

Б.Г. ЛЮБАРСКИЙ, канд. техн. наук, доц., НТУ «ХПИ»

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНОГО УГЛА НАКЛОНА КУЗОВА СКОРОСТНОГО ЭЛЕКТРОПОЕЗДА С ТЯГОВЫМ ПРИВОДОМ НА ОСНОВЕ РЕАКТИВНОГО ИНДУКТОРНОГО ДВИГАТЕЛЯ С АКСИАЛЬНЫМ МАГНИТНЫМ ПОТОКОМ

Рассмотрен порядок определения рационального угла наклона кузова скоростного электропоезда с тяговым приводом на основе реактивных индукторных двигателей с аксиальным магнитным потоком. Использован комплексный критерий эффективности, определенный по результатам расчета кривых движения на участке пути.

Ключевые слова: электропоезд, механизм наклона кузова, реактивный индукторный двигатель, аксиальный магнитный поток, критерий эффективности.

Введение. Основным элементом электроподвижного состава (ЭПС) является *тяговый электропривод* – совокупность устройств, предназначенных для преобразования электрической энергии, получаемой из контактной сети, в полезную работу по перемещению электроподвижного состава. Его эффективность определяет в большей степени эффективность всего электропоезда. В работах [1, 2] отмечается, что определяющим для структуры тягового электропривода является электромеханический преобразователь энергии (ЭМП) – тяговый двигатель. Рассмотрены перспективные типы ЭМП для ЭПС. Одним из наиболее перспективных типов тяговых приводов для скоростного электропоезда является тяговый безредукторный привод на основе реактивного индукторного ЭМП с аксиальным магнитным потоком [3]. Также для улучшения эффективности тягового привода (по критериям расхода энергии и средней скорости движения) возможно применение системы наклона кузова электропоезда [4]. Снижение ограничений скорости движения при одновременном уменьшении затрат энергии на разгон электропоезда делают наклон кузова чрезвычайно привлекательным направлением для повышения эффективности электроподвижного состава. В работах [4, 5] рассмотрена одна из наиболее перспективных систем наклона кузова – электромеханическая система на основе линейного ЭМП. Однако повышение угла наклона кузова требует дополнительных затрат энергии для выполнения этой операции.

В работе поставлена следующая цель: определить рациональный угол наклона кузова скоростного электропоезда с тяговым приводом на основе реактивного индукторного ЭМП с аксиальным магнитным потоком.

Математическая модель. Расчет кривых движения основан на интегрировании уравнения движения [5, 6]:

$$m \frac{dv}{dt} = \frac{1}{1+\gamma} (F - W - B), \quad (1)$$

где m – масса электропоезда; v – скорость движения электропоезда; $1+\gamma$ – коэффициент инерции вращающихся частей; t – текущее значение времени; F – сила тяги; B – тормозная сила; W – полное сопротивление движению; γ – безразмерный коэффициент, учитывающий влияние вращающихся частей на ускорение движения электропоезда.

Сила тяги и торможения зависят от режима работы тягового привода. На реально существующих участках пути минимизация расхода энергии является частью решения сложной многокритериальной задачи. Однако для выбора типа ЭМП нами предлагается (для рассматриваемых задач движения ЭПС на участке пути при требовании минимизации времени движения на участке пути с заданным профилем и графиком движения) предложить следующие режимы движения ЭПС:

- с максимальной допустимой силой тяги, которое осуществляется для разгона ЭПС;
- на выбеге со скоростью, близкой к заданной;
- с максимальной силой торможения при требовании резкого снижения скорости ввиду её ограничения согласно графику движения;
- при работе электропривода с максимальным КПД в режиме тяги со скоростями, близкими к заданной, и больших сопротивлений движению (на затяжных подъемах);
- при работе электропривода с максимальным КПД в режиме торможения – движении со скоростями, близкими к заданной, при больших отрицательных сопротивлениях движению (на затяжных спусках).

Эти режимы согласуются с *принципом максимума Понтрягина* [7], согласно которому, движение поезда должно осуществляться с максимальной силой тяги для достижения установленной скорости движения или на выбеге.

В качестве показателя эффективности для ЭПС рассматривались различные величины. Наибольшее распространение получил показатель расхода энергии A [8]. Однако при рассмотрении вопроса о создании скоростного ЭПС на первый план выходит время движения, поэтому в качестве этого показателя возможно выбрать среднюю скорость v_{sr} . Эти два показателя могут быть взаимно противоречивы, поэтому для принятия решения по определению лучшего типа предлагается ввести относительный показатель эффективности.

Под показателем эффективности, как меры степени соответствия результата операции требуемому [7], выбирается величина, определяющая отличие реализуемой кривой движения поезда от идеализированной, позволяющей осуществлять движения поезда по участку пути с предельной для данного участка скоростью реализуя при этом все СЭМП по преобразованию энергии. Этот показатель можно определить следующей формулой:

$$W_{oemsi} = \frac{W_{real}}{W_{pred}}, \quad (2)$$

где W_{real} – энергия, преобразованная ЭПС из электрической в механическую энергию силы тяги или торможения; W_{pred} – предельно возможная энергия, которую может реализовать по условиям контакта колесо-рельс при максимально возможной скорости движения на участке пути.

Электрическая энергия, которую преобразовывала СЭМП, можно определить по выражению:

$$W_{real} = \frac{n}{3600} \left[\int_0^{t_{КП}} \frac{P_{2ПСП}}{\eta_C} dt + \int_{t_{HT}}^{t_{КТ}} P_{2ТСП} \eta_{СП} dt \right], \quad (3)$$

где n – количество тяговых двигателей ЭП; $P_{2ПСП}$, $P_{2ТСП}$ – средняя мощность на валу двигателя при разгоне и торможении соответственно; $t_{КП}$ и $t_{КТ}$ – время конца пуска и торможения; t_{HT} – момент времени начала торможения; η_C и $\eta_{СП}$ – КПД электропривода соответственно в режиме тяги и рекуперативного торможения.

Предельно возможная энергия, которую можно передать по условиям контакта колесо-рельс при максимально возможной скорости движения на участке пути, определяется так:

$$W_{real} = \frac{n}{3600} \int_0^{t_{\Sigma}} \frac{60 \mu v_{max}}{3.6 \pi D} \frac{M_k'(v_{max})}{9.55} dt, \quad (4)$$

где v_{max} – максимальная скорость на рассматриваемом участке движения, μ – передаточное отношение редуктора ЭПС; D – диаметр среднеизношенного бандажа колесной пары, $M_k'(v_{max})$ – максимально возможный момент на валу тягового двигателя по условию контакта колесо-рельс.

В результате в работе предлагается ввести комплексный критерий эффективности в виде:

$$W = \rho \left(\left[\begin{array}{l} MIN(A_{emsi}) \\ MAX(v_{sri}) \end{array} \right], W_{oemsi} \right), \quad (5)$$

где A_{emsi} – расход энергии i -го ЭПС, v_{sri} – средняя скорость i -го ЭПС.

Результаты моделирования. Для определения кривых движения поезда проведено интегрирование дифференциального уравнения (1) *методом Эйлера*.

Для анализа режимов работы выбран участок пути и графики движения, предложенные в работе [10] для участка Полтава-Красноград.

Результаты решения тяговой задачи приведены на рис. 1 – 3 (где M_2 момент на валу тяговых двигателей), а основные энергетические показатели приведены в таблице.

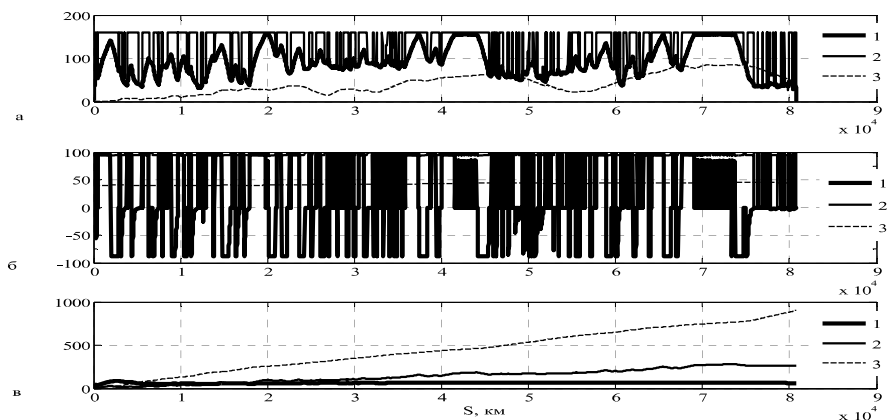


Рис. 1 – Кривые движения скоростного электропоезда без наклона кузова:
 а: 1 – скорость движения, км/ч, 2 – заданная скорость, км/ч, 3 – профиль пути, м;
 б: 1 – $M_2/50$, 2 – КПД, %, 3 – температура тягового двигателя, °С;
 в: 1 – $W_{oemsi} \cdot 1000$, 2 – расход энергии, кВт ч, 3 – время движения/4, с.

Как видно из рисунков и таблицы, использование наклона кузова на 4° позволяет резко повысить среднюю скорость движения поезда с 76,52 км/ч до 123,28 км/ч, при этом расход энергии также увеличился. Увеличение наклона с 4° до 6° приводит к незначительному изменению как скорости дви-

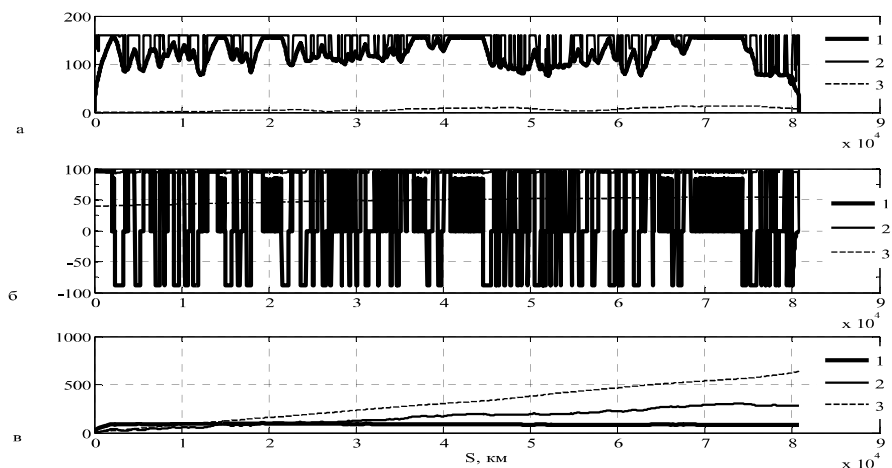


Рис. 2 – Кривые движения скоростного электропоезда при максимальном наклоне кузова на 4 градуса: а: 1 – скорость движения, км/ч, 2 – заданная скорость движения, км/ч, 3 – профиль пути, м; б: 1 – $M_2/50$, 2 – КПД, %, 3 – температура тягового двигателя, °С; в: 1 – $W_{oemsi} \cdot 1000$, 2 – расход энергии, кВт ч, 3 – время движения/4, с.

жения, так и расхода энергии. Это обусловлено незначительным изменением числа ограничений скорости движения. Расход энергии, затрачиваемый на наклон кузова, несоизмеримо мал, с расходом энергии на тягу.

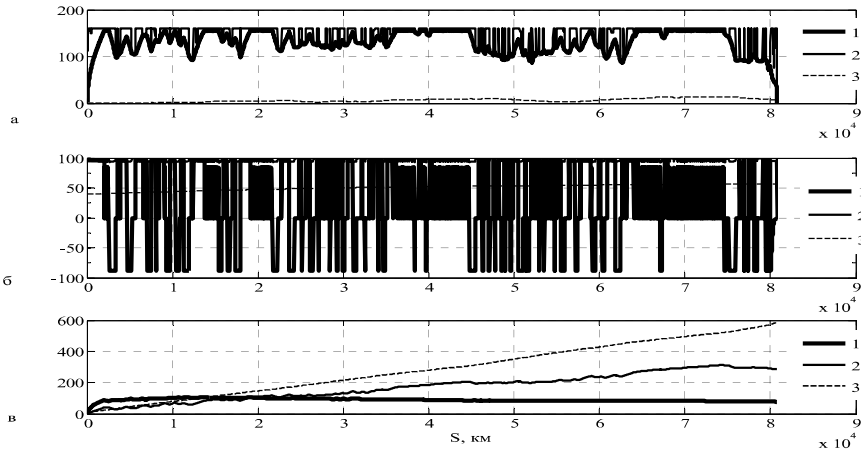


Рис. 3– Кривые движения скоростного электропоезда при максимальном наклоне кузова на 6 градуса: *а*: 1 – скорость движения, км/ч, 2 – заданная скорость движения, км/ч, 3 – профиль пути, м; *б*: 1 – $M_2 / 50$, 2 – КПД, %, 3 – температура тягового двигателя, °С; *в*: 1 – $W_{oecmsi} \cdot 1000$, 2 – расход энергии, кВт ч, 3 – время движения/4, с.

Таблица – Основные энергетические показатели движения скоростного электропоезда на участке пути Полтава-Красноград

Угол наклона кузова, град.	Расход энергии на тягу, кВт·ч	Расход энергии на изменение наклона кузова, кВт·ч	Суммарный расход энергии, кВт·ч	Средняя скорость движения, км/ч	Показатель эффективности, отн. ед.
0	263,715	0	263,715	76,52	0,0637
4	281,089	0,316	281,405	113,16	0,0797
6	288,093	0,825	288,918	123,28	0,0775

Поэтому даже значительное относительное изменение этих затрат не повлекло за собой увеличение общего расхода энергии. Согласно критерия эффективности, наилучшим решением является: скоростной электропоезд с наклоном кузова до 4° .

Выводы. В качестве критерия эффективности выбран комплексный критерий со следующими составляющими: расход энергии электропоезда, средняя скорость движения, показатели эффективности. Определено, что расход энергии на изменение наклона кузова несоизмеримо мал по сравнению с расходом энергии на тягу. Поэтому даже значительное относительное

изменение этих затрат не повлекло за собой увеличение общего расхода энергии. Согласно критерия эффективности, наилучшим решением является: скоростной электропоезд с наклоном кузова до 4° .

Список литературы: 1. *Омельяненко В.И., Любарский Б.Г., Рябов Е.С., Демидов А.В., Глебова Т.В.* Анализ и сравнение перспективных тяговых электродвигателей // *Залізничний транспорт України*. – 2008. – №2/1. – С. 26 – 31. 2. *Омельяненко В.И., Любарский Б.Г., Рябов Е.С., Демидов А.В., Глебова Т.В.* Электродвигатели для перспективного электроподвижного состава // *Локомотив-информ*. – 2008. – №1. – С. 16 – 19. 3. *Рябов Е.С.* Безредукторный тяговый привод на основе реактивного индукторного двигателя с аксиальным магнитным потоком для скоростного электроподвижного состава / Е.С. Рябов // *дисс. ... канд. техн. наук.* – Харьков. 2011 – 162с. 4. *Якунин Д.И.* Электромеханическая система привода с линейным двигателем для наклона кузовов скоростного подвижного состава / Д.И. Якунин // *дисс. ... канд. техн. наук.* – Харьков. 2010 – 202с. 5. *Правила тяговых расчетов поездной работы.* – М.: Транспорт. 1985. – 287 с. 6. *Основы локомотивной тяги. Учебник для техникумов ж.-д. трансп. / С.И. Осипов, К.А. Миронов, В.И. Ревич.* 3-е изд., доп. и перераб. – М.: Транспорт, 1979. – 440 с. 7. *Постол Б.Г.* Теоретические основы разработки рациональных режимов вождения поездов и расчета масс составов: Уч. пособие. – Хабаровск: ДВГУПС. 1998. 61с. 8. *Мушинский Л.А., Илютович А.У., Ябло И.А.* Энергооптимальные методы управления движением поездов: сб. науч. тр. «ВНИИЖТ». – М.: Интекст, 2012. – 80с. 9. *Логина Е.Ю., Солдатенко Д.А.* Использование критериев эффективности при выборе тягового электродвигателя для электрической передачи тепловоза / *Транспорт: наука, техника, управление.* – 2009. – №2. – С. 22 – 27 10. *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.

Поступила в редколлегию 26.02.2014

УДК 621.313

Определение рационального угла наклона кузова скоростного электропоезда с тяговым приводом на основе реактивного индукторного двигателя с аксиальным магнитным потоком / Б. Г. Любарский // *Вісник НТУ «ХПІ»*. Серія: Математичне моделювання в техніці та технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ», 2014. – № 6 (1049). – С. 118 – 123. *Бібліогр.*: 10 назв. – ISSN 2222-0631.

Розглянуто визначення раціонального кута нахилу кузова швидкісного електропоїзда з тяговим приводом на основі реактивних індукторних двигунів з аксіальним магнітним потоком на основі комплексного критерію ефективності, визначеного за результатами розрахунку кривих руху на ділянці шляху.

Ключові слова: електропоїзд з механізмом нахилом кузова, реактивний індукторний двигун аксіальним магнітним потоком, критерій ефективності.

UDC 621.313

Determination of the rational angle of the body of a speed train with an electric traction drive based on the inductor jet engine with axial magnetic flux / B. G. Lyubarskiy // *Bulletin of National Technical University «KhPI» Series: Mathematical modeling in engineering and technologies.* – Kharkiv: NTU «KhPI», 2014. – № 6 (1049). – pp. 118 – 123. *Bibliog.*: 10 titles. – ISSN 2222-0631.

The article deals with calculating the rational tilting angle of the body of a speed train with an electric traction drive based on the inductor jet engine with axial magnetic flux using complex efficiency criterion determined by the results of calculation of motion curves on the plot path.

Key words: train with tilting mechanism, efficiency criterion of inductor jet engine with axial flux.