

## REFERENCES

1. Kuznetsov V.A., Kuzmichev V.A. *Ventilno-induktornye dvigateli* (Switched reluctance motors). Moscow, MEI Publ., 2003. 70 p.
2. Irimia N.D., Simon A., Livadaru L., Vlasceanu S., Dabija O., Mihai A.M. Study of a 3 phase (6/4) switched reluctance motor control. *Buletinul AGIR*, 2001. pp.129–134.
3. Krishnan R. *Switched reluctance motor drives: modeling, simulation, analysis, design, and applications*. Boca Raton, CRC Press, 2001. 432 p.
4. Odnokopylov G.I., Rozaev I.A., Bukreev V.G. *Ventilno-induktorny elektropriwod so svoystvom zhivuchesti* (switched reluctance drive with survivability property). Patent RF, no. 2012153519/07, 2013.

УДК 621.33, 629.423.1

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА БУКСОВАНИЯ КОЛЁСНОЙ ПАРЫ РУДНИЧНОГО ЭЛЕКТРОВОЗА В ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМАХ

А.Д. Вильнин\*, С.Н. Кладиев, Б.И. Пякилля

Томский политехнический университет

\*Томский государственный архитектурно-строительный университет

E-mail: va771@mail.ru; kladiev@tpu.ru; pakillaboris@gmail.com

*Описан косвенный метод получения информации об эффекте буксования колесной пары рудничного электровоза на основе использования особой фильтрационной схемы, которая производит фильтрацию измеренного момента сопротивления колесной пары тягового электровоза и выделяет сигнал, величина которого пропорциональна величине буксования. Также в работе представлены результаты имитационного моделирования. Далее выполнен анализ результатов моделирования на основе сравнения графиков линейных скоростей колесной пары тягового рудничного электровоза и корпуса электровоза при использовании алгоритма компенсации эффекта буксования и при его отсутствии. Метод обнаружения эффекта буксования колесной пары и основанный на нем алгоритм управления тяговым электроприводом колесной пары электровоза позволяют повысить энергоэффективность процессов разгона и торможения подвижного состава с тяговым рудничным электровозом.*

### Ключевые слова:

*Рудничный электровоз, система управления движением, частотно-регулируемый электропривод, люфт, буксование, много-массовая модель подвижного состава.*

### Введение

Рудничный электротранспорт в угольных шахтах и шахтах по добыче металлических руд работает в сложных условиях эксплуатации, какими являются: наличие абразивной пыли, влаги на рельсах и т. п., что снижает коэффициент сцепления колёс с рельсами. Эти факторы приводят к буксованию колёсной пары относительно рельсов и как следствие существенно снижают производительность тягового электрооборудования и безопасность движения состава [1]. Наибольшую интенсивность буксование имеет в динамических режимах работы, а именно в процессах разгона и торможения подвижного состава. Все это значительно снижает эффективность работы тяговых электровозов, которым приходится тратить большое количество энергии для преодоления эффекта буксования, что отрицательно сказывается на энергоэффективности электрооборудования [2].

Известен способ обнаружения начала процесса буксования транспортного средства, заключающийся в том, что явление буксования определяют по разности линейной скорости движения подвижного состава относительно неподвижной системы координат и линейной скорости движения оси колесной пары относительно подвижной системы координат, которая определяется как произведение

угловой частоты вращения колеса на его радиус. Использование такого способа обнаружения буксования предполагает наличие двух датчиков измерения линейной скорости движения. Один датчик связан с корпусом и измеряет линейную скорость состава относительно неподвижной системы координат, а именно рельсового пути, и является датчиком оптического или электромагнитного действия. Второй является датчиком угловой частоты вращения колеса относительно оси, который связан с приводным тяговым двигателем [2]. Данный способ не может быть реализован в подземном транспортном средстве, поскольку датчик линейной скорости состава не подходит для использования в условиях горных выработок.

В [2] приведено описание способа определения буксования колес относительно рельс, основанного на выявлении пульсаций тока электродвигателя с частотой упругих фрикционных автоколебаний, возникающих в этих режимах. Практическая реализация данного устройства в аналоговом исполнении оказалась сопряжена с серьезными сложностями, вызванными, в частности, пульсациями, которые зависят от наличия эксцентриситета колес, неровностей путей, пульсациями от зубчатой передачи, упругих колебаний, возникающих при изменении упругих и возмущающих воздействий.

В [3] был предложен способ и устройство обнаружения буксования и юза колес рельсового транспортного средства, содержащее датчик колебаний механической части привода колесной пары и два канала обнаружения буксования. Основным недостатком этого способа и устройства является то, что изменение характера колебаний механической системы происходит в момент начала буксования или юза колесной пары, т. е. является возмущением для системы автоматического управления частотой вращения тягового двигателя. Также устройство имеет недостаток в виде использования в его структуре тензодатчика, выходом которого является аналоговый сигнал малой мощности, подверженный воздействию помех и шума.

Все вышеуказанные способы имеют те или иные существенные недостатки, связанные либо с неточностью обнаружения факта проскальзывания, либо со сложностью измерения линейной скорости электровоза, либо с недостаточной надежностью устройств измерения этой скорости.

#### Постановка задачи

В настоящей работе исследована возможность повышения точности, надежности устройства обнаружения буксования и юза, который на нем реализован.

Способ и устройство для его реализации могут применяться только совместно, так как при этом используются возможности цифровой системы управления частотно-регулируемого тягового электропривода и внешние блоки устройства, программно реализованные на внешнем микроконтроллере.

Научная новизна работы заключается в использовании математической модели тягового электровоза как объекта для обнаружения эффекта буксования колесной пары в динамических режимах работы, а также в использовании свойств полосового фильтра и фильтра низких частот для определения степени буксования. Предмет исследования – методика анализа колебаний электромагнитного момента частотно-регулируемого привода колесной пары при обработке аддитивной гармонической составляющей в сигнале задания электромагнитного момента электропривода.

#### Математические основы метода

Используем математическую модель тягового электровоза, представленную в работах [4, 5]. На основании второго закона Ньютона для вращательного движения [6] выразим момент сопротивления одной из колесных пар (КП) через задающий момент и момент инерции КП, умноженный на ее угловое ускорение:

$$M_1(t) = M_3(t) - J_1 \varepsilon(t),$$

где  $M_3(t)$  – задающий момент;  $J_1$  – момент инерции КП;  $\varepsilon(t)$  – угловое ускорение колеса.

Эта величина и будет нами использоваться в дальнейшем для определения эффекта буксования.

В основе предложенного метода определения буксования используются два вида фильтров: полосовой фильтр (ПФ) и фильтр низких частот (ФНЧ), каждый из которых выполняет функцию «наблюдателя» избыточной скорости скольжения [7]. Эти фильтры отсекают всю ненужную информацию и формируют необходимый сигнал события. Математически метод можно описать следующим образом: пусть при  $M_3 \neq 0$  генератором колебаний формируется некоторый гармонический сигнал  $f(t)$  с частотой  $\omega$ , который аддитивно добавляется к задающему моменту:

$$f(t) = A \sin(\omega t),$$

где амплитуду  $A$  можно принять равной единице. После этого функция скорости скольжения  $U_1(t)$  для первой колесной пары будет иметь вид (1)

$$U_1(t) = \left( \int_0^t M_3(\tau) + A \sin(\omega \tau) - \right) \frac{R}{J_1} - V_{et}(t), \quad (1)$$

$$-M_1(\tau) d\tau$$

где  $R$  – радиус колеса;  $V_{et}(t)$  – линейная скорость электровоза.

Момент же первой КП, записанный в зависимости от скольжения [2], имеет вид (2)

$$M_1(t) = M_3(t) - J_1 \varepsilon(t) = \left( \Phi_0 \left( 1 - \exp\left(\frac{-2U_1(t)}{U_0}\right) \right) \right) \frac{mR}{k_n}, \quad (2)$$

где  $\Phi_0$  – коэффициент сцепления;  $m$  – масса электровоза;  $k_n$  – передаточный коэффициент механической передачи (редуктора).

Данная величина является входным сигналом для полосового фильтра, имеющего передаточную функцию (3)

$$W_{нф}(p) = \frac{kp}{p^2 + ap + b}, \quad (3)$$

где  $p$  – комплексная переменная.

На основе (1)–(3) реакция фильтра приближенно будет описываться функцией вида

$$h(t) = \int_0^t M_1(t - \tau) w(\tau) d\tau = \int_0^t \left( \frac{2\Phi_0 mR}{kU_0} \frac{dU_1(t - \tau)}{dt} \exp\left(\frac{-2U_1(t - \tau)}{U_0}\right) \right) = \int_0^t \left( \frac{k \exp(-p_1 \tau)}{2p_1 + a} + \frac{k \exp(-p_2 \tau)}{2p_2 + a} \right) d\tau, \quad (4)$$

где  $p_1, p_2$  – корни характеристического полинома ПФ;  $a, b$  – параметры фильтра.

Выражение (4) показывает явную зависимость между выходом фильтра и величиной скольжения, при повышении скольжения значение выходного сигнала стремится к нулю, в противном случае выходной сигнал увеличивается. Так как полосовой фильтр пропускает сигналы определенной частоты, а нам необходимо выделение собственно частоты,

ты испытательного сигнала  $f(t)$ , для выявления лучшей качественной картины мы использовали ФНЧ. Его передаточная функция имеет вид (5):

$$W_{\text{фнч}}(p) = \frac{1}{\frac{1}{\omega_c} p + 1}, \quad (5)$$

где  $\omega_c$  – частота среза фильтра.

**Результаты моделирования**

Основным доказательством работы метода, если аналитические зависимости в явном виде получить невозможно или достаточно тяжело, является анализ результатов моделирования процесса, которые представлены в графической форме. Для моделирования использовался программный пакет *MATLAB Simulink* фирмы *Mathworks*.

На рис. 1 представлен график косвенно измеренного момента сопротивления первой колесной пары  $M_1(t)$ :

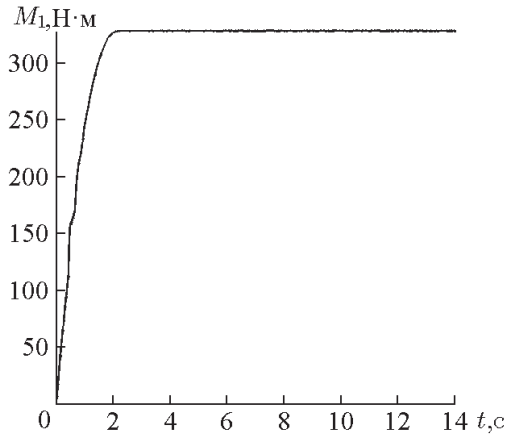


Рис. 1. Зависимость момента сопротивления  $M_1(t)$  от времени

Колебания относительно среднего значения момента обусловлены процедурой дифференцирования. Изображения зависимостей линейных скоростей колесной пары  $V_1(t)$  и электровоза  $V_{et}(t)$  в функции времени представлены на рис. 2.

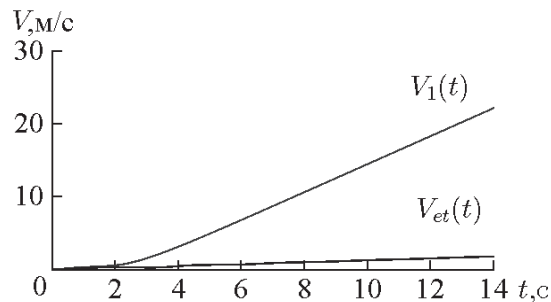


Рис. 2. Графики линейных скоростей  $V_1(t)$  и  $V_{et}(t)$  при наличии буксования колесной пары

Как видно из графиков, существует расхождение в значениях линейных скорости обода колесной пары относительно ее оси вращения и скорости оси колесной пары относительно неподвижной системы координат (рельсового пути), обусловленное эффектом буксования. Эффект буксования опреде-

ляется величиной скорости скольжения  $U_1(t)$ , которая получается на основе выражения (6):

$$U_1(t) = V_1(t) - V_{et}(t). \quad (6)$$

Величина (6) растет, а одновременно с нею растет количество энергии, которое тратится вхолостую. Эту проблему можно решить, используя некоторый тип наблюдателей, позволяющий определить качественное поведение величины скольжения, и уже на основе этой информации необходимо провести синтез закона управления на регулируемый электропривод для устранения буксования.

Для этого используется алгоритм наблюдения, основанный на применении особой схемы фильтрации, состоящей из полосового фильтра и фильтра низких частот. Далее происходит уменьшение буксования при помощи ограничения задающего момента. На рис. 3 представлены графики линейных скоростей, а также график скорости скольжения  $U_1(t)$  на рис. 4 при использовании управляющего алгоритма, на котором пунктирной линией показана максимальная величина скольжения, которая считается приемлемой.

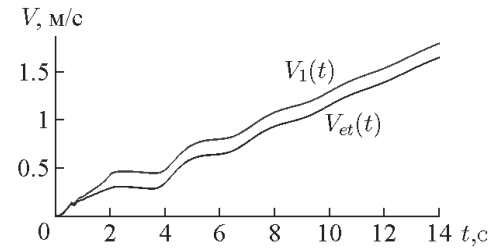


Рис. 3. Линейные скорости  $V_1(t)$  и  $V_{et}(t)$  при использовании алгоритма компенсации буксования

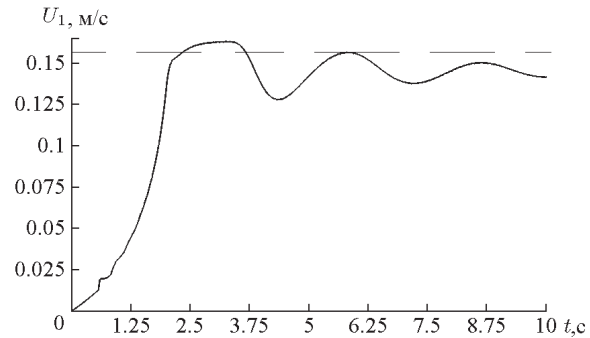


Рис. 4. Зависимость скорости скольжения от времени  $U_1(t)$

Анализ изменения скорости скольжения от времени (рис. 4) показывает, что данный метод позволяет эффективно компенсировать явление буксования колесной пары путем управления ее разгона и торможения с помощью регулируемого электропривода. Величина скорости скольжения ограничена и поддерживается на минимально допустимом уровне ( $U_1(t) \approx 0,15$  м/с), когда коэффициент сцепления обода колеса с рельсом практически не меняется. Время работы алгоритма компенсации буксования в имитационной модели ( $t_p \approx 2$  с) соотносится со временем переходного процесса разгона или торможения колесной пары подвижного состава рудничного электровоза которое на порядок больше.

В дальнейшем планируется исследовать взаимовлияние тяговых электроприводов первой и второй колесных пар электровоза при их совместном управлении в переходных режимах движения состава по рельсовым путям сложного профиля при различной загрузке вагонов сырьем.

#### Выводы

1. По результатам имитационного моделирования доказана работоспособность метода определения эффекта буксования колесной пары в переходных режимах разгона и торможения.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тимошенко А.В. Динамика автоматизированного электропривода рудничного электровоза с цифровым устройством распознавания буксования // *Електротехнічні та комп'ютерні системи*. – 2011. – Вып. 03 (79). – С. 153–154.
2. Кутовой Ю.Н. Повышение тяговых свойств рудничного электровоза средствами электропривода: дис. ... канд. техн. наук. – Харьков, 1984. – 186 с.
3. Устройство обнаружения буксования и юза колес рельсового средства: пат. 2071197 Российская Федерация, МПК В 60 L 3/10. № 94044536/11; заявл. 14.12.1994; опубл. 27.12.1996, Бюл. № 11. – 1 с.
4. Кладиев С.Н., Вильнин А.Д., Пякилля Б.И. Модель электро-механической системы подвижного состава рудничного элек-

2. Метод позволяет сформировать закон управления тяговым электроприводом колесной пары, который работает в режиме регулирования момента с ограничениями на рывок, ускорение частоты вращения колесной пары и исключает явление буксования. Это позволяет добиться снижения потерь энергии при разгонах и торможениях состава.
3. Появляется возможность увеличить ресурс работы колесной пары за счет уменьшения износа обода колеса о рельс при трении из-за предотвращения режима буксования в переходных режимах.

*Работа выполнена в рамках Госзаказа «Наука» № 7.2826.2011.*

тровоза // *Современные технологии. Системный анализ. Моделирование*. – 2013. – Вып. 1 (37). – С. 65–68.

5. Вильнин А.Д., Кладиев С.Н. Структура тягового электропривода рудничного электровоза // *Современные проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании: сб. науч. тр.* – Одесса: Черноморье, 2011. – Т. 2. – С. 80–85.
6. Бутенин Н.В., Лунц Я.Л., Меркин Д.Р. Курс теоретической механики. В 2-х т. Т. II: Динамика. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1979. – 544 с.
7. Оппенгейм А., Шафер Р. Цифровая обработка сигналов. – М.: Техносфера, 2006. – 856 с.

*Поступила 10.10.2013 г.*

UDC 621.33, 629.423.1

## INVESTIGATION OF WHEEL PAIR SKIDDING IN MINE ELECTRIC LOCOMOTIVE IN TRANSIENT CONDITION

A.D. Vilnin\*, S.N. Kladiev, B.I. Pyakillya

Tomsk Polytechnic University

\*Tomsk State University of Architecture and Building

*The paper describes the indirect method of obtaining the information on wheel pair skidding. The method is based on using a special filtration scheme which filters the estimated resistive torque and highlights the signal which is proportional to wheel pair skidding. The work introduces as well the imitation modeling results. The modeling results were analyzed by comparing the linear velocities of wheel pair and electric locomotive in different modes. The method helps to increase energy efficiency of acceleration and braking processes of mobile composition with mine electric locomotive.*

#### Key words:

*Mine electric locomotive, motion control system, variable frequency drive, backlash, skidding, multimass model of mobile composition.*

#### REFERENCES

1. Timoshchenko A.V. *Elektrotehnikni ta kompyuterni sistemi*, 2011. 03 (79), pp. 153–154.
2. Kutovoy Yu.N. *Povyshenie tyagovykh svoystv rudnichnogo elektrovoza sredstvami elektroprivoda*. Diss. kand. tekhn. nauk (Increase of haulage capacity of mine electric locomotive by means of electric drive. Cand. techn. sci. diss.). Harkov, 1984. 186 p.
3. Pavlenko A.P., Pavlenko A.A., Klepikov V.B., Kutovoy Yu.N. *Ustroystvo obnaruzheniya buksovaniya i yuza kolel relsovoogo sredstva* (The device for determining skidding and slipping of rail vehicle wheels). Patent RF, no. 94044536/11, 1996.
4. Kladiev S.N., Vilnin A.D., Pyakillya B.I. *Sovremennye tekhnolo-*

*gii. Sistemnyj analiz. Modelirovanie*, 2013. 1 (37), pp. 65–68.

5. Vilnin A.D., Kladiev S.N. *Struktura tyagovogo elektroprivoda rudnichnogo elektrovoza. Sovremennye problemy i puti ikh resheniya v nauke, transporte, proizvodstve i obrazovanii*. Sbornik nauchnykh trudov (Structure of traction drive of a mine locomotive. Proc. Current problems and the ways of the solution in science, transport, industry and education). Odessa, Chernomorye, 2011. 2, pp. 80–85.
6. Butenin N.V., Lunts Ya.L., Merkin D.R. *Kurs teoreticheskoy mekhaniki. T. II: Dinamika* (The course of theoretical mechanics. Dynamics). 2<sup>nd</sup> Iss. Moscow, Nauka, 1979. 2, 544 p.
7. Oppengeym A., Shafer R. *Tsifrovaya obrabotka signalov* (Signal digital processing). Moscow, Tekhnosfera, 2006. 856 p.