

УДК 621.3.016.25

**СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ УСТРОЙСТВОМ КОРРЕКЦИИ  
КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ ПОДСТАНЦИЙ МЕТРОПОЛИТЕНА****А.А. Петров***Новосибирский государственный технический университет*

На сегодняшний день большое влияние на эффективность энергопотребления оказывает качество электрической энергии. Существует множество факторов: нелинейные высокочастотные искажения, фазовый сдвиг, несимметричная нагрузка фаз, которые в итоге являются причиной увеличения потерь мощности в сетях переменного тока.

В продолжение работы [1] в данной статье рассматриваются некоторые вопросы, возникающие при компенсации реактивной мощности и мощности высокочастотных гармонических искажений активным силовым фильтром. А именно влияние характера тока нагрузки на работу электросетей, локализация активного силового фильтра на подстанции метрополитена, а также рассматривается система и стратегия управления фильтром в условиях работы метрополитена. Результаты подкреплены математическим имитационным моделированием в Matlab Simulink.

*Ключевые слова:* реактивная мощность, активный силовой фильтр, система управления.

DOI: 10.17212/1727-2769-2019-1-83-90

**Введение**

Снижение потерь электроэнергии и повышение пропускной способности линий электропередач – важнейшие части общего комплекса энергосберегающих мероприятий. Данные положения утверждены на законодательном уровне. 23.11.2009 принят закон № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности...», а также «Энергетическая стратегия России на период до 2030 года» призваны уменьшить потери электроэнергии в электрических сетях на 40 % до 2020 года [7]. Здесь также необходимо отметить зарубежный опыт, в США, Японии, Германии и других странах на федеральном уровне приняты положения по поддержанию коэффициента мощности (power factor) на высоком уровне с тенденцией на дальнейшее увеличение показателей до значений 0,98...0,99.

**1. Влияние характера тока нагрузки на работу электрических сетей**

На качество электроэнергии в сети влияют не только электростанции, которые ее генерируют, но и потребители. В наиболее общем случае влияние потребителей характеризуется:

- а) наличием реактивных элементов, электродвигателей и другого оборудования, которое является причиной фазового сдвига тока относительно напряжения;
- б) несинусоидальным потреблением тока, что вносит в сеть высшие гармоники;
- в) несимметричной загрузкой фаз в линиях 0,4 кВ.

Реактивная энергия, циркулирующая между генератором и потребителем по сети, не является прямыми потерями, так как не расходуется нагрузкой, но является причиной следующих негативных воздействий:

- передача реактивной энергии приводит к дополнительной нагрузке элементов сети (главным образом питающих линий) и, как следствие – к снижению их пропускной способности;

- увеличивается действующее значение тока линии и, следовательно, потери во всех звеньях цепи, что также способствует снижению напряжения у потребителей электроэнергии;
- ухудшение показателей качества электроэнергии у сторонних потребителей данной сети и др.

При несинусоидальном потреблении тока отрицательное влияние на сеть характеризуется появлением высших гармоник, которые являются причиной:

- искажения формы питающего напряжения;
- увеличения потерь в трансформаторах за счет увеличения потерь на гистерезис и появления вихревых токов;
- дополнительных потерь в шинпроводах вследствие поверхностного эффекта и эффекта близости;
- возникновения резонансных явлений в сети;
- помех в сетях близлежащих коммуникаций;
- более быстрого старения изоляции кабельных линий и многого другого.

При несимметричном потреблении электроэнергии нагрузкой в трехфазных четырехпроводных системах 0,4 кВ происходит:

- увеличение тока в нулевом проводе;
- возникновение в первичной сети гармоник кратных трем;
- искажение формы питающего напряжения;
- просадки напряжения по перегруженным фазам.

Все вышеперечисленные негативные последствия влияния нагрузки на сеть являются причиной повышенного внимания к качеству электроэнергии со стороны энергохозяйств и требуют принятия решений по коррекции коэффициента мощности потребителей.

## 2. Коррекция коэффициента мощности

Важнейшим и наиболее эффективным техническим средством повышения  $\cos \varphi$  является компенсация реактивной мощности, которая заключается в подведении к нагрузке источника реактивной мощности (рис. 1).

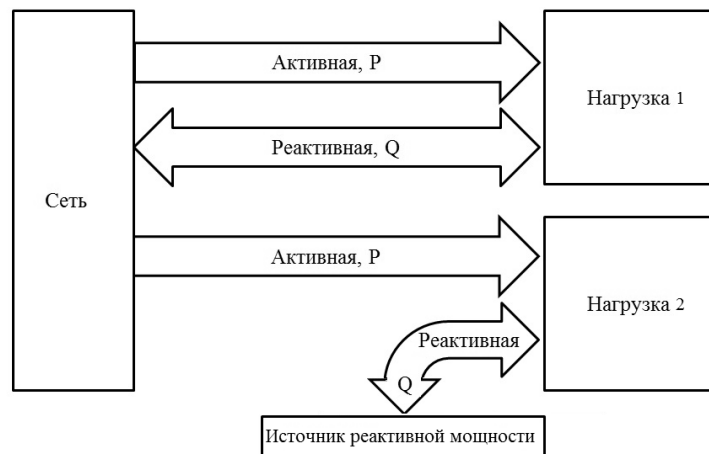


Рис. 1 – Компенсация реактивной мощности

Fig. 1 – Reactive power compensation

Внедрение компенсации реактивной мощности позволяет не только обеспечить баланс мощностей, но также дает и значительный экономический эффект, который заключается в уменьшении потерь электроэнергии в сетях вследствие их нагрева, снижении провалов напряжения, в рациональном использовании оборудования подстанций. Также на рис. 1 наглядно видно уменьшение потребляемой полной мощности у второй нагрузки по сравнению с первой.

Другим методом, дополняющим компенсацию реактивной мощности, является коррекция высокочастотных искажений. Устройством, уменьшающим гармонические составляющие переменного тока, являются активные силовые фильтры (АСФ) (рис. 2).

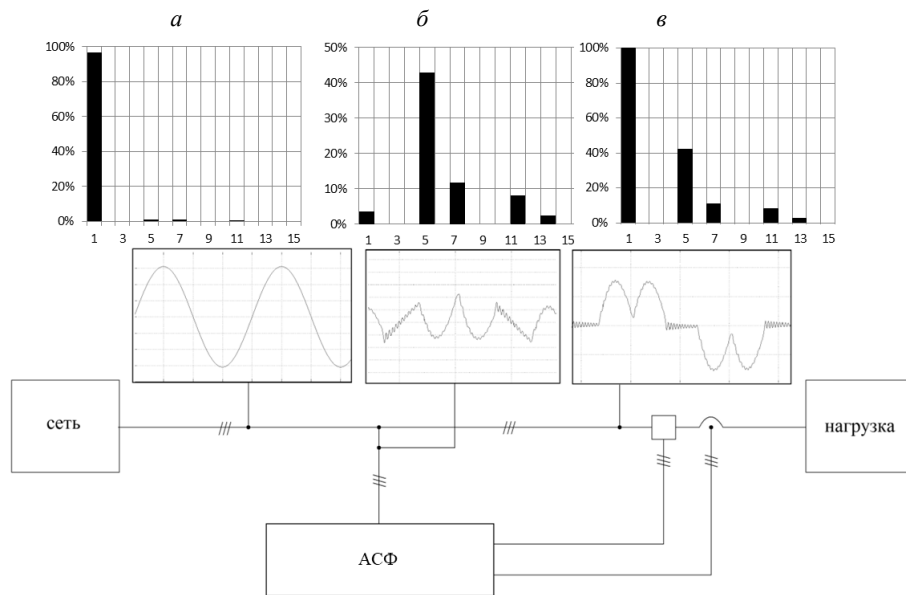


Рис. 2 – Компенсация высокочастотных искажений характеристики тока:  
а – в сети; б – в АСФ; в – в нагрузке

Fig. 2 – High-frequency distortion compensation of current characteristics:  
a – in the network; b – in APF; c – in the load

В нагрузке (рис. 2, в) присутствуют, кроме основной, 5, 7, 11, 13-я и т. д. гармоники. Спектральный анализ тока компенсации (рис. 2, б) характеризует работу АСФ. Их результирующий ток – ток сети (рис. 2, а) имеет синусоидальную форму с основной гармоникой, равной 96 % от первой гармоники тока нагрузки. Ток компенсации составляет 56 % от тока нагрузки.

Тяговые подстанции Новосибирского метрополитена являются неравномерным потребителем реактивной мощности в течение суток. Причем на данной подстанции присутствуют потребители с низким и постоянным коэффициентом мощности, в случае работы эскалаторов – с высоким, но варьируемым в широких пределах, в случае потребления на тягу [2, 6].

Для компенсации реактивной мощности данного потребителя предлагается использовать активный силовой фильтр, который также сможет выполнить задачу по компенсации токов высших гармоник. Необходимо заметить, что одним из возможных решений является применение гибридных фильтров, состоящих из АСФ и пассивной конденсаторной батареи [2, 3, 10].

## 2. Локализация АСФ на подстанции метрополитена

Место размещения фильтрокомпенсирующего устройства является актуальным вопросом при расчете и проектировании как новых подстанций, так и при реконструкции существующих, так как оно зависит от типа компенсирующего устройства и целей компенсации. Различают несколько способов выбора места размещения силовых фильтров.

1. Глобальная компенсация реактивной мощности. Подразумевает размещение устройств компенсации в транспортных узлах энергосистемы в масштабах страны. Основная задача – уменьшение значений реактивной мощности при передаче электроэнергии на большие расстояния в соседние области и страны. Фильтрокомпенсирующим устройством в большинстве случаев являются синхронные машины, работающие в режиме перевозбуждения. Данный тип компенсации реактивной мощности можно рассматривать как затраты активной мощности на уменьшение реактивной.

2. Компенсация реактивной мощности группы потребителей. Используется для коррекции коэффициента мощности нескольких крупных предприятий со схожими показателями качества электроэнергии и подключенных к одному узлу энергосистемы на уровне 6–35 кВ. Выбор устройства компенсации зависит от характера нагрузки, обычно применяются пассивные блоки конденсаторов, а также системы типа СТК и statcom.

3. Коррекция нелинейных искажений и значений реактивной мощности одного потребителя. Применяется для потребителей, имеющих активно-индуктивный характер нагрузки, а также вносящих в сеть гармонические нелинейные искажения. Считается наиболее эффективным средством повышения качества электроэнергии ввиду наиболее близкого расположения фильтров к нагрузке, а также возможности коррекции высокочастотных гармоник. Для компенсации реактивной мощности и высших гармоник могут применяться все виды силовых фильтров, в том числе и активные, а также большое разнообразие гибридных решений.

Наиболее подходящим местом размещений силовых фильтрокомпенсирующих устройств в метрополитене являются тяговые подстанции вследствие наиболее близкого расположения к нагрузкам.

## 3. Система управления активным силовым фильтром

Современные системы управления активными силовыми фильтрами основаны на наиболее быстрых методах расчета мгновенных мощностей. Одним из первых ученых, разделивших синусоидальный ток на активную и реактивную составляющую, был S. Fryze. Его решение основано на расчете среднеквадратичных значений и математическом аппарате интегрирования, что при применении данного подхода в современных системах управления АСФ сильно сказывается на динамических свойствах силовых фильтров. Новый качественный скачок идея компенсации реактивной мощности получила в Японии в 1980 г., где группой ученых во главе с Н. Akagi была сформулирована  $p-q$  теория мгновенной мощности, а затем и модифицированная  $p-q$  теория [4, 5]. Данная теория сделала прорыв в сфере проектирования силовых фильтров, так как позволила построить системы управления таким образом, чтобы стало возможным использовать активные методы компенсации реактивной мощности и мощности нелинейных высокочастотных искажений. Дальнейшее развитие теория Н. Akagi получила в виде  $p-q-r$ ,  $d-q$  и других формулировок [8, 9]. У каждой теории существуют определенные преимущества и недостатки, подробно описанные в [12]. При размещении активных фильтров на подстанциях метрополитена наиболее подходящей для построения

системы управления является  $p-q-r$  теория вследствие того, что в данной теории зависимость трех токов от соответствующих мгновенных мощностей линейна. А отсутствие нулевого провода (ведь для электроснабжения тяговых нагрузок метрополитена применяются трехпроводные системы) сильно упрощает расчеты мгновенных мощностей.

В настоящее время выделяют несколько основных стратегий управления активными фильтрами: это коррекция формы и фазы тока нагрузки, стабилизация напряжения в сети, устранение тока в нулевом проводе и борьба с определенными гармониками. Соответственно у каждой стратегии существуют собственные задачи: компенсация реактивной мощности, коррекция высших гармоник, устранение дисбаланса фаз и другие. Ввиду использования метрополитеном мощных выпрямительных агрегатов, что определяет наличие мощных высокочастотных гармоник, наиболее целесообразной стратегией управления АСФ является получение сбалансированного синусоидального тока сети.

Структурная схема системы управления АСФ изображена на рис. 3. Здесь на основе информации, полученной с датчиков тока и напряжения, после ее преобразования в  $p-q-r$  систему координат, происходит расчет мгновенных мощностей в соответствии с [12]. Затем с использованием данных обратной связи формируются значения неактивных мощностей, подлежащих компенсации. Следующим шагом является расчет компенсационных токов и перевод их в  $a-b-c$  систему координат.

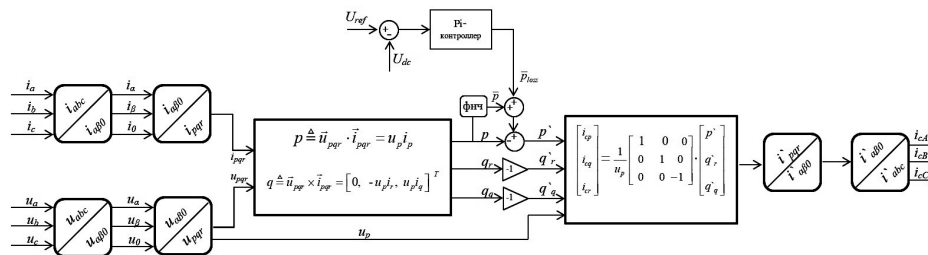


Рис. 3 – Структурная схема системы управления АСФ

Fig. 3 – Block-diagram of APF control system

На рис. 4 показаны результаты имитационного моделирования АСФ в Matlab Simulink. На рисунке 4, а показаны ток нагрузки и напряжение сети до включения АСФ, соответственно на рисунке 4, б представлен результат работы активного фильтра, который проявляется в изменении фазы и гармонического состава тока сети.

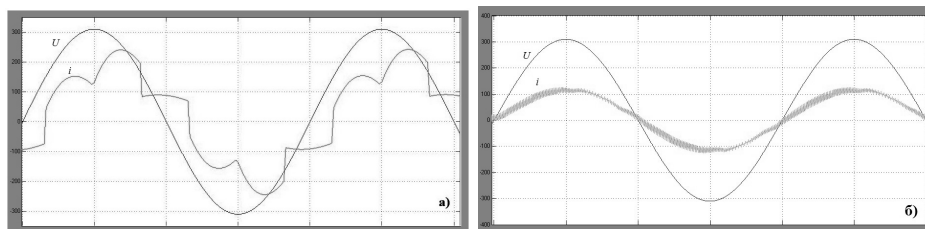


Рис. 4 – Результаты моделирования АСФ в Matlab Simulink

Fig. 4 – APF simulation results in Matlab Simulink

Коррекция высших гармоник тока потребителя является одной из основных задач при использовании активной фильтрации. По результатам моделирования,

изображенным на рис. 5, можно увидеть уменьшение тока высших гармоник после включения фильтра.

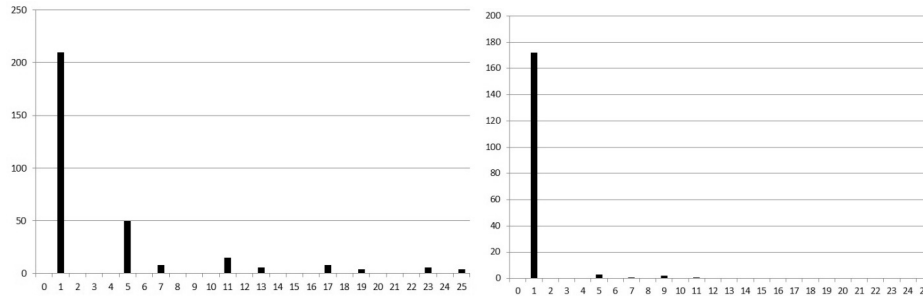


Рис. 5 – Гармонический состав тока сети до и после включения АСФ

Fig. 5 – Harmonic composition of the network current before and after actuating APF

### Закключение

Применение активных методов силовой фильтрации имеет множество неоспоримых преимуществ, таких как компенсация мощности высокочастотных искажений, равномерная загрузка фаз, стабилизация напряжения сети и многие другие. В условиях работы метрополитена, который имеет мощные выпрямительные установки, различные нетяговые активно-индуктивные нагрузки, применение АСФ более чем оправданно либо как самостоятельного устройства, либо в составе какого-либо гибридного устройства силой фильтрации. Место размещения фильтра однозначно определяется тяговой подстанцией, так как в этом случае компенсация неактивных мощностей наиболее эффективна. За счет того, что система электроснабжения выпрямительных агрегатов является трехпроводной, в системе управления АСФ были использованы положения  $p-q-r$  теории мгновенной мощности, а стратегией управления выбрано получение сбалансированного и синусоидального тока сети. Результаты подкреплены математическим имитационным моделированием в Matlab Simulink, которое показывает успешную реализацию предложенной концепции.

### ЛИТЕРАТУРА

1. **Петров А.А., Щуров Н.И., Штанг А.А.** Повышение качества электроэнергии метрополитена // Доклады АН ВШ РФ. – 2016. – № 4 (33). – С. 80–87. – DOI: 10.17212/1727-2769-2016-4-80-87.
2. **Petrov A.A., Shchurov N.I.** Reactive power compensation and high-frequency distortions correction in metro // International Conference on Actual Issues of Mechanical Engineering (AIME 2017): proceedings, Tomsk Polytechnic University, 27–29 July 2017. – Tomsk, 2017. – P. 604–608. – (Advances in Engineering Research; vol. 133). – DOI: 10.2991/aime-17.2017.98.
3. **Petrov A.A., Shchurov N.I., Rozhkova M.V.** Hybrid system of reactive power compensation // The 18 International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, EDM 2017: proceedings, Altai, Erlagol, 29 June – 3 July 2017. – Novosibirsk, 2017. – P. 533–536. – DOI: 10.1109/EDM.2017.798182.
4. **Akagi H., Watanabe E.H., Aredes M.** Instantaneous power theory and applications to power conditioning. – Hoboken, NJ: Wiley, 2007. – 379 p.
5. **Akagi H.** Active harmonic filters // Proceedings of the IEEE. – 2005. – Vol. 93, iss. 12. – P. 2128–2141.
6. **Сопов В.И., Щуров Н.И.** Системы электроснабжения электрического транспорта на постоянном токе: учебник. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2013. – 727 с.

7. Федеральный закон от 23.11.2009 № 261-ФЗ (ред. от 13.07.2015) «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации».
8. Шалыгин К.А., Нос О.В. Техническая реализация принципов энергосбережения на базе силовых активных фильтров // Труды VIII Международной (XIX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2014. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2014. – Т. 2. – С. 28–32.
9. Нос О.В., Харитонов С.А. Система управления силовыми токами компенсации мгновенной неэффективной мощности // Электротехника. – 2015. – № 2. – С. 28–35.
10. Akagi H., Kanazawa Y., Nabae A. Generalized theory of the instantaneous reactive power in three-phase circuits // Proceedings of the International Power Electronics Conference (IPEC'83), Japan, Tokyo, 1983. – Tokyo, 1983. – P. 1375–1386. – DOI: 10.1002/eej.4391030409.
11. Шакарян Ю.Г. Управляемые (гибкие) системы передачи переменного тока. – М.: ВНИИЭ, 2005. – 41 с.
12. Instantaneous power compensation in three-phase systems by using p-q-r theory / H. Kim, F. Blaabjerg, D. Bak-Jensen, J. Choi // The IEEE 32nd Annual Power Electronics Specialists Conference, PESC 2001, Vancouver, Canada, June 17–21, 2001. – Vancouver, 2001. – Vol. 2. – P. 478–485.

## A CONTROL SYSTEM OF A POWER FACTOR CORRECTION DEVICE FOR METRO SUBSTATIONS

Petrov A.A.

*Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia*

Today the quality of electrical energy influences the efficiency of energy consumption. There are many factors: nonlinear distortion, a phase shift, and an asymmetric phase load which are the primary cause of increasing power losses in AC grids.

In continuation of the work [1], this article discusses some issues of compensation reactive power and high-frequency harmonic distortion power by an active power filter. Namely, the influence of the load current on the operation of electrical grids, the localization of an active power filters at a metro substation, and the filter control system and strategy under the conditions of metro operation are also considered. The results are supported by mathematical simulation in Matlab Simulink.

*Keywords:* reactive power, active power filter, control system.

DOI: 10.17212/1727-2769-2019-1-83-90

## REFERENCES

1. Petrov A.A., Schurov N.I. Shtang A.A. Povyshenie kachestva elektroenergii metropolitena [Electricity quality improving in metro]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2016, no. 4 (33), pp. 80–87. DOI: 10.17212/1727-2769-2016-4-80-87.
2. Petrov A.A., Shchurov N.I. Reactive power compensation and high-frequency distortions correction in metro. *International Conference on Actual Issues of Mechanical Engineering (AIME 2017): proceedings*, Tomsk, 27–29 July 2017. *Advances in Engineering Research*, vol. 133, pp. 604–608. DOI: 10.2991/aime-17.2017.98.
3. Petrov A.A., Shchurov N.I., Rozhkova M.V. Hybrid system of reactive power compensation. *The 18 International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, EDM 2017: proceedings*, Altai, Erlagol, 29 June – 3 July 2017, pp. 533–536. DOI: 10.1109/EDM.2017.798182.
4. Akagi H., Watanabe E.H., Aredes M. *Instantaneous power theory and applications to power conditioning*. Hoboken, NJ, Wiley, 2007. 379 p.
5. Akagi H. Active harmonic filters. *Proceedings of the IEEE*, 2005, vol. 93, iss. 12, pp. 2128–2141.

6. Sopov V.I., Shchurov N.I. *Sistemy elektrosnabzheniya elektricheskogo transporta na postoyannom toke* [Power systems electric vehicles on direct current]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2013. 727 p.
7. RF Federal Law "On energy saving and on improving energy efficiency and on amending certain legislative acts of the Russian Federation" of November 23, 2009 N 261-FZ (as amended on July 13, 2015). (In Russian).
8. Shalygin K.A., Nos O.V. [Technical realization of the energy conservation principles on the basis of power active filters]. *Trudy VIII Mezhdunarodnoi (XIX Vserossiiskoi) konferentsii po avtomatizirovannomu elektroprivodu AEP-2014* [Proceedings of the VIII International (XIX All-Russian) Conference on the Automatic Electric Drive AED-2014]. Saransk, 2014, vol. 2, pp. 28–32. (In Russian).
9. Nos O.V., Kharitonov S.A. Sistema upravleniya silovymi tokami kompensatsii mgnovЕННОй neeffektivnoi moshchnosti [Control system of power currents compensation of instant inefficient power]. *Elektrotehnika – Russian Electrical Engineering*, 2015, no. 2, pp. 28–35. (In Russian).
10. Akagi H., Kanazawa Y., Nabae A. Generalized theory of the instantaneous reactive power in three-phase circuits. *Proceedings of the International Power Electronics Conference (IPEC'83)*, Tokyo, Japan, 1983, pp. 1375–1386. DOI: 10.1002/eej.4391030409.
11. Shakaryan Yu.G. *Upravlyaemye (gibkie) sistemy peredachi peremennogo toka* [Control (flexible) AC transmission systems]. Moscow, VNIIE Publ., 2005. 41 p.
12. Kim H., Blaabjerg F., Bak-Jensen D., Choi J. Instantaneous power compensation in three-phase systems by using p-q-r theory. *The IEEE 32nd Annual Power Electronics Specialists Conference, PESC 2001*, Vancouver, Canada, June 17–21, 2001, vol. 2, pp. 478–485.

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



**Петров Андрей Александрович** – родился в 1992 году, аспирант кафедры электротехнических комплексов Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: повышение качества электроснабжения. Опубликовано 16 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: Andrey Petrov.nstu@gmail.com).

**Petrov Andrey Aleksandrovich** (b. 1992) – post graduate student of electrotechnical complexes department of the Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on improving the quality of electricity supply. He is author of 14 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: Andrey Petrov.nstu@gmail.com).

*Статья поступила 18 января 2019 г.  
Received January 18, 2019*

#### To Reference:

Petrov A.A. Sistema upravleniya ustroystvom korrektsii koeffitsienta moshchnosti podstantsii metropolitena [A control system of power factor correction device for metro substations]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2019, no. 1 (42), pp. 83–90. DOI: 10.17212/1727-2769-2019-1-83-90.