулировочная характеристика преобразователя оказывается линейной, возрастающей и инвариантной к изменениям входного напряжения.

Аналитическое выражение для прямой 1 может быть получено из выражения для прямой 4, поскольку прямая в первом квадранте координатной плоскости может быть получена из прямой в четвертом квадранте, если ее повернуть относительно оси  $ON^*$  на угол  $\pi$ . Переходное уравнение при этом будет иметь вид

$$M_2^* = U_{\text{ВЫХ2}}^* \quad (28)$$

а выражение для регулировочной характеристики ИП может быть записано как

$$U_{\text{ВЫХ2}}^* = N^* \quad (29)$$

или в абсолютных единицах

$$U_{\text{ВЫХ2}} = U_{\text{ВЫХ MAX(Н)}} \cdot N / N_{\text{MAX}} = U_{\text{ВХ(Н)}} \cdot N / N_{\text{MAX}} \quad (30)$$

Анализ двух различных приемов компенсации влияния возмущений со стороны входа импульсных преобразователей на их выходное напряжение показал, что оба эти приема обеспечивают инвариантность регулировочных характеристик к таким возмущениям.

С точки зрения программно-аппаратных затрат, второй тип регулятора по входному возмущению оказывается более предпочтительным.

Предварительный анализ динамических свойств импульсных преобразователей (реакция на быстрые изменения входного напряжения) также подтверждает преимущества регулятора по входному возмущению второго типа.

**Список литературы:** 1. Замкнутые системы преобразования электрической энергии / [под ред. В.Я. Жуйкова]. – К.: Техника; Братислава: Альфа, 1989. – 320 с. 2. Быстродействующие электроприводы постоянного тока с широтно-импульсными преобразователями / М.Е. Гольц, А.Б. Гудзенко, В.М. Остреров [и др.]. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 184 с. 3. Мкртчян Ж.А. Основы построения устройств электропитания ЭВМ / Ж.А. Мкртчян. – М.: Радио и связь, 1990. – 208 с. 4. Источники вторичного электропитания / [под ред. Ю.И. Конева]. – М.: Радио и связь, 1983. – 280 с. 5. А.с. 957190 СССР, МКИ 3 G 05 F 1/56. Способ импульсной стабилизации напряжения постоянного тока / Ю.П. Гончаров, С.Н. Иванов, Н.И. Лазарев [и др.]. – Опубл. 7.09.82. Бюл. № 3. 6. Иванов С.Н. Узел гиперболической нелинейности импульсного стабилизатора / С.Н. Иванов, А.А. Пономаренко, Г.И. Онищенко // Вестник Харьк. политехн. ин-та, серия «Электромашиностроение и автоматизация промышленных предприятий». – Харьков: «Вища школа», 1988. – № 255. – Вып. 13. – С. 86–89. 7. Определение частоты модуляции в узле параметрической компенсации импульсного стабилизатора напряжения / Ю.П. Гончаров, С.Н. Иванов, П.В. Натаров [и др.]. // Вестник Харьк. политехн. ин-та, серия «Электромашиностроение и автоматизация промышленных предприятий». – Харьков: «Вища школа», 1982. – № 191. – Вып. 7. – С. 51–53. 8. Система управления источником электропитания, работающим по методу широтно-импульсной модуляции / Е.И. Сокол, А.В. Кипенский, В.А. Шеенко [и др.]. // Проблемы электромагнитной совместимости силовых полупроводниковых преобразователей: Тез. докл. Третьего Всесоюз. науч.-техн. совещания. – Таллин: АН ЭССР, 1986. – Ч. 3. – С. 98–99. 9. А.с. 1377836 СССР, МКИ 4 G 05 F 1/56. Способ управления преобразователем постоянного напряжения в постоянное / Ю.П. Гончаров, Н.А. Тимченко, А.В. Кипенский [и др.]. – Опубл. 29.02.88. Бюл. № 8. 10. Кипенский А.В. Широтно-импульсный преобразователь с аналогово-цифровым регулятором по входному возмущению / А.В. Кипенский // Вестник Харьк. политехн. ин-та, серия «Электромашиностроение и автоматизация промышленных предприятий». – Харьков: ХПИ, 1992. – № 5. – Вып. 17. – С. 72–76. 11. Долбня В.Т. Использование графоаналитического метода для синтеза на координатной плоскости регулировочных характеристик полупроводниковых преобразователей электроэнергии / В.Т. Долбня, А.В. Кипенский, Н.И. Кубышкина // Электротехника. – М., 2004. – № 6. – С. 45–49. 12. Кипенский А.В. Цифро-импульсные преобразователи с широтно-импульсным законом преобразования / А.В. Кипенский, А.А. Лашин // Вестник Харьк. гос. политехн. ун-та. – Харьков: ХГПУ, 1999. – Вып. 32. – С. 29–38. 13. Патент 1742964 РФ, МКИ 5 H02 M 7/12. Способ управления полупроводниковым преобразователем постоянного напряжения / А.В. Кипенский, А.В. Кипенская. – Опубл. 23.06.92. Бюл. № 23.

**Bibliography (transliterated):** 1. Zamknutyie sistemy preobrazovaniya jelektricheskoy jenerгии / [pod red. V.Ja. Zhujkova]. – K.: Tjehnika; Bratislava: Al'fa, 1989. – 320 p. 2. Bystrodejstvujushhie jelektroprivody postojannogo toka s shirotno-impul'snymi preobrazovateljami / M.E. Gol'c, A.B. Gudzenko, V.M. Ostrerov [i dr.]. – Moscow.: Jenergoatomizdat, 1986. – 184 p. 3. Mkrтчjan Zh.A. Osnovy postroeniya ustrojstv jelektropitanija JeVM / Zh.A. Mkrтчjan. – Moscow: Radio i svjaz', 1990. – 208 p. 4. Istochniki vtorichnogo jelektropitanija / [pod. red. Ju.I. Koneva]. – Moscow: Radio i svjaz', 1983. – 280 p. 5. A.s. 957190 SSSR, MKI 3 G 05 F 1/56. Sposob impul'snoj stabilizacii naprjazhenija postojannogo toka / Ju.P. Goncharov, S.N. Ivanov, N.I. Lazarev [i dr.]. – Opubl. 7.09.82. Bjul № 3. 6. Ivanov S.N. Uzel giperbolicheskoy nelinejnosti impul'snogo stabilizatora / S.N. Ivanov, A.A. Ponomarenko, G.I. Onishhenko // Vestnik Khark. politehn. in-ta, serija «Jelektromashinostroenie i avtomatizacija promyshlennyh predpriyatij». – Kharkiv: «Vishha shkola», 1988. – № 255. – Issue 13. – P. 86–89. 7. Opredelenie chastoty moduljacii v uzle parametricheskoy kompensacii impul'snogo stabilizatora naprjazhenija / Ju.P. Goncharov, S.N. Ivanov, P.V. Natarov [i dr.]. // Vestnik Khark. politehn. in-ta, serija «Jelektromashinostroenie i avtomatizacija promyshlennyh predpriyatij». – Kharkiv: «Vishha shkola», 1982. – № 191. – Issue 7. – P. 51–53. 8. Sistema upravlenija istochnikom jelektropitanija, rabotajushhim po metodu shirotno-impul'snoj moduljacii / E.I. Sokol, A.V. Kipenskij, V.A. Sheenko [i dr.]. // Problemy jelektromagnitnoj sovmestimosti silovyh poluprovodnikovovyh preobrazovatelej: Tez. dokl. Tret'ego Vsesojuz. nauch.-tehn. soveshhanija. – Tallin: AN JeSSR, 1986. – Part 3. – P. 98–99. 9. A.s. 1377836 SSSR, MKI 4 G 05 F 1/56. Sposob upravlenija preobrazovatelem postojannogo naprjazhenija v postojannoe / Ju.P. Goncharov, N.A. Timchenko, A.V. Kipenskij [i dr.]. – Opubl. 29.02.88. Bjul. № 8. 10. Kipenskij A.V. Shirotno-impul'snyj preobrazovatel' s analogovo-cifrovym reguljatorom po vhodnomu vozmushheniju / A.V. Kipenskij // Vestnik Khark. politehn. in-ta, serija «Jelektromashinostroenie i avtomatizacija promyshlennyh predpriyatij». – Kharkiv: HPI, 1992. – № 5. – Issue. 17. – P. 72–76. 11. Dolbnja V.T. Ispol'zovanie grafoanaliticheskogo metoda dlja sinteza na koordinatnoj ploskosti regulirovochnyh harakteristik poluprovodnikovovyh preobrazovatelej jelektrojenerгии / V.T. Dolbnja, A.V. Kipenskij, N.I. Kubyshkina // Jelektrotehnika. – Moscow, 2004. – № 6. – P. 45–49. 12. Kipenskij A.V. Cifro-impul'snye preobrazovateli s shirotno-impul'snym zakonom preobrazovaniya / A.V. Kipenskij, A.A. Lashin // Vestnik Khark. gos. politehn. un-ta. – Kharkiv: HGPU, 1999. – Issue. 32. – P. 29–38. 13. Patent 1742964 RF, MKI 5 NO2 M 7/12. Sposob upravlenija poluprovodnikovym preobrazovatelem postojannogo naprjazhenija / A.V. Kipenskij, A.V. Kipenskaja. – Opubl. 23.06.92. Bjul. № 23.

Поступила (received) 24.08.2015