

## Активное подавление гармоник во входном токе силового преобразователя электропривода компрессора

ЯКОВЕНКО М.С., АНУЧИН А.С., ШПАК Д.М., ОСТРИРОВ В.Н., РЕПЕЦКИЙ Д.В., ПОДЛЕСНЫЙ М.В., МИЛЬСКИЙ К.В.

*Рассматривается проблема интерференции тока, потребляемого электродвигателем компрессорного агрегата вагона метро, с сигналами, используемыми системой предотвращения столкновений, на некоторых частотах. При модернизации силового преобразователя, который питает асинхронный электродвигатель компрессора, размеры входных фильтров были уменьшены для повышения надежности и снижения цены. Это привело к значительному увеличению потребления тока на частотах 275 и 325 Гц, используемых системой предотвращения столкновений. Проблема была рассмотрена и предложен способ ее решения. Способ подразумевает постоянное регулирование мощности, потребляемой электроприводом компрессора, что позволяет уменьшить гармонику тока с частотой 25 Гц, создаваемую моментом нагрузки; таким образом, пульсация 300 Гц от выпрямителя на тяговой подстанции не интерферирует с пульсацией мощности, обусловленной механикой компрессора. Поэтому гармоники тока с частотами 275 и 325 Гц снижаются и не влияют на работу системы предотвращения столкновений. Предлагаемый способ управления был реализован, представлены экспериментальные результаты.*

**Ключевые слова:** электропривод, переменная скорость, интерференция, железнодорожное сообщение, безопасность железных дорог

Мощные электронные преобразователи становятся более компактными и дешевыми благодаря недавним достижениям в области полупроводниковой техники, производстве элементов силовой электроники и развитию систем управления [1]. Транзисторные ключи, изготовленные по карбид-кремниевой технологии (SiC), широко используются в транспорте, как и пленочные конденсаторы — более компактные и надежные в сравнении с электролитическими при одинаковых значениях тока. Но с уменьшением массы и размеров преобразователя увеличивается влияние электромагнитных и других помех от источника питания на линии связи.

Рассматриваемая в этой статье проблема возникла из-за сочетания нескольких факторов в московском метро. С момента основания здесь используются рельсовые цепи [2] для системы предотвращения столкновения поездов. Цепи работают на частотах, кратных 25 Гц (в том числе 275 и 325 Гц), для передачи информации о расстоянии между поездами. Одновременно ходовые рельсы используются как отрицательная шина постоянного тока, соединенная с тяговой электростанцией. Станция электропитания включает трансформатор и выпрямитель, поэтому в напряжении контактной сети и токе питания электроподвижного состава присутствует частота 300 Гц.

На протяжении многих лет пневматическая система поездов метро наполнялась сжатым воздухом с помощью компрессоров с приводами постоянного тока [3, 4]. Пневматическая система используется для торможения поезда, раньше она также применялась для открытия дверей, но в новых вагонах модели 81-765 эту функцию выполняют электроприводы [5]. Примерно 10 лет назад компания Knorr-Bremse начала поставлять для московского метрополитена современные поршневые компрессоры с асинхронными электродвигателями. Основные преимущества асинхронных приводов переменного тока — более длительный период работы до наступления срока обслуживания привода и значительно большая надежность по сравнению с приводом постоянного тока из-за отсутствия щеточных контактов. Для питания асинхронного электродвигателя компрессора был спроектирован специальный преобразователь [6].

Мотор-компрессор и преобразователь не оказывали воздействия на систему предотвращения столкновений до тех пор, пока не была разработана новая модификация преобразователя, более дешевого и надежного за счет замены некоторых компонентов, включая замену входных электролитических конденсаторов на пленочные (рис. 1). Это привело к уменьшению постоянной времени входного фильтра до небольшого значения и увеличению частоты среза до 1 кГц или выше.

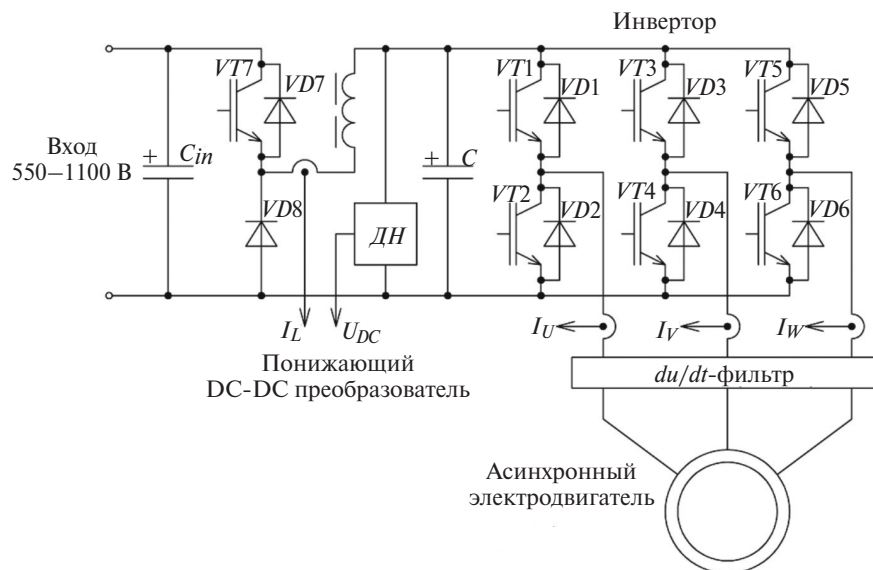


Рис. 1. Силовой преобразователь для асинхронного электродвигателя привода компрессора

Последний фактор заключается в том, что у поршневых компрессоров компании Knorr-Bremse при работе с номинальной скоростью от источника питания частотой 50 Гц пульсация момента происходит на частоте 25 Гц. Эта пульсация приводит к пульсации тока в звене постоянного тока (ЗПТ), которая модулируется пульсацией 300 Гц от выпрямителя, что в результате приводит к появлению в токе контактного рельса гармоник с частотами 275 и 325 Гц. Эти составляющие тока влияют на работу системы предотвращения столкновений и должны быть уменьшены.

**Устранение гармоник в токе контактной сети.** Для подавления этих частот существуют два основных варианта, которые могут быть реализованы с помощью системы управления. Во-первых, это устранение гармоники входного тока с частотой 300 Гц, обусловленной работой выпрямителя тяговой подстанции; во-вторых, устранение во входном токе гармоники с частотой 25 Гц, вызванной пульсацией момента компрессора.

**Устранение гармоники с частотой 300 Гц.** Из-за малого отношения между частотой ШИМ и основными частотами пульсаций (10000 Гц ШИМ и 300 Гц пульсации) первый вариант требует внедрения системы управления, построенной на прогнозировании изменения входного напряжения путем обработки результатов измерений напряжения за предыдущий период [7] (так называемая повторяющаяся система управления). Возможность исключения из входного тока составляющей с частотой 300 Гц приведет к возникновению пульсации в токе дросселя понижающего преобразователя, синфазной с пульсацией входного напряжения. Пульсация тока дросселя нагружает электролитический конденсатор ЗПТ инвертора и сокращает время до

его отказа. Следующее поколение привода компрессора в части понижающего преобразователя будет оснащаться пленочными конденсаторами, поэтому постоянная времени этого фильтра уменьшится. Для конденсатора емкостью 220 мкФ и компрессора мощностью 8 кВт текущая пульсация на 15% потребляемого тока составляет 2,2 А, что приводит к пульсации выходного напряжения понижающего преобразователя в диапазоне 33 В. Дальнейшее уменьшение емкости пленочного конденсатора возможно, если в понижающем преобразователе используются транзисторные ключи на карбиде кремния (SiC). Еще одна проблема возникает при низких значениях входного напряжения, когда понижающий преобразователь работает в режиме проводимости. В этом случае подавление составляющей входного тока частотой 300 Гц невозможно.

**Устранение гармоники с частотой 25 Гц.** Как было показано выше, проблема подавления пульсации выпрямленного напряжения вызвана уменьшением емкости входного фильтра с целью снижения стоимости системы. Для устранения любой гармонической составляющей переменного тока необходимо использовать накопитель энергии. Если его размеры будут уменьшаться с развитием силовых электронных устройств, то механическая часть компрессора останется неизменной в течение как минимум 10 лет, и не видно никаких признаков того, что в будущем она изменится значительно. Использование механической инерции для различных целей, включая энергосбережение [8], хорошо известно. В случае периодической нагрузки, для того чтобы уменьшить пульсацию тока, которая влияет на момент и стабильность скорости, желательно снизить точность регулирования. Уменьше-

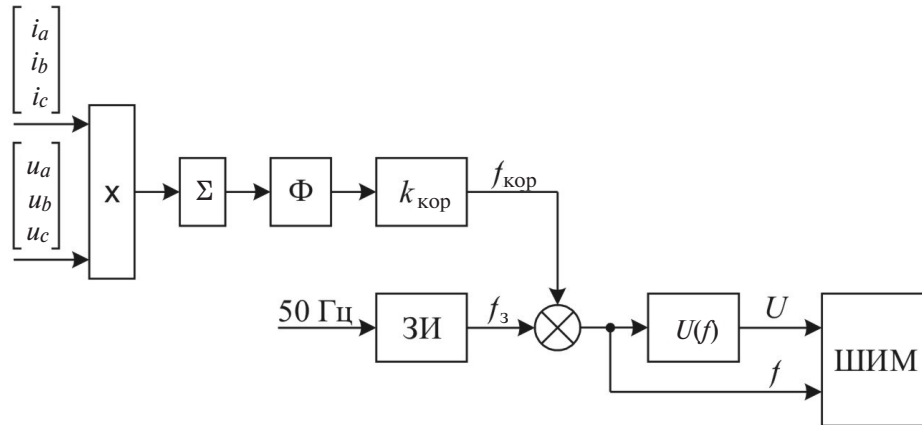


Рис. 2. Структурная схема предлагаемого способа подавления колебаний нагрузки

ние пульсации тока снижает омические потери в двигателе.

Учитывая вышеизложенное, было предложено использовать инерцию для подавления пульсации механической нагрузки частотой 25 Гц. Предлагаемый способ управления (рис. 2) предполагает вычисление мгновенной мощности, питающей электродвигатель, путем суммирования произведений заданных значений фазных напряжений и измеренных фазных токов. Оценить затем переменную составляющую мощности можно с помощью фильтра верхних частот. Разумеется, для переменной составляющей также должен использоваться фильтр нижних частот, чтобы избежать шумов, вызванных ошибкой измерения. Постоянная времени фильтра нижних частот не должна влиять на фазу пульсации механической нагрузки, но одновременно должна удалять пульсации, обусловленные выпрямленным напряжением. Оба фильтра могут быть представлены в виде одного полосового фильтра. Наконец, задание частоты вращения электродвигателя должно быть скорректировано. Корректировку можно отрегулировать, изменив коэффициент  $k_{кор}$ . Значение корректировки  $f_{кор}$  суммируется со значением  $f_3$  с выхода датчика ин-

тенсивности (ЗИ). Далее скорректированное задание приходит на блок  $U(f)$ , в котором вычисляется задание выходного напряжения инвертора. Задания на напряжение и частоту являются входными параметрами для блока широтно-импульсной модуляции (ШИМ), в котором рассчитывается скважность для транзисторных ключей инвертора.

**Результаты моделирования.** Предлагаемый способ управления был исследован с применением компьютерного моделирования. Включение и отключение компенсации потребления тока частотой 25 Гц позволяло сравнивать поведение системы в двух разных режимах. В первом случае частота вы-

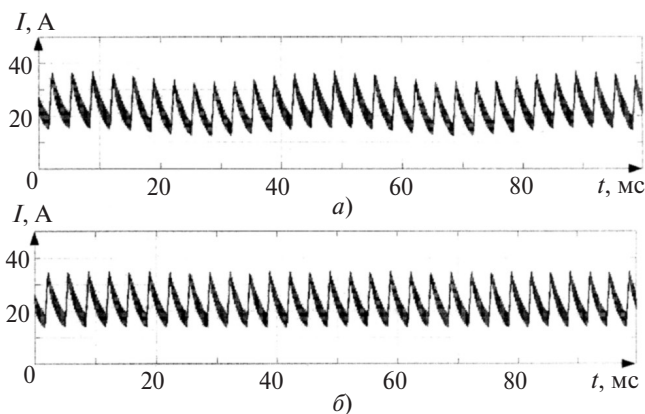


Рис. 3. Результаты моделирования: а — без коррекции выходной частоты; б — с коррекцией выходной частоты

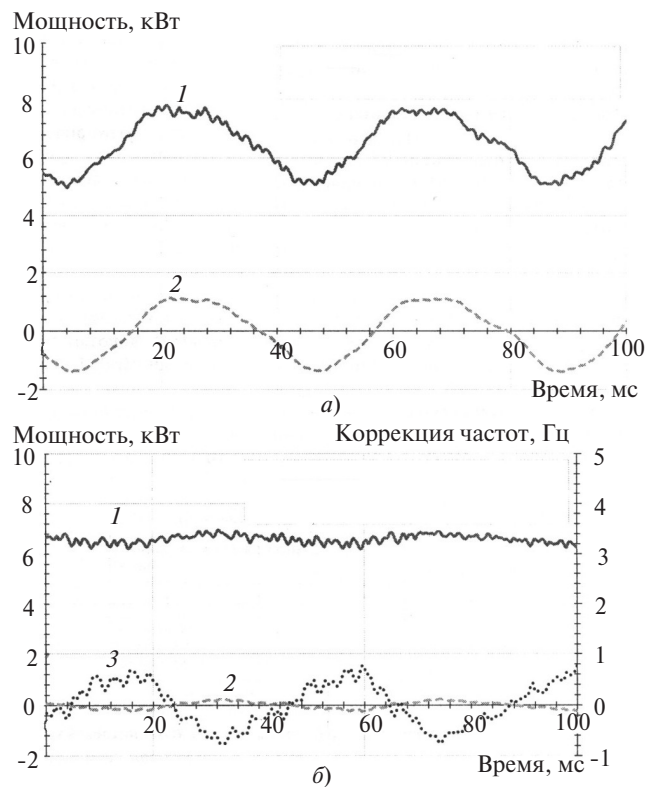


Рис. 4. Экспериментальные результаты: а — без коррекции выходной частоты; б — с коррекцией выходной частоты; 1 — мощность; 2 — переменная составляющая мощности; 3 — коррекция частоты привода

ходного напряжения инвертора стабильна и в потребляемом токе присутствуют частоты 300 и 25 Гц. Во втором случае система регулирует выходную частоту, чтобы исключить составляющую тока частотой 25 Гц. Потребляемый от контактного рельса ток без компенсации и с компенсацией показан на рис. 3, а и б, из которого видно, что при включении компенсации низкочастотные колебания входного тока значительно снижаются. Спектры потребляемого тока для тех же случаев показали значительное снижение гармоник с частотами 275 и 325 Гц при компенсации частоты 25 Гц.

**Экспериментальные результаты.** Эксперименты проводились на вагоне метро с использованием реального оборудования. Осциллограммы электрических параметров были получены с использованием цифрового осциллографа, встроенного в программное обеспечение микроконтроллера. Отклонение мощности, подаваемой на двигатель компрессора, составляло около 1,5 кВт при средней мощности 7 кВт. Переменная составляющая мощности была выделена и отфильтрована от пульсации 300 Гц (рис. 4, а). Когда предлагаемый способ был реализован в системе управления преобразователем, переменная составляющая мощности использовалась для коррекции выходной частоты, которая стала отклоняться на  $\pm 0,6$  Гц. Это повлияло на колебания потребляемой мощности — они снизились до  $\pm 0,2$  кВт (рис. 4, б).

Спектрограммы потребляемого тока измерялись с помощью специального прибора, используемого испытательной службой метро, который регистрировал потребляемый ток. Спектрограмма входного тока при отключенной коррекции выходной частоты показала превышение значения 0,1 А как на частоте 300 Гц, так и на частотах 275 и 325 Гц, что не соответствует требованиям безопасности в метро. Спектрограмма входного тока при включенной коррекции выходной частоты по предлагаемому алгоритму показала, что амплитуда указанных гармоник не превышает 0,1 А.

Для получения значений выбранных гармоник за время стандартного цикла работы компрессора применялось преобразование Фурье со скользящим окном. Были сняты диаграммы токов помехи при отключенной и включенной коррекции в полосе частот 315–334 Гц (рис. 5, а и б), которые позволили установить, что при отключенной коррекции токи помехи выходили за пределы допустимых значений в течение почти всего рабочего цикла. При включении предлагаемого алгоритма подавления составляющая тока частотой 25 Гц и обе гармоники 275 и 325 Гц были значительно уменьшены. На диаграмме рис. 5, б можно заметить, что в небольшие промежутки времени значение этих гармоник

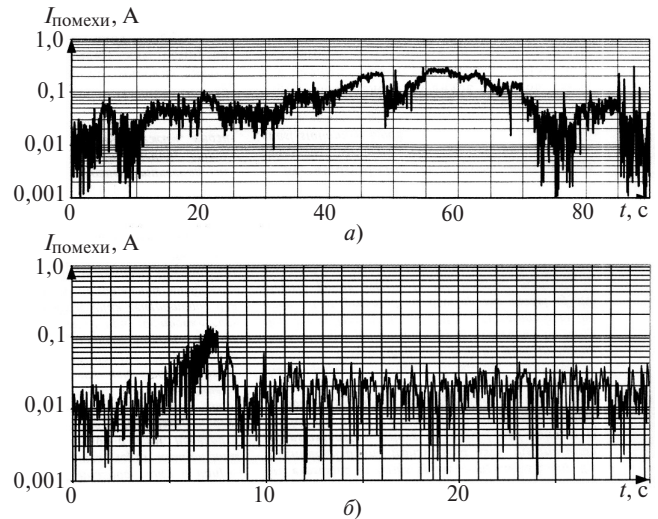


Рис. 5. Диаграммы токов помехи в диапазоне частот 315–334 Гц при работе электропривода компрессора: а — без коррекции; б — с коррекцией выходной частоты

всё же превышало допустимые пределы, однако длительность превышений составляла не более 0,5 с, что допустимо требованиями к электрооборудованию вагонов.

**Заключение.** Предлагаемое решение помогло устранить в потребляемом токе частоты, оказывающие нежелательное воздействие на систему предотвращения столкновений, применяемую в российском метро. Для стабилизации выходной мощности используется механическая инерция компрессора. Это существенно уменьшает составляющую тока частотой 25 Гц и помогает исключить из потребляемого тока гармоники 275 и 325 Гц. Предлагаемый подход был реализован во встроенной системе управления компрессорным приводом; сертификационные испытания прошли в московском метро.

*Исследование проводилось при поддержке гранта Министерства образования и науки РФ (проект № 8.8313.2017/ВСн).*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Tong C.F., Nawawi A., Yin S., Tseng K.J., Liu Y., Simanjorang Rejeki Demonstration of 6kW/kg 50kW grid facing power converter for future aircraft. — IEEE Region 10 Conf. (TENCON), November 2016.
2. The Invention of the Track Circuit, Signal Section, American Railway Association, 1922.
3. Electrical and Automatic Air Brake Equipment Instructions, Interborough Rapid Transit Company, Office of General Superintendent, New York City, June, 1904
4. Shaoxuan F., Baoquan Z., Ohtomo Y., Asada T., Kimijima H., Fujii K. Electrical Components and Air-conditioning Units for Lowenvironmental-impact Trains for Subway Systems in China, Hitachi, 2008, pp. 33–40.
5. Данилов Е.Б. Вагоны метрополитена модели 81-765/766/767. М.: ИПЦ «Маска», 2018, 190 с.
6. Анучин А.С., Остриров В.Н., Прудникова Ю.И., Яковенко М.С., Подлесный М.В. Алгоритм термостабилизации силовых полупроводниковых приборов в электроприводе компрессора. — Вестник МЭИ, 2017, №3, с. 13–19.



7. **Никольский А.А.** Точные самообучающиеся электроприводы станков некруглого точения. М.: Адванседсолушнз, 2016, 220 с.

8. **Tobnaghi D.M., Alirezaloo M., Gheydi M., Baroogh F.A., Farhadi Payam** «Induction motor driven based on efficiency optimization and drive loss minimization». — 10th Intern. Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE), 23–25 March 2017.

[23.07.2018]

**А в т о р ы : Яковенко Максим Сергеевич** окончил «НИУ «Московский энергетический институт (МЭИ)» в 2014 г. Аспирант кафедры автоматизированного электропривода (АЭП) «НИУ «МЭИ».

**Анучин Алексей Сергеевич** окончил «НИУ «МЭИ» в 2001 г. В 2004 г. защитил кандидатскую диссертацию «Разработка системы управления многофазного вентильно-индукторного привода с промежуточным регулируемым звеном постоянного тока». Доцент, заведующий кафедрой АЭП «НИУ «МЭИ».

**Шпак Дмитрий Михайлович** окончил «НИУ «МЭИ» в 2015 г. Аспирант кафедры АЭП «НИУ «МЭИ».

**Остриров Вадим Николаевич** окончил МЭИ в 1977 г. В 2004 г. защитил докторскую диссертацию «Создание гаммы электронных преобразователей для электропривода на современной элементной базе». Профессор кафедры АЭП «НИУ «МЭИ».

**Репецкий Дмитрий Васильевич** окончил «НИУ «МЭИ» в 2003 г. Ведущий инженер ООО НПП «ЦИКЛ ПЛЮС».

**Подлесный Михаил Владимирович** окончил «НИУ «МЭИ» в 2006 г. Начальник проектно-конструкторского отдела ООО НПП «ЦИКЛ ПЛЮС».

**Мильский Константин Викторович** окончил «НИУ «МЭИ» в 2006 г. Начальник Отдела научно-технического развития ООО НПП «ЦИКЛ ПЛЮС».

*Elektrichestvo (Electricity), 2018, No. 12, pp. 41–46*

*DOI:10.24160/0013-5380-2018-12-41-46*

## Active Suppression of Higher Harmonic Components in the Input Current of a Compressor Electric Drive Power Converter

**YAKOVENKO Maxim S.** (National Research University «Moscow Power Engineering Institute» — NRU «MPEI», Moscow, Russia) — Postgraduate student of the Department of Electric Drives

**ANUCHIN Alecksey S.** (NRU «MPEI», Moscow, Russia) — Associate Professor, Head of the Department of Electric Drives, Cand. Sci. (Eng.)

**SHPAK Dmitry M.** (NRU «MPEI», Moscow, Russia) — Postgraduate student of the Department of Electric

**OSTRIROV Vadim N.** (NRU «MPEI», Moscow, Russia) — Professor of the Department of Electric Drives, Dr. Sci. (Eng.)

**REPETSKY Dmitry V.** (R&D Company «Cysle+», Moscow, Russia). — Leading engineer

**PODLESNY Mikhael V.** (R&D Company «Cysle+», Moscow, Russia) — Head of the Design engineering department

**MILSKIY Konstantin V.** (R&D Company «Cycle+» Moscow, Russia) — Head of the Technical development department

*The article considers the problem connected with interference that may occur at certain frequencies between the current consumed by the underground train carriage compressor unit electric motor and the signals used in the collision avoidance system. In upgrading the power converter supplying power to the compressor's induction motor, the input filters were made more compact for achieving more reliable operation and for reducing the cost. This modification entailed a significantly higher consumption of current at the 275 and 325 Hz frequencies, which are used in the collision avoidance system. The problem was analyzed, and a method for solving it was proposed. The proposed method implies continuous control of the power consumed by the compressor electric drive. As a result, the 25 Hz current harmonic component generated by the load torque becomes smaller, due to which the 300 Hz ripple generated by the rectifier at the traction substation does not interfere with the power pulsation associated with the compressor mechanical characteristics. Therefore, the 275 and 325 Hz current harmonic components become smaller and do not affect the performance of the collision avoidance system. The proposed control method has been implemented, and the obtained experimental results are presented.*

**Key words:** *electric drive, variable speed, interference, railway communication, railway safety*

## REFERENCES

1. **Tong C.F., Nawawi A., Yin S., Tseng K.J., Liu Y.,** Simanjorang Rejeki Demonstration of 6 kW/kg 50kW grid facing power converter for future aircraft. — IEEE Region 10 Conf. (TENCON), November 2016.
2. **The Invention** of the Track Circuit, Signal Section, American Railway Association, 1922.
3. **Electrical** and Automatic Air Brake Equipment Instructions, Interborough Rapid Transit Company, Office of General Superintendent, New York City, June, 1904
4. **Shaoxuan F., Baoquan Z., Ohtomo Y., Asada T., Kimijima H., Fujii K.** Electrical Components and Air-conditioning Units for Lowenvironmental-impact Trains for Subway Systems in China, Hitachi, 2008, pp. 33–40.
5. **Danilov Ye.B.** Vagony metropolitena modeli 81-765/766/767 (Type 81-765/766/767 Underground Train Carriages). Moscow, IPTs «Maska», 2018, 190 p.
6. **Anuchin A.S., Ostrirov V.N., Prudnikova Yu.I., Yakovenko M.S., Podlesnyi M.V.** *Vestnik MPEI – in Russ. (Bulletin of the Moscow Power Engineering Institute)*, 2017, No. 3, pp. 13–19.
7. **Nikol'skii A.A.** *Tochnye samoobuchayushchiyesya elektroprivody stankov nekruglogo tocheniya* (Precision Self-Learning Electric Drives for Eccentric Turning Lathes). Moscow, Advansedsolyushnz, 2016, 220 p.
8. **Tobnaghi D.M., Alirezaloo M., Gheydi M., Baroogh F.A., Farhadi Payam.** «Induction motor drives efficiency optimization and drive loss minimization». — 10th Intern. Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE), 23–25 March 2017.

[23.07.2018]