

Транспорт

УДК 621.33.054.42:621.332.015.32

DOI: 10.30987/1999-8775-2020-3-11-20

С.И. Макашева, П.С. Пинчуков, А.Р. Мамаев, С.Г. Терлецкий

**ОЦЕНКА КАЧЕСТВА НАПРЯЖЕНИЯ НА ШИНАХ 27,5 кВ
ТЯГОВОЙ ПОДСТАНЦИИ С УСТРОЙСТВОМ
ПРОДОЛЬНОЙ ЕМКОСТНОЙ КОМПЕНСАЦИИ**

Повышение качества электрической энергии в тяговой сети переменного тока железных дорог. Для достижения поставленной цели необходим вероятностно-статистический анализ качественных характеристик напряжения тяговой сети, который проводится на основании натурных замеров на шинах тяговой подстанции, питающих фидера контактной сети. Отдельным вопросом исследования являлась оценка степени влияния включенного компенсирующего устройства, установленного в фидер отсosa тяговой подстанции, на несимметрию и гармонический состав напряжения контактной сети по плечам питания тяговой подстанции.

Выполнен вероятностно-статистический анализ основных показателей качества по напряжению с графическим построением гистограмм плотности нормального распределения исследуемых величин на основании экспериментальных замеров, произведенных на действующей подстанции переменного тока, расположенной на Дальнем Востоке РФ.

Дана оценка степени влияния включения устройства продольной емкостной компенсации на

степень симметрии и синусоидальности напряжения на тяговых шинах подстанции. Наличие достоверной и актуальной информации о качества электроэнергии в тяговой сети позволяет принимать более точные, обоснованные и экономически эффективные решения для обеспечения электромагнитной совместимости различных технических средств: токоприемников электроподвижного состава, устройств связи и других объектов системы тягового электроснабжения.

Анализ результатов обработки натурных замеров характеристик электроэнергии тяговой подстанции с действующими стандартами и инструкциями в области электроснабжения железных дорог показывает, что качество электроэнергии не соответствует нормативам. Необходимо дальнейшее изучение данной проблемы и применение средств повышения качества электроэнергии, в частности, фильтрокомпенсирующих устройств.

Ключевые слова: тяговая подстанция, качество электрической энергии, электромагнитная совместимость, уровень напряжения, несинусоидальность напряжения, ёмкостная компенсация.

S.I. Makasheva, P.S. Pinchukov, A.R. Mamaev, S.G. Terletsky

**ESTIMATE OF VOLTAGE QUALITY ON TRACTION SUBSTATION
BUSES OF 27.5 kV WITH LONGITUDINAL CAPACITIVE
COMPENSATION DEVICE**

The paper is dedicated to the investigation of electric energy quality in AC traction network. The object of investigations is voltage in the AC traction network on buses of 27.5 kV in the AC functioning substation. The probabilistic-statistical value of the voltage level and values of electric energy quality according to voltage non-sinusoidality is under fulfillment.

There are shown numerical characteristics and histograms of the distribution density of values under analysis for two operation modes of the AC traction substation – switching on and off of the longitudinal capacitive compensation device formed on the basis of natural measurements. The probabilistic-statistical processing of natural measurements results in power sup-

ply arms of the functioning traction substation located in the Far-East of the Russian Federation is carried out.

The analysis results are shown as distribution density histograms of random values according to the standard law and in a table form. The longitudinal compensation device impact upon quality values of electric power according to the voltage is under consideration.

The calculated indices of electric power quality at the traction substation are compared with the requirements of GOST 32144-2013 in force. It is mentioned that upon buses of 27.5 kV of the traction substation both in the mode of UPK switching on, and in the mode of its switching off the electric power quality by the factor of voltage harmonic components does not

satisfy the requirements of GOST 32144-2013 in a number of harmonics. On the basis of the complex estimate of voltage parameters there is drawn a conclusion of the positive impact of longitudinal capacitive compensation devices upon voltage level and the absence of a distinct effect upon a harmonic structure of voltage in a traction network at longitudinal compensation switching on. The conclusion is drawn about filtra-

Введение

Вопрос обеспечения надлежащего качества электрической энергии (КЭ) неразрывно связан с необходимостью создания надёжного, безопасного и экономически эффективного процесса энергоснабжения потребителей электрической энергией. В системе железнодорожного транспорта вопрос КЭ приобретает особую актуальность для электроподвижного состава (ЭПС), т.к. к его безопасности и бесперебойности движения предъявляются повышенные требования. Рассмотрим два аспекта, которые обосновывают необходимость поддержания КЭ на высоком уровне. Во-первых, электрическая энергия надлежащего качества необходима для эффективной работы ЭПС и исполнения предписанного графика движения поездов [1, 2]. Во-вторых, работающий ЭПС вызывает искажение качества электроэнергии, потребляемой им из тяговой сети, что передается в питающую сеть внешнего электроснабжения, ухудшая тем самым условия электромагнитной совместимости элементов всей системы электроснабжения [3, 4]. Так, при использовании в схемах ЭПС двухполупериодных тиристорных выпрямителей наблюдается значительное искажение кривых напряжения и тока, что в ряде случаев может привести к выходу из строя измерительных и вычислительных полупроводниковых приборов, чувствительных к гармоническому составу напряжения и тока [5].

Качество электрической энергии в Российской Федерации регламентируется межгосударственным стандартом ГОСТ 32144-2013 [6], а для приведения КЭ в соответствие с его требованиями в системе тягового электроснабжения применяют разнообразные фильтры, компенсирующие и симметрирующие устройства для ком-

пенсации реактивной мощности и реактивного сопротивления. Вопрос электромагнитной совместимости является актуальным и за рубежом: исследователей интересует повышение экономической эффективности, устойчивости, стабильности систем электроснабжения [2, 7]. Предлагаются меры устранения недостатков в существующих системах [8], а также предлагаются к внедрению новые технические решения и схемы [9]. В сети железных дорог РФ в последние годы широко применяются компенсирующие устройства продольной емкостной компенсации (УПК) [10].

Key words: traction substation, electric energy quality, electromagnetic compatibility, voltage level, voltage non-sinusoidality, capacitive compensation.

Устройства УПК положительно влияют на улучшение симметрии напряжения в питающей трехфазной сети, к которой подключаются тяговые подстанции [10]. Устройство продольной компенсации для системы тягового электроснабжения переменного тока напряжением 25 кВ предназначено для компенсации индуктивного сопротивления сети и способствует повышению напряжения на шинах подстанции, предотвращению эффекта опережения или отставания фаз, получению более симметричных напряжений с равными токами в плечах питания тяговой подстанции и снижению отклонения напряжения.

В этой связи особую актуальность и практическую значимость приобретают вопросы экспериментальной сравнительной оценки показателей качества электрической энергии при включении и отключении УПК на реальном объекте. Таким объектом исследования в данной работе выбрана одна из тяговых подстанций переменного тока, расположенная на Дальневосточной железной дороге, где и проводился эксперимент по оценке степени влияния УПК на качество электрической энергии по напряжению.

Проведение эксперимента

Для получения точных натуральных данных о качестве электроэнергии на шинах 27,5 кВ действующей тяговой подстанции переменного тока, расположенной на Дальневосточной железной дороге, были проведены замеры с применением измерительного комплекса Ресурс UF-2M. Целью эксперимента является численная

оценка уровня и гармонического состава напряжения по обоим плечам питания ТП, а также оценка степени их изменения от наличия/отсутствия в тяговой сети УПК. Замеры проводились при включённом и отключённом УПК, размещённом в отсасывающем фидере тяговой подстанции, по схеме, приведённой на рис. 1.

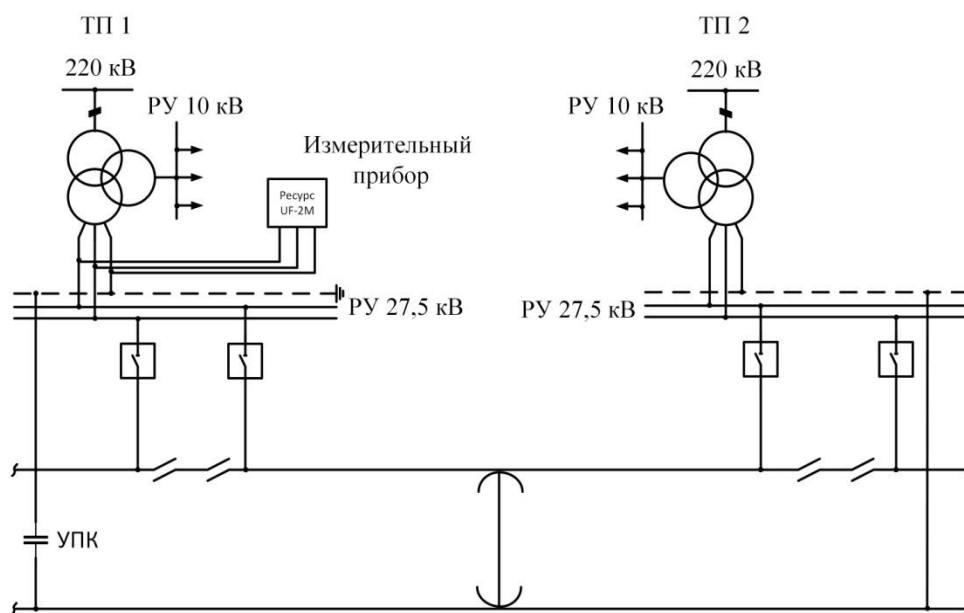


Рис. 1. Условная схема подключения измерительного прибора к тяговой сети

В результате проведения экспериментальных замеров в тяговой сети на плечах питания тяговой подстанции ТП 1 и в фидере отсоса были получены базы данных исходных величин, которые далее были подвергнуты вероятностно-статистической обработке. Длительность замера – одни сутки. Несмотря на то, что рекомендованная по ГОСТ 32144-2013 длительность замера показателей качества элек-

трической энергии составляет одну неделю, для инженерных расчетов, удовлетворяющих допустимой инженерной погрешности 5 %, в нашем случае достаточной является длительность замера в одни сутки. Таким образом, по каждому фидеру 27,5 кВ был произведён анализ численных значений напряжения в форме массивов из 25600 значений (1 замер – раз в 3 секунды).

Вероятностно-статистическая оценка напряжения и показателей его качества

Полученные массивы исходных данных далее были обработаны с применением базовых положений теории вероятностей и аппарата математической статистики. Поскольку значения электрических величин в действующих сетях тягового электроснабжения являются случайными величинами, которые подчиняются нормальному закону распределения [1], то для анализа массива значений, полученного в хо-

де эксперимента, определены параметры этого закона распределения: математическое ожидание (МО, μ) и среднеквадратическое отклонение (СКО, σ) случайной величины. Зная численные значения характеристик напряжения, далее была произведена оценка стабильности напряжения, а также определён диапазон наиболее ожидаемых реализаций значения исследуемых величин по правилу “трёх сигм”.

Результаты замеров и обработки данных при помощи методов математической статистики и теории вероятностей сведены

в гистограммы плотности распределения случайной величины.

Анализ уровня напряжения

На рис. 2 приведены кривые нормального распределения напряжения «опережающего» плеча питания тяговой подстанции для обоих случаев – включе-

ния УПК и отключения УПК. На рис. 2 «опережающее» плечо питания имеет обозначение U_1 .

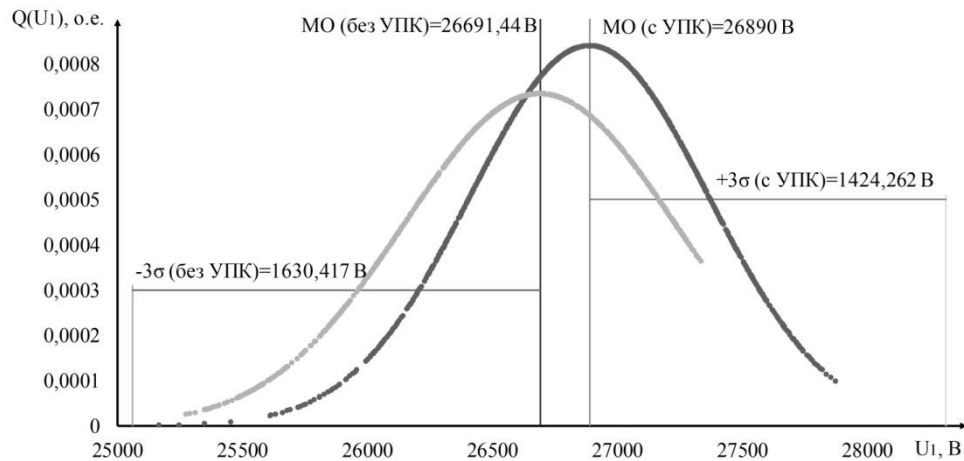


Рис. 2. Нормальное распределение напряжения «опережающего» плеча питания ТП 1

На рис. 3 приведены кривые нормального распределения напряжения «отстающего» плеча питания также для обоих случаев – включения УПК и отключения

УПК. На рис. 3 «отстающее» плечо питания тяговой подстанции имеет обозначение U_2 .

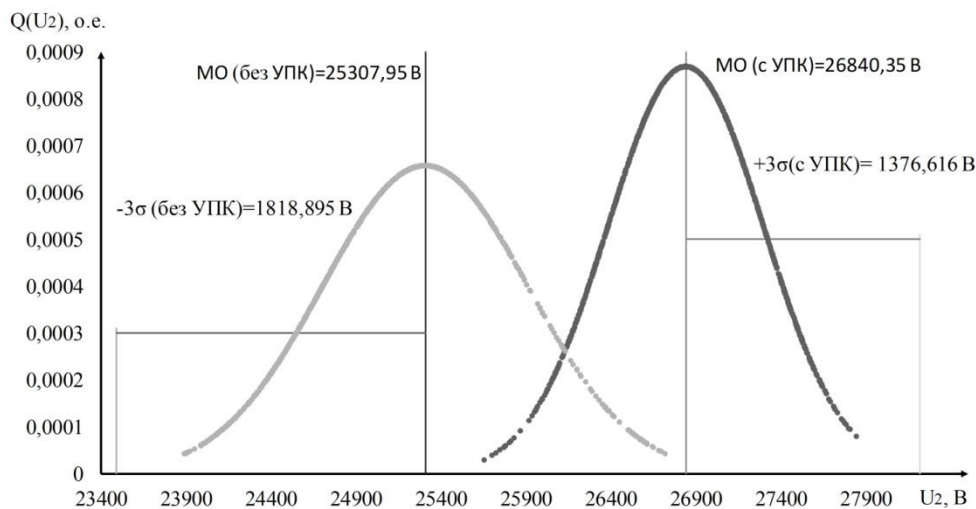


Рис. 3. Нормальное распределение напряжения «отстающего» плеча питания ТП 1

Как следует из рис. 2 и 3, гистограммы плотности распределения при включении УПК изменились, что позволяет выделить следующие особенности:

- значение МО уровня напряжения возрастает за период измерения на 198,56 В для «опережающего» плеча и – на 1532 В для «отстающего» плеча питания ТП. Таким образом, наличие в тяговой се-

ти включённого УПК благоприятно сказывается на режиме напряжения в тяговой сети, повышая его средний уровень;

- интервал наиболее вероятных ожидаемых значений уровня напряжения (участок гистограммы на интервале от $(\mu-3\sigma)$ до $(\mu+3\sigma)$ сужается при применении УПК, причём как по «опережающему» плечу, так и по «отстающему», что свидетельствует о более высокой стабильности напряжения при включении УПК;

- границы изменения величины напряжения в сторону увеличения ($+3\sigma$) сокращаются на 206,209 В в «опережающем» плече, на 442,279 В – в «отстающем» плече питания ТП, что также свидетель-

ствует о улучшении стабильности напряжения при включении УПК;

- наблюдается эффект симметрирования напряжений на плечах питания ТП.

Таким образом, при применении УПК основная часть (99,95 %) значений уровня напряжения сместилась в сторону увеличения, а разброс значений сузился, что говорит о положительном влиянии включённого УПК на стабильность и уровень напряжения плеч питания тяговой подстанции. Положительный эффект в большей степени проявляется на напряжении «отстающего» плеча питания тяговой подстанции.

Далее перейдем к оценке степени синусоидальности кривых напряжения.

Анализ несинусоидальности кривых напряжения плеч питания ТП

Согласно ГОСТ 32144-2013 синусоидальность кривой напряжения оценивается двумя показателями качества электрической энергии: K_U , % – суммарным коэффициентом гармонических составляющих напряжения и $K_{U(n)}$, % – коэффициентами гармонических составляющих напряжения до 40-го порядка. На рис. 4 и 5 приведены

в общих осях спектры гармонического состава напряжений в виде коэффициента гармонических составляющих напряжения $K_{U1(n)}$ и $K_{U2(n)}$, %, для «опережающего» (соответствующие данные изображены тёмными отсчётами) и «отстающего» (светлые отсчёты) плеч питания тяговой подстанции при отключённом и подключённом УПК.

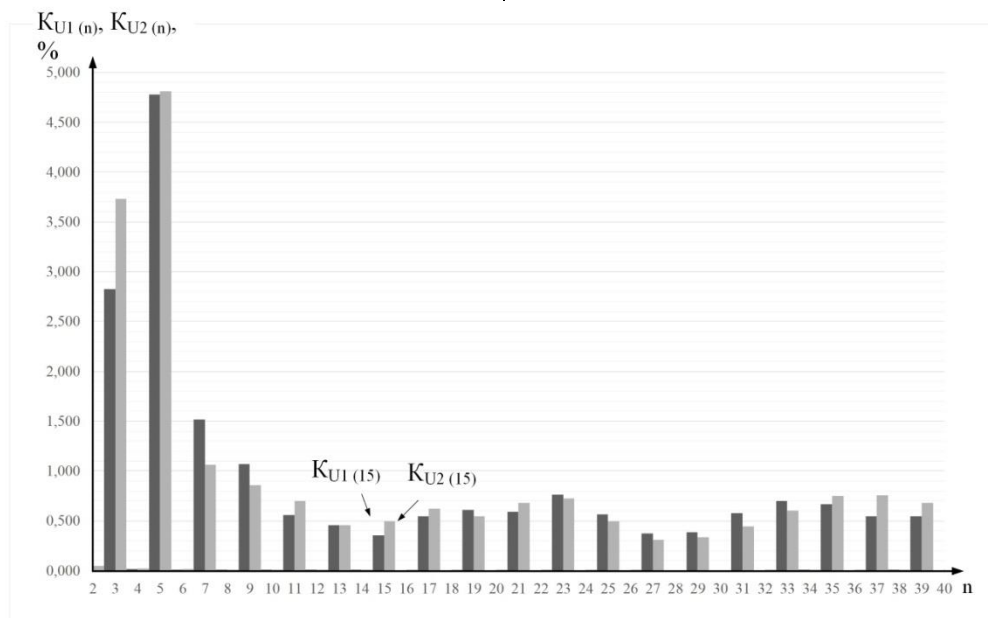


Рис. 4. Коэффициенты гармонических составляющих напряжения при отключённом УПК

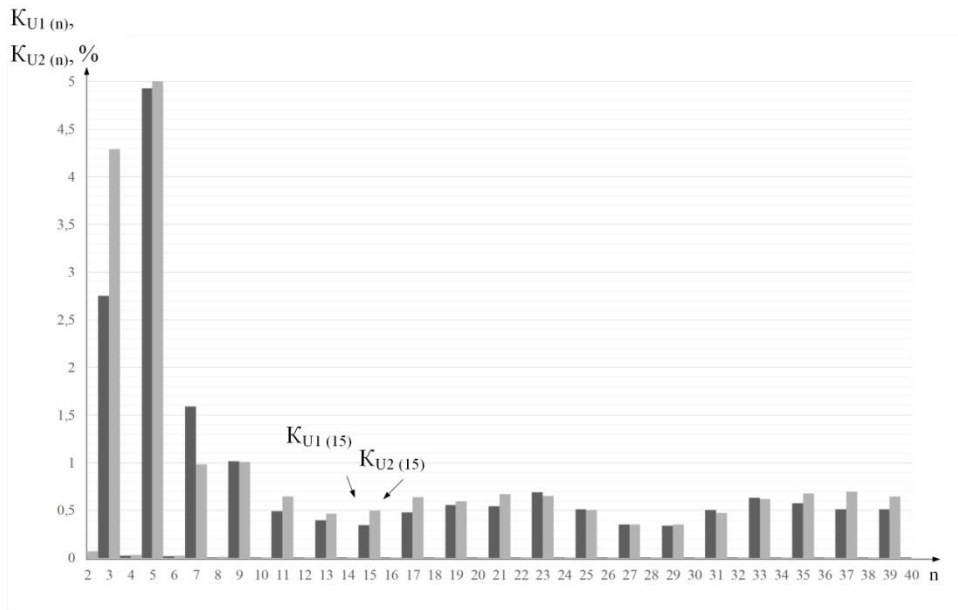


Рис. 5. Коэффициенты гармонических составляющих напряжения при подключённом УПК

На рис. 6 и 7 приведены в общих осях диаграммы плотности распределения вероятности значений суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения K_U , %, для «опережающего» и «отстающего» плеч питания тяговой под-

станции для обоих режимов – при включении УПК и при его отключении. Индекс 1 означает принадлежность коэффициента к «опережающему» плечу питания тяговой подстанции, а индекс 2 – к «отстающему».

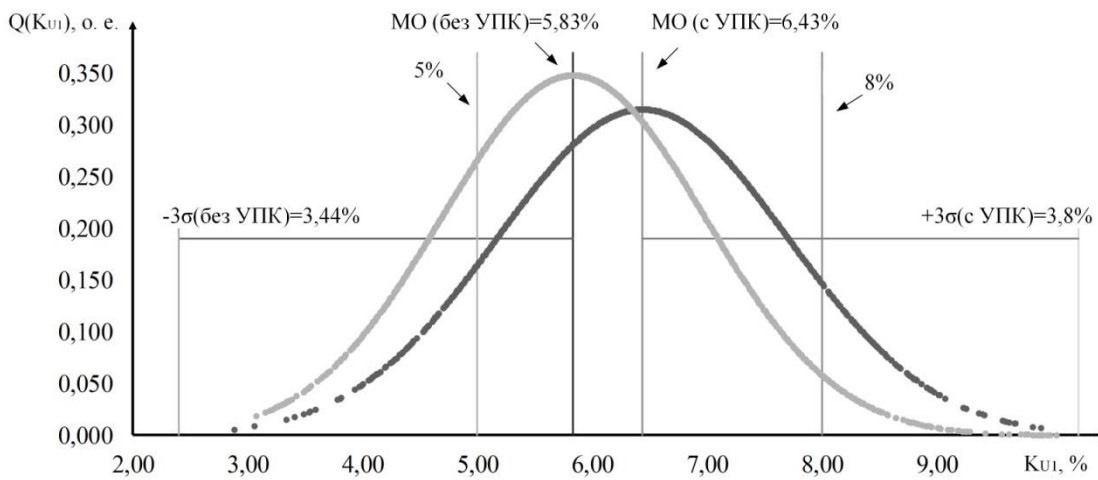


Рис. 6. Распределение плотности вероятности суммарных коэффициентов гармонических составляющих напряжения «опережающего» плеча питания

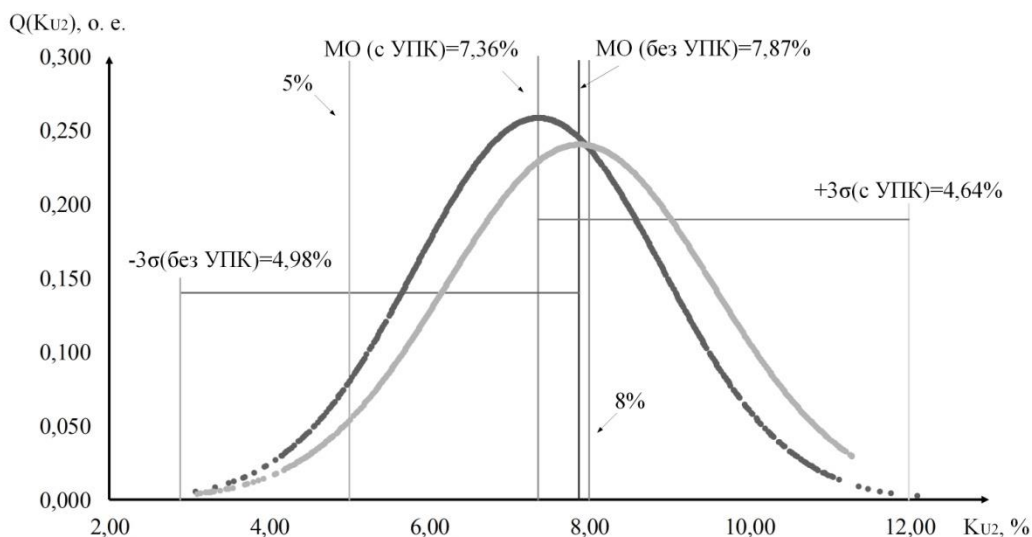


Рис. 7. Распределение плотности вероятности суммарных коэффициентов гармонических составляющих напряжения «отстающего» плеча питания

На рис. 6 и 7 кривые, окрашенные более тёмным цветом, относятся к режиму включения УПК, а более светлые кривые – к режиму, когда УПК отключено.

Анализируя рис. 4-7, можно отметить следующие закономерности:

- при включении УПК суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения изменяется на $0,5 \div 0,6$ %;
- гармонический состав напряжения по обоим плечам питания тяговой подстанции практически не изменяется при включении УПК;

– для «опережающего» плеча применение УПК приводит к увеличению среднего значения суммарного коэффициента гармонических составляющих. МО возрастает на 0,6 %, диапазон возможных значений K_{U1} также расширился на 0,36 %;

– для «отстающего» плеча применение УПК приводит к уменьшению среднего значения суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения. МО убывает на 0,41 %, диапазон возможных значений K_{U2} стал меньше на 0,34 %.

Оценка соответствия ПКЭ требованиям ГОСТ 32144-2013.

Проведем сравнение полученных значений ПКЭ с требованиями существующих стандартов. В табл.1 приведены данные по оценке сорока гармоник напряжения для «опережающего» плеча питания. В рамках статьи ограничимся приведением данных для «опережающего» плеча как для плеча с наихудшими условиями. Укажем в таблице количество измеренных значений гармонических составляющих нечетных гармоник напряжения, превышающих нормально допустимое (уровень 95 %) и предельно допустимое (уровень 100 %) значения по [6].

Как следует из табл.1, напряжение на шинах 27,5 кВ рассматриваемой подстанции не соответствует требованиям ГОСТ

32144-2013, что говорит о неудовлетворительном качестве электроэнергии по синусоидальности кривых напряжения. Из сравнения показателей при отключённом и включённом УПК следует, что его применение не имеет заметного положительного эффекта, а по ряду гармоник (19, 35) – даже усугубляет ситуацию с искажением синусоидальности напряжения. В связи с этим существует необходимость в разработке мер по подавлению высших гармоник, образующихся при движении широко распространённых на российских железных дорогах электропоездов переменного тока с коллекторными двигателями и тиристорными выпрямительно-инверторными установками [3, 5].

Таблица 1

Значения коэффициентов гармонических составляющих $K_{UI(n)}$ для напряжения «опережающего» плеча питания ТП

Номер гармоники, n	УПК включено			УПК отключено		
	Количество измеренных значений, % , вышедших за уровень		Соответствие ГОСТ	Количество измеренных значений, % , вышедших за уровень		Соответствие ГОСТ
	95 %	100 %		95 %	100 %	
3	41,90	9,05	нет	44,17	10,00	нет
5	74,22	21,38	нет	66,67	25,00	нет
9	50,78	9,05	нет	56,67	14,17	нет
15	60,86	19,83	нет	60,00	20,83	нет
17	0,00	0,00	да	0,00	0,00	да
19	3,62	0,00	да	8,33	0,00	нет
21	98,79	92,24	нет	100,00	95,83	нет
23	12,50	0,43	нет	22,50	0,00	нет
25	2,50	0,00	да	2,50	0,00	да
27	90,60	62,93	нет	90,83	66,67	нет
29	0,00	0,00	да	0,00	0,00	да
31	1,12	0,00	да	1,67	0,00	да
33	99,57	94,83	нет	100,00	100,00	нет
35	3,19	0,00	да	5,83	0,00	нет
37	0,86	0,00	да	2,50	0,00	да
39	98,97	89,57	нет	100,00	95,83	нет

Заключение

Согласно проведенным исследованиям экспериментальных данных при включении и отключении устройства продольной емкостной компенсации в отсасывающий фидер тяговой подстанции переменного тока, можно сделать следующие выводы:

1. Включение УПК положительно влияет на увеличение напряжения по плечам питания ТП: уровень напряжения в отстающем плече питания повышается на 1,5 кВ, в опережающем – на 250 В, при этом напряжения плеч питания становятся практически одинаковыми по величине.

2. Включение УПК незначительно влияет на синусоидальность кривых напряжения при включении УПК суммар-

ный коэффициент гармонических составляющих напряжения изменяется на $0,5 \div 0,6$ %.

3. На шинах 27,5 кВ тяговой подстанции как в режиме включения УПК, так и в режиме его отключения качество электрической энергии по коэффициенту гармонических составляющих напряжения по ряду гармоник не удовлетворяет требованиям ГОСТ 32144-2013.

4. Для приведения качества электрической энергии к требованиям существующих стандартов целесообразно применять специальные устройства, фильтрующие гармонический состав напряжения и тока в тяговой сети.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ким, А.В. Непрерывный мониторинг и прогноз показателей качества электрической энергии как составляющая часть энергосберегающих технологий / А.В. Ким, О.П. Красновская, С.И. Макашова // Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке. – 2017. – Т. 1. – С. 65-68.
2. Power quality (and monitoring) in railway systems Marco Filipe Santos, Global Railway Review Magazine, issue 5 2013.
3. Кабалык, Ю.С. Повышение энергоэффективности 3-фазного автономного инвертора напряжения / Ю.С. Кабалык // Электро. Электротехника,

- электроэнергетика, электротехническая промышленность. – 2015. – № 1. – С. 32-35.
4. Modelling of Dynamic Compensation for Isolated Neutral Power Network P S Pinchukov 2019 IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 272 022070.
 5. Власьевский, С.В. Аварийные процессы работы тиристорного выпрямителя электровоза переменного тока / С.В. Власьевский, О.В. Мельниченко, О.А. Малышева // Электротехника. – 2016. – № 2. – С. 12-16.
 6. 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. – 16 с.
 7. Power Quality Issues in Railway Electrification: A Comprehensive Perspective IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, VOL. 62, NO. 5, MAY 2015.

1. Kim, A.V. Continuous monitoring and forecast of values in electric power quality as constituent of energy-saving technologies / A.V. Kim, O.V. Krasnovskaya, S.I. Makashyova // Scientific-technical and Economic Cooperation of AFR countries in XXI-th Century. 2017. Vol.1. pp. 65-68.
2. Power quality (and monitoring) in railway systems Marco Filipe Santos, Global Railway Review Magazine, issue 5 2013.
3. Kabalyk, Yu.S. Energy effectiveness increase of 3-phase autonomous inverter of voltage / Yu.S. Kabalyk // Electro. Electrical Engineering, Power Industry, Power Engineering Industry. 2015. No.1. pp. 32-35.
4. Modelling of Dynamic Compensation for Isolated Neutral Power Network P S Pinchukov 2019 IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 272 022070.
5. Vlasievsky, S.V. Processes of thyristor rectifier emergency operation in AC electric locomotive / S.V. Vlasievsky, O.V. Melnichenko, O.A. Malysheva // Electrical Engineering. 2016. No.2. pp. 12-16.

8. Study of Different Methods for Enhancing Power Quality Problems Priyanka Chhabra. International Journal of Current Engineering and Technology, Vol.3, No.2 (June 2013).
9. New generation traction power supply system and its key technologies for electrified railways Li, Q. J. Mod. Transport. (2015) 23: 1. <https://doi.org/10.1007/s40534-015-0067-1>.
10. Герман, Л.А. Современная схема продольной емкостной компенсации в системе тягового электроснабжения / Л.А. Герман, В.П. Гончаренко // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2013. – №2 (50). – С. 12-17.

6. GOST 32144-2013 Electric Energy. Electromagnetic Compatibility of Engineering Means. Quality Standards of Electric Energy in Power Supply Systems of General Purpose. Introduced 2014-07-01. М.: Standardinform, 2014. – pp. 16.
7. Power Quality Issues in Railway Electrification: A Comprehensive Perspective IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, VOL. 62, NO. 5, MAY 2015.
8. Study of Different Methods for Enhancing Power Quality Problems Priyanka Chhabra. International Journal of Current Engineering and Technology, Vol.3, No.2 (June 2013).
9. New generation traction power supply system and its key technologies for electrified railways Li, Q. J. Mod. Transport. (2015) 23: 1. <https://doi.org/10.1007/s40534-015-0067-1>.
10. German, L.A. Modern circuit of longitudinal capacitive compensation in system of traction power supply / L.A. German, V.P. Goncharenko // Bulletin of Rostov State University of Railways. 2013. No.2 (50). pp. 12-17.

Ссылка для цитирования:

Макашева С.И., Пинчуков П.С., Мамаев А.Р., Терлецкий С.Г. Оценка качества напряжения на шинах 27,5 кВ тяговой подстанции с устройством продольной емкостной компенсации // Вестник Брянского государственного технического университета. 2020. № 3. С. 11–20. DOI: 10.30987/1999-8775-2020-3-11-20.

Статья поступила в редакцию 28.11.19.

Рецензент: д.т.н., профессор Брянского государственного технического университета

Кобищанов В.В.,

член редсовета журнала «Вестник БГТУ».

Статья принята к публикации 12. 02. 20.

Сведения об авторах:

Макашева Светлана Игоревна, к.т.н., доцент Дальневосточного государственного университета путей сообщения, e-mail: jar_svet@mail.ru.

Пинчуков Павел Сергеевич, к.т.н., директор Электроэнергетического института, доцент Дальневосточного государственного университета путей сообщения, e-mail: pinchukov-pavel@mail.ru.

Мамаев Александр Романович, студент Дальневосточного государственного университета путей сообщения, e-mail: iernoeen@pm.me.

Makasheva Svetlana Igorevna, Can. Sc. Tech., Assistant Prof., Far-Eastern State University of Railways, e-mail: jap_svet@mail.ru.

Pinchukov Pavel Sergeevich, Can. Sc. Tech., Director of Electro-Energetic Institute, Assistant Prof. of Far-Eastern State University of Railways, e-mail: pinchukov-pavel@mail.ru.

Терлецкий Сергей Геннадьевич, студент Дальневосточного государственного университета путей сообщения, e-mail: never.hbr@mail.ru.

Mamaev Alexander Romanovich, Student of Far-Eastern State University of Railways, e-mail: iernoeen@pm.me.

Terletsy Sergey Gennadievich, Student of Far-Eastern State University of Railways, e-mail: never.hbr@mail.ru.