

УДК 621.314.27

## РАЗРАБОТКА ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ КАСКАДНОГО ТИПА ДЛЯ ДВИГАТЕЛЯ ПОГРУЖНОГО НАСОСА

Милюша И.В., Мирзин А.М., Коротаев А.Д., Шутемов С.В.

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет (ПНИПУ)», (614000, Россия, Пермь, Комсомольский пр-т, 29-а.), e-mail: [shutemsv@yandex.ru](mailto:shutemsv@yandex.ru).*

В статье рассмотрен преобразователь частоты каскадного типа. Он необходим для питания погружного электродвигателя на большой глубине. При этом необходимо исключить паразитные гармоники. Гармоники засоряют питающую сеть и негативно влияют на изоляцию кабеля и двигателя. Регулируя скорость добычи в зависимости от дебита, можно добиться увеличения срока эксплуатации скважины. 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. Приведена структурная схема системы управления и диаграмма включения пар транзисторов. Математическая модель системы «преобразователь частоты – двигатель» выполнена в Simulink. Описаны все ключевые блоки модели. Выполнен гармонический анализ с помощью «Powergui». На основе данного анализа был сделан вывод о целесообразности использования каскадного преобразователя частоты для питания цилиндрического линейного вентильного двигателя погружных насосов.

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

## INVERTER DEVELOPMENT OF CASCADE TYPE FOR SUBMERSIBLE PUMP MOTORS

Milyusha I.V., Mirzin A.M., Korotaev A.D., Shutemov S.V.

*Federal State Educational Institution of Higher Professional Education "Perm National Research Polytechnic University (PNIPU)" (Russia, 614000, Perm, Komsomol prospect, 29-a.)*

The article describes the frequency converter cascade type. It is necessary to supply submersible motor at great depths. When it is necessary to eliminate spurious harmonics. Clog mains harmonics and negatively affect the insulation of the cable and motor. By adjusting the extraction rate according to the production rate can be increased life of the well. To solve these problems considered cascade inverter consisting of a three-phase multiple winding transformer and power inverters, IGBT-transistors. A device power cell. View of one embodiment of forming a control signal for IGBT-transistors, through which is possible to obtain an almost perfect sine wave output inverter. This principle is described as an example of single-phase bridge inverter. The diagram of the control system and diagram incorporating transistor pairs. Mathematical model of the "inverter-motor" made in Simulink. Describes all the key building blocks of the model. Harmonic analysis is made using the "Powergui". On the basis of this analysis, it was concluded that the feasibility of using the cascade inverter for powering a cylindrical linear motor valve submersible pumps.

Keywords: inverter, IGBT-transistors, multiple winding transformer PWM motor drive system, harmonics, debit, well, a mathematical model, harmonic analysis, linear cylindrical valve engine.

Нефтепромыслы обычно имеют слабую сеть, не допускающую перегрузок и сильных просадок напряжения. Прямой пуск в такой ситуации невозможен. В таких условиях погружной электродвигатель на большой глубине рационально питать высоковольтным преобразователем частоты [4]. При этом необходимо исключить паразитные гармоники.

Гармоники засоряют питающую сеть и негативно влияют на изоляцию кабеля и двигателя. Регулируя скорость добычи в зависимости от дебита, можно добиться увеличения срока эксплуатации скважины.

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

При наличии шести групп независимых источников максимальное напряжение отдельной ячейки составляет 575В. Последовательное соединение 6-ти ячеек с максимальным выходным напряжением 575В позволяет получить максимальное действующее фазное напряжение 3450В, а линейное 6000В. С помощью системы управления фазы выходного напряжения отдельных ячеек сдвинуты на  $10^0$ , что обеспечивает взаимную компенсацию высших гармоник. Регулирование величины выходного напряжения и частоты производится синхронизировано 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.

В результате построения схемы по данному принципу, ток и напряжение на входе и выходе преобразователя имеют практически синусоидальную форму.

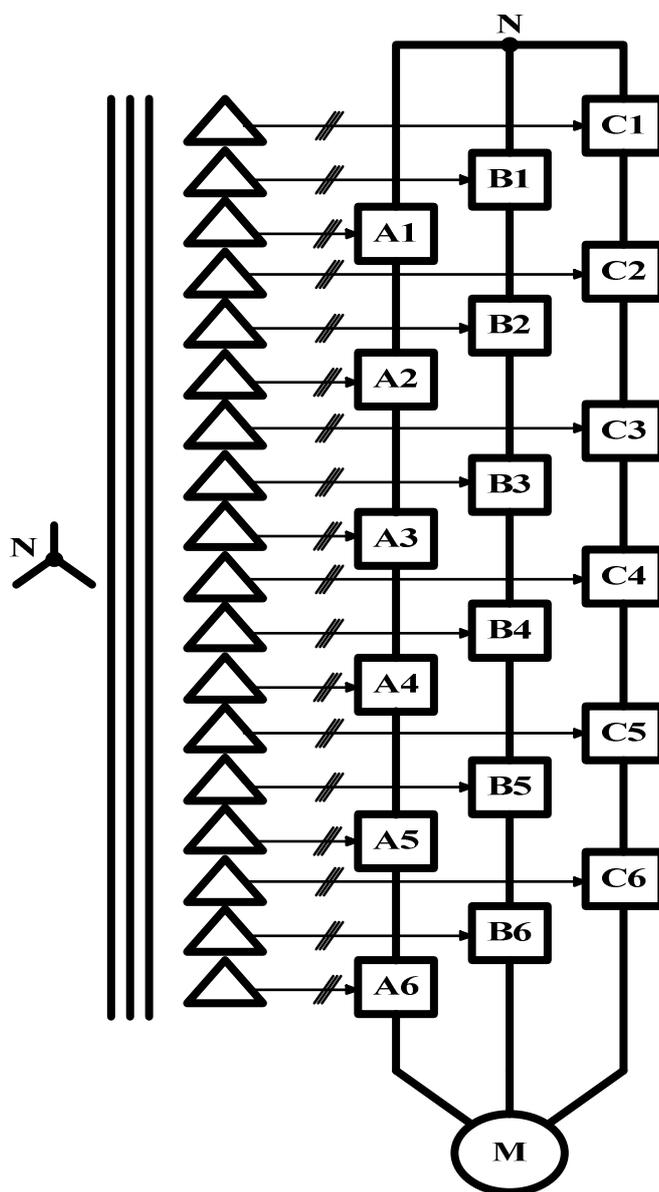


Рис. 1. Силовая схема системы «каскадный преобразователь частоты – двигатель»

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. 2 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.

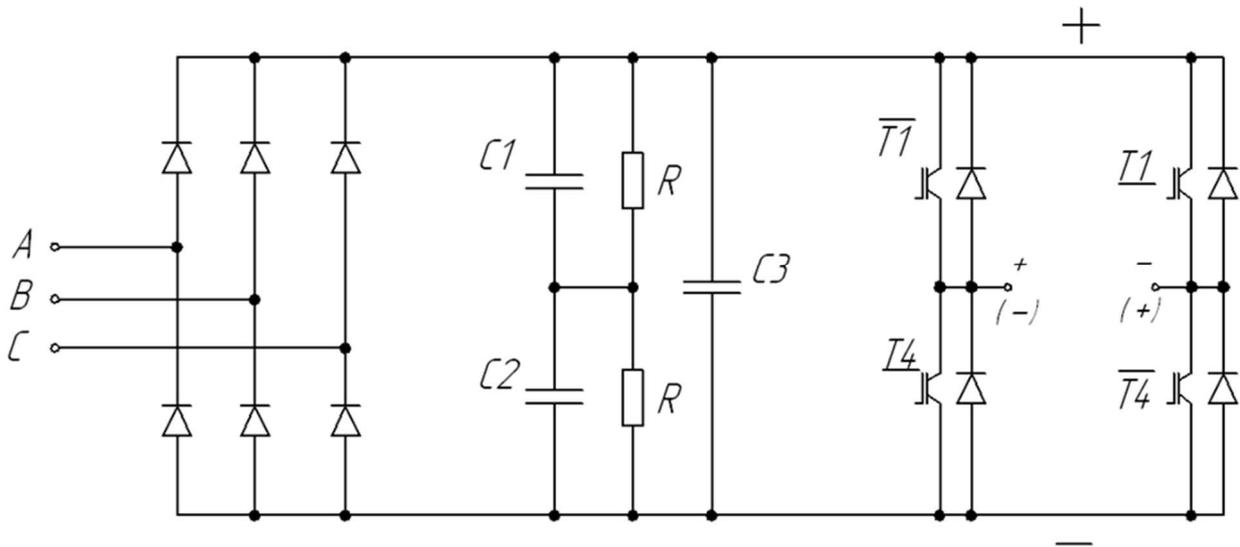


Рис. 2. Силовая ячейка

Принцип данного варианта ШИМ, на примере мостового однофазного инвертора, приведен на 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 ( $\Phi 1$ ,  $\Phi 2$ ), блок, обеспечивающий паузу на включение транзисторных пар ( $\tau_{\text{вк}}$ ), и драйверы  $\overline{Д1}$ ,  $\overline{Д4}$ ,  $\underline{Д1}$ ,  $\underline{Д4}$ , 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  $U_{on}$ . Если  $U^* > U_{on}$ , т.е. разность  $(U^* - U_{on})$  положительна, то сигнал на выходе (НО) положителен, и на выходе формирователя  $\Phi 1$  существует положительный сигнал  $f_1^*$ , который с паузой  $\tau_{\text{вк}}$  включает транзисторы  $\overline{T1}$  и  $\overline{T4}$ , и на выходе инвертора появится положительное напряжение (рис. 4).

При отрицательной разности  $(U^* - U_{on})$ , когда  $U^* < U_{on}$ , пара транзисторов  $\overline{T1}$  и  $\overline{T4}$  закрываются без выдержки времени, и на выходе  $\Phi 1$  будет действовать отрицательный сигнал  $f_1^*$ , при наличии которого драйверы  $\overline{Д1}$ ,  $\overline{Д4}$  формируют небольшой отрицательный сигнал  $-5\text{В}$ , закрывающий транзисторы  $\overline{T1}$  и  $\overline{T4}$ . Одновременно с этим на выходе  $\Phi 2$  появится положительный сигнал  $f_2^*$ , который с выдержкой времени  $\tau_{\text{вк}}$  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.

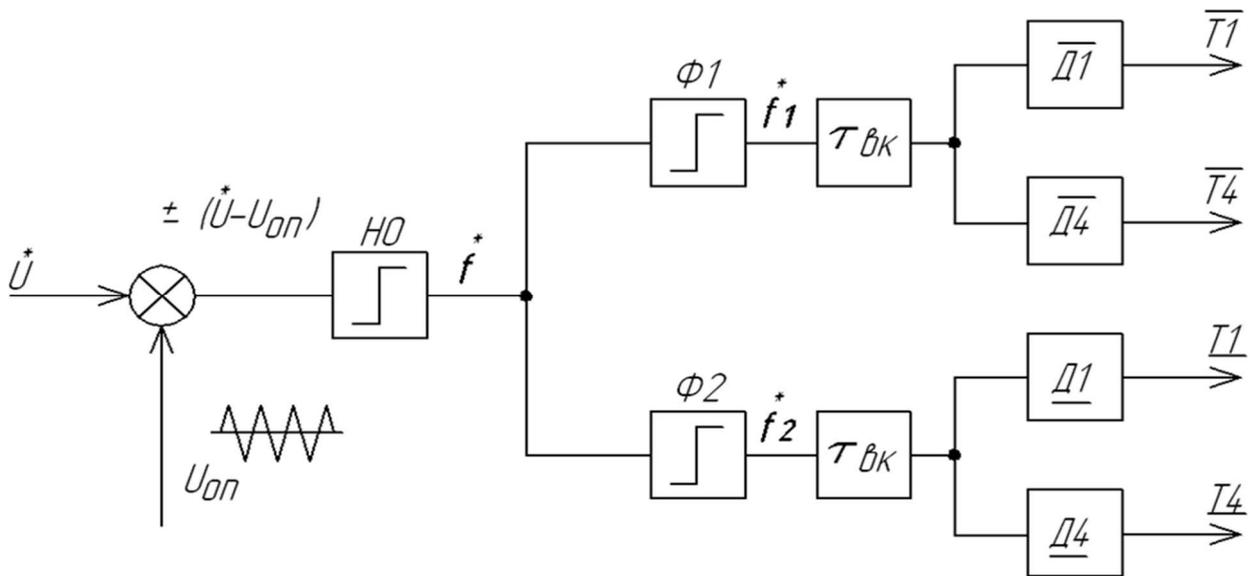


Рис. 3. Структурная схема системы управления

На рис. 4 показаны симметричное пилообразное опорное напряжение с максимальным значением  $U_{omn}$  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 напряжения на выходе определяется следующим образом:

$$U = U_d \cdot \left(1 - \frac{2 \cdot T_2}{T_{шим}}\right) \quad (1)$$

$$T_{шим} = T_1 + T_2 = \frac{1}{f_{шим}} \quad (2)$$

где  $T_1$ ,  $T_2$  – интервалы замкнутого состояния транзисторных пар  $\overline{T1}$ ,  $\overline{T2}$  и  $T1$ ,  $T2$  соответственно;  $T_{шим}$  – период ШИМ,  $f_{шим}$  – частота ШИМ.

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

$$\frac{T_2}{T_{шим}} = \frac{U_{omn} - U^*}{2U_{omn}} \quad (3)$$

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

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

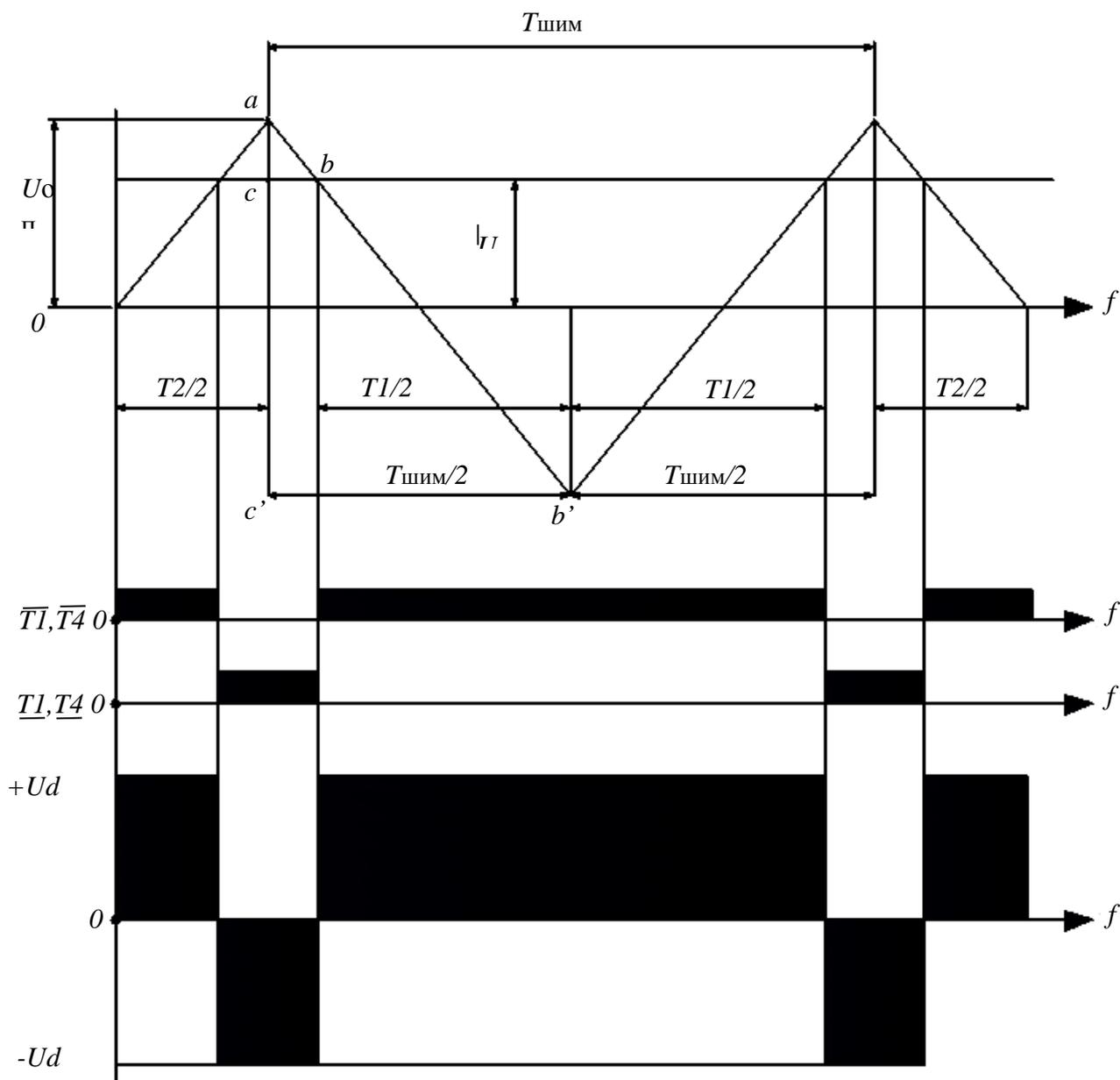


Рис. 4. Диаграмма включения пар транзисторов

где  $K_u = \frac{U_d}{U_{омт}}$  – передаточный коэффициент инвертора в линейной части

характеристики, когда  $U < U_{омт}^*$ .

Для получения неискаженного значения напряжения на выходе инвертора задающий сигнал  $U$  не должен превышать максимальное значение опорного напряжения  $U_{омт}^*$ , а быть несколько меньше, т.е.  $U < U_{омт}^*$ .

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, которая имеет частоту управляющего сигнала  $U^*$ , и ряд гармоник более высокого порядка. Таким образом, если амплитуда  $U^*$  не превышает значение  $U_{\text{отн}}$ , 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 *Mathlab 6.5* в пакете *Simulink* [5].

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

С помощью инструмента «*Powergui*» был проведен гармонический анализ тока на выходе из преобразователя частоты. Были получены результаты гармонического анализа для фаз А,В,С. При данной реализации ШИМ гармоническое искажение составляет всего 0,86 %, что позволяет получить на выходе преобразователя почти идеальную синусоиду.

На основе данной математической модели был разработан стенд на кафедре ЭТиЭМ, где в качестве двигателя использовался цилиндрический линейный вентильный двигатель [2]. Двигатель работал в тандеме с каскадным преобразователем частоты. Удалось получить высокий КПД и низкие потери напряжения. Описанные возможности каскадного преобразователя частоты были подтверждены на практике. Данное исследование позволяет судить о целесообразности использования каскадного преобразователя частоты для питания двигателя погружного насоса.

**Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «ПНИПУ» при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (договор № 02.G25.31.0068 от 23.05.2013 г. в составе мероприятия по реализации постановления Правительства РФ № 218).**

## Список литературы

1. ГОСТ 30429-97. Совместимость электромагнитная. Радиопомехи промышленные от оборудования. – М.: Госстандарт, 1998. – 21 с.
2. Ключников А.Т., Коротаев А.Д., Шутемов С. В. Моделирование цилиндрического линейного вентильного двигателя // Электротехника. – 2013. – № 11.
3. Крючков В.В., Малышков Г.М., Соловьев И.Н. Кодовое широтно-импульсное регулирование для инверторов // Практическая силовая электроника. – 2001. – № 1.
4. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным управлением. – М.: Академия, 2006. – 272 с.
5. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. – 1-е изд. – «ДМК Пресс», 2007. – 288 с.

### Рецензенты:

Шевелев Н.А., д.т.н., профессор, проректор по учебной работе, Пермский национальный исследовательский политехнический университет (ПНИПУ), г. Пермь.

Щицин Ю.Д., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Сварочное производство и технология конструкционных материалов», Пермский национальный исследовательский политехнический университет (ПНИПУ), г. Пермь.