

*Г. В. КРИВЯКИН*, канд. техн. наук, доц. НТУ «ХПИ»;

*Е. С. РЕДЧЕНКО*, ассистент НТУ «ХПИ»;

*С. Г. ШУМАНСКИЙ*, магистрант НТУ «ХПИ»

## **ВЫБОР КОНСТРУКЦИИ ЛИНЕЙНОГО ДВИГАТЕЛЯ В СОСТАВЕ СИЛОВОГО ПРИВОДА СИСТЕМЫ НАКЛОНА КУЗОВОВ СКОРОСТНЫХ ПОЕЗДОВ**

Работа посвящена выбору конструкций линейного двигателя электромагнитного типа постоянного тока, используемого в качестве силового привода системы наклона кузовов скоростных поездов. Рассмотрены возможные варианты кинематических схем механической части системы наклона кузовов скоростных поездов, отличающиеся местом присоединения силовых приводов. Для каждого варианта кинематической схемы в качестве силового привода предложены конструкции линейного двигателя. Обоснован выбор типа конструктивного исполнения линейных двигателей в зависимости от варианта их установки в системе наклона. Описаны устройство и принцип действия каждой из предложенных конструкций линейного двигателя. Приведены их тяговые характеристики совместно с нагрузочными характеристиками механизма наклона кузова согласно рассмотренных вариантов кинематических схем. Проведен анализ тяговых характеристик предложенных конструкций линейного двигателя.

**Ключевые слова:** силовой привод, система принудительного наклона кузова, скоростные поезда, нагрузочная характеристика, тяговая характеристика, центробежная сила инерции, кинематическая схема, линейный двигатель электромагнитного типа постоянного тока.

**Введение.** Назначение силового привода системы принудительного наклона кузова заключается в создании усилия, необходимого для поворота кузова на угол, при котором достигается компенсация действия центробежной силы инерции [1]. Как показали исследования, наибольшую эффективность имеет силовой привод с тяговой характеристикой, которая соответствует нагрузочной характеристике механизма наклона кузова [2, 3]. Нагрузочная характеристика механизма наклона определяется его кинематической схемой и массогабаритными параметрами кузова вагона [4], а тяговая характеристика линейного двигателя – его конструктивным исполнением [5]. Таким образом, целью настоящей статьи является выбор конструктивных схем линейного двигателя в зависимости от особенностей его компоновки в механической части системы наклона кузова, для достижения соответствия тяговой и нагрузочной характеристик.

**Варианты установки силового привода в системе наклона кузова.** В силу конструктивных особенностей тележки вагона с наклоняемым кузовом [6, 7] возможны два варианта установки силового привода механизма наклона.

В первом варианте силовые приводы устанавливаются на боковых балках рамы тележки, как показано на рис. 1, а. При этом усилие привода направлено по нормали к поверхности боковых балок рамы тележки.

Второй вариант предусматривает установку силового привода под наклоняемой балкой, как показано на рис. 1, б. При этом усилие силового привода направлено в поперечной плоскости тележки.

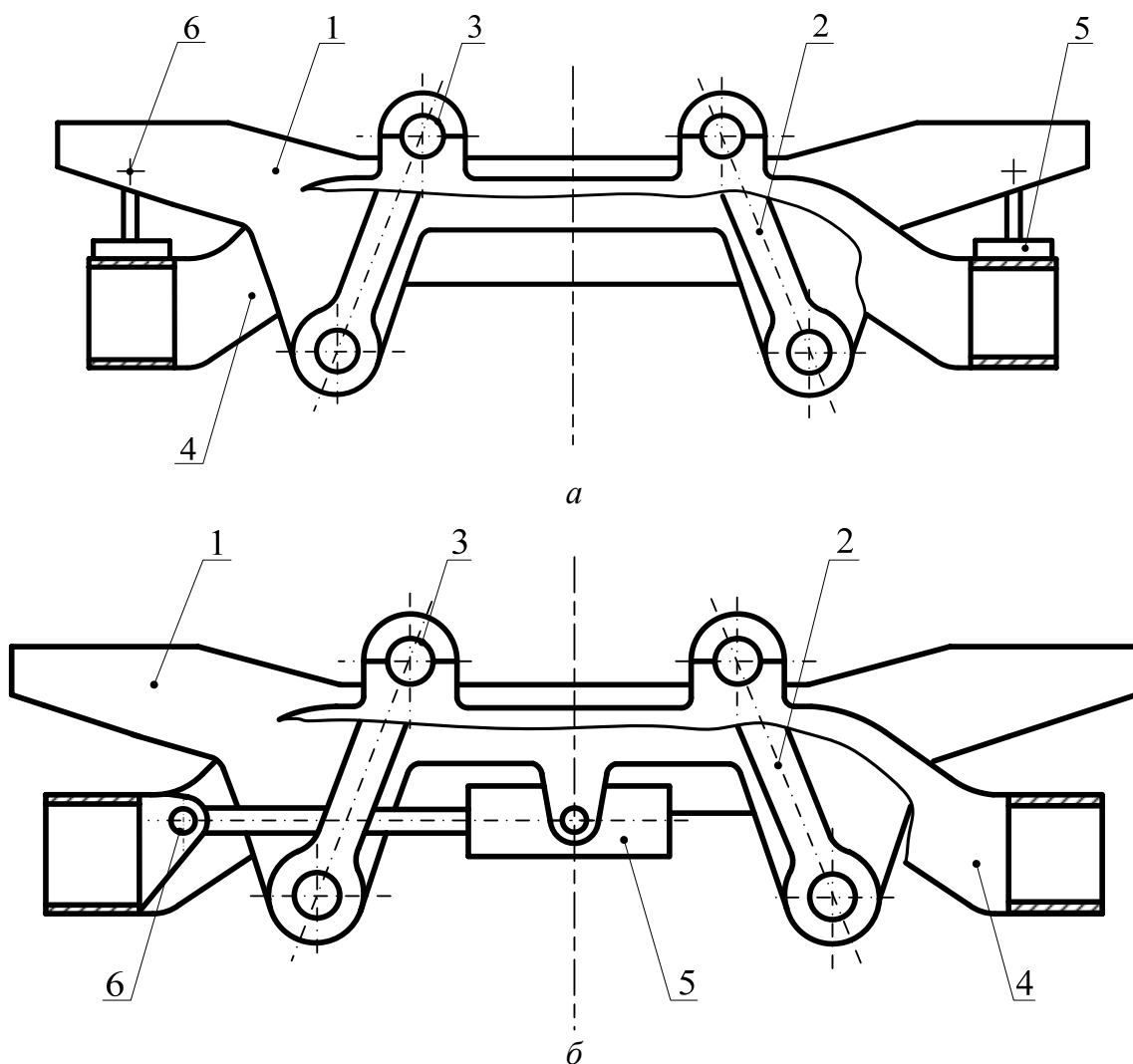


Рис. 1 – Схемы вариантов установки силового привода механизма наклона:  
*а* – первый вариант; *б* – второй вариант; 1 – наклоняемая балка; 2 – рычаги подвеса;  
 3 – шарниры рычагов подвеса; 4 – рама тележки; 5 – силовой привод; 6 – шарниры  
 силового привода.

Для каждого варианта установки силового привода конструкция линейного двигателя должна удовлетворять специфическим требованиям. Для размещения двигателя по схеме рис. 1, *а* он должен обеспечивать большой ход при малых осевых габаритах. Для схемы рис. 1, *б* двигатель в первую очередь должен обеспечивать двунаправленное перемещение наклоняемой балки.

**Линейные двигатели.** Установка силового привода системы наклона на боковых балках рамы тележки имеет ряд конструктивных особенностей, которые, в конечном счете, влияют на устройство линейного двигателя. С одной стороны в исходном положении, когда угол наклона кузова равен нулю, осевой габарит линейного двигателя ограничен 150-200 мм, что обусловлено конструктивными особенностями крепления наклоняемой балки к раме тележки. С другой стороны для достижения максимальных углов наклона балки линейный двигатель должен обладать достаточно большим ходом (не менее 150 мм), что связано с геометрическими и кинематическими параметрами рычажной системы подвеса наклоняемой балки.

Таким требованиям соответствуют линейные двигатели с якорем в виде набора плоских цилиндрических секций и с якорем телескопической конструкции.

Принцип действия двигателя с якорем в виде набора плоских цилиндрических секций (рис. 2, а) основан на последовательном втягивании секций якоря 1, 2 и 3 с обмотками 6, 7 в корпус статора 5 [8]. Этот процесс происходит следующим образом. При включении обмотки 6 секция якоря 1 начинает притягиваться к секции якоря 2. В момент соприкосновения нижнего торца секции якоря 1 с верхним торцом секции якоря 2 включается обмотка 7. Вследствие этого секция якоря 2 с удерживаемой секцией 1 притягиваются к секции якоря 3. Аналогичным образом при включении обмотки 8 секция якоря 3 притягивается к корпусу статора 4 вместе с удерживаемыми секциями 2 и 1.

Как видно на рис. 2, б, тяговая характеристика не совпадает с нагрузочной характеристикой механизма наклона, что обусловлено особенностями его конструкции. Она имеет гиперболическую форму с двумя всплесками, которые соответствуют рабочим зазорам двигателя 110 и 60 мм. В исходном положении якоря сила тяги  $f_{ЭМ}$  составила 3,17 кН. В конечном положении якоря сила  $f_{ЭМ}$  достигла максимума и составила 34,86 кН. Первый всплеск соответствует нулевому рабочему зазору между секциями якоря 1 и 2, а второй – нулевому рабочему зазору между секциями якоря 2 и 3. Амплитуды всплесков равны 10,54 и 15,29 кН соответственно.

Спрямления характеристики можно достичь за счет увеличения подвижных секций якоря, но с другой стороны это приведет к увеличению осевого габарита двигателя и соответственно усложнит его установку на раме тележки.

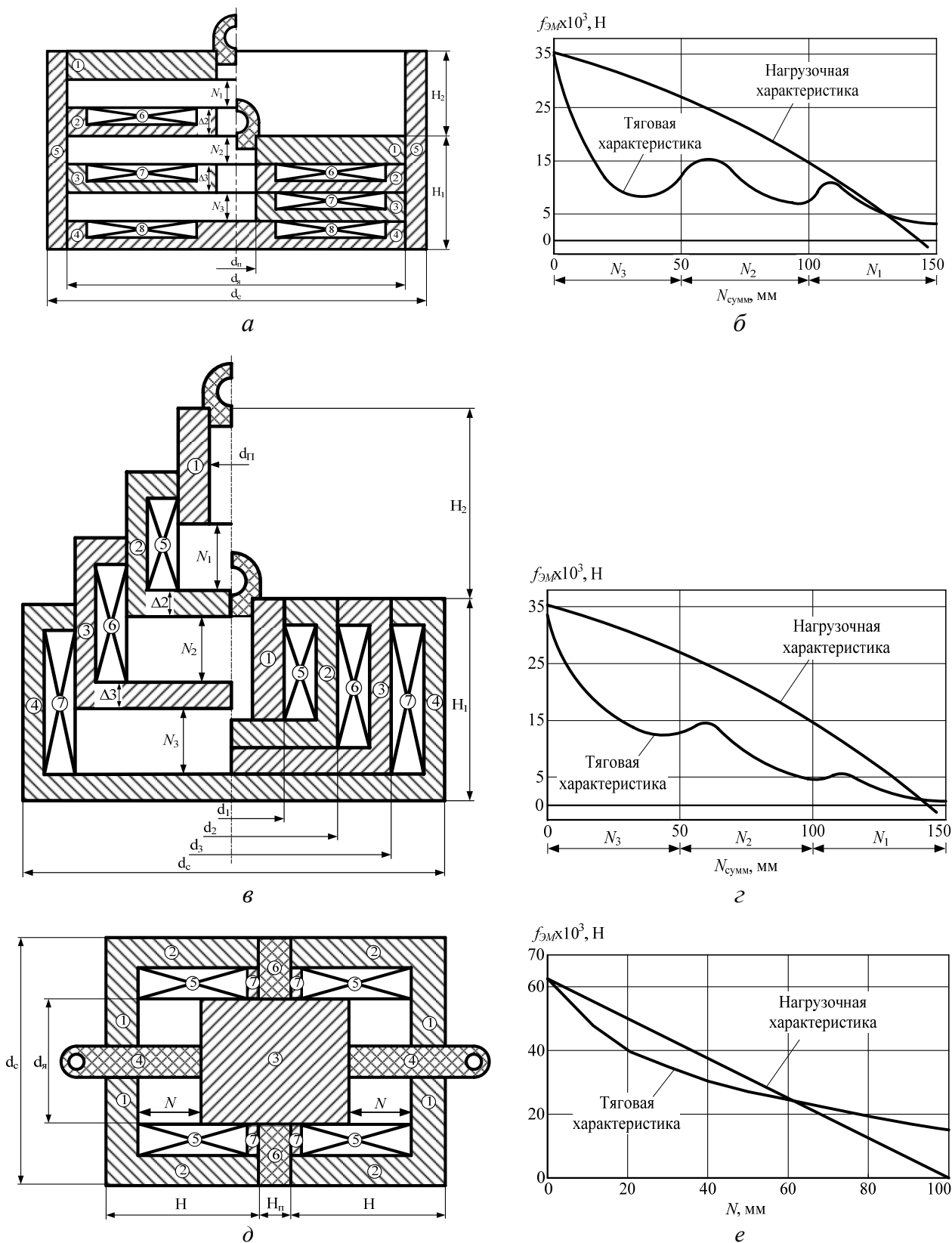


Рис. 2 – Схемы конструкций линейного двигателя и их тяговые характеристики:  
*а* – с якорем в виде набора плоских цилиндрических секций; *б* – тяговая характеристика;  
*в* – с якорем телескопической конструкции; *г* – тяговая характеристика;  
*д* – двунаправленного действия; *е* – тяговая характеристика.

В двигателе с якорем телескопической конструкции активная зона взаимодействия перемещающихся секций якоря со статором образована несколькими секциями с обмотками, которые последовательно включаются в процессе работы системы наклона (рис. 2, в). Принцип действия такого двигателя основан на последовательном втягивании якоря 1 и обмоток с сердечниками 2, 3 в статорную обмотку 4 [9]. Это происходит следующим образом. При включении обмотки 5 якорь 1 втягивается внутрь сердечника 2. В момент соприкосновения нижнего торца якоря 1 с торцом сердечника 2 включается обмотка 6, при этом сердечник 2 вместе с удерживаемым якорем 1 втягивается в сердечник 3. Аналогичным образом при включении обмотки 7 сердечник 3 втягивается в сердечник 4 вместе с удерживаемыми в нем сердечником 2 и якорем 1.

Как видно на графике рис. 2, г тяговая характеристика линейного двигателя с якорем телескопической конструкции также не имеет удовлетворительного совпадения с нагрузочной характеристикой механизма наклона. Она имеет гиперболическую форму с двумя всплесками, которые соответствуют рабочим зазорам 110 и 60 мм. В исходном положении сила тяги  $f_{ЭМ}$  составила 0,78 кН. В конечном положении максимальное значение силы тяги  $f_{ЭМ}$  достигло величины 33,02 Н. Первый всплеск соответствует нулевому рабочему зазору между якорем 1 и сердечником 2, а второй – нулевому рабочему зазору между сердечником 2 и сердечником 3. Амплитуды всплесков составляют 5,74 и 14,65 кН соответственно.

Некоторого спрямления тяговой характеристики такого двигателя можно добиться увеличением числа подвижных секций линейного двигателя, но это может привести к неустойчивости его конструкции при максимальном рабочем зазоре.

Второй вариант установки силового привода подразумевает использование одного двигателя, который должен обеспечивать двунаправленное перемещение штока (по 100 мм в каждую сторону), что соответствует наклону балки на  $8^\circ$ . Конструкция такого двигателя представлена на рис. 2, д.

Линейный двигатель двунаправленного действия состоит из статора 2, замкнутого ярмами 1, в который помещаются две секции обмотки 5. Корпус статора 2 разделен на две равные части немагнитной вставкой 6. Каждая секция обмотки 5 отделена от вставки 6 стальным кольцом 7. Якорь выполнен составным: его основная часть 3 стальная, а вспомогательные части 4 с двух торцов якоря сделаны из немагнитного материала [10].

Принцип действия двигателя двунаправленного действия заключается в притяжении торца основной части якоря 3 к ярму статора 1 при включении одной из обмоток 5. Включение той или иной обмотки определяется

параметрами кривой и, соответственно, необходимостью наклона кузова в нужную сторону.

Как видно из рис. 2, е, тяговая характеристика двигателя двунаправленного действия имеет практически удовлетворительное совпадение с нагрузочной характеристикой механизма наклона, что обусловлено конструктивным устройством двигателя. Дело в том, что в этом двигателе активная часть якоря и обмотки выполнены таким образом, что на всей протяженности хода якоря обеспечивается замыкание большей части магнитного потока через его боковую поверхность [11, 12]. В результате сила тяги увеличивается постепенно по мере уменьшения рабочего зазора и тяговая характеристика не имеет резких всплесков. В исходном положении якоря при максимальном рабочем зазоре сила тяги составила 14,95 кН, а в конечном положении якоря – 62,43 кН.

**Выводы.** Предложены два варианта кинематической схемы механической части системы наклона, отличающиеся местом присоединения силовых приводов. Первый вариант предусматривает установку силового привода на боковых балках рамы тележки, а второй вариант – под наклоняемой балкой.

Для первого варианта кинематической схемы, с точки зрения конструктивного устройства механической части системы наклона, в качестве силового привода целесообразно использование линейных двигателей с якорем в виде набора плоских цилиндрических секций и с якорем телескопической конструкции.

Анализ тяговых характеристик этих двигателей показал их неудовлетворительное совпадение с нагрузочной характеристикой механизма наклона. Соответствие тяговой и нагрузочной характеристик может осуществляться только за счет увеличения числа элементов якоря. Это ведет к усложнению конструкции и снижению надежности.

Для второго варианта кинематической схемы в качестве силового привода может быть использован линейный двигатель с монолитным сердечником якоря и с возможностью двунаправленного перемещения штока. В силу особенностей устройства магнитопровода такого двигателя достигается удовлетворительное совпадение тяговой и нагрузочной характеристик, что дает возможность рассмотреть такой тип силового привода как альтернативу гидравлическим, пневматическим и электромеханическим приводам системы наклона кузова.

**Список литературы.** 1. Омеляненко В. И., Якунин Д. И., Редченко Е. С. Привод наклона кузовов на базе линейного двигателя // *Залізничний транспорт України*. – 2010. – №6. – С.23-25. 2. Омеляненко В. И., Любарский Б. Г., Якунин Д. И. Моделирование механизма наклона кузова с приводом на базе линейного электродвигателя // *Залізничний транспорт України*. –

2011. – №2. – С.48-52. **3.** *Омельяненко В. И., Любарский Б. Г., Якунин Д. И., Ерицян Б. Х.* Концептуальный проект электромеханической системы привода с линейным двигателем для наклона кузовов // Вестник НТУ «ХПИ» Транспортное машиностроение. – 2011. – №18. – С.84-89. **4.** *Якунин Д. И.* Нагрузочная характеристика механизма наклона кузова // Вестник НТУ «ХПИ» Транспортное машиностроение. – 2009. – №47. – С.72-75. **5.** *Кривякин Г. В., Редченко Е. С.* Влияние элементов конструкции линейного двигателя на тяговую характеристику привода наклона кузовов скоростных поездов // Вестник НТУ «ХПИ» Математическое моделирование в транспорте и технологиях. – 2012. – №54. – С.107-111. **6.** *Корниенко В. В., Омельяненко В. И.* Высокоскоростной электрический транспорт. Мировой опыт // Харьков : НТУ «ХПИ». – 2007. – 159 с. **7.** *Омельяненко В. И.* Линейные двигатели постоянного тока с тиристорным коммутатором. – Харьков : Основа. – 1994. – 76 с. **8.** *Andrew B. Pataki, Landsdale, Pa.* Long stroke linear actuator. Патент US 4,394,592, 19.07.1983. **9.** *Кузьмичев В. Ф.* Грузоподъемный электромагнит. Авторское свидетельство СССР № 814839, 23.03.1981. **10.** *Никитенко А. Г.* Проектирование оптимальных электромагнитных механизмов. М. : Энергия, 1974. **11.** *Матюк В. Ф., Осипов А. А., Стрелюх А. В.* Распределение магнитной индукции вдоль полого стержня круглого сечения в постоянном однородном магнитном поле. // Электротехника. – 2011. – №11. – С.35-42. **12.** *Матюк В. Ф., Осипов А. А., Стрелюх А. В.* Распределение намагниченности вдоль цилиндрического стержня круглого сечения, находящегося в продольном постоянном однородном магнитном поле // Электротехника. – 2009. – №8. – С.37-46.

**Bibliography (transliterated):** **1.** *Omelyanenko V., Yakunin D., Redchenko E.* Drive of inclination of baskets on the base of linear engine. // Railway transport of Ukrain. – 2010. – №6. – P.23-25. **2.** *Omelyanenko V., Lyubarskiy B., Yakunin D.* Design of mechanism of inclination of basket with a drive on the base of linear electric motor. // Railway transport of Ukrain. – 2011. – №2. – P.48-52. **3.** *Omelyanenko V., Lyubarskiy B., Yakunin D., Ericyan B.* The Conceptual project of the electromechanics system of drive with a linear engine for inclination of baskets. // An announcer NTU «KHPI» The Transport engineer. – 2011. – №18. – P.84-89. **4.** *Yakunin D.* Loading description of mechanism of inclination of basket. // An announcer NTU «KHPI» is the Transport engineer. – 2009. – №47. – P.72-75. **5.** *Krivyakin G. Redchenko E.* Influence of elements of construction of linear engine on hauling description of drive of inclination of baskets of speed trains. // An announcer NTU «KHPI» A mathematical design is in a transport and technologies. – 2012. – №54. – P.107-111. **6.** *Kornienko V., Omelyanenko V.* The High-speed electric transport. World experience. // Kharkov : NTU «KHPI» – 2007. – 159 p. **7.** *Omelyanenko V.* The Linear engines of direct-current with a tiristors switchboard. Kharkov : Osnova. – 1994. – 76 p. **8.** *Andrew B. Pataki, Landsdale, Pa.* Long stroke linear actuator. Patent US 4,394,592, 19.07.1983. **9.** *Kuzmichev V.* The Loadlifting electromagnet. Copyright certificate USSR № 814839, 23.03.1981. **10.** *Nikitenko A.* Planning of optimum electromagnetic mechanisms. M. : Energy, 1974. **11.** *Matyuk V., Osipov A., Strelyuk A.* Distributing of magnetic induction along declivous bar of round section in the permanent homogeneous magnetic field. // Electromechanics. – 2011. – №11. – P.35-42. **12.** *Matyuk V., Osipov A., Strelyuk A.* Distributing of magnetized along the cylindrical bar of round section, being in the longitudinal permanent homogeneous magnetic field. // Electromechanics. – 2009. – №8. – P.37-46.

*Надійшла (received) 02.04.2014*