

УДК 621.314

DOI: 10.24160/1993-6982-2017-5-57-62

## Метод определения и локализации пробоя изоляции для гибридного и электрического транспорта

А.С. Анучин, Ю.О. Беляков, Ю.И. Прудникова, К.Г. Федорова

С увеличением темпов роста рынка электрического транспорта все более актуальными становятся проблемы, связанные с эксплуатацией и ремонтом электрических трансмиссий, особенно в сегменте тягового транспорта, рассчитанного на большую мощность. Одной из значимых проблем является обеспечение электробезопасности, так как транспортные средства с электрической трансмиссией работают на высоких напряжениях.

Описан метод, позволяющий оперативно определять участки электрической трансмиссии, состояние изоляции которых является аварийным. В настоящее время методы, применяемые для диагностики изоляции, не позволяют локализовать токовые утечки, хотя и могут мгновенно определить факт их наличия. Задачи, которые можно решить с помощью предлагаемого метода, актуальны, сфера его применения весьма широка: электрические тяговые трансмиссии используются как в составах метро, так и в промышленности для грузовых тяговых платформ.

Предложенный метод основан на измерении токов утечки на корпус и анализе их активной составляющей для каждого устройства электрической трансмиссии. Перед началом измерений необходимо остановить транспортное средство и обесточить звено постоянного тока. Между звеном постоянного тока и корпусом машины подается напряжение путем подключения источника тестового сигнала. Определение полного тока утечки выполняется токоизмерительными клещами, специально доработанными под данную задачу.

На испытаниях опытного образца диагностического комплекса в вагонах метро метод показал высокую эффективность, аварийные участки изоляции были успешно детектированы и локализованы. Экспериментальные результаты подтверждают необходимость внедрения данного метода и создания на его основе оперативных диагностических комплексов. Он также может быть усовершенствован путем применения гармонического анализа, что позволит снизить стоимость комплекса диагностики и повысить его эффективность.

*Ключевые слова:* трансформатор тока, диагностика изоляции, токи утечки, электрический транспорт.

*Для цитирования:* Анучин А.С., Беляков Ю.О., Прудникова Ю.И., Федорова К.Г. Метод определения и локализации пробоя изоляции для гибридного и электрического транспорта // Вестник МЭИ. 2017. № 5. С. 57—62. DOI: 10.24160/1993-6982-2017-5-57-62.

## A Method for Detecting and Locating Insulation Faults for Hybrid and Electric Vehicles

A.S. Anuchin, Yu.O. Belyakov, Yu.I. Prudnikova, K.G. Fedorova

The constantly increasing growth rates seen in the market of electric vehicles entail increasingly growing importance of problems concerned with the maintenance and repair of electrical transmissions, especially in the segment of high-capacity traction vehicles. In view of the fact that electric transmission vehicles operate at high voltages, assurance of electrical safety is one of the most significant issues.

The article describes a method that allows one to quickly identify electric transmission parts with critically damaged electric insulation. Although the methods that are currently used for diagnosing the state of electrical insulation can instantly detect the presence of current leaks, they do not allow the leak location to be determined. The problems that can be solved using the proposed method are quite topical, and its scope is fairly wide: electric traction transmissions are used both in subway trains and in the industry for cargo traction platforms.

Operations on measuring the frame leakage currents and analyzing their active component for each electrical transmission unit constitute the heart of the proposed method. Prior to start the measurement procedure, the vehicle is shut down, and the DC link is de-energized. After that, a voltage is applied between the DC link and the machine body using a test signal source. The total leakage current is determined by means of a clip-on current transformer specially adapted to fit the application.

The prototype diagnostic system was subjected to tests for the electrical equipment of subway carriages. The test results have shown good efficiency of the method: the faulty spots of insulation were successfully detected and located. The obtained experimental results confirm the expediency of using the method for field applications and constructing prompt diagnostic systems on its basis. The method can be further improved by augmenting it with harmonic analysis, due to which the diagnostics system will become less costly and more efficient.

*Key words:* current transformer, insulation diagnostics, leakage currents, electric vehicles.

*For citation:* Anuchin A.S., Belyakov Yu.O., Prudnikova Yu.I., Fedorova K.G. A Method for Detecting and Locating Insulation Faults for Hybrid and Electric Vehicles. MPEI Vestnik. 2017; 5:57—62. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2017-5-57-62.

## Введение

Трансмиссия современного электрического и гибридного транспорта состоит из множества компонентов, однако ее структура одинакова для большинства систем. В ее состав входят двигатели, генераторы, батареи, суперконденсаторы, электрические преобразователи и др. Все эти устройства зачастую питаются от общей шины постоянного тока. Устройства, как и шина, распределены по всей длине транспортного средства. Напряжение шины обычно составляет от 400 до 1000 В. Надежность и безопасность электрического транспорта, в трансмиссию которого входит высоковольтное звено постоянного тока, зависит от качества изоляции между электрическими устройствами и корпусом машины. Транспортное средство работает в жестких условиях. Вибрации, экстремальные температурные режимы, неблагоприятные условия окружающей среды негативно влияют на качество изоляции, увеличивая риск ее повреждения [1, 2].

Общеизвестный метод детектирования аварийного состояния изоляции основан на измерении напряжения между нейтральной точкой и корпусом машины [3]. Для этого применяется делитель напряжения. Потенциал нейтральной точки при повреждении изоляции меняется, что позволяет детектировать наличие аварии. Это позволяет лишь установить факт наличия аварии, но не обнаружить, в каком из устройств она произошла [3–6]. Предложен метод, позволяющий

вместе с обнаружением наличия пробоя изоляции также установить, какой участок или устройство являются аварийными. Он реализован при испытаниях опытного образца диагностического комплекса и успешно применен на реальной электрической трансмиссии.

## Постановка проблемы

В качестве примера структуры гибридной электрической трансмиссии приведем трансмиссию, структура которой изображена на рис. 1 [7]. В ее состав включены инверторы тяговых двигателей, двигатель внутреннего сгорания, электрогенератор, выпрямитель, а также система рекуперации кинетической энергии в виде электрического преобразователя с суперконденсатором. Устройства подключены к шине постоянного тока, напряжение на которой составляет 540 В. В номинальном режиме работы оборудование изолировано от корпуса машины.

Механизмы распределены по всей длине транспортного средства. Шина постоянного тока, питающая эти устройства, также проходит по всей длине машины. Аварийные участки, связанные со снижением качества изоляции, могут возникнуть в любой точке распределенной электромеханической системы. Особенно большую потенциальную опасность представляют системы, в которых применяется мотор-колесо. В этом случае силовые провода, связывающие силовые преобразователи тяговых двигателей, подвергаются значительному влиянию колебаний подвески.

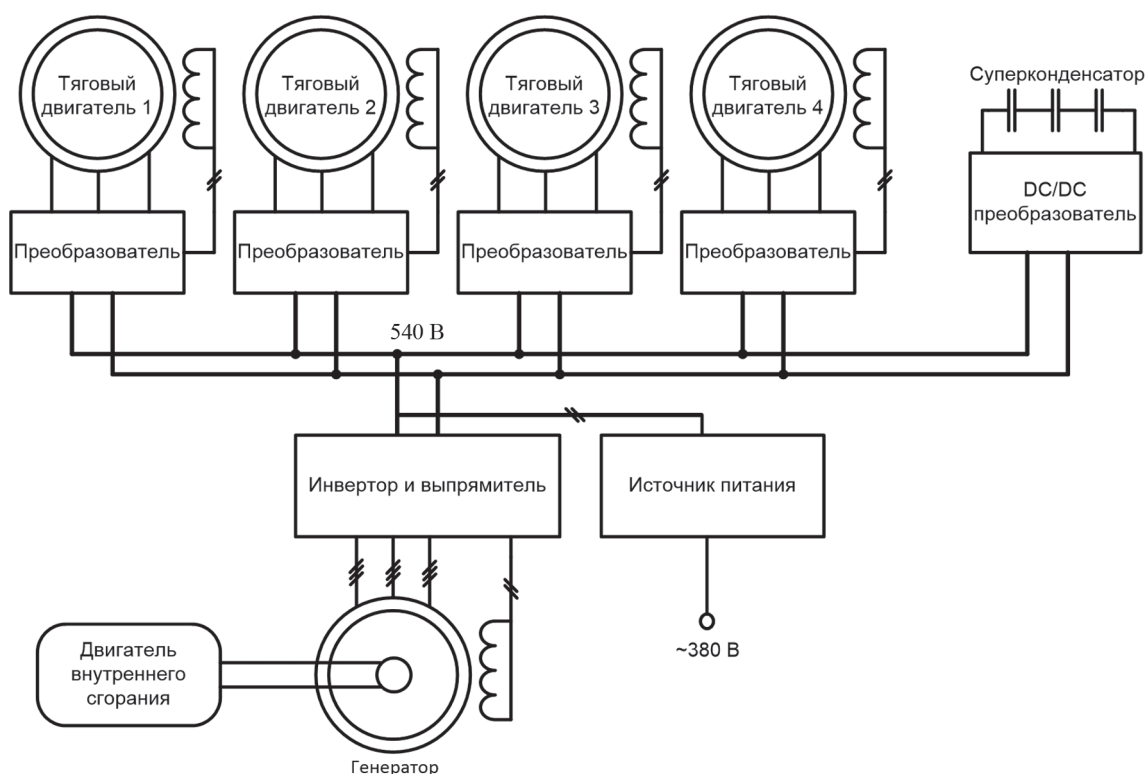


Рис. 1. Пример структуры гибридной электрической трансмиссии

Достоинство общепринятого метода детектирования аварийного состояния изоляции с применением делителя напряжения состоит в том, что он может применяться на ходу в номинальном режиме работы трансмиссии. На его основе можно строить системы защитного отключения при пробоях изоляции. Однако если пробой произошел, критично важно определить непосредственное расположение аварийного участка, локализовать аварию. Недостаток метода заключается в том, что он лишь предоставляет информацию об общем состоянии изоляции во всей машине, т. е. может только подтвердить либо целостность изоляции, либо наличие проблем.

Общепринятый подход для обнаружения неисправных устройств заключается в последовательном переборе. Все устройства отключаются от звена постоянного тока, а затем по очереди подключаются обратно. Возникновение общего сигнала аварийного состояния изоляции при подключении очередного блока говорит о неисправности этого блока. Данный подход не может использоваться, если пробой изоляции произошел только в определенном положении механически подвижных частей трансмиссии. Также возможна ситуация, когда нет устройств, находящихся в явном аварийном состоянии. Если качество изоляции в среднем равномерно ухудшено в каждом из устройств, то появление аварийного сигнала при подключении очередного устройства не будет являться признаком аварийности этого устройства, и диагностика окажется ошибочной.

Другим недостатком является значительное время перебора всех устройств. Транспортное средство должно быть остановлено и обесточено, все силовые блоки

должны быть отсоединены от звена постоянного тока, а соответствующие цепи обесточены посредством демонтажа. При поочередном подключении тестируемых блоков необходимо каждый раз включать машину для получения сигнала об аварии. Если очередной блок оказался исправным, питание снова отключается и подключается следующий блок. Определить аварийный блок за разумное время практически невозможно, особенно для длинных трансмиссий с большим числом осей.

С помощью системы диагностики электрических трансмиссий, использующих предлагаемый метод, можно оперативно и за малое время выполнять задачи по локализации аварийных блоков в трансмиссии. Преимущество метода позволяет локализовать аварийные устройства без демонтажа и последующего перебора.

### Измерение токов утечки для оценки сопротивления изоляции

Функциональная схема, описывающая предлагаемый подход, показана на рис. 2. Система диагностики состоит из двух компонентов — генератора тестового напряжения и измерительного устройства.

Перед началом измерений транспортное средство должно быть остановлено, а трансмиссия обесточена. Между корпусом машины и любой точкой шины постоянного тока подключается генератор тестового напряжения, вырабатывающий переменное напряжение от 200 до 400 В. Частота тестового напряжения может варьироваться от 50 до 200 Гц. Требуемая выходная мощность мала, поэтому генератор может быть портативным. Он относится к импульсным источникам питания и содержит инвертор, повышающий трансформатор и синусный фильтр. Выходное напряжение

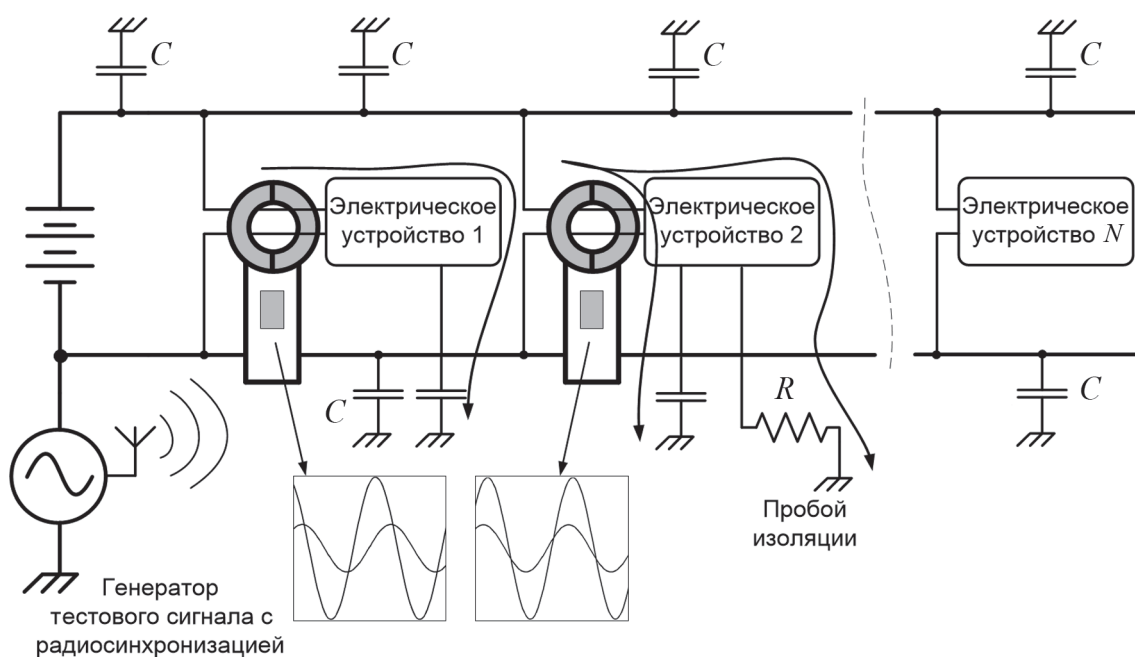


Рис. 2. Функциональная диаграмма системы диагностики изоляции

прикладывается между звеном постоянного тока и корпусом машины, следовательно, меняется потенциал относительно корпуса всех устройств, подключенных к звену постоянного тока, что приводит к возникновению токов утечки.

Токи утечки измеряются с помощью токоизмерительных клещей, подключаемых поочередно к входам всех устройств, как показано на рис. 2. Их использование обусловлено возможностью бесконтактного измерения тока, что очень важно, так как доступ к тестируемым устройствам затруднен в силу большой плотности оборудования в ограниченном пространстве. Токоизмерительные клещи работают по принципу трансформатора тока, поэтому могут измерять лишь переменный ток, что обуславливает выбор переменного напряжения в качестве тестового.

Электрооборудование, расположенное по всей длине транспортного средства и объединенное посредством шины постоянного тока, имеет относительно высокую емкость между своими токоведущими частями и корпусом машины. Емкостная составляющая полного тока, стекающего на корпус при подаче тестового напряжения, может быть сопоставима с активной составляющей, обусловленной ухудшением качества изоляции. Таким образом, для обнаружения тока утечки необходимо выделить активную составляющую полного тока, для чего должно выполняться сравнение фазы измеренного полного тока относительно фазы идеального емкостного тока.

Результаты предварительных тестов показали, что паразитная емкость между токоведущими частями блоков трансмиссии и корпусом машины может составлять порядка 100 нФ, если речь идет о транспортном средстве, габариты которого сопоставимы с вагоном метро. Паразитная емкость обусловлена наличием электромагнитных согласующих фильтров, емкостной связью обмоток двигателей и их заземленными корпусами, а также емкостной связью шины постоянного тока с корпусом машины. Если тестовый генератор производит напряжение в несколько сотен вольт, емкостной ток, не связанный с нарушением изоляции, может составлять более 10 мА.

Токоизмерительные клещи должны быть достаточно чувствительны для измерения токов от долей миллиампера. Большинство клещей, рассчитанных на малые токи, имеют диапазон измерения 10 ... 100 мА, поэтому требуется их доработка.

Отделение емкостной составляющей полного тока, стекающего на корпус, производится путем анализа фазы измеряемого клещами тока. Для этого необходимо знать фазу генерируемого тестового напряжения, поэтому расширенный функционал клещей при доработке должен включать также способность синхронизации с генератором тестового напряжения.

Существуют два подхода, позволяющих синхронизировать источник тестового напряжения и изме-

рительную часть разрабатываемого диагностического комплекса. Первый подход, опробованный в опытном образце комплекса, основан на проводной или беспроводной связи источника и измерительной части. Однако применение проводной связи практически невозможно вследствие вышеуказанных причин — измерительная часть должна быть компактной и малогабаритной, так как доступ к устройствам трансмиссии затруднен. Беспроводная связь наиболее предпочтительна. При генерации синусоидального напряжения генератор посылает по радиоканалу тактовые сигналы, соответствующие фазе тестового напряжения. При измерении тока, стекающего на корпус в одном из устройств трансмиссии, тактовый сигнал используется для определения фазы этого тока. Зная фазу тока, можно вычислить его активную составляющую.

Второй подход основан на преобразовании Фурье и не требует синхронизации между источником тестового напряжения и измерительной частью. Генератор формирует напряжение по 1-й и 3-й гармоникам, либо чистый меандр. С помощью анализа 1-й и 3-й гармоник измеряемого тока можно также выделить активную и реактивную составляющие измеряемого тока. Хотя данный метод не требует радиосвязи между источником и измерительной частью, анализ гармоник даст большую погрешность из-за малых амплитуд сигналов. Данный метод требует исследований.

В рамках проекта по созданию опытного образца диагностического комплекса были доработаны токоизмерительные клещи, переработана печатная плата, добавлены радиоприемник и LCD-дисплей для графического отображения формы измеряемого тока. Функциональная диаграмма измерительной части показана на рис. 3.

Модифицированные токоизмерительные клещи позволяют измерять токи от 0,4 мА, что соответствует оценке прочности изоляции в 1 МОм при тестовом напряжении в 400 В. Также в их функционал входит отдельное отображение активной и емкостной составляющих измеряемого тока. На рис. 4 показан дисплей модифицированных клещей опытного образца диагностического комплекса.

## Выводы

Рассмотренный метод показал отличную эффективность на испытаниях в поездах метро. В них участвовал опытный образец диагностического комплекса. В ходе экспериментов были успешно локализованы пробои изоляции и обнаружены аварийные устройства, подлежащие замене. Результаты опытов позволяют утверждать, что на основе метода может быть создан комплекс оперативной диагностики, который будет успешно использоваться в области обслуживания тягового электрического транспорта.

Будущие исследования планируется направить на улучшение точности измерения фазы тока в случае с прямоугольной формой тестового напряжения, чтобы



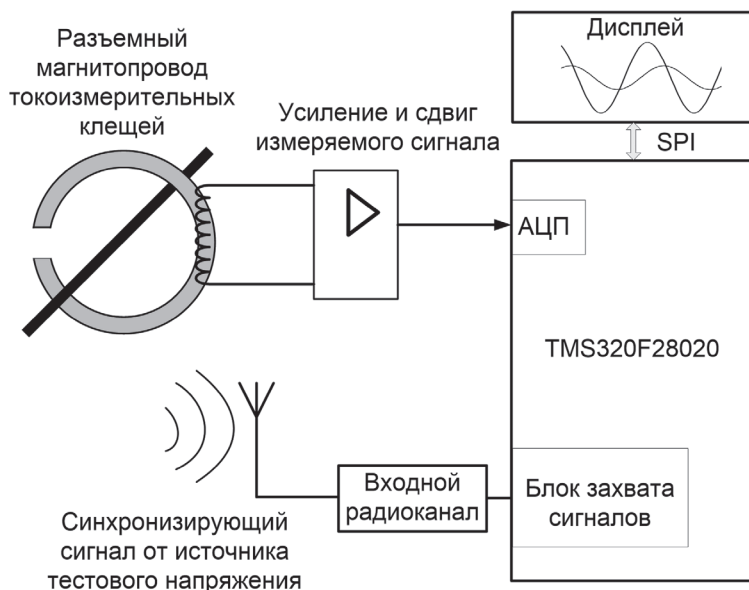


Рис. 3. Функциональная диаграмма модифицированных токоизмерительных клещей



Рис. 4. Общий вид и дисплей модифицированных токоизмерительных клещей

исключить необходимость синхронизации источника тестового напряжения и токоизмерительных клещей.

### Литература

1. Xuezhe W., Lu B., Zechang S. A Method of Insulation Failure Detection on Electric Vehicle Based on FPGA // Proc. IEEE Conf. Vehicle Power and Propulsion. Harbin, 2008. V. 1. Pp. 1—5.
2. Wu Z.-J., Wang L.-F. A Novel Insulation Resistance Monitoring Device for Hybrid Electric Vehicle // Proc. IEEE Conf. Vehicle Power and Propulsion. Harbin, 2008. V. 2. Pp. 1—4.
3. Potdevin H. Insulation Monitoring in High Voltage Systems for Hybrid and Electric Vehicles // ATZeλεκtronik worldwide. 2009. V. 4. Iss. 6. Pp. 28—31.
4. Liu Y.-C., Lin C.-Y. Insulation Fault Detection Circuit for Ungrounded DC Power Supply Systems // Proc. IEEE Sensors. Taipei, 2012. Pp. 1—4.

5. Yan G., Rong Z., Guibin L., Kinoshita N. Research of Measurement Method about Electric Vehicle High Voltage System Isolation Resistance // Proc. IEEE Conf. and Expo on Transportation Electrification Asia-Pacific. Beijing, 2014. Pp. 1—5.

6. Zhao C., Jia X., Hao Z. The New Method of Monitoring DC System Insulation On-line // Proc. 27<sup>th</sup> IEEE Annual Conf. Industrial Electronics Society. Denver, 2001. V. 1. Pp. 688—691.

7. Kozachenko V.F., Ostrirov V.N., Lashkevich M.M. Electric Transmission Based on the Switched Reluctance Motor with Independent Excitation // Russian Electrical Eng. 2014. V. 85. Iss. 2. Pp. 115—120.

### References

1. Xuezhe W., Lu B., Zechang S. A Method of Insulation Failure Detection on Electric Vehicle Based on FPGA. Proc. IEEE Conf. Vehicle Power and Propulsion. Harbin. 2008;1:1—5.
2. Wu Z.-J., Wang L.-F. A Novel Insulation Resistance Monitoring Device for Hybrid Electric Vehicle. Proc. IEEE Conf. Vehicle Power and Propulsion. Harbin. 2008;2:1—4.
3. Potdevin H. Insulation Monitoring in High Voltage Systems for Hybrid and Electric Vehicles. ATZeλεκtronik worldwide. 2009;4:6:28—31.
4. Liu Y.-C., Lin C.-Y. Insulation Fault Detection Circuit for Ungrounded DC Power Supply Systems. Proc. IEEE Sensors. Taipei. 2012:1—4.
5. Yan G., Rong Z., Guibin L., Kinoshita N. Research of Measurement Method about Electric Vehicle High Voltage System Isolation Resistance. Proc. IEEE Conf. and Expo on Transportation Electrification Asia-Pacific. Beijing. 2014:1—5.
6. Zhao C., Jia X., Hao Z. The New Method of Monitoring DC System Insulation On-line. Proc. 27<sup>th</sup>

IEEE Annual Conf. Industrial Electronics Society. Denver. 2001;1:688—691.

7. **Kozachenko V.F., Ostrirov V.N., Lashkevich M.M.** Electric Transmission Based on the Switched Reluctance Motor with Independent Excitation. Russian Electrical Eng. 2014;85;2:115—120.

---

#### Сведения об авторах

---

**Анучин Алексей Сергеевич** — кандидат технических наук, заведующий кафедрой автоматизированного электропривода НИУ «МЭИ», e-mail: AnuchinAS@mpei.ru

**Беляков Юрий Олегович** — аспирант кафедры автоматизированного электропривода НИУ «МЭИ», e-mail: belyakovyo@gmail.com

**Прудникова Юлия Ивановна** — кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизированного электропривода НИУ «МЭИ», e-mail: PrudnikovaYI@mpei.ru

**Федорова Ксения Георгиевна** — ассистент кафедры автоматизированного электропривода НИУ «МЭИ», e-mail: FedorovaXG@mpei.ru

---

#### Information about authors

---

**Anuchin Aleksey S.** — Ph.D. (Techn.), Head of Automated Electrical Drive Dept., NRU MPEI, e-mail: AnuchinAS@mpei.ru

**Belyakov Yuriy O.** — Ph.D.-student of Automated Electrical Drive Dept., NRU MPEI, e-mail: belyakovyo@gmail.com

**Prudnikova Yulia I.** — Ph.D. (Techn.), Assistant Professor of Automated Electrical Drive Dept., NRU MPEI, e-mail: PrudnikovaYI@mpei.ru

**Fedorova Kseniya G.** — Assistant of Automated Electrical Drive Dept., NRU MPEI, e-mail: FedorovaXG@mpei.ru

*Статья поступила в редакцию 05.12.2016*