

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.

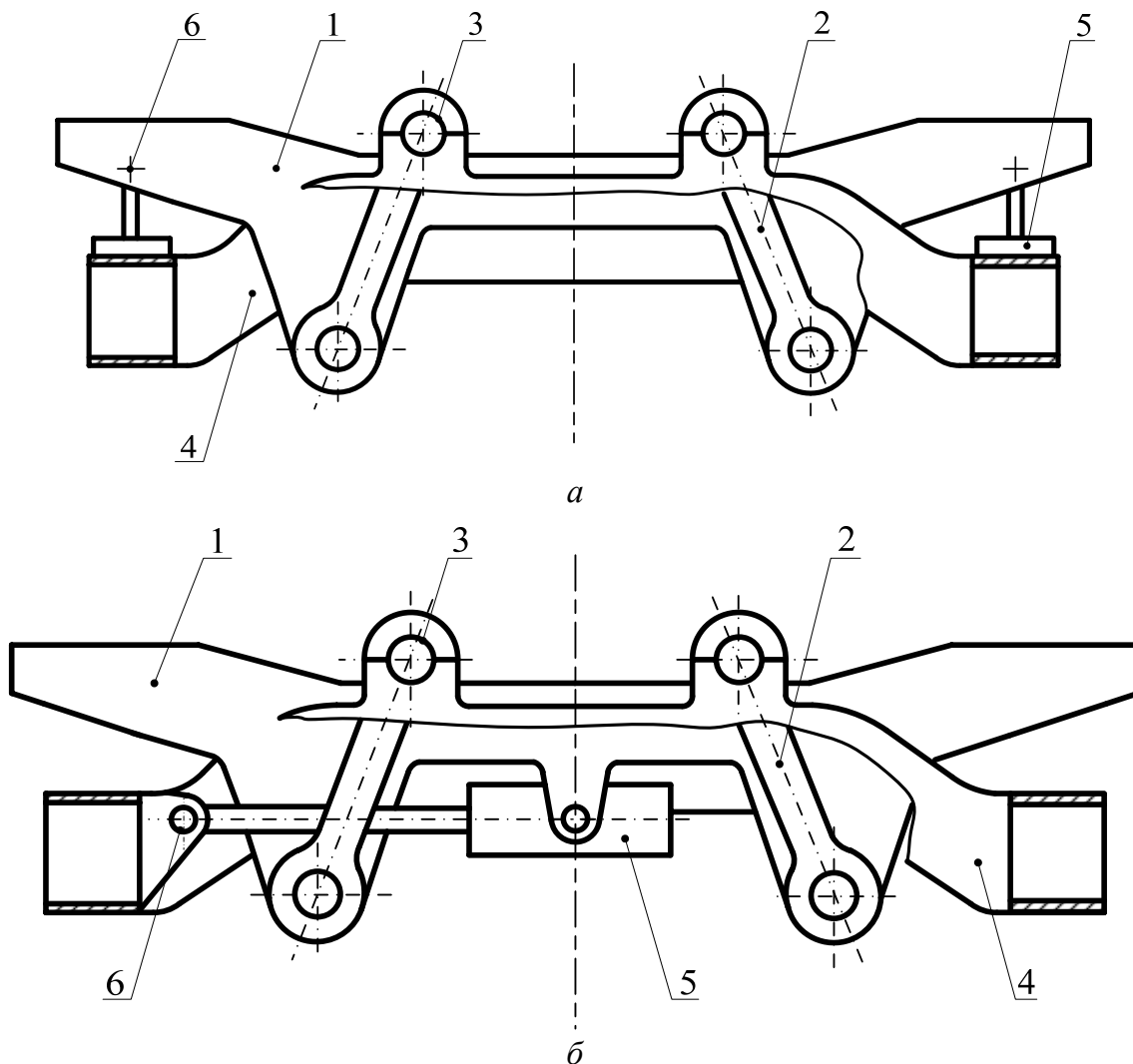


Рис. 1 – Схемы вариантов установки силового привода механизма наклона:
 а – первый вариант; б – второй вариант; 1 – наклоняемая балка; 2 – рычаги подвеса;
 3 – шарниры рычагов подвеса; 4 – рама тележки; 5 – силовой привод; 6 – шарниры
 силового привода.

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.

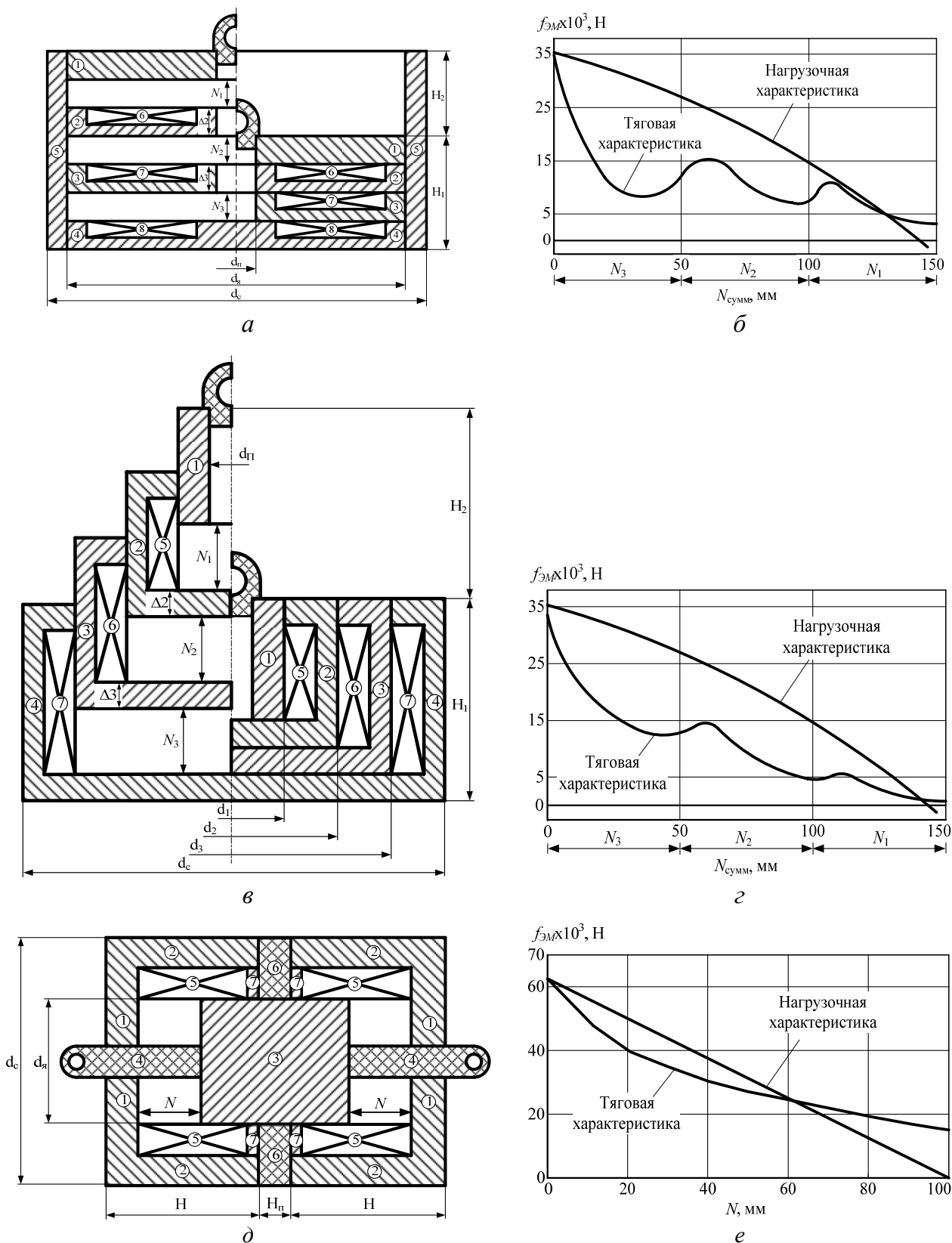


Рис. 2 – Схемы конструкций линейного двигателя и их тяговые характеристики:
а – с якорем в виде набора плоских цилиндрических секций; *б* – тяговая характеристика;
в – с якорем телескопической конструкции; *г* – тяговая характеристика;
д – двунаправленного действия; *е* – тяговая характеристика.

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° . 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