

УДК 621.331

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ
ПАРАМЕТРОВ ТЯГОВЫХ ПОДСТАНЦИЙ ГОРЭЛЕКТРОТРАНСПОРТА****Е.Ю. Абрамов***Новосибирский государственный технический университет*

Существующая система городского электротранспортного комплекса г. Новосибирска функционирует в условиях низких показателей пассажироперевозок, что обуславливает отклонение рабочих параметров тягового оборудования подстанций от проектных значений. Вместе с этим избыточный износ электротранспортной инфраструктуры определяет повышенные технологические расходы энергии. В рамках повышения энергоэффективности горэлектротранспорта поставлена задача экспериментальной оценки нормируемых показателей электроэнергии и ненормируемых энергетических характеристик действующих тяговых подстанций.

Для решения задач исследования выполнены продолжительные натурные измерения параметров электроэнергии на базе регистратора FLUKE 1760 по стороне 10 кВ и разработанных автором регистраторов по стороне выпрямленного напряжения.

В результате анализа полученных данных вероятностно-статистическими методами установлен факт соответствия нормируемых медленных изменений параметров переменного напряжения допустимым значениям. Анализ энергетических характеристик выпрямительных агрегатов показал существенное отклонение от проектных номинальных значений, вследствие этого установлено снижение энергетической эффективности работы тягового оборудования и предложено применение организационных мероприятий по существенному улучшению энергетики преобразователей, не требующих материальных затрат.

Ключевые слова: городской электрический транспорт, система тягового электроснабжения, тяговая подстанция, показатели качества электроэнергии, энергетические характеристики, энергоэффективность.

DOI: 10.17212/1727-2769-2016-3-33-42

Введение

Городской электрический транспорт (ГЭТ) является одним из наиболее важных и энергоемких потребителей городских агломераций. На ГЭТ в развитых странах приходится более 50 % пассажироперевозок [1]. Поэтому повышение эффективности функционирования и создание условий устойчивого развития систем ГЭТ является необходимым для обеспечения высоких темпов экономического роста и повышения качества жизни населения.

Статистика показывает непрерывное снижение объема пассажироперевозок ГЭТ. По данным мэрии г. Новосибирска величина пассажироперевозок, реализуемых трамваем и троллейбусом, снизилась к 2015 г. до 70 млн чел/год, т. е. более чем в 3 раза по сравнению с началом 1990-х годов, что определяет изменение условий функционирования инфраструктуры электроснабжения относительно проектных характеристик. Кроме этого, контактная сеть и оборудование тяговых подстанций (ТП) имеют избыточный износ, они не модернизировались с 1970-х годов. Сложившаяся ситуация обуславливает функционирование системы в условиях повышенных технологических расходов энергии и низких энергетических показателей [2].

Таким образом, существует необходимость совершенствования системы тягового электроснабжения ГЭТ, которая наряду с обостряющимися энергетическими

проблемами обуславливает потребность в реализации потенциала снижения энергетических и материальных затрат, внедрения высокотехнологичных энергоэффективных решений при модернизации существующих транспортных линий и реализации новых.

Задача улучшения энергетических параметров ГЭТ неразрывно связана с нормируемыми ГОСТ показателями качества электроэнергии, которые оказывают влияние на работу электротранспортного комплекса и всей системы электроснабжения. Кроме нормируемых показателей важное значение имеют ненормируемые характеристики электроснабжения. В связи со сказанным задачи выполненного исследования заключались в получении экспериментальных данных параметров электроснабжения действующих ТП ГЭТ в реальных условиях и оценке их влияния на энергетическую эффективность эксплуатируемых технических средств.

1. Методы и средства исследования

Для решения поставленных задач в соответствии с [3] выполнен ряд натурных измерений на тяговых подстанциях МКП ГЭТ г. Новосибирска. Продолжительность измерений составила 7 суток для ТП № 29, 14 суток для ТП № 7 и ТП № 13. Объем выборок данных составил более 20 млн значений.

В качестве измерительного оборудования на стороне переменного тока ТП № 29 использовался регистратор качества электроэнергии FLUKE 1760. Датчики напряжения подключались ко вторичной обмотке штатного измерительного трансформатора напряжения НТМИ-10. Токовые датчики на базе катушек Роговского подключались непосредственно к вводным линиям 10 кВ преобразовательного трансформатора агрегата № 1. Подключение выполнено по методу двух ваттметров (так называемому A_{opn_2}), при котором требуются датчики только на двух фазах, а для третьей значения вычисляются встроенным ПО.

Для измерений тока и напряжения на стороне выпрямленного напряжения всех трех подстанций использовались разработанные автором самопишущие регистраторы постоянных тока и напряжения на базе микроконтроллера ATmega_1760, датчиков напряжения на эффекте Холла LEM LV-25P, оптронных датчиков тока с компенсирующей обратной связью на ОУ. Измерение тока выполнено через штатные токовые шунты с падением напряжения 75 мВ при токе 2000 А, а напряжения – через штатные токоограничительные резисторы P103M (ГОСТ 8623–69) номиналом 133 кОм с классом точности 0,5.

Разработанные регистраторы обеспечили измерение напряжения в диапазоне 0...850 В, измерение тока в диапазоне 0...1000 А, оцифровку данных с чувствительностью АЦП 4,88 мВ, непрерывную запись на SD-карту в Excel-файл значений тока и напряжения по двум каналам со скоростью 4 выборки в секунду. Калибровка прибора выполнена с использованием цифрового осциллографа OWON_Smart DS6062 в качестве эталонного измерительного прибора.

В результате работы приборов получены временные зависимости следующих величин:

1) напряжения и токи (мгновенные и действующие значения), активная, реактивная и полная мощности, коэффициент мощности, частота, гармонический состав напряжения и некоторые другие на стороне 10 кВ;

2) ток и напряжение на стороне выпрямленного напряжения.

Исследуемые энергетические параметры являются случайными величинами, поэтому их анализ был основан на вероятностно-статистических методах. Наиболее полную характеристику случайных величин обеспечивают законы их распределения, поэтому для экспериментальных данных были определены вероятности возникновения конкретных значений и на основе 40 законов статистических рас-

пределений выполнен подбор наиболее подходящих выравнивающих функций и рассчитаны числовые характеристики.

2. Анализ нормируемых показателей качества электроэнергии

Качество электроэнергии определяется степенью искажения параметров напряжения из-за изменений нагрузки, кондуктивными электромагнитными помехами и другими внешними событиями. Отклонения от нормируемых значений обуславливает: рост потребления и потерь энергии; перегревы тяговой сети; нарушение работы релейных защит и автоматики; увеличение числа коротких замыканий; некорректную работу приборов учета и др. Поэтому оценка качества электроэнергии имеет важное значение при внедрении энергосберегающих мероприятий на ГЭТ. В качестве национального стандарта РФ действует ГОСТ 32144–2013 [4], который устанавливает нормы и показатели качества электроэнергии.

Основной интерес для исследования представляют продолжительные изменения характеристик напряжения, так как они в основном вызываются изменениями нагрузки и ее нелинейным влиянием. Внезапные и значительные изменения формы напряжения обусловлены непредсказуемыми событиями и внешними воздействиями и не имеют зависимости от характера тяговой нагрузки. На основе полученных экспериментальных данных на стороне 10 кВ агрегата № 1 ТП № 29 выполнена оценка продолжительных изменений характеристик напряжения. В качестве примера на рис. 1 представлены временные диаграммы некоторых характеристик. Результаты оценки отклонений характеристик напряжения от допустимых по ГОСТ 32144–2013 значений, выполненной с помощью специализированного ПО «PQ Analyze v.1.9.4» компании FLUKE, сведены в табл. 1 и 2.

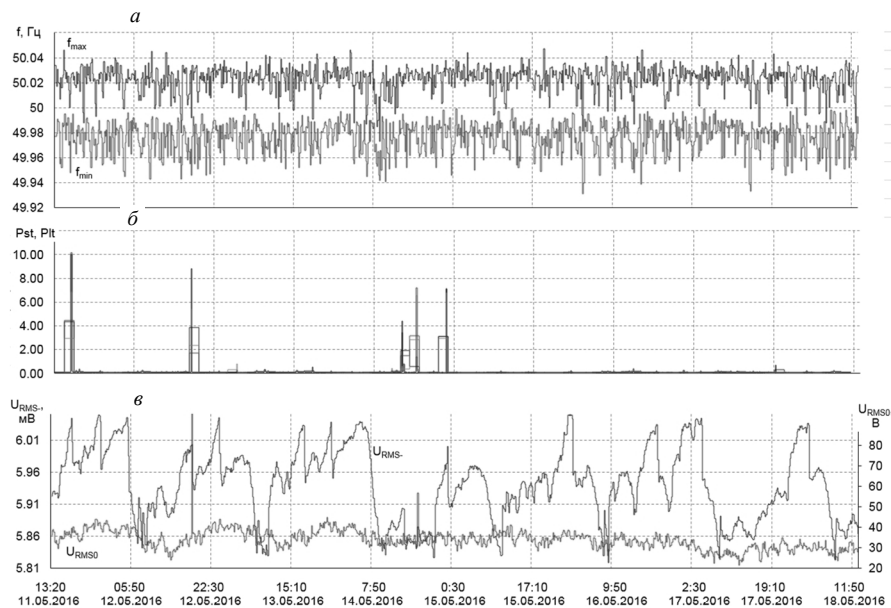


Рис. 1 – Диаграммы характеристик напряжения:

a – отклонения частоты; *b* – кратковременная и длительная дозы фликера; *в* – несимметрия напряжения по нулевой и обратной последовательности

Fig. 1 – Voltage characteristics diagrams:

a – frequency deviation; *b* – short-term and long-term flicker factors; *c* – voltage unbalance at zero and negative sequence

Таблица 1 / Table 1

Оценка показателей качества электроэнергии
Evaluation of electricity quality characteristics

Показатели качества электроэнергии		Допустимые значения	Экспериментальная оценка
Отклонение частоты		$\pm 0,2$ Гц в 95 % времени и $\pm 0,4$ Гц в 100 % времени	+0,036/-0,046 Гц в 95 % времени и +0,047/-0,069 в 100 % времени
Медленные изменения напряжения (положительные и отрицательные отклонения напряжения)		Не более 10 % номинального в 100 % времени	Положительные до 4,73 %; Отрицательные до 0,77 %
Доза фликера	кратковременная	Не более 1,38	До 10,15
	длительная	Не более 1	До 4,43
Гармонические составляющие напряжения (несинусоидальность)	Коэффициент гармоник	До 11-й представлены в табл. 2	
	Суммарный коэффициент гармоник	5 % в 95 % времени и 8 % в 100 % времени	До 1,95 % в 95 % времени и 2,27 % в 100 % времени
Коэффициенты несимметрии напряжений	по обратной последовательности	2 % в 95 % времени и 4 % в 100 % времени	0,4 % в 95 % времени и 0,43 % в 100 % времени
	по нулевой последовательности		

Таблица 2 / Table 2

Оценка гармонических составляющих напряжения в десятиминутных интервалах

Evaluation of voltage harmonic components at 10 min intervals

№ гармоники напряжения	Допустимые значения, %		Экспериментальная оценка, %					
	В течение 95 % времени	В течение 100 % времени	В течение 95 % времени			В течение 100 % времени		
			L1L2	L2L3	L3L1	L1L2	L2L3	L3L1
2	1,5	2,25	0,1			0,15		0,14
3	3	4,5	0,38	0,25	0,22	0,43	0,31	0,26
4	0,7	1,05	0,08	0,07	0,09	0,11	0,09	0,1
5	4	6	1,87	1,74	1,84	2,21	2,08	2,17
6	0,3	0,45	0,02			0,03	0,02	0,03
7	3	4,5	0,81	0,80	0,81	1,03	0,99	1,03
8	0,3	0,45	0,04			0,06		
9	1	1,5	0,06	0,05	0,07	0,09	0,07	0,09
10	0,3	0,45	0,04			0,06		
11	2	3	0,42	0,41	0,42	0,59	0,56	0,54

Из временных диаграмм видно, что отрицательные отклонения напряжения, появление фликера, всплески гармонических искажений носят редкий и кратковременный характер. При анализе осциллограмм напряжения и тока в интервалах появления этих явлений установлено, что они обусловлены событиями со стороны внешнего электроснабжения, а не влиянием тяговой нагрузки (медленное изменение тока свидетельствует о первичном влиянии напряжения, но не наоборот). В качестве подтверждения этого на рис. 2, а представлены статистические функции максимальных значений коэффициента гармоник в десятиминутных интервалах.

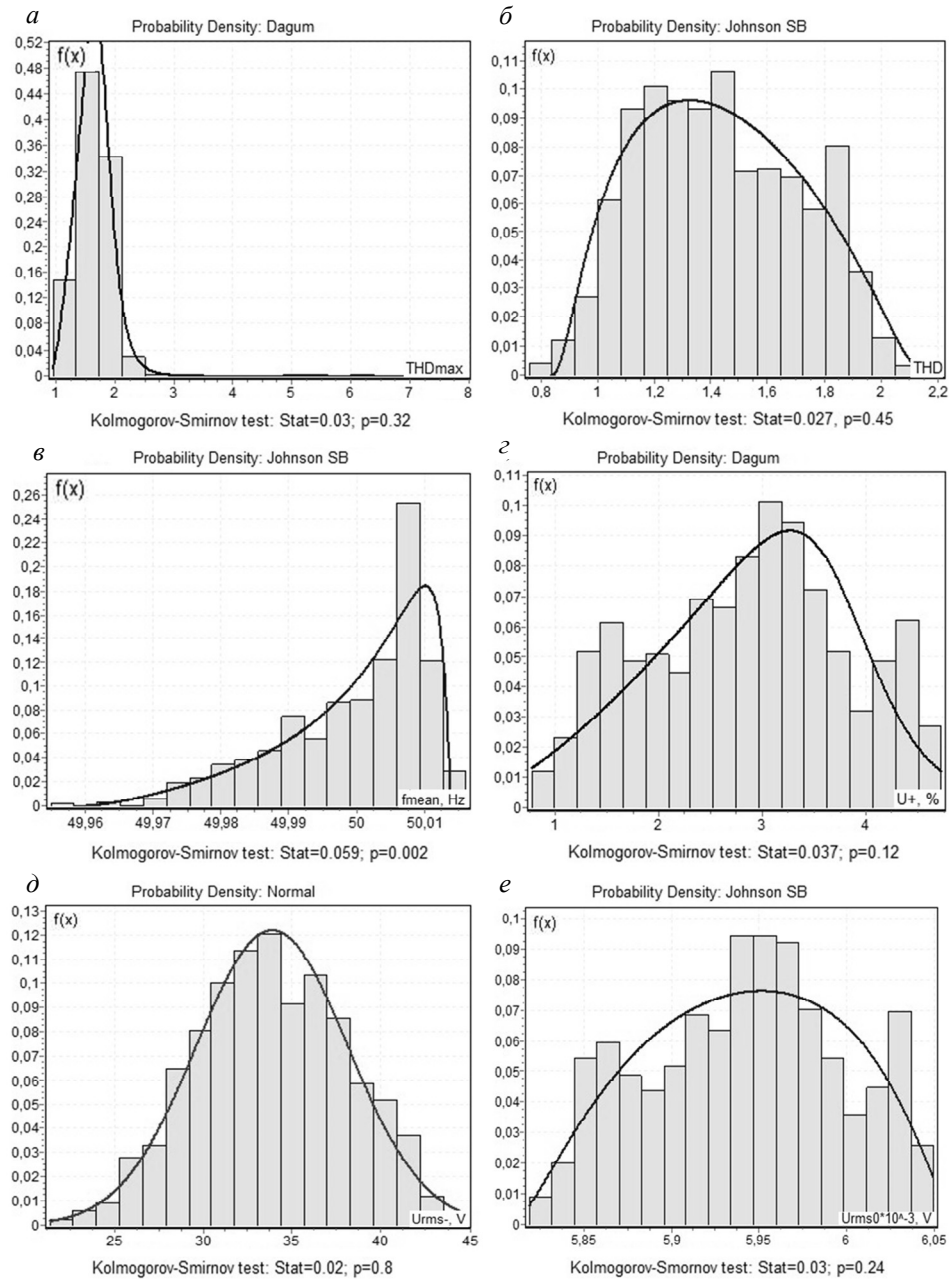


Рис. 2 – Эмпирические и теоретические статистические функции плотности вероятности:

a – максимальных значений суммарного коэффициента гармоник; *б* – суммарного коэффициента гармоник; *в* – значений частоты; *г* – положительных отклонений напряжения; *д* – несимметрии напряжения по обратной последовательности; *е* – несимметрии напряжения по нулевой последовательности

Fig. 2 – Empirical and theoretical statistical function of probability density:

a – maximum values of total harmonic distortion; *b* – total harmonic distortion; *c* – frequency values; *d* – positive voltage deviations; *e* – negative voltage deviations; *f* – voltage unbalance at zero sequence

Полученные функции (см. рис. 2, *b-f*) и числовые характеристики статистических распределений медленных отклонений напряжения на стороне 10 кВ показывают, что рассмотренные показатели находятся в пределах нормально допустимых значений, а вероятность выхода за эти пределы стремится к нулю.

Таким образом, в рамках выполненного эксперимента можно сделать важный вывод, что искажения характеристик электроэнергии, установленных ГОСТ 32144–2013, не оказывают существенного влияния на работу электротранспортного комплекса, следовательно, применение мероприятий по улучшению данных показателей для повышения энергетической эффективности ГЭТ не принесет сколько-нибудь ощутимый эффект.

3. Оценка энергетических характеристик тяговых подстанций

Основной энергетической характеристикой выпрямительного агрегата ТП является зависимость выпрямленного напряжения от выпрямленного тока, наклон которой определяется потерями напряжения в трансформаторе, линиях электропередач и диодах выпрямителя. Внешняя характеристика, полученная при выводе из работы всех агрегатов кроме агрегата № 1 ТП № 29, приведена на рис. 3, *a*.

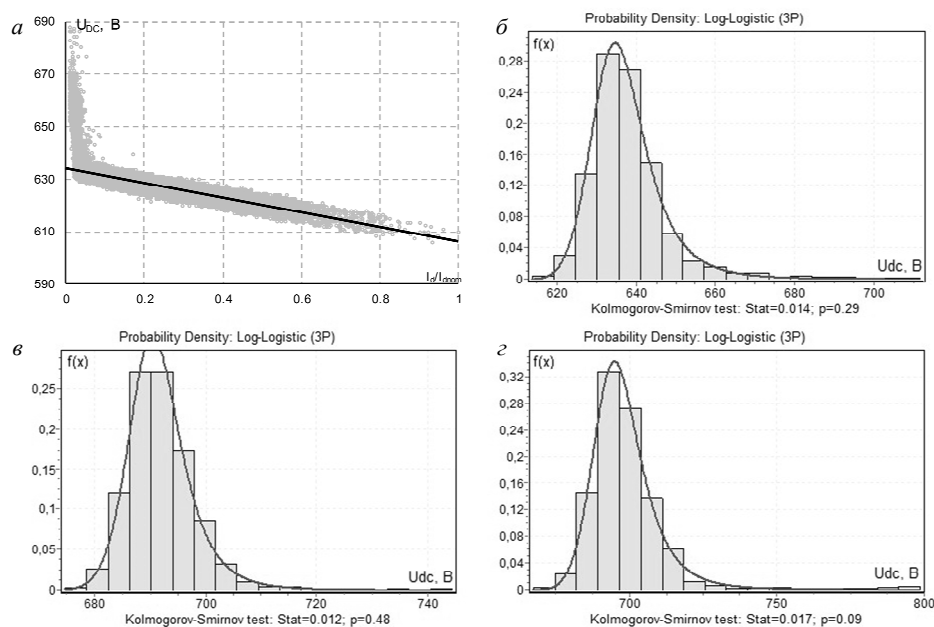


Рис. 3 – Внешняя характеристика агрегата № 1 ТП № 29 (*a*); статистические функции плотности вероятности напряжения ТП № 29 (*b*), ТП № 13 (*c*), ТП № 7 (*d*)

Fig. 3 – External characteristic of the first unit TSS № 29 (*a*); statistical function of probability density of the TSS № 29 DC voltage (*b*), TSS № 13 DC voltage (*c*), TSS № 7 DC voltage (*d*)

Уровни напряжения на шинах ТП и токоприемниках ЭПС ГЭТ установлены ГОСТ 6962–75 [5] (переиздание 1996 г., действующее) и ГОСТ 29322–2014 [6], в соответствии с этими стандартами номинальное напряжение на шинах ТП трамвая и троллейбуса должно составлять 600 В, наибольшее допускаемое значение при любых эксплуатационных условиях, за исключением коммутационных режимов, не должно превышать 700 В. Вероятностно-статистическая оценка уровней

выпрямленного напряжения, выполненная на основе усредненных в интервале 10 с суточных графиков, представлена на рис. 3, в-г. Как видно наиболее вероятны условия работы подстанций, при которых напряжение составляет 635...700 В, а наибольшие значения достигают 700...800 В, что является превышением допустимого предела. Это говорит о том, что функционирование системы электро-транспортного комплекса осуществляется в условиях низкой загрузки установочной мощности оборудования подстанций.

Используя данные с регистратора FLUKE_1760 на стороне 10 кВ и с разработанного регистратора на стороне выпрямленного напряжения, получены зависимости КПД преобразовательного агрегата и коэффициента мощности от тока нагрузки для ТП № 29. Эти зависимости, а также функции статистического распределения тока нагрузки подстанций приведены на рис. 4.

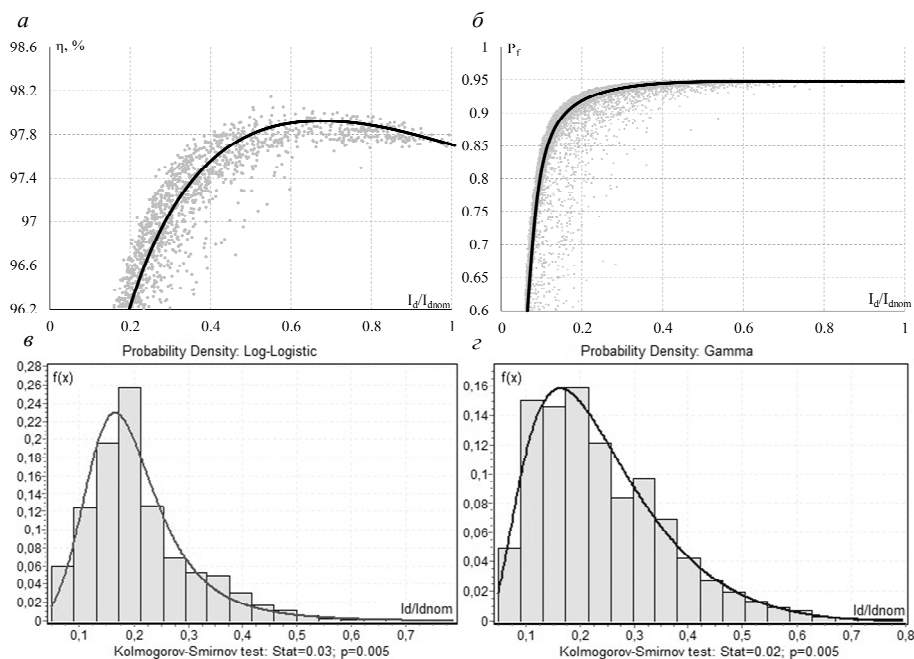


Рис. 4 – Зависимость КПД агрегата № 1 ТП № 29 от нагрузки (а); зависимость коэффициента мощности от нагрузки (б); функции статистического распределения тока нагрузки ТП № 7 (в) и ТП № 29 (г)

Fig. 4 – Unit №1 (TSS № 29) load characteristic of the efficiency (a) and load characteristic of the power factor (b); statistical function of probability density of the TSS № 7 load current (c) and TSS № 13 load current (d)

Полученные характеристики подтверждают, что подстанции работают в области низких нагрузок относительно установленной мощности с редким достижением номинального режима работы оборудования подстанций. Кроме этого, очевидно снижение энергетических показателей относительно номинальных значений, наиболее вероятным токам нагрузки соответствуют величины КПД порядка 96 % и коэффициента мощности порядка 0,92. При том, что в номинальном режиме их значения будут смещены к 97,6 % и 0,95 соответственно, а работа будет осуществляться не в вертикальной части характеристик, а преимущественно в горизонтальной.

4. Заключение

В работе представлены результаты проведенных экспериментальных измерений на действующих тяговых подстанциях МКП ГЭТ г. Новосибирска с использованием регистратора показателей качества электроэнергии FLUKE 1760 и разработанных автором регистраторов постоянных тока и напряжения. Получено более 20 млн значений данных, на основе которых выполнено исследование нормируемых и ненормируемых показателей электроснабжения.

Вероятностно-статистическая обработка данных показала, что медленные изменения параметров напряжения, установленные ГОСТ 32144–2013, находятся в нормально допустимых пределах и не оказывают существенного влияния на работу ГЭТ, поэтому применение мероприятий по их улучшению нецелесообразно ввиду низкого эффекта.

Получены статистические функции плотности вероятности значений выпрямленного напряжения по трем ТП, которые показали завышение наиболее вероятного уровня напряжения до 200 В относительно номинальных 600 В, а также превышение предельно допустимого по ГОСТ 6962–75 на 100 В. Сделан вывод о низкой величине токов тяговых нагрузок подстанций, который был подтвержден полученными статистическими функциями этих токов. Действительно, наблюдается занижение нагрузки вплоть до 70 % от номинальной, что обуславливает работу выпрямительных агрегатов с заниженными значениями ненормируемых энергетических характеристик.

На основе полученных результатов можно заключить, что при обеспечении соответствия количества введенных в работу выпрямительных агрегатов величине действующей в системе тяговой нагрузки возможно повышение энергетической эффективности всего электротранспортного комплекса за счет снижения технологических расходов на преобразование электроэнергии. Достоинством данного мероприятия при неавтоматическом управлении является отсутствие необходимости в каких-либо материальных затратах. С другой стороны, реализация автоматического регулирования способна обеспечить адаптивное управление в зависимости от величины нагрузки, в этом случае полученные энергетические характеристики могут быть использованы для выбора уставок регулирования мощности. С учетом числовых характеристик полученных распределений токов тяговой нагрузки можно ожидать снижения потерь в тяговых агрегатах подстанций до 20 % в зависимости от параметров графиков нагрузки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бюллетень социально-экономического кризиса в России. № 7. Активность населения в использовании транспортных услуг [Электронный ресурс] / Л. Григорьев, А. Голяшев, Е. Буряк, А. Лобанова, В. Кульпина; Аналитический центр при Правительстве Российской Федерации. – М., 2015. – 22 с. – URL: <http://ac.gov.ru/files/publication/a/7059.pdf> (дата обращения: 11.10.2016).
2. Энергосберегающие режимы работы выпрямительных агрегатов подстанций электрического транспорта / В.И. Сопов, В.В. Бирюков, С.А. Евдокимов, А.А. Помазная, Ю.В. Аверина // Транспорт: наука, техника, управление. – 2010. – № 4. – С. 39–43.
3. ГОСТ Р 51317.4.30–2008. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Методы измерений показателей качества электрической энергии. – Введ. 2010–01–01. – М.: Стандартинформ, 2010. – 54 с.
4. ГОСТ 32144–2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – Введ. 2014–07–01. – М.: Стандартинформ, 2014. – 20 с.

5. ГОСТ 6962–75. Транспорт электрифицированный с питанием от контактной сети. Ряд напряжений. – Взамен ГОСТ 6962–54. – Введ. 1977–01–01. – Переизд. (март 1996 г.) с Изм. № 1. – М.: Изд-во стандартов, 1996. – 7 с.

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF ENERGY PARAMETERS OF URBAN ELECTRIC TRANSPORT TRACTION SUBSTATIONS

Abramov E.Yu.

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

The current urban electric transport system in Novosibirsk operates under conditions of a low passenger carriage rate, which causes a divergence of traction substation equipment performance from design values. At the same time, an excessive wear of the electric transport infrastructure results in an increase in energy consumption. To enhance the system energy efficiency the task was set to experimentally evaluate rated parameters of electric energy and non-standardized energy characteristics of the existing traction substations.

To solve these problems it is necessary to carry out long-term experimental measurements of electric parameters based on the FLUKE 1760 power quality recorder at the 10 kV-side and the recorders at the rectified voltage side developed by the author.

The data probabilistic-statistical analysis showed the agreement between the rated slow changes of alternating voltage characteristics and admissible values. The analysis of the rectifier unit energy characteristics revealed a significant divergence from the design rated values. As a result, it was elucidated that the energy performance of the traction equipment decreased. Consequently, the author suggests implementing measures to improve the quality of converter energy characteristics at low costs.

Keywords: urban electric transport; traction power supply system; traction substation; electric energy quality indicators; energy characteristics; energy efficiency.

DOI: 10.17212/1727-2769-2016-3-33-42

REFERENCES

1. Grigor'ev L., Golyashev A., Buryak E., Lobanova A., Kul'pina V. *Byulleten' sotsial'no-ekonomicheskogo krizisa v Rossii*. N 7. *Aktivnost' naseleniya v ispol'zovanii transportnykh uslug* [Bulletin of the socio-economic crisis in Russia. N 7. Population active in use of transport services]. Analytical Center for the Government of the Russian Federation. Moscow, 2015, 22 p. Available at: <http://ac.gov.ru/files/publication/a/7059.pdf> (accessed 11.10.2016)
2. Sopov V.I., Birukov V.V., Evdokimov S.A., Pomaznaya A.A., Averina Yu.V. *Energosberegayushchie rezhimy raboty vypryamitel'nykh agregatov podstantsii elektricheskogo transporta* [Energy-saving modes of traction rectifier units of electric transport substations]. *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie – Transportation: Science, Technology, Management*, 2010, no. 4, pp. 39–43.
3. GOST R 51317.4.30–2008. *Elektricheskaya energiya. Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Metody izmerenii pokazatelei kachestva elektricheskoi energii* [State Standard 51317.4.30–2008. Electric energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Electric energy quality indices measurement methods]. Moscow, Standartinform Publ., 2010. 54 p.
4. GOST 32144–2013. *Elektricheskaya energiya. Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Normy kachestva elektricheskoi energii v sistemakh elektrosnabzheniya obshchego naznacheniya* [State Standard 32144–2013. Electric energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Power quality limits in the public power supply systems]. Moscow, Standartinform Publ., 2014. 20 p.
5. GOST 6962–75. *Transport elektrifitsirovannyi s pitaniem ot kontaktnoi seti. Ryad napryazhenii* [State Standard 6962–75. Electrified transport with overhead system power supply. Voltage row]. Moscow, Izdatel'stvo standartov Publ., 1996. 7 p.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ



Абрамов Евгений Юрьевич – родился в 1985 году, аспирант, ассистент кафедры электротехнических комплексов Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: энергосбережение и энергоэффективность, электротранспортные системы, возобновляемые источники энергии, комбинированные системы электроснабжения. Опубликовано 10 научных работ. (Адрес: 630073, РФ, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. Email: e.abramov@corp.nstu.ru).

Abramov Evgeniy Yrievich – born in 1985, a postgraduate student, assistant at the electrotechnical systems department of Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on energy saving and efficiency, electric transport systems, renewable energy sources, and combined power supply systems. He is the author of 10 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. Email: e.abramov@corp.nstu.ru).

*Статья поступила 28 августа 2016 г.
Received August 28, 2016*

To Reference:

Abramov E.Yu. Eksperimental'noe issledovanie energeticheskikh parametrov tyagovykh podstantsii gorelektrotransporta [Experimental investigation of energy parameters of urban electric transport traction substations]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2016, no. 3 (32), pp. 33–42. doi: 10.17212/1727-2769-2016-3-33-42