

Д. И. ЯКУНИН, канд. техн. наук, доц. НТУ «ХПИ»;
А. О. КАРТАМЫШЕВ, студент НТУ «ХПИ»

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ УСТРОЙСТВА С МОДИФИЦИРОВАННЫМ ЛИНЕЙНЫМ ДВИГАТЕЛЕМ ДЛЯ НАКЛОНА КУЗОВА СКОРОСТНОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Рассмотрено моделирование работы системы наклона кузова на базе линейного двигателя для современного скоростного подвижного состава железных дорог. Показано, что данная технология способствует реализации скоростного движения на имеющейся сети железных дорог. Предложено применение линейного двигателя в качестве силового привода наклона кузова. Произведено моделирование работы системы наклона кузова. Предложена задача улучшения показателей работы системы путем изменения конструкции линейного двигателя с целью приближения формы его тяговой характеристики к форме нагрузочной характеристики механизма наклона кузова. Предложены и исследованы четыре типа конструкции линейных двигателей: базовая – с плоской законцовкой якоря, с сегментным якорем, с конической проставкой статора и с конической законцовкой якоря. Выявлено наибольшее соответствие нагрузочной характеристике механизма наклона кузова тяговой характеристики линейного двигателя с конической законцовкой якоря. Произведено моделирование работы системы наклона кузова средствами MATLAB Simulink, где в качестве привода использованы базовый линейный двигатель и двигатель с конической законцовкой якоря. Получены результаты моделирования, позволившие сделать заключение, что заданный угол достигается обоими двигателями, у двигателя с конической законцовкой якоря наблюдается меньшая частота импульсов напряжения в области, соответствующей углам наклона более 5° , что облегчает режим работы инвертора, питающего линейные двигатели. Такой двигатель при незначительном изменении конструкции показывает меньший уровень энергопотребления при работе в области углов наклона, близких к максимальному. Предложено исследовать варьирование параметров геометрии линейного двигателя на его основные показатели работы в составе механизма наклона кузова скоростного подвижного состава.

Ключевые слова: скоростное движение, подвижной состав, наклон кузова, линейный двигатель, моделирование, тяговая характеристика, статор, якорь, угол наклона.

Введение. Интеграция Украины в мировое сообщество цивилизованных государств требует внедрения скоростного подвижного состава [1]. Прокладка новых, высокоскоростных магистралей вряд ли возможна в имеющейся экономической ситуации. Внедрение технологии наклона кузовов в кривых позволит на имеющихся магистралях реализовать скоростное движение [2].

Анализ основных достижений и литературы. В качестве силового привода исполнительного механизма наклона кузова предлагается применение линейного двигателя (ЛД), свободного от недостатков применяемых приводов. Для обеспечения приемлемых показателей механизма, необходимо обеспечить наибольшее соответствие тяговой характеристики привода нагрузочной характеристике механизма наклона [3].

Наибольшее распространение для наклона кузовов скоростных поездов получила схема с рычажным подвесом промежуточной балки к

раме тележки. Её нагрузочная характеристика представляет собой практически линейную зависимость естественной возвращающей силы от угла наклона кузова. Такой нагрузочной характеристике механизма в наибольшей степени соответствует тяговая характеристика коаксиального электромагнитного двигателя постоянного тока с переменным воздушным зазором и полезной силой, действующей вдоль зазора [4].

Для исследования влияния показателей системы наклона на ее параметры, с помощью программы Simulink, являющейся приложением к пакету MATLAB, создана имитационная модель механизма наклона кузова [5]. Как подсистема, эта модель вошла в состав модели системы наклона кузова [6]. По результатам исследования модели показано влияние параметров устройств исполнительного механизма наклона с приводом от линейного двигателя на основные его характеристики [7].

Дальнейшее повышение показателей системы наклона кузова возможно путем введения в систему дополнительных элементов [8], либо ограничения угла наклона кузова [9].

Цель исследования, постановка задачи. Предлагается улучшить показатели работы системы путем изменения конструкции линейного двигателя, направленного на приближение формы тяговой характеристики к форме нагрузочной характеристики механизма наклона кузова [10].

Материалы исследований. Исследовано изменение конструкции как якоря, так и проставки статора. Рассмотрены четыре варианта конструкции линейного двигателя. В расчете принято значение МДС в обмотке 200000 А·в. Зазор между якорем и проставкой статора варьировался в диапазоне 0 – 100 мм с шагом 10 мм.

Исследована конструкция линейного двигателя, принятая за базовую. Ее геометрия приведена на рис. 1 а. Также рассмотрен линейный двигатель с сегментным якорем (рис. 1, б), с конической проставкой статора (рис. 1, в) и с конической законцовкой якоря (рис. 1, г).

Путем моделирования магнитного поля каждого из двигателей в FEMM [11] с последующим интегрированием, получены тяговые характеристики исследуемых конструкций, приведенные на рис. 5, где приведена также нагрузочная характеристика механизма наклона кузова. Очевидно, что ей наиболее соответствует тяговая характеристика 4 – линейного двигателя с конической законцовкой якоря.

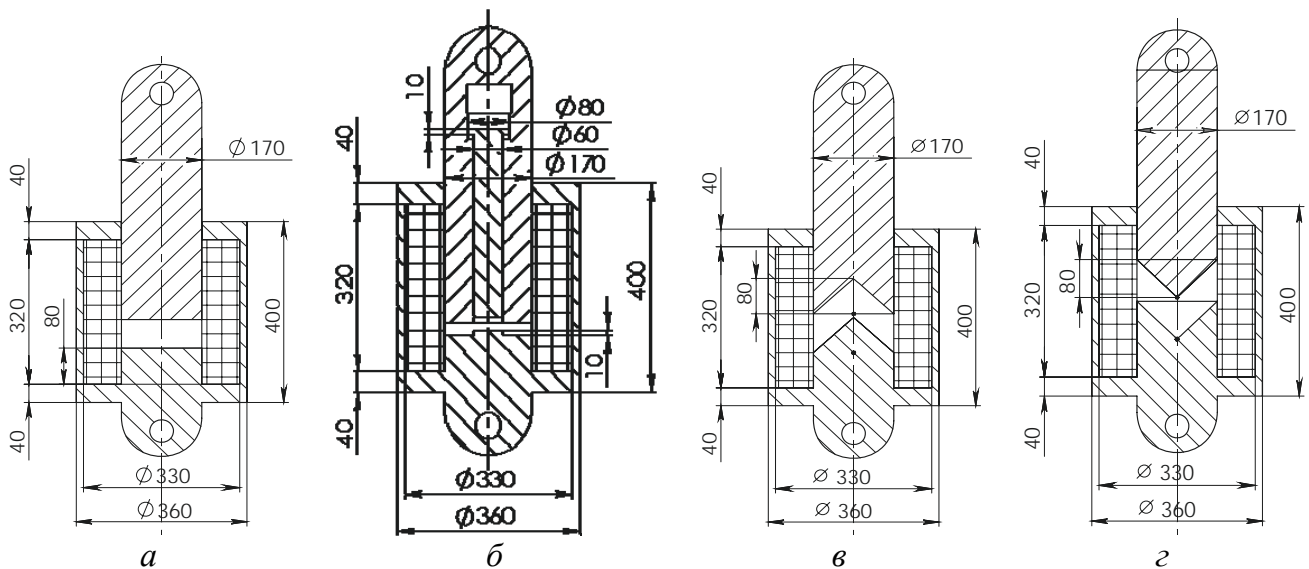


Рис. 1 – Варианты конструкции линейного двигателя:
a – базовая; *б* – с сегментным ярком; *в* – с конической проставкой статора;
г – с конической законцовкой ярка.

Результаты исследований. Изменение формы законцовки ярка и проставки наиболее влияние оказывает в области малых значений зазора N . Сегментный ярк не может быть применен в предлагаемом виде, поскольку его тяговая характеристика 2 имеет локальный минимум, лежащий ниже нагрузочной характеристики, то есть двигатель в данной области не способен выполнять свою функцию.

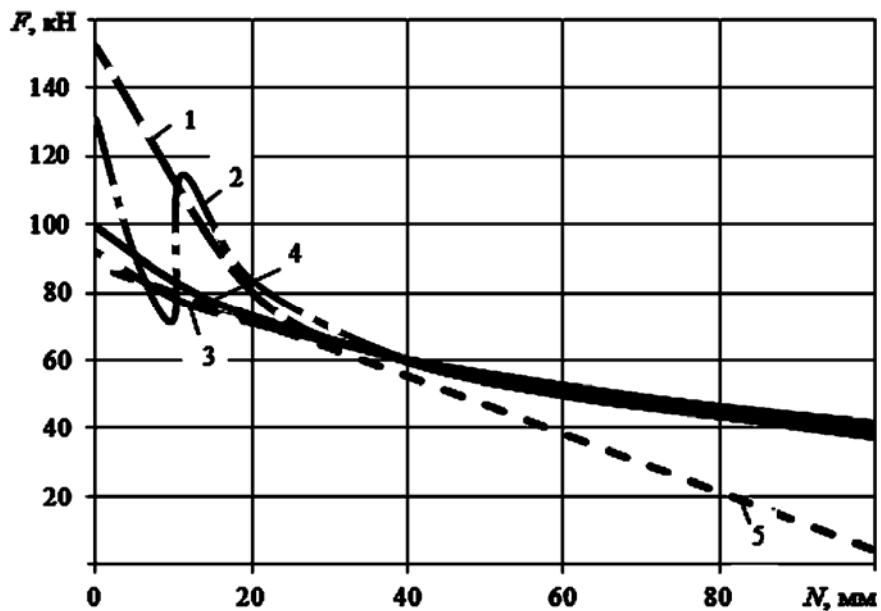


Рис. 2 – Результаты моделирования линейных двигателей:
 1...4 – тяговые характеристики линейных двигателей по рис. 1 *a*...*г* – соответственно; 5 – нагрузочная характеристика механизма наклона;
 F – сила; N – зазор между ярком и проставкой статора.

При аналогичном исполнении, двигатель с конической проставкой статора имеет несколько худшие тяговые показатели по сравнению с двигателем с конической законцовкой якоря (тяговые характеристики 3 и 4 – соответственно).

Произведено моделирование работы системы наклона кузовасредствами MATLAB Simulink [12], где в качестве привода использованы линейные двигатели, выполненные по рис. 1 *а* – базовый ЛД и *б* – принятый ЛД. Результаты моделирования приведены на рис. 3 – 5. Энергопотребление за период 6 сек. составило: для базового ЛД – 274 100 Дж., для принятого – 271 600 Дж.

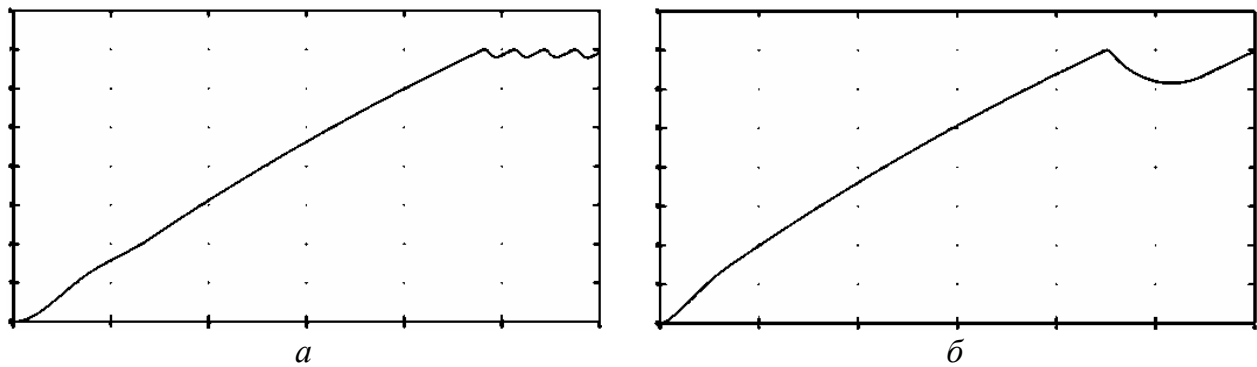


Рис. 3 – Процесс достижения заданного угла наклона (7°) во временной области:
а – базовый ЛД, *б* – принятый ЛД.

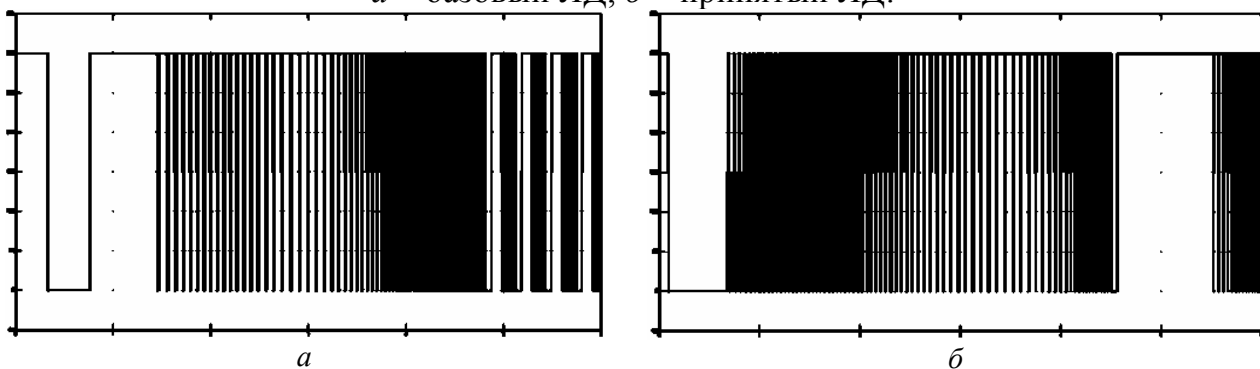


Рис. 4 – Процесс изменения напряжения на обмотке ЛД во временной области:
а – базовый ЛД, *б* – принятый ЛД.

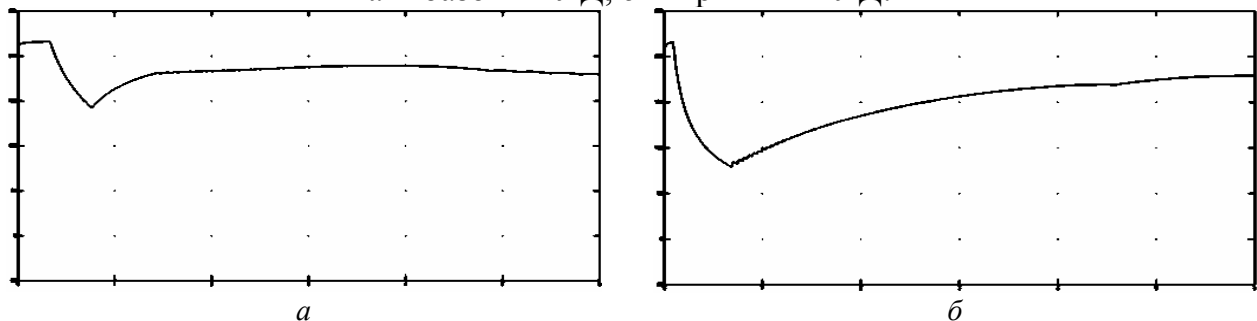


Рис. 5 – Процесс изменения среднего тока питания ЛД во временной области:
а – базовый ЛД, *б* – принятый ЛД.

Из рисунков видно, что заданный угол достигается обоими двигателями за 4,5 сек. При этом у принятого двигателя наблюдается меньшая частота импульсов напряжения в области, соответствующей углам наклона более 5°. Это облегчает режим работы инвертора, питающего ЛД. Также очевидно меньшее значение среднего питающего тока, что обусловлено большим приближением тяговой характеристики принятого ЛД к нагрузочной характеристике механизма наклона кузова.

Следует, однако, отметить, что базовый ЛД надежнее удерживает заданный угол наклона, что обусловлено большим запасом силы этого двигателя в области максимальных углов наклона. Однако, предложенное ранее в работе [8] устройство удержания заданного угла наклона в виде управляемого демпфера, позволяет пренебречь этим фактом.

Выводы. Для облегчения режима работы прямоходового инвертора, рекомендуется выполнять линейный двигатель с конической формой законцовки якоря. Такой двигатель при незначительном изменении конструкции показывает меньший уровень энергопотребления при работе в области углов наклона, близких к максимальному.

В дальнейшем планируется исследовать влияние параметров геометрии ЛД на его основные показатели работы в составе механизма наклона кузова скоростного подвижного состава.

Список литературы: 1. Корниенко В. В. Высокоскоростной электрический транспорт. Мировой опыт / В. В. Корниенко, В. И. Омеляненко // – Харьков, НТУ «ХПИ», 2007. – 159 с. 2. Омеляненко В. И. Поезда с наклоняемыми кузовами для скоростного пассажирского движения / В. И. Омеляненко, Г. В. Кривякин, Д. И. Якунин, Е. С. Редченко // Локомотив-информ. – Харьков: Техностандарт. – 2008. – №5 С. 12-17. 3. Омеляненко В. И. Привод наклона кузовов на базе линейного двигателя / В. И. Омеляненко, Д. И. Якунин, Е. С. Редченко // Залізничний транспорт України. – Київ: Транспорт України, 2010. – № 6. – С. 23-25. 4. Якунин Д. И. Нагрузочная характеристика механизма наклона кузова / Д. И. Якунин // Вестник Национального технического университета „Харьковский политехнический институт”. – Харьков: НТУ „ХПИ”, 2009.– № 47.– С. 72-75. 5. Якунин Д. И. Имитационное моделирование нагрузочной характеристики механизма наклона кузовов / Д. И. Якунин // Восточно-европ. журнал передовых технологий.– 2009.– № 6/6(42).– С.14 – 17. 6. Омеляненко В. И. Моделирование механизма наклона кузова с приводом на базе линейного электродвигателя / В. И. Омеляненко, Б. Г. Любарский, Д. И. Якунин // Залізничний транспорт України. – Київ: Транспорт України, 2011. – № 2. – С. 48-52. 7. Омеляненко В. И. Влияние параметров исполнительного механизма на показатели работы линейного двигателя в системе привода наклона вагонов скоростных поездов / В. И. Омеляненко, Б. Г. Любарський, Д. І. Якунін // Електротехніка і електромеханіка.– Харків: НТУ «ХПІ», 2011.– №4.– С.47-52. 8. Якунин Д. И. Развитие имитационного моделирования электромеханической системы привода наклона кузовов / Д. И. Якунин, Б. Х. Ерищян, Д. Ю. Шаповалов // Вестник Национального технического университета „Харьковский политехнический институт”. – Харьков: НТУ „ХПИ”, 2012.– № 20.– С. 98-103. 9. Якунин Д. И. Предпосылки для моделирования движения по рельсовому пути экипажа, оборудованного устройствами для наклона кузова / Д. И. Якунин, Е. Ю. Зверев, А. Н. Срибник // Вестник Национального технического университета „Харьковский политехнический институт”. – Харьков: НТУ „ХПИ”, 2013.– № 32.– С. 76-80. 10. Якунін Д.

І. Електромеханічна система привода з лінійним двигуном для нахилу кузовів швидкісного рухомого складу: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.09 / Д. І. Якунін ; Нац. техн. ун-т "Харк. політехн. ін-т". — Х., 2010. — 21 с. — укр. **11.** <http://www.femm.info/wiki/HomePage> **12.** Ануфриев І., Смирнов А., Смирнова Е. MATLAB 7. Наиболее полное руководство / Санкт-Петербург: "БХВ-Петербург", 2005.— 1082 с.

Bibliography (transliterated): **1.** Kornienko V. V. The high-speed electric transport. World experience. V. V. Kornienko, V. I. Omelyanenko. Kharkiv, NTU «KhPI», 2007. **2.** Omelyanenko V. I. Trains with tiltable baskets for speed passenger motion. V. I. Omelyanenko, G. V. Kriviakin, D. I. Iakunin, E. S. Redchenko. Lokomotiv. — Kharkiv: Technostandart. — 2008. — №5. **3.** Omelyanenko V. I. Drive of inclination of baskets on the base of linear engine. V. I. Omelyanenko, D. I. Iakunin, E. S. Redchenko. Railway transport of Ukraine. — Kyiv: Transport of Ukraine, 2010. — № 6. **4.** Iakunin D. I. Loading description of mechanism of inclination of basket. D. I. Iakunin. Bulletin of NTU «KhPI». Series: Transport machine building. - Kharkiv: NTU «KhPI», 2009.— № 47. **5.** Iakunin D. I. Imitation design of loading description of mechanism of inclination of baskets. D. I. Iakunin. East - European magazine of front - rank technologies. — 2009.— № 6/6(42). **6.** Omelyanenko V. I. Design of mechanism of inclination of basket with a drive on the base of linear electric motor. V. I. Omelyanenko, B. G. Lubarsky, D. I. Iakunin. Railway transport of Ukraine. — Kyiv: Transport of Ukraine, 2011. — № 2. **7.** Omelyanenko V. I. Influence of parameters of executive mechanism on the indexes of work of linear engine in the system of drive of inclination of carriages of high-speed trains. V. I. Omelyanenko, B. G. Lubarsky, D. I. Iakunin. Electrical engineering and electrical mechanika. — Kharkiv: NTU «KhPI», 2011.— №4. **8.** Iakunin D. I. Development of imitation design of the electromechanics system of drive of inclination of baskets. D. I. Iakunin, B. H. Yeritsian, D. Iu. Shapovalov. Bulletin of NTU «KhPI». Series: Transport machine building. - Kharkiv: NTU «KhPI», 2012.— № 20. **9.** Iakunin D. I. Pre-conditions for the design of motion on the claotype way of the crew equipped by devices for inclination of basket. D. I. Iakunin, E. Iu. Zverev, A. N. Sribnik. Bulletin of NTU «KhPI». Series: Transport machine building. - Kharkiv: NTU «KhPI», 2013.—№ 32. **10.** Iakunin D. I. Electromechanics system of drive with a linear engine for inclination of baskets of speed rolling stock: autoref. dis. ... cand.tech. science: 05.22.09. D. I. Iakunin; NTU «KhPI». — Kharkiv., 2010. **11.** <http://www.femm.info/wiki/HomePage>. **12.** Anufriev I., Smirnov A., Smirnova E. MATLAB 7. Moatfullguide/ SPb: "BHV-Petersburg", 2005.

Поступила (received) 01.04.2014

