

УДК 621.314.54: 622.276.054 – 043.61

**И.В. Милюша, А.Д. Коротаев**Пермский национальный исследовательский политехнический университет,  
Пермь, Россия**РАЗРАБОТКА ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ КАСКАДНОГО  
ТИПА ДЛЯ ДВИГАТЕЛЯ ПОГРУЖНОГО НАСОСА**

Для решения данных проблем рассмотрен каскадный преобразователь частоты, состоящий из трехфазного многообмоточного трансформатора и силовых инверторов на IGBT-транзисторах. Описано устройство силовой ячейки. Представлен один из вариантов формирования управляющего сигнала на IGBT-транзисторах, благодаря которому удается получить практически идеальную синусоиду на выходе преобразователя частоты. Данный принцип описан на примере мостового однофазного инвертора. Приведены структурная схема системы управления и диаграмма включения пар транзисторов. Приведена математическая модель системы электропривода «преобразователь частоты – двигатель», выполненная в *Simulink*. Приведено описание всех ключевых блоков модели. Выполнен гармонический анализ с помощью *Powergui*. На основе данного анализа был сделан вывод о целесообразности использования каскадного преобразователя частоты с цилиндрическими линейными вентильными двигателями погружных насосов.

**Ключевые слова:** преобразователь частоты, IGBT-транзисторы, многообмоточный трансформатор, ШИМ, система электропривода, гармоники, дебет, скважина, математическая модель, гармонический анализ, цилиндрический линейный вентильный двигатель.

**I.V. Miliusha, A.D. Korotaev**

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

**THE DEVELOPMENT OF CASCADE CONVERTER  
OF FREQUENCY FOR SUBMERSIBLE PUMP ENGINE**

To solve these problems cascade converter of frequency is considered. It consists of triple phase multi-winding transformer and power invertors built on IGBT transistors. The structure of power cell has been described. One of the ways to form the controlling signal on IGBT transistors which allows getting practically ideal sinusoid on the output of the frequency converter, is presented. This principle has been described on the example of a bridge single-phase inverter. The structural scheme of management system and the diagram of transistor couples connection, have been given. The mathematical model of frequency converter and engine coupling developed in *Simulink*, has been presented. All key blocks of the model have been also described. The harmonic analysis has been carried out on "Powergui". On the basis of the analysis mentioned, the conclusion on usage appropriateness of cascade converter of frequency along with cylindrical linear valve engines of submersible pumps, has been made.

**Keywords:** frequency transformer, IGBT transistors, multi-winding transformer, Pulse-width modulation (pWM), electric drive system, harmonics, debet, well, mathematical model, harmonic analysis, cylindrical linear valve engine.

Для увеличения срока эксплуатации скважины требуется регулирование скорости добычи в зависимости от дебета скважины. Более того требуется поддерживать номинальное напряжение на обкладках двигателя на большой глубине. Также нужно исключить паразитные гармоники, засоряющие питающую сеть.

Для решения данных проблем предлагается использовать каскадный преобразователь частоты [1]. Преобразователь состоит из высоковольтного трехфазного силового трансформатора, первичная обмотка которого соединена по схеме «звезда» с линейным напряжением 6000 В, и 54 вторичных обмоток, соединенных группами по схеме «треугольник» и смещенных по фазе напряжения на 120 град относительно друг друга. Всего в трансформаторе имеется 18 групп независимых источников питания, по 6 в каждой фазе для питания 18 однофазных ячеек инверторов: фаза А (A1–A6); фаза В (B1–B6); фаза С (C1–C6) (рис. 1). Группа соединения многообмоточного трансформатора – звезда/треугольник, что позволяет снизить величину нечетных гармоник.

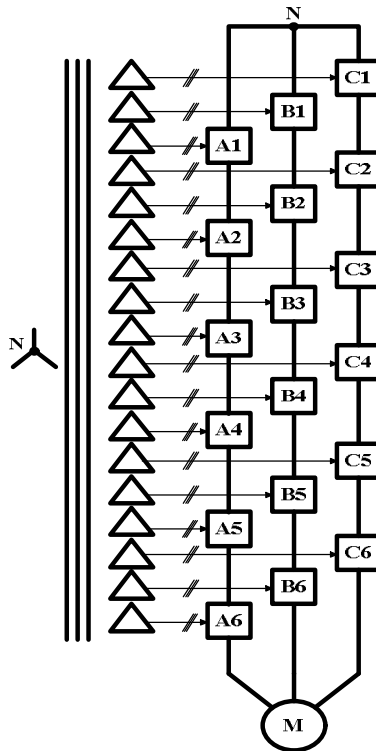


Рис. 1. Силовая схема системы электропривода «каскадный преобразователь частоты – двигатель»

При наличии 6 групп независимых источников максимальное напряжение отдельной ячейки составляет 575 В. Последовательное соединение 6 ячеек с максимальным выходным напряжением 575 В позволяет получить максимальное действующее фазное напряжение 3450 В, а линейное – 6000 В. С помощью системы управления фазы выходного напряжения отдельных ячеек сдвинуты на 10 град, что обеспечивает взаимную компенсацию высших гармоник. Регулирование величины выходного напряжения и частоты производится синхронизированно широтно-импульсной модуляцией (далее – ШИМ) напряжения в каждой ячейке. Сдвиг напряжения в отдельных ячейках каждой фазы позволяет получить многопульсную схему выпрямления преобразователя в целом, что позволяет уменьшить влияние преобразователя на питающую сеть.

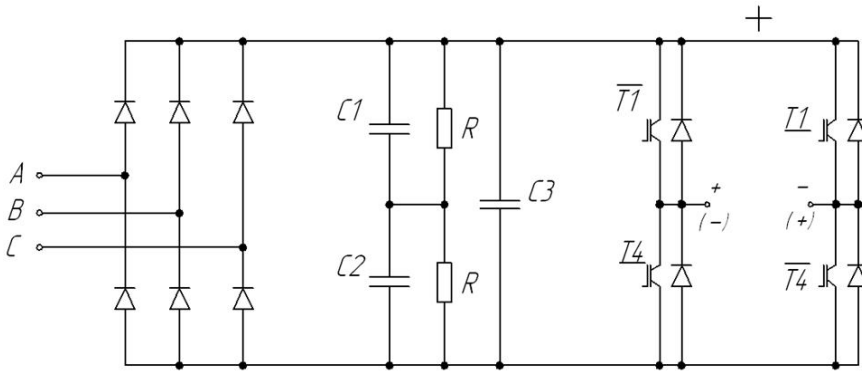


Рис. 2. Силовая ячейка

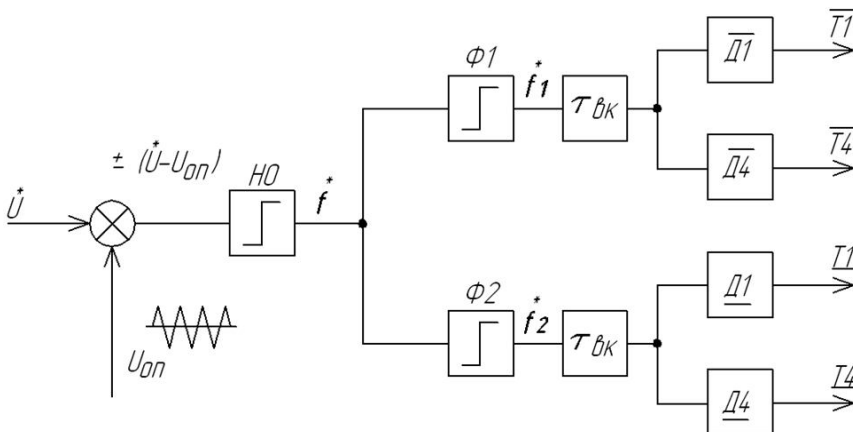


Рис. 3. Структурная схема системы управления

В результате данного принципа построения схемы ток и напряжение на входе и выходе преобразователя имеют практически синусоидальную форму.

Силовая ячейка имеет трехфазный выпрямитель, конденсаторный фильтр и однофазный инвертор на IGBT-транзисторах. Включение транзисторов  $\overline{T1}$ ,  $\overline{T4}$ , находящихся в разных плечах однофазной мостовой схемы, будем принимать за прямое включение. При этом полярность выходного напряжения на рис. 6. обозначена «+», «-», в этом случае включение транзисторов  $\underline{T1}$ ,  $\underline{T4}$  будет являться инверсным, а полярность выходного напряжения обозначена на схеме (+) и (-). Выходное напряжение при инверсном включении направлено противоположно напряжению при прямом включении. Между включением одной пары транзисторов и выключением другой должна быть обеспечена пауза  $\tau_{вк}$ , учитывающая время восстановления запирающих свойств транзисторов.

Принцип данного варианта ШИМ поясним на примере мостового однофазного инвертора (рис. 2). Структурная схема системы управления инвертора с этим вариантом ШИМ показана на рис. 3.

Система управления транзисторными ключами содержит в своем составе нуль-орган (НО), формирователи ( $\Phi1$ ,  $\Phi2$ ), блок, обеспечивающий паузу на включение транзисторных пар ( $\tau_{вк}$ ), и драйверы  $\overline{D1}$ ,  $\overline{D4}$ ,  $\underline{D1}$ ,  $\underline{D4}$ , формирующие сигнал для открытия и закрытия транзисторов. На входе нуль-органа сравниваются задающий сигнал  $U^*$  (эти сигналы здесь и далее будем обозначать с индексом «звездочка») и пилообразное опорное напряжение  $U_{оп}$ . Если  $U^* > U_{оп}$ , т.е. разность  $(U^* - U_{оп})$  положительна, то сигнал на выходе (НО) положителен и на выходе формирователя  $\Phi1$  существует положительный сигнал  $f_1^*$ , который с паузой  $\tau_{вк}$  включает транзисторы  $\overline{T1}$  и  $\overline{T4}$ , и на выходе инвертора появится положительное напряжение (рис. 4).

При отрицательной разности  $(U^* - U_{оп})$ , когда  $U^* < U_{оп}$ , пара транзисторов  $\overline{T1}$  и  $\overline{T4}$  закрывается без выдержки времени, и на выходе  $\Phi1$  будет действовать отрицательный сигнал  $f_1^*$ , при наличии которого

драйверы  $\overline{Д1}$ ,  $\overline{Д4}$  формируют небольшой отрицательный сигнал 5 В, закрывающий транзисторы  $\overline{T1}$  и  $\overline{T4}$ . Одновременно с этим на выходе Ф2 появится положительный сигнал  $f_2^*$ , который с выдержкой времени  $\tau_{вк}$  подается на драйверы  $\underline{Д1}$ ,  $\underline{Д4}$ , и инверсная пара транзисторов  $\underline{T1}$ ,  $\underline{T4}$  включается, а на выходе инвертора появляется отрицательное напряжение, потенциалы которого на рис. 2 обозначены в скобках.

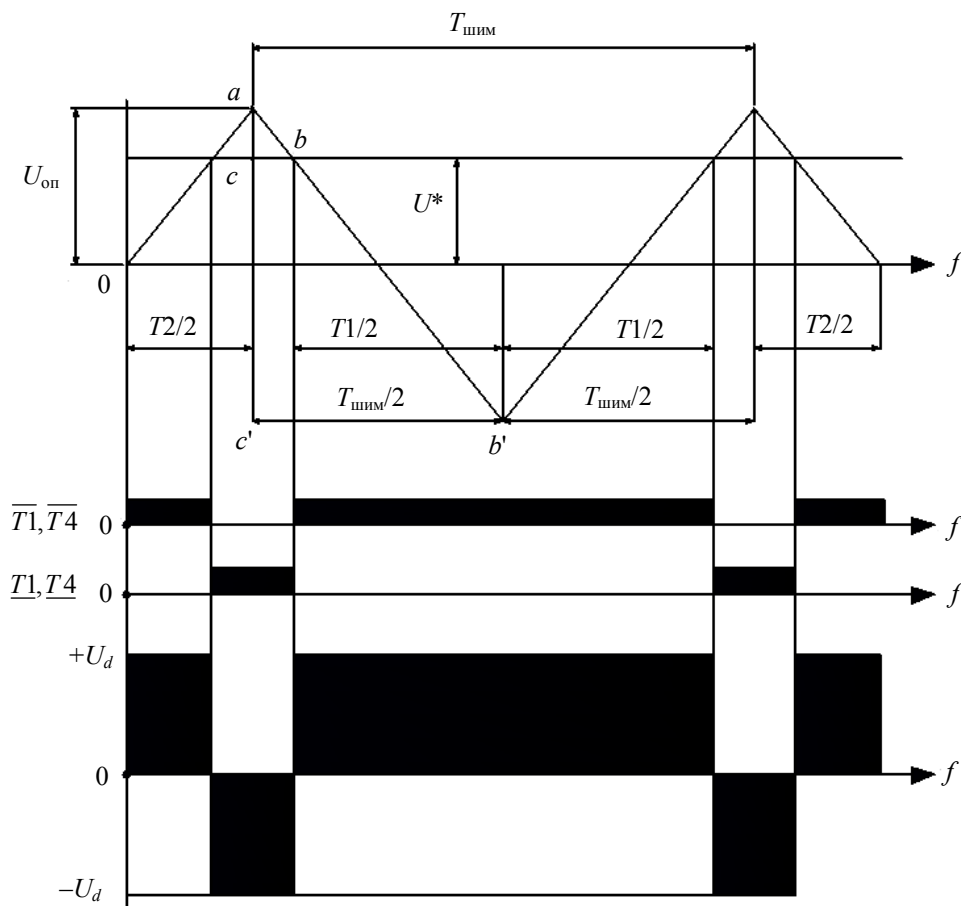


Рис. 4. Диаграмма включения пар транзисторов

На рис. 4 показаны симметричное пилообразное опорное напряжение с максимальным значением  $U_{опм}$  и напряжение задания  $U^*$ , которое предполагается постоянным в течение периода  $T_{ШИМ}$  опорного

напряжения. В нижней части рис. 4 показаны состояния транзисторных пар  $\overline{T1}$ ,  $\overline{T4}$  и  $T1$ ,  $T4$  и форма напряжения на выходе инвертора  $U$ . Среднее значение напряжение на выходе определяется следующим образом:

$$U = U_d \left( 1 - \frac{2 \cdot T2}{T_{\text{ШИМ}}} \right), \quad (1)$$

$$T_{\text{ШИМ}} = T1 + T2 = \frac{1}{f_{\text{ШИМ}}}, \quad (2)$$

где  $T1$ ,  $T2$  – интервалы замкнутого состояния транзисторных пар  $\overline{T1}$ ,  $\overline{T2}$  и  $T1$ ,  $T2$  соответственно;  $T_{\text{ШИМ}}$  – период ШИМ,  $f_{\text{ШИМ}}$  – частота ШИМ.

Из подобия треугольников  $авс$  и  $а'в'с'$  для рабочей части характеристик инвертора, когда  $|U| < U_{\text{опт}}^*$ , может быть записано:

$$\frac{T_2}{T_{\text{ШИМ}}} = \frac{U_{\text{опт}}^* - U}{2U_{\text{опт}}^*}. \quad (3)$$

Отсюда с учетом приведенного выше выражения для  $U$  следует, что

$$U = \frac{U_d}{U_{\text{опт}}^*} U = K_u U, \quad (4)$$

где  $K_u = \frac{U_d}{U_{\text{опт}}^*}$  – передаточный коэффициент инвертора в линейной части характеристики, когда  $U < U_{\text{опт}}^*$ .

Для получения неискаженного значения напряжения на выходе инвертора задающий сигнал  $U^*$  не должен превышать максимального значения опорного напряжения  $U_{\text{опт}}^*$ , а быть несколько меньше, т.е.  $U^* < U_{\text{опт}}^*$ . На рис. 4 опорное напряжение  $U^*$  принято постоянным за период ШИМ, поэтому и на выходе инвертора мы получим постоянное среднее значение напряжения.

Если управляющий сигнал представляет собой синусоиду с частотой  $f$ , то напряжение на выходе инвертора будет представлять собой гармоническую кривую, содержащую наряду с первой гармоникой, ко-

торая имеет частоту управляющего сигнала  $U^*$ , и ряд гармоник более высокого порядка. Таким образом, если амплитуда  $U^*$  не превышает значения  $U_{\text{опт}}$ , то первая гармоника напряжения на выходе инвертора в определенном масштабе повторяет управляющий сигнал. Изменение его частоты приводит к изменению частоты на выходе инвертора. Изменение амплитуды управляющего сигнала при неизменной частоте будет приводить к изменению соотношения длительности положительных и отрицательных импульсов напряжения на выходе за каждый период частоты ШИМ.

Эти диаграммы работы преобразователя реализует блок-схема управления транзисторами, показанная на рис. 3.

Математическая модель каскадного преобразователя частоты реализована в среде *MatLab* в пакете *Simulink* (рис. 5).

Для упрощения модели вместо многообмоточного трансформатора напряжения и блоков выпрямителей напряжения для питания отдельных ячеек взяты источники постоянного напряжения. Величина напряжения взята 575 В.

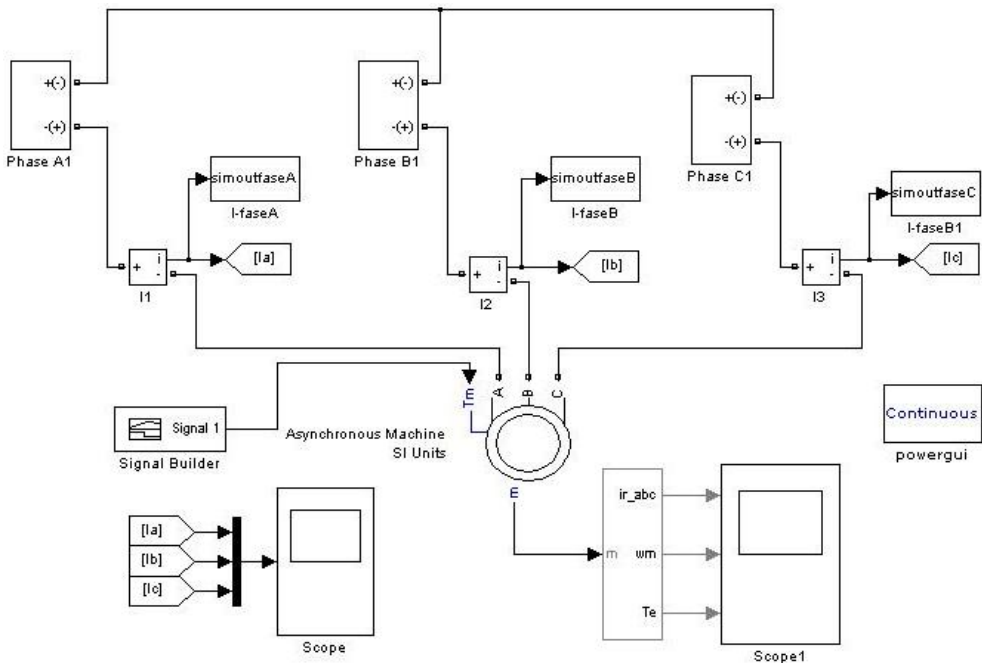


Рис. 5. Общий вид виртуальной модели

В блоках *PhaseA1*, *Phase B1*, *Phase C1* находятся непосредственно сами ячейки инверторов фаз *A*, *B*, *C* соответственно.

Блоки  $UmSin(\omega t) - UmSin(\omega t)5$  предназначены для формирования управляющего сигнала заданной частоты  $U^*$  (рис. 6). Для этого задаются величина необходимой частоты, амплитуда напряжения и начальная фаза.

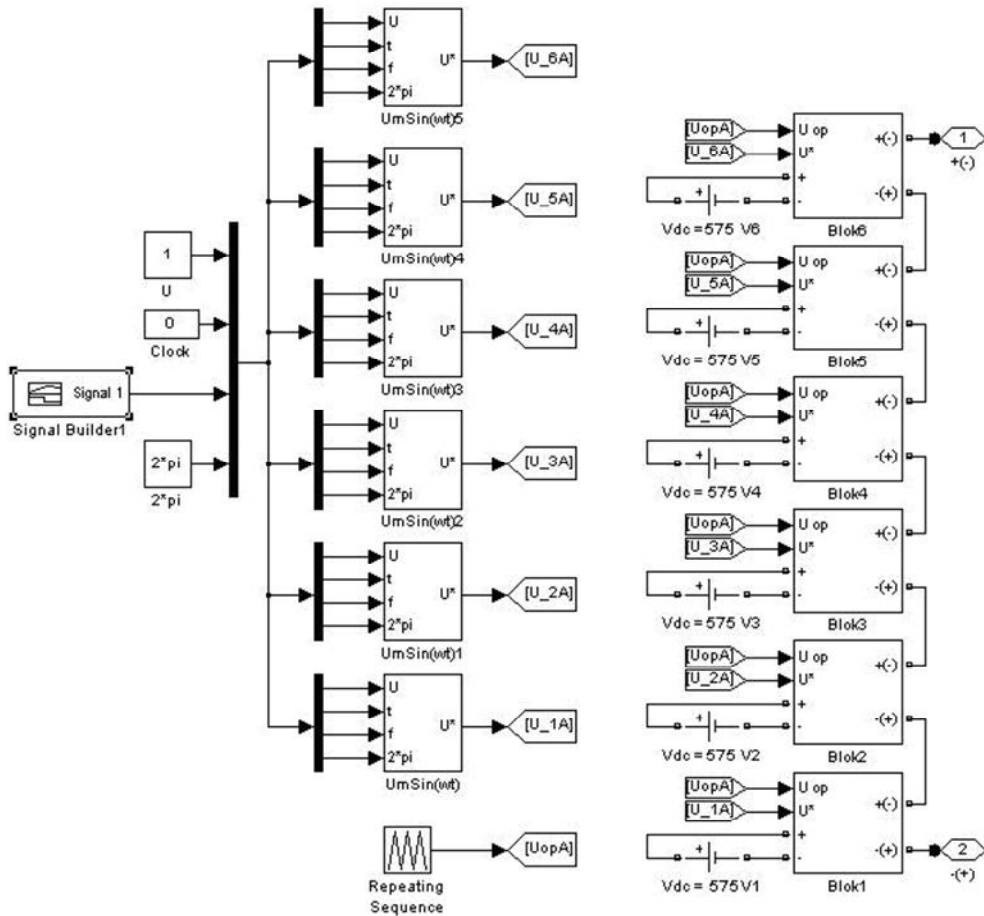


Рис. 6. Ячейки инверторов фаз *A*, *B*, *C*

На выходе всех блоков  $UmSin(\omega t) - UmSin(\omega t)5$  синусоидальное опорное напряжение будет одинаковым и отличается только начальной фазой, которая задается в блоке *Phase*.

Блок *RepeatingSequence* служит для формирования опорного пилообразного напряжения заданной частоты. В нашем случае эта частота



та составляет 3 КГц. На все ячейки подается одинаковое опорное пилообразное напряжение.

Блоки *Blok1–Blok6* являются непосредственно самими инверторами. Они состоят из IGBT-транзисторов, на которые подается постоянное напряжение системы управления транзисторами.

С помощью инструмента *Powergui* был проведен гармонический анализ тока на выходе из преобразователя частоты, в ходе которого были получены следующие результаты (рис. 7). Значит, при данной реализации ШИМ гармоническое искажение составляет всего 0,86 %, что позволяет получить на выходе преобразователя почти идеальную синусоиду [2].

Таким образом, в данной работе представлен каскадный преобразователь частоты с его возможностями, изложен один из способов формирования управляющего сигнала и проведен гармонический анализ выходного тока. Данное исследование позволяет судить о целесообразности использования каскадных преобразователей частоты для двигателей погружного насоса.

### **Библиографический список**

1. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным управлением. – М.: Академия, 2006. – 272 с.
2. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MatLab, SimPowerSystems и Simulink. – 1-е изд. – М.: ДМК Пресс, 2007. – 288 с.

### **Сведения об авторах**

**Милюша Илья Владимирович** (Пермь, Россия) – аспирант кафедры электротехники и электромеханики Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: Iliamiliusha@gmail.com).

**Коротаев Александр Дмитриевич** (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры электротехники и электромеханики Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: lis@pstu.ru).

### **About the authors**

**Miliusha Ilya Vladimirovich** (Perm, Russian Federation) is a post-graduate student of the Department of Electrical Engineering and Electromechanics, Perm National Research Polytechnic University (614990, 29, Komsomolsky prospect, Perm, e-mail: [iliamiliusha@gmail.com](mailto:iliamiliusha@gmail.com)).

**Korotaev Alexander Dmitrievich** (Perm, Russian Federation) is PhD of Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Electrical Engineering and Electromechanics, Perm National Research Polytechnic University (614990, 29, Komsomolsky prospect, Perm, e-mail: [lis@pstu.ru](mailto:lis@pstu.ru)).

Получено 06.09.2013