

УДК 621.3.016.25

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ МЕТРОПОЛИТЕНА

А.А. Петров, Н.И. Щуров, А.А. Штанг

Новосибирский государственный технический университет

Рациональное использование энергетических ресурсов является одной из основополагающих задач управления энергохозяйства страны. Снижение потерь электроэнергии – важнейшая часть общего комплекса энергосберегающих мероприятий. Данные положения утверждены на законодательном уровне. 23.11.2009 принят закон № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности...», который совместно с «Энергетической стратегией развития России на период до 2030» года призван уменьшить потери электроэнергии в электрических сетях до 40 % до 2020 года.

При этом большое влияние на качество электроэнергии оказывает наличие реактивной мощности. Передача реактивной энергии по электрическим сетям приводит не только к увеличению потерь электроэнергии, но и к снижению их пропускной способности, увеличению потерь напряжения, снижению качества электроэнергии.

В качестве объекта исследования рассматривается система электроснабжения Новосибирского метрополитена. Проведен детальный анализ показателей качества данной системы, по результатам которого для снижения перетоков реактивной энергии в электрических сетях и уменьшения вызываемых ими отрицательных последствий сделан вывод о необходимости компенсации реактивной мощности. Компенсация реактивной мощности обеспечивает соблюдение условия баланса реактивной мощности, способствует снижению потерь электроэнергии в электрических сетях, увеличению их пропускной способности, позволяет осуществлять регулирование напряжения за счет применения компенсирующих устройств и др. С этой точки зрения компенсация реактивной мощности может рассматриваться как достаточно эффективное направление энергосбережения.

Ключевые слова: реактивная мощность, активный компенсатор реактивной мощности, пассивные конденсаторные установки с пошаговым регулированием.

DOI: 10.17212/1727-2769-2016-4-80-87

Введение

На сегодняшний день метрополитен является лидером по объему перевозок среди электрического транспорта в крупных городах, вместе с этим являясь и одним из самых крупных потребителей электроэнергии [3]. Тенденция к переходу на электрические виды транспорта также будет определять рост потребления электроэнергии в следующие годы. Поэтому необходимо не только наращивать установленные мощности электростанций, но и рационально использовать действующую энергосистему. Для этого необходимо обратить внимание на качество электрической энергии, которое зависит как от производителей, так и от потребителей электрической энергии.

1. Анализ источников реактивной мощности в метрополитене

Самым энергоемким потребителем метрополитена является тяга поездов, на питание которой тратится более 50 % от общего количества потребляемой электроэнергии [3]. Неравномерная тяговая нагрузка, значительные кратковременные токи при пуске поездов и нелинейность преобразовательных агрегатов, а также работа тяговых трансформаторов в недогруженном состоянии способствуют увеличению реактивной составляющей потребляемой мощности. Наличие индуктив-

ности в электротехническом оборудовании подстанции способствует фазовому сдвигу характеристики тока, а высшие гармоники, вызванные выпрямителями, проявляются в виде нелинейных искажений тока, которые ухудшают качество электроэнергии [4].

В общем случае для любых потребителей независимо от наличия высших гармоник и фазового сдвига коэффициент мощности может быть найден:

$$\frac{P}{S} = \frac{P_{avg}}{U_{rms} I_{rms}} = \frac{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} U(t)I(t)dt}{\sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} U^2(t)dt} \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} I^2(t)dt}}. \quad (1)$$

На рис. 1 представлена потребляемая на тягу полная и реактивная мощности тяговой подстанции СТП-9, которая находится на станции метро «Студенческая» г. Новосибирска.

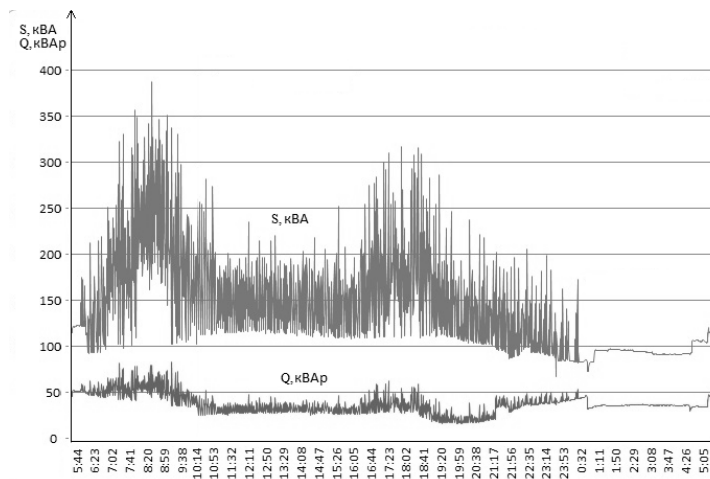


Рис. 1 – Полная и реактивная мощности на СТП-9 за сутки

Fig. 1 – Full and reactive power on STP-9 for day

Для анализа характеристики коэффициента мощности воспользуемся статистическими методами обработки данных, определим плотность вероятности, математическое ожидание и среднеквадратичное отклонение.

Из рис. 2 видно, что гистограмма плотности вероятности является неполной гамма-функцией. Значения коэффициента мощности лежат в диапазоне 0,79...0,95 с максимумом в 0,94.

Математическое ожидание

$$M[X] = \tilde{m}_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad (2)$$

где X – обозначение случайной величины; n – число членов статистического ряда; x – текущее значение случайной величины.

Дисперсия несмещенная и среднеквадратичное отклонение

$$D[X] = D_x = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - m_x)^2. \quad (3)$$

Математическое ожидание равно 0,91, среднеквадратичное отклонение – 0,008.

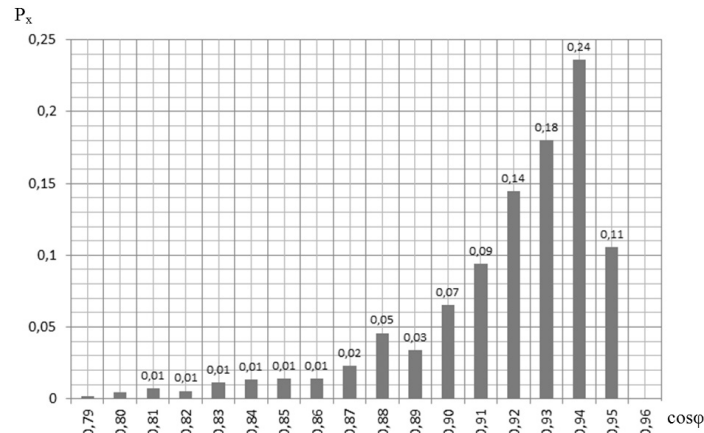


Рис. 2 – Плотность вероятности коэффициента мощности электрической тяги за сутки

Fig. 2 – Probability density of power factor of electric traction per calendar day

Также в метрополитене присутствуют потребители с крайне низким значением коэффициента мощности. Одним из таких потребителей является привод эскалаторов.

На рис. 3 представлена плотность вероятности для коэффициента мощности эскалаторов. Математическое ожидание равно 0,17. Столь низкое значение коэффициента мощности обусловлено большим потреблением реактивной мощности асинхронными двигателями, которые работают с малым моментом.

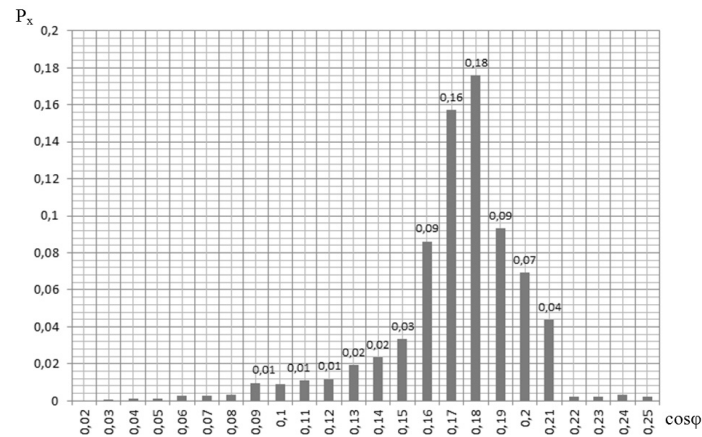


Рис. 3 – Плотность вероятности коэффициента мощности эскалаторов за сутки

Fig. 3 – Probability density of power factor of escalators per calendar day

Реактивная мощность на метрополитене появляется вследствие не только фазового сдвига тока относительно напряжения, но и нелинейных искажений, вносимых в сеть тяговыми преобразовательными агрегатами [4]. По причине нелинейной вольт-амперной характеристики диодов потребление тока из первичной сети несинусоидальное [5].

Представив функцию тока первичной линии 10кВ в гармоническом ряде Фурье, получим следующую гистограмму.

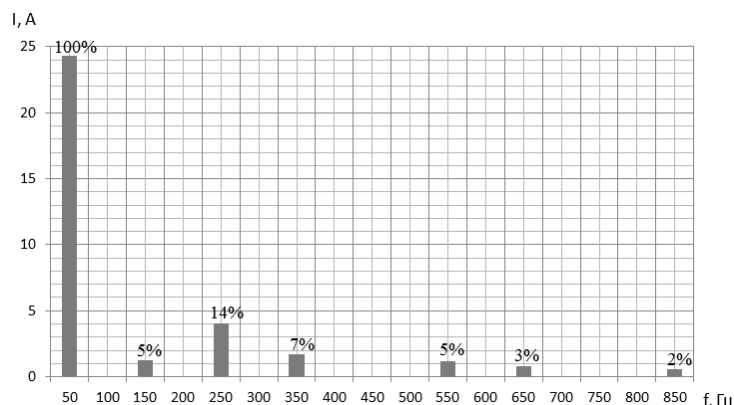


Рис. 4 – Гистограмма спектрального состава тока в первичной сети при работе 6-пульсной схемы выпрямления

Fig. 4 – Histogram of spectral composition of the current in the primary network with the 6-pulse rectification circuit

Из графика, представленного на рис. 4, видно, что основные гармонические искажения вносят преобразовательные агрегаты, это 5-я и 7-я, 11-я и 13-я гармоники. Также присутствует 3-я гармоника, обусловленная несимметричной нагрузкой фаз.

При передаче реактивной мощности возникают дополнительные потери мощности и электроэнергии в элементах системы электроснабжения, обусловленные их нагрузкой реактивной мощностью. Кроме того, загрузка реактивной мощностью линий электропередачи и силовых трансформаторов снижает их пропускную способность и требует увеличения сечений проводов и кабелей, увеличения номинальной мощности или числа трансформаторов и т. п. При передаче реактивной мощности также возникают дополнительные потери напряжения в элементах системы электроснабжения.

В целях снижения перетоков реактивной мощности в электрических сетях должна осуществляться компенсация реактивной мощности. В общем случае под компенсацией реактивной мощности понимается снижение реактивной мощности, циркулирующей между источником и потребляющими ее электроприемниками. Компенсация реактивной мощности обеспечивает соблюдение условия баланса реактивной мощности, снижает потери мощности и электроэнергии в сети, а также позволяет осуществлять регулирование напряжения посредством применения компенсирующих устройств.

2. Способы увеличения коэффициента мощности

Способы увеличения коэффициента мощности можно условно разделить на два типа: организационные и технические. Организационные меры рационально применять на любом производстве, в основном они включают в себя оптимизацию работы существующего оборудования. Применительно к Новосибирскому метрополитену необходимо обратить внимание на следующие организационные меры по уменьшению коэффициента мощности:

- организовать понижение напряжения электродвигателей, систематически работающих с малой нагрузкой;
- ограничить длительности холостого хода асинхронных двигателей;
- осуществлять замену или отключение в период малых нагрузок силовых трансформаторов;
- при необходимости заменить электродвигатели на меньшие по номинальной мощности [10].

Технические меры включают в себя замену 6-пульсных выпрямителей на 12-пульсные, что позволит избежать появления 5-й и 7-й гармоник [5], а также применение компенсаторов реактивной мощности [1].

Компенсаторы реактивной мощности условно можно разделить на две категории: пассивные конденсаторные установки с пошаговым регулированием (ПКУ) и активные компенсаторы реактивной мощности (АКРМ) [1, 2, 9].

ПКУ состоят из нескольких ступеней конденсаторных батарей, управляемых микропроцессорным регулятором, который обеспечивает подключение к сети требуемой величины реактивной мощности [7, 8].

АКРМ состоит из конденсаторных батарей и IGBT-транзисторов, которые управляются микроконтроллером на основе информации, полученной с датчиков тока и напряжения [5]. Данное устройство выполняет следующие функции:

- сдвигает фазу тока относительно напряжения;
- демпфирует нелинейные высокочастотные искажения;
- обеспечивает симметричную нагрузку фаз;
- сглаживает броски активной мощности;
- обеспечивает коэффициент мощности системы на уровне 0,97...0,99.

Основным недостатком АКРМ является его высокая стоимость.

Закключение

Тяговые подстанции Новосибирского метрополитена является неравномерным потребителем реактивной мощности в течение суток. Причем на данной подстанции присутствуют потребители как с низким и постоянным коэффициентом мощности в случае работы эскалаторов (рис. 3), так и с высоким, но варьируемым в широких пределах в случае потребления на тягу (рис. 2). Анализируя рис. 1, можно сделать вывод, что реактивную мощность, потребляемую метрополитеном в течение суток, можно представить в виде постоянной и переменной составляющей. Постоянная составляющая реактивной мощности потребляется равномерно и обусловлена работой эскалаторов, насосов, вентиляции, освещения. А переменная составляющая возникает при потреблении энергии на тягу поездов, причем на рис. 1 видны два характерных пика потребления, соответствующих утреннему и вечернему часам пик. Множество пиковых потреблений тока в течение суток характерно для пуска составов со станции.

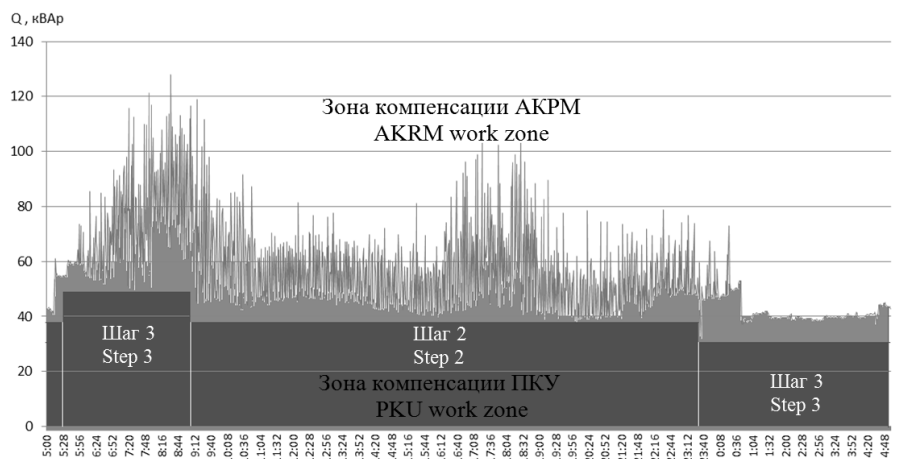


Рис. 5 – Зоны работы компенсаторов

Fig. 5 – Compensators work zone

Для компенсации реактивной мощности данного потребителя предлагается использовать оба вида компенсирующих устройств ПКУ с шаговым регулированием для компенсации постоянной составляющей реактивной мощности и АКРМ для компенсации переменной составляющей (рис. 5). Причем максимально увеличить долю компенсации ПКУ ввиду высокой стоимости устройств АКРМ.

При предлагаемом варианте будет скомпенсирована реактивная мощность, возникающая вследствие как фазового сдвига тока относительно напряжения, так и мощности нелинейных искажений. Помимо этого будет возможность реализовать равномерную нагрузку фаз.

В результате изучения причин возникновения реактивной мощности на метрополитене был получен материал, анализ которого показал следующее.

1. Метрополитен является значительным потребителем реактивной мощности и имеет потребность в ее компенсации.

2. Потребляемая реактивная мощность может быть представлена в виде постоянной и переменной составляющих.

3. Для компенсации РМ необходимо:

- применять организационные меры;
- осуществить замену преобразовательных агрегатов на более современные;
- применить ПКУ с шаговым регулированием для компенсации постоянной составляющей РМ;
- применить АКРМ для компенсации переменной составляющей РМ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Akagi H., Watanabe E.H., Aredes M. Instantaneous power theory and applications to power conditioning. – Piscataway, NJ: IEEE Press; Hoboken, NJ: Wiley, 2007. – 379 p.
2. Akagi H. Active harmonic filters // Proceedings of the IEEE. – 2005. – Vol. 93, iss. 12. – P. 2128–2141.
3. Сопов В.И., Щуров Н.И. Системы электроснабжения электрического транспорта на постоянном токе: учебник. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2013. – 727 с.
4. К методам расчета установленных мощностей выпрямительных трансформаторов / О.Л. Волкова, С.А. Евдокимов, Н.И. Щуров, А.А. Степанов // Научный вестник НГТУ. – 2010. – № 4 (41). – С. 155–160.
5. Оптимизация реактивной мощности тяговых подстанций и ее снижение при многопульсном выпрямлении / Ю.А. Прокушев, Н.И. Щуров, С.А. Евдокимов, Г.Н. Ворфоломеев, В.И. Сопов // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2006. – № 2. – С. 229–233.
6. Филипп В.Б., Щуров Н.И. К вопросу расчета пассивного сглаживающего фильтра для тягового электропривода перспективного ЭПС с асинхронными тяговыми электродвигателями // Транспорт: наука, техника, управление. – 2008. – № 6. – С. 9–12.
7. 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, 2014. – Т. 2. – С. 28–32.
8. Petrov A., Logutenko N. The analysis of reactive power in metro // 11th International Forum on Strategic Technology (IFOST-2016): Proceedings of IFOST-2016. – Novosibirsk, 2016. – Pt. 2. – P. 121–123.
9. Логутенко Н.С., Петров А.А. Компенсация реактивной мощности на метрополитене // Наука. Технологии. Инновации: сборник научных трудов. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2015. – Ч. 5. – С. 148–150.
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. – P. 1375–1386. – doi: 10.1002/eej.4391030409.
11. Шакарян Ю.Г. Управляемые (гибкие) системы передачи переменного тока. – М.: ВНИИЭ, 2005. – 41 с.
12. Карташев И.И., Чехов В.И. Статические компенсаторы реактивной мощности в энергосистемах. – М.: Изд-во МЭИ, 1990. – 68 с.

ELECTRICITY QUALITY IMPROVING IN METRO

Petrov A.A., Schurov N.I., Shtang A.A.

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

The rational uses of energy resources are one of the fundamental problems modern economies. Reducing electricity losses is the most important part of the overall complex of energy-saving measures. These provisions were approved at the legislatively. 23.11.2009 passed the law № 261-FZ "On energy saving and increasing energy efficiency ..." as well as "Energy Strategy of Russia for the period ..." designed to reduce electricity losses in electrical grid to 40% until 2020.

At the same time, a great impact on the quality of electricity has the presence of reactive power. Sending reactive power on the electrical grids leads to not only an increase in power losses, but also to reduce their bandwidth increased voltage loss, reduces power quality.

The object of study is metro power system in Novosibirsk. The detailed analysis of quality indicators in the system is made, the results show the ways reduction the flows of reactive power in electric grids and reduction the negative effects caused by them, the conclusion about the necessary for reactive power compensation. Reactive power compensation ensures compliance with reactive power balance conditions, helping to reduce energy losses in power networks, increase their capacity, allows for voltage regulation through the uses of compensating devices, and others. From this perspective, the reactive power compensation can be regarded as sufficiently effective direction of energy efficiency.

Keywords: reactive power, active compensator of reactive power, passive capacitor banks with step regulation.

DOI: 10.17212/1727-2769-2016-4-80-87

REFERENCES

1. Akagi H., Watanabe E.H., Aredes M. *Instantaneous power theory and applications to power conditioning*. Piscataway, NJ, IEEE Press, Hoboken, NJ, Wiley, 2007. 379 p.
2. Akagi H. Active harmonic filters. *Proceedings of the IEEE*, 2005, vol. 93, iss. 12, pp. 2128–2141.
3. Sopov V.I., Schurov N.I. *Sistemy elektrosnabzheniya elektricheskogo transporta na postoyan-nom toke* [Power systems electric vehicles on direct current]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2013. 727 p.
4. Volkova O.L., Evdokimov S.A., Schurov N.I., Stepanov A.A. K metodam rascheta ustanovlennyykh moshchnosti vypryamitel'nykh transformatorov [Method of analysis for rectifier transformer installed power]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2010, no. 4 (41), pp. 155–160.
5. Prokushev Yu.A., Schurov N.I., Evdokimov S.A., Vorfolomeev G.N., Sopov V.I. Optimizatsiya reaktivnoi moshchnosti tyagovykh podstantsii i ee snizhenie pri mnogopol'snom vypryamlenii [Optimization of reactive power in traction substations and its decrease with multipulse rectifier]. *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka – Scientific problems of transportation in Siberia and the Far East*, 2006, no. 2, pp. 229–233.
6. Filipp V.B., Schurov N.I. K voprosu rascheta passivnogo sglazhivayushchego fil'tra dlya tyagovogo elektroprivoda perspektivnogo EPS s asinkhronnymi tyagovymi elektro-dvigatelyami [On the issue of calculation of passive filter for the traction drive long-range electric vehicles with asynchronous traction motors]. *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie – Transportation: science, technology, management*, 2008, no. 6, pp. 9–12.
7. 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)
8. Petrov A., Logutenko N. The analysis of reactive power in metro. *11th International Forum on Strategic Technology (IFOST-2016): Proceedings of IFOST-2016*. Novosibirsk, 2016, pt. 2, pp. 121–123.

9. Logutenko N.S., Petrov A.A. [Reactive power compensation in the metro]. *Nauka. Tekhnologii. Innovatsii* [Nauka. Tekhnologii. Innovatsii]. Novosibirsk, 2015, pt. 5, pp. 148–150. (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. Kartashev I.I., Chekhov V.I. *Staticheskie kompensatory reaktivnoi moshchnosti v energosistemakh* [Static reactive power compensators in power systems]. Moscow, MEI Publ., 1990. 68 p.

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 11 научных работ. (Адрес: 630073, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: Andreypetrov.nstu@gmail.com).

Petrov Andrey (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 11 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: Andreypetrov.nstu@gmail.com).



Щуров Николай Иванович – родился в 1947 году, д-р техн. наук, профессор кафедры электротехнических комплексов Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: электротехнические и электротранспортные комплексы. Опубликовано 270 научных работ. (Адрес: 630073, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: nischurov@mail.ru).

Schurov Nicolay (b. 1947) – Doctor of Sciences (Eng.), professor of electrotechnical complexes department of the Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on: electrotechnical and electrotransport systems. He is author of 270 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: nischurov@mail.ru.)



Штанг Александр Александрович – родился в 1978 году, канд. техн. наук, декан факультета мехатроники и автоматизации Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: электрический транспорт. Опубликовано 40 научных работ. (Адрес: 630073, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. Email: shtang@corp.nstu.ru).

Shtang Alexandr (b. 1978) – Candidate of Sciences (Eng.), dean of Mechatronics and automation faculty of Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on electric transport. He is author of 40 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: shtang@corp.nstu.ru).

Статья поступила 17 ноября 2016 г.

Received November 17, 2016

To Reference:

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