

УДК 62-932.2

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЕНТИЛЬНО-ИНДУКТОРНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА В АВАРИЙНЫХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ

Г.И. Однокопылов, И.А. Розаев

Томский политехнический университет  
E-mail: RozayevIA@gmail.com

Рассмотрена имитационная модель в среде MatLab Simulink для одно- и двухсекционного вентильно-индукторного электропривода в составе электроприводов опасных производственных объектов, позволяющая исследовать его работу в нормальных, аварийных и неполнофазных режимах работы. Приведен алгоритм отказоустойчивого управления, позволяющий обеспечивать восстановление работоспособности вентильно-индукторного электропривода на основе непрерывного мониторинга фазных токов и активизации алгоритма восстановления работоспособности. Приведены результаты имитационного моделирования переходных процессов при обрыве одной фазы статора односекционного и двухсекционного двигателей. Выполнено сравнение временных диаграмм по частоте вращения односекционного и двухсекционного вентильно-индукторного электропривода. Приведены зависимости провала частоты вращения от времени переключения структуры электропривода и величины нагрузки. Показана адекватность предложенной математической модели, позволяющей исследовать вентильно-индукторный электропривод.

### Ключевые слова:

Имитационная модель вентильно-индукторного электропривода, двухсекционный вентильно-индукторный электропривод, обрыв фазы электродвигателя, алгоритм отказоустойчивого управления, время переключения структуры электропривода.

В последние годы наблюдается увеличение количества работ зарубежных и отечественных авторов в области создания простых по конструкции и надежных электрических машин для электроприводов, где технологичность, простота, низкая цена и отказоустойчивость исполнительного двигателя, выполненного на основе вентильно-индукторного двигателя (ВИД), имеют решающее значение, а требуемые показатели качества достигаются за счет применения высокоинтеллектуальных преобразователей частоты. Эти исследования могут быть применены для электроприводов (ЭП) в составе промышленного оборудования опасных производственных объектов: ядерных, военных, химических, строительных, металлургических и транспортных, то есть там, где существует необходимость организации отказоустойчивого управления исполнительными электроприводами с обеспечением свойства живучести.

Обеспечение необходимого уровня живучести возможно за счет секционирования вентильно-индукторной машины, входящей в состав электропривода. Конструктивно двигатель, входящий в состав электропривода, обеспечивает полную независимость статорных обмоток друг от друга, что дает возможность ЭП продолжить работу на исправных фазах двигателя при таких аварийных ситуациях, как отказ ключа преобразователя частоты (ПЧ) или обрыв фазы двигателя. Для обеспечения работы ЭП при таких отказах без существенных провалов по частоте вращения и моменту можно применить двухсекционный или многосекционный вентильно-индукторный электропривод (ВИП), имеющий независимое управление статорными обмотками [1].

Для исследования ВИП в аварийных режимах работы и разработки алгоритмов отказоустойчивого управления необходимо разработать имитационную модель многосекционного ВИП. В статье

рассматривается имитационная модель двухсекционного ВИП в среде MatLab Simulink, а также способ обеспечения свойства живучести многофазного ВИП за счет микроконтроллерного управления электроприводом с реализацией алгоритма восстановления работоспособности.

При разработке модели двухсекционного ВИП за основу взята модель односекционного ВИП [2, 3]. Параметры односекционного 3-х фазного вентильно-индукторного электропривода с 6 полюсами на статоре и 4 на роторе приведены в таблице.

**Таблица.** Параметры модели односекционного вентильно-индукторного электропривода

Параметр	Величина
Сопротивление обмотки статора, Ом	0,05
Момент инерции, кг·м <sup>2</sup>	0,05
Момент сил трения, Н·м	0,02
Начальная скорость $\omega_0$ , рад/с	0
Начальное положение ротора $\Theta_0$ , рад	0
Индуктивность при рассогласованном положении, Гн	$0,67 \cdot 10^{-3}$
Индуктивность в согласованном положении, Гн	$23,6 \cdot 10^{-3}$
Индуктивность насыщения согласованного положения, Гн	$0,15 \cdot 10^{-3}$
Максимальный ток, А	450
Максимальное потокосцепление, В·с	0,486
Напряжение питания, В	230

При моделировании использовалась преобразовательная ячейка (ПЯ), выполненная по схеме однофазного инвертора напряжения, изображенная на рис. 1, а [2], с расчетными временными диаграммами потокосцепления, тока статорных обмоток и вращающего момента, рис. 1, б.

Полученные в разработанной модели диаграммы (рис. 1, б) полностью совпадают с диаграммами, приведенными в работе [2], рассчитанными

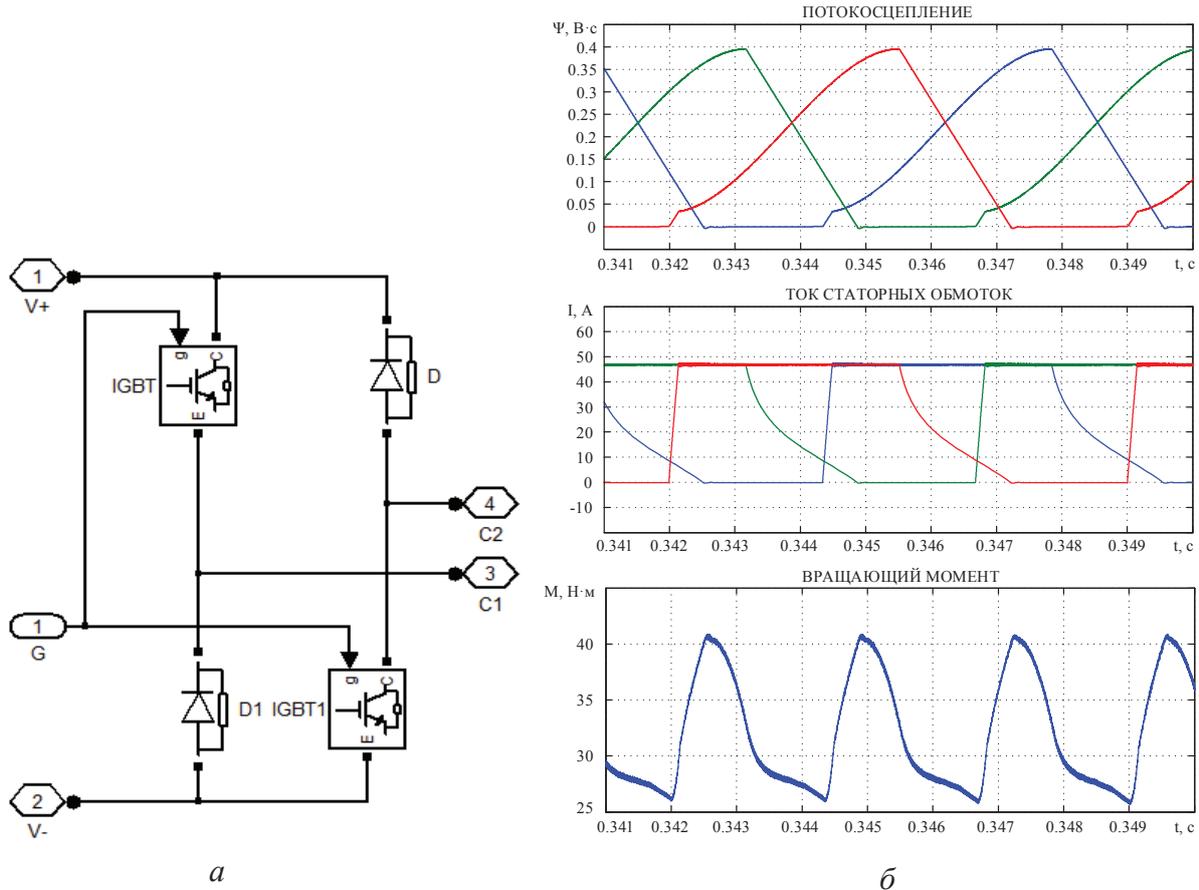


Рис. 1. Схема инвертора (а) и временные диаграммы (б) потокосцепления, тока и вращающего момента

для двигателя с параметрами, приведенными в таблице, что позволяет судить об адекватности разработанной имитационной модели односекционного ВИП.

После подтверждения работоспособности односекционной модели ВИП на её основе была реализована  $n$ -секционная модель ВИП (рис. 2) с  $m$ -фазным преобразователем частоты ВИП, выполненным на основе однофазного инвертора (рис.1), с микроконтроллерной системой управления (МК) и датчиком положения (ДП) позиционной обратной связи.



Рис. 2. Функциональная схема многосекционного вентильно-индукторного электропривода

В многосекционном ЭП каждая секция может рассматриваться как независимая обмотка, что является особенностью данного типа электродвигателя. Работа ЭП осуществляется за счет сигналов, поступающих с ДП в СУ, в которой МК на основе сигналов с соответствующих датчиков тока каждой фазы формирует текущее задание на ток для ПЧ. ПЧ осуществляет коммутацию транзисторов

ПЧ, обеспечивая поочередное питание фаз каждой секции электродвигателя. Каждая секция  $m$ -фазного ПЧ в общем случае содержит  $m$  защитных элементов [4].

ЭП с отказоустойчивым управлением, выполненный по предложенному способу, на примере 2-секционного ВИП с  $m$ -фазным преобразователем, позволяет обеспечить эффективные алгоритмы формирования токов в фазных обмотках с целью минимизации пульсаций магнитодвижущей силы. Для обеспечения функционирования отказоустойчивого алгоритма требуется, чтобы каждая  $m$ -фазная обмотка двухсекционного вентильно-индукторного двигателя поочередно запитывалась однополярным импульсом тока. Для этого измеряется период сигнала фазы датчика положения ротора, вычисляются временные интервалы, определяющие начало и окончание зон импульсов управления силовыми ключами инвертора напряжения и по результатам измерений и вычислений формируется последовательность импульсов управления силовыми ключами каждой фазы. Формируются биты отказов отдельно для каждой секции  $m$ -фазного двухсекционного ВИП:  $i=1...m$ , по результатам анализа мгновенных значений амплитуды фазных токов первой секции электродвигателя:

- если  $|I_{1zi} - I_{1oci}| \geq \delta$ , то выявляют отказ  $i$ -фазы первой секции:  $a_{1i}=1, \bar{a}_{1i}=0$ ,

второй секции электродвигателя:

- если  $|I_{2zi} - I_{2oci}| \geq \delta$ , то выявляют отказ  $i$ -фазы второй секции:  $a_{2i} = 1, \bar{a}_{2i} = 0$ ,

где  $I_{1zi}$  – заданные значения мгновенной амплитуды формируемых фазных токов для  $i$ -фазы первой секции, А;  $I_{2zi}$  – заданные значения мгновенной амплитуды формируемых фазных токов для  $i$ -фазы второй секции, А;  $\delta$  – допустимая ошибка работы регулятора тока. При наличии отказа в одной из фаз электродвигателя происходит блокирование соответствующим инверсным битом отказа  $\bar{a}_{1i}, \bar{a}_{2i}$  соответствующей преобразовательной ячейки первой секции ПЯ<sub>1i</sub> или второй секции ПЯ<sub>2i</sub> от цепей питания, после чего формируется увеличенное задание амплитуды фазного тока для соответствующей исправной преобразовательной ячейки другой секции, для первой секции по выражению (1):

$$I_{1zi} = I_{\omega} \bar{a}_{1i} (1 + \bar{a}_{2i}) \frac{1}{2} [1 + \text{sign}(\alpha(\Theta_k, i) - \alpha(t))]; \quad (1)$$

для второй секции по выражению (2):

$$I_{2zi} = I_{\omega} \bar{a}_{2i} (1 + \bar{a}_{1i}) \frac{1}{2} [1 + \text{sign}(\alpha(\Theta_k, i) - \alpha(t))]; \quad (2)$$

где  $I_{\omega}$  – значение амплитуды формируемых фазных токов, А;  $\alpha(\Theta_k, i)$  – значения формируемого угла, рад;  $\alpha(t)$  – мгновенное значение датчика положения ротора, рад.

Проверка предложенного алгоритма отказоустойчивого управления была осуществлена на имитационной модели двухсекционного ВИП в среде MatLab Simulink рис. 3.

На основании модели ВИП рис. 3 были проведены исследования аварийных ситуаций, возникающих в ВИП. Зависимости частоты вращения от времени при отказе в одной из фаз ПЧ приведены

на рис. 4 для односекционного и на рис. 5 для двухсекционного двигателя, бит отказа изображен сигналом логического уровня напряжения +5 В.

Как следует из диаграммы, представленной на рис. 4, в случае аварийного отключения одной из фаз односекционного трехфазного вентильно-индукторного электропривода происходит 33 % снижение частоты вращения от номинального значения при номинальной нагрузке с сохранением частичной работоспособности электропривода.

На рис. 5 показан процесс обрыва одной фазы одной секции с дальнейшим восстановлением работоспособности за счет удвоения тока одноименной фазы второй секции в двухсекционном электроприводе. Восстановление работоспособности происходит практически без потери качества работы ЭП. Как видно из рисунка, такой алгоритм позволяет полностью восстановить работоспособность электропривода за время восстановления  $T_{\text{в}}$ . Время провала  $T_{\text{п}}$  и время восстановления  $T_{\text{в}}$  вместе составляют время переключения структуры электропривода  $T_{\text{эп}}$ , величина которого определяет качество процесса восстановления работоспособности ВИП. За время  $T_{\text{эп}}$  частота вращения изменится на величину  $\Delta\omega$ :

$$\Delta\omega = (\omega_{\text{ном}} - \omega_{\text{п.мах}}) \cdot 100 \%, \quad (3)$$

где  $\omega_{\text{ном}}$  – номинальное значение частоты вращения,  $\omega_{\text{п.мах}}$  – максимальное значение провала частоты вращения при отказе фазы одной секции.

На рис. 6 приведен 3-х мерный график зависимости  $\Delta\omega$  от величины нагрузки  $M_c$ , представленной в относительных единицах от величины номинальной нагрузки, и времени переключения структуры электропривода  $T_{\text{эп}}$ .

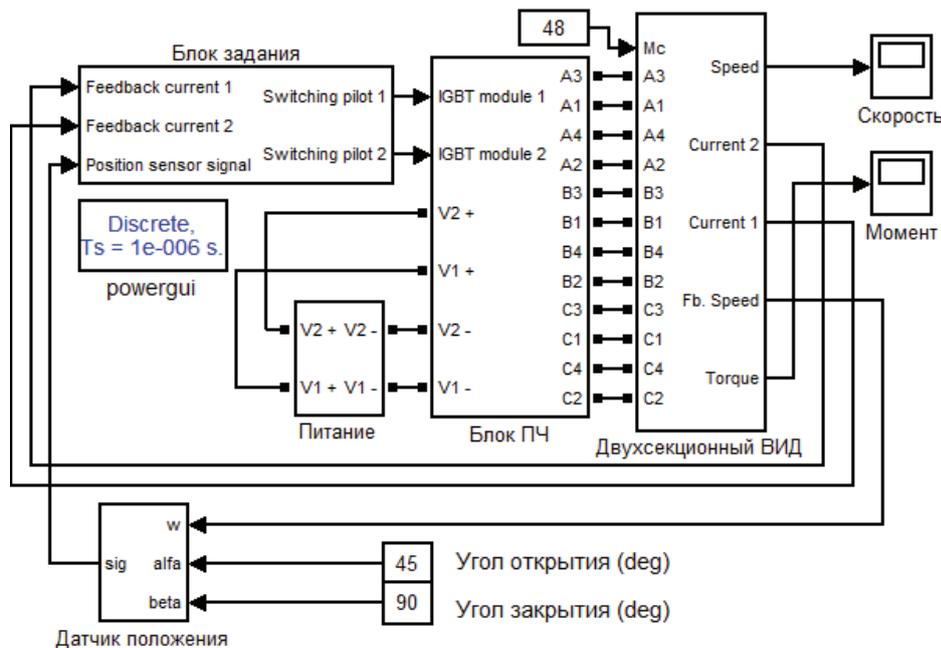


Рис. 3. Имитационная модель двухсекционного вентильно-индукторного электропривода в среде моделирования MatLab Simulink

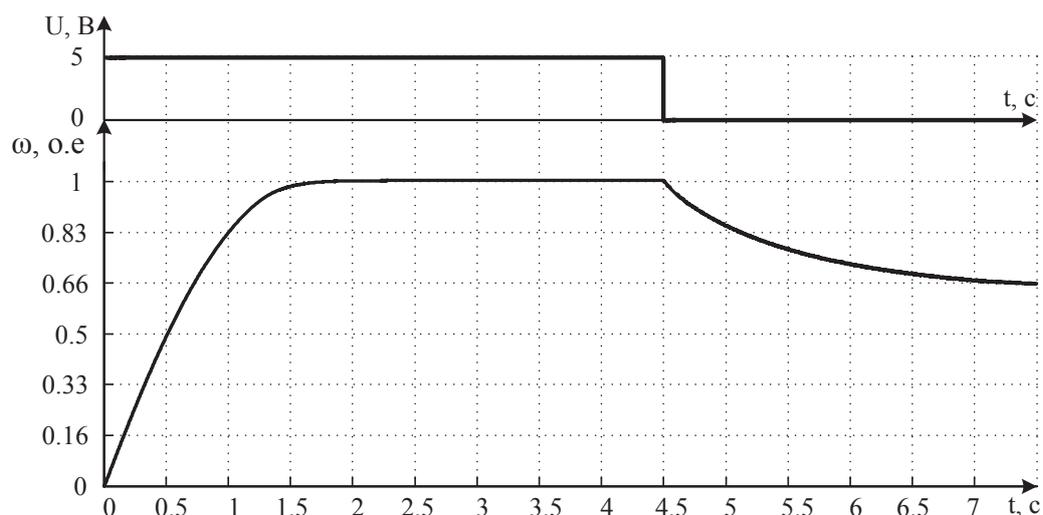


Рис. 4. Временная диаграмма односекционного ВИП при обрыве фазы

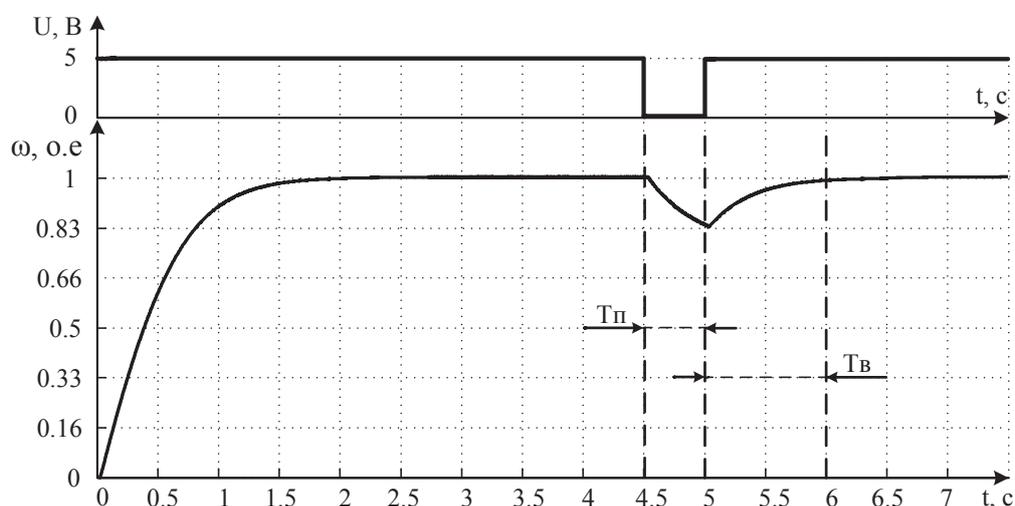


Рис. 5. Временная диаграмма двухсекционного ВИП при обрыве фазы с активизацией алгоритма отказоустойчивого управления

Как следует из рис. 6, максимальное значение провал частоты вращения  $\Delta\omega=5,7\%$  достигает при полной номинальной нагрузке с временем переключения структуры электропривода  $T_{эл}=0,1$  с, что во много раз превышает частоту дискретизации ШИМ. Следовательно, для значений времени  $T_{эл}$ , равных или меньших времени дискретизации ШИМ, возможно восстановление работоспособности ЭП с  $\Delta\omega\leq 1\%$ . Использование алгоритма отказоустойчивого управления на основе анализа фазных токов позволяет полностью восстанавливать работоспособность ВИП с минимальными провалами по частоте вращения за время переключения структуры электропривода.

#### Выводы

1. В среде MatLab Simulink разработана имитационная модель позволяющая исследовать рабочие и аварийные режимы работы одно- и двухсекционного вентильно-индукторного электропривода.

2. В случае аварийного отключения одной из фаз односекционного трехфазного вентильно-индукторного электропривода происходит 33% снижение частоты вращения от номинального значения при номинальной нагрузке с сохранением частичной работоспособности электропривода.
3. Применение в двухсекционном вентильно-индукторном электроприводе предложенного алгоритма отказоустойчивого управления позволяет обеспечить полное восстановление работоспособности в случае отказа одной или нескольких фаз электродвигателя или преобразователя частоты.
4. В случае аварийного отключения одной из фаз в двухсекционном вентильно-индукторном электроприводе, работающем с номинальной нагрузкой за время восстановления работоспособности с переключением структуры электропривода 0,1 с, падение частоты вращения составило 5,7% от номинальной частоты вращения.

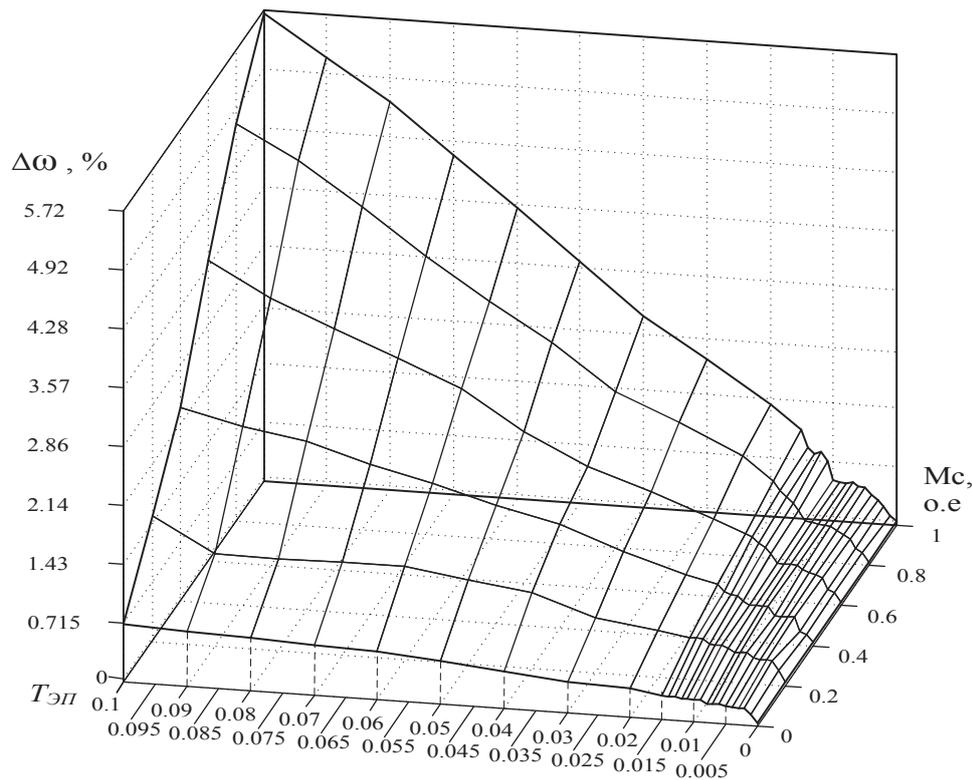


Рис. 6. График зависимости  $\Delta\omega$  от величины нагрузки  $M_c$ , времени переключения структуры электропривода  $T_{эл}$  в двухсекционном ВИП

#### СПИСОКЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузнецов В.А., Кузьмичев В.А. Вентильно-индукторные двигатели. – М.: Изд-во МЭИ, 2003. – 70 с.
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. – P.129–134.
3. Krishnan R. Switched reluctance motor drives: modeling, simulation, analysis, design, and applications. – Boca Raton: CRC Press, 2001. – 432 p.
4. Вентильно-индукторный электропривод со свойством живучести: пат. РФ № 128409, МПК, H02H 7/09, H02H 7/12, H02P 6/12, H02P 6/16, № 2012153519/07; заявл. 11.12.2012; опубл. 20.05.2013, Бюл. № 14. – 13 с.

Поступила 03.10.2013 г.

UDC 62–932.2

## MODELING OF SWITCHED-RELUCTANCE DRIVE IN EMERGENCY OPERATION

G.I. Odnokopylov, I.A. Rozayev

Tomsk Polytechnic University

The authors have considered in MatLab Simulink the simulation model of one- and two-section switched reluctance drive operating in hazardous industrial mechanisms. The model allows investigating the work of switched-reluctance drive in usual, emergency and low-phases modes. The paper introduces a free-failure control algorithm which gives the possibility to provide the operation recovery of switched-reluctance drive based on continuous monitoring of phase currents and stirring up the operation recovery algorithm. The data of transient simulation at one motor phase loss in one- and two-section switched reluctance motors are given. The time charts are compared in rotation frequency of one- and two-section motor drives. The dependences of speed failure on drive structure switching time and load level are introduced. The paper introduces the adequacy of the proposed mathematical model which allows investigating the switched-reluctance drive.

#### Key words:

Simulation model of a switched reluctance drive, two-section switched reluctance drive, loss of motor phase, free-failure control algorithm, drive structure switching time.

## 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.