



**55** КГЭУ

# **XXVII ВСЕРОССИЙСКИЙ АСПИРАНТСКО-МАГИСТЕРСКИЙ НАУЧНЫЙ СЕМИНАР,**

**ПОСВЯЩЕННЫЙ ДНЮ ЭНЕРГЕТИКА И 55-ЛЕТИЮ КАЗАНСКОГО  
ГОСУДАРСТВЕННОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА**

**КАЗАНЬ, 5-6 ДЕКАБРЯ 2023 Г.**

**МАТЕРИАЛЫ ДОКЛАДОВ**

**В ТРЕХ ТОМАХ**

**ТОМ 1**

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Казанский государственный энергетический университет»**

**XXVII ВСЕРОССИЙСКИЙ АСПИРАНТСКО-МАГИСТЕРСКИЙ  
НАУЧНЫЙ СЕМИНАР,  
ПОСВЯЩЕННЫЙ ДНЮ ЭНЕРГЕТИКА И 55-ЛЕТИЮ КГЭУ**

5–6 декабря 2023 г.

Казань

В трех томах

*Под общей редакцией ректора КГЭУ  
Э.Ю. Абдуллазянова*

Том 1

Казань 2023

УДК 621.311+51+53+620.22+502+614.8+620.92

ББК 31+32+22+68.9+38.9

М34

Рецензенты:

доцент СГТУ имени Гагарина Ю.А,  
кандидат физико-математических наук, доцент Е.К. Пыльская;  
проректор по РиИ ФГБОУ ВО «КГЭУ»,  
доктор технических наук, доцент И.Г. Ахметова

Редакционная коллегия:

Э.Ю. Абдуллазянов (гл. редактор); И.Г. Ахметова (зам. гл. редактора),  
Д.А. Ганеева

М34 **Материалы докладов XXVII Всероссийского аспирантско-магистерского научного семинара, посвященного дню энергетика и 55-летию КГЭУ / Под общ. ред. ректора КГЭУ Э.Ю. Абдуллазянова. В 3 т.; Т. 1. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2023. – 611 с.**

ISBN 978-5-89873-651-4 (т. 1)

ISBN 978-5-89873-654-5

В сборнике представлены материалы докладов XXVII Всероссийского аспирантско-магистерского научного семинара, посвященного дню энергетика и 55-летию КГЭУ, в которых изложены результаты научно-исследовательской работы молодых ученых, аспирантов и студентов по проблемам в области тепло- и электроэнергетики, ресурсосберегающих технологий в энергетике, энергомашиностроения, инженерной экологии, электромеханики и электропривода, фундаментальной физики, современной электроники и компьютерных информационных технологий, экономики, социологии, истории и философии.

Предназначены для научных работников, аспирантов и специалистов, работающих в сфере энергетике, а также для студентов вузов энергетического профиля.

Материалы докладов публикуются в авторской редакции. Ответственность за содержание тезисов возлагается на авторов.

УДК 621.311+51+53+620.22+502+614.8+620.92

ББК 31+32+22+68.9+38.9

ISBN 978-5-89873-651-4 (т. 1)

© КГЭУ, 2023

ISBN 978-5-89873-654-5

2. Добрусин Л.Н. Проблема качества электроэнергии и электросбережения в России // Энергоэксперт. – 2018. – № 4 (9). – С. 30–35.

3. Большаков О., Воронин В., Шамонов Р., Тульский В. Подходы к обеспечению нормативного качества электроэнергии // Электроэнергия: Передача и распределение. – 2019. – № 1(22). – С. 112–115.

4. Коверникова Л., Тульский В., Шамонов Р. Качество электроэнергии в ЕЭС России. Текущие проблемы и необходимые решения // Электроэнергия: Передача и распределение. – 2017. – № 2(35). – С. 28–38.

5. Шпак Д.А., Баринов В.М., Попов О.Ю. Качество электрической энергии на примере города-миллионника // Электроэнергия: Передача и распределение. – 2021. – № 3. – С. 60–64.

УДК 621.31

## **ВЛИЯНИЕ ВЫСШИХ ГАРМОНИК НАПРЯЖЕНИЯ И ТОКА НА ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ И ОЦЕНКА УЩЕРБА ОТ НАРУШЕНИЙ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ**

Алина Ренатовна Денисова<sup>1</sup>, Ольга Дмитриевна Семенова<sup>2</sup>,  
Азалия Ренатовна Мухаметова<sup>3</sup>, Ислам Ренатович Мухарлямов<sup>4</sup>  
<sup>1,2,3,4</sup>ФГБОУ ВО «КГЭУ», г. Казань

<sup>1</sup>denisova\_ar@mail.ru, <sup>2</sup>ollivka@bk.ru, <sup>3</sup>mukhametova.15@mail.ru

**Аннотация.** Рассмотрены основные аспекты, связанные с влиянием высших гармоник на работу электрооборудования. Актуальность данного исследования определена тем, что в настоящее время в электрических системах и сетях очень сложно поддерживать должный уровень качества электроэнергии. В работе показано, что при выборе способа снижения высших гармоник необходимо проанализировать источник и природу их возникновения, произвести оценку и расчет возможного ущерба от нарушения ПКЭ для определения экономической эффективности внедряемых в сеть устройств.

**Ключевые слова:** влияние высших гармоник, электрооборудование, показатели качества электроэнергии, оценка ущерба.

# INFLUENCE OF HIGHER VOLTAGE AND CURRENT HARMONICS ON ELECTRICAL EQUIPMENT AND ASSESSMENT OF DAMAGE CAUSED BY VIOLATIONS OF ELECTRIC POWER QUALITY

Alina R. Denisova<sup>1</sup>, Olga D. Semenova<sup>2</sup>,

Azalia R. Mukhametova<sup>3</sup>, Islam R. Mukharlyamov<sup>4</sup>

<sup>1,2,3,4</sup> KSPEU, Kazan, Republic of Tatarstan

<sup>1</sup>denisova\_ar@mail.ru, <sup>2</sup>ollivka@bk.ru, <sup>3</sup>mukhametova.15@mail.ru

**Abstract.** The main aspects related to the influence of higher harmonics on the work of electrical equipment are considered. The relevance of this study is determined by the fact that at present in electrical systems and networks it is very difficult to maintain a proper level of electricity quality. The paper shows that when choosing a method of reducing high harmonics, it is necessary to analyze the source and nature of their occurrence, assess and calculate the possible damage from the violation of the SCE to determine the economic efficiency of the devices introduced into the network.

**Keywords:** influence of high harmonics, electrical equipment, indicators of electricity quality, damage assessment.

В последнее время отмечается увеличение нелинейных нагрузок в сетях электроснабжения и, как следствие, ухудшение качества электроэнергии, что, соответственно, приводит к негативному влиянию на работу других потребителей, подключенных к этой же сети. Качество электроэнергии существенно влияет на надежность электроснабжения. Поэтому существует необходимость соблюдения стандартов по качеству электроэнергии таких как IEEE 1159-1995, IEEE 519-1992, ГОСТ 32144-2013.

С каждым годом растет количество используемых полупроводниковых элементов в системах электроснабжения, являющихся источником высших гармоник тока и напряжения, что становится большой проблемой для поддержания требуемого уровня КЭ. К нелинейной нагрузке можно отнести источники бесперебойного питания, светодиодное освещение, пускорегулирующую аппаратуру газоразрядных ламп, большинство промышленных термических установок, сварочное оборудование, а также преобразователи частоты (ПЧ), с помощью которых производят регулирование режима работы электрооборудования. Они содержат в своем составе неуправляемый (диодный) выпрямитель, сглаживающий фильтр и инвертор напряжения с широтно-импульсной модуляцией. Так как выпрямители выполняют по трехфазной мостовой

схеме, то входной ток ПЧ представляет собой сумму нечетных гармоник, за исключением кратных трем. При этом наиболее интенсивными являются гармоники с номерами 5 и 7 [1, 2]. При использовании 12-пульсных схем выпрямления, наибольшие параметры принимают 11, 13, 23, 25-я гармоники.

Высшие гармоники напряжения и тока оказывают негативные воздействия на работу электрооборудования. Как отмечалось в работах [1-5], такие воздействия выражаются появлением дополнительных потерь в этих сетях, а также возможным выходом из строя элементов сети. При наличии высокочастотных гармонических стравляющих зачастую появляются сбои в работе систем релейной защиты, автоматики, телемеханики и связи [6, 7]. Высокие уровни гармоник могут переноситься на соседние устройства в сети, что может вызывать проблемы с их работой, особенно если они не защищены от гармонических искажений.

Для большинства помехочувствительных элементов зависимость порога отказов  $P_{от}$  от глубины посадки напряжения  $\delta V$  и ее длительности  $\tau$  с высокой степенью точности аппроксимируется выражением вида:

$$P_{от} = \delta V^n \sqrt{\tau}.$$

При выборе способа снижения высших гармоник необходимо, проанализировать источник и природу их возникновения, которые зависят от факторов, обусловленных работой электрооборудования. Планируется разработка программного комплекса, который позволит определить оптимальный способ подавления высших гармоник в сети. Для этого необходимо производить оценку амплитудно-частотной характеристики сопротивления в различных конфигурациях сети при проектировании ФКУ, производить подбор оптимального способа подавления высших гармоник, а так же оценку потерь мощности и расчет возможного ущерба от нарушения ПКЭ для определения экономической эффективности внедряемых в сеть устройств.

При оценке экономической целесообразности изменения схем с использованием ФКУ необходимо провести оценку потерь, обусловленных высшими гармониками. Высокие уровни гармоник могут вызывать дополнительные потери энергии в сети. Это может привести к увеличению энергетических затрат и понижению эффективности системы.

Потери мощности, обусловленные колебаниями напряжения, можно оценить из выражения:

$$\Delta P_{к,п} \approx 2\Delta P_{\Sigma} m,$$

где  $\Delta P_{\Sigma}$  – суммарные активные потери в сети при отсутствии колебаний;  $m = (U - U_{min})/2$  – индекс модуляции;  $U$  и  $U_{min}$  – напряжение в сети при отсутствии колебания и минимальное значение напряжения при модуляции.

Значения потерь мощности  $\Delta P_{к,п}$ , вызываемых колебаниями напряжения, пропорциональны относительному значению дисперсии колебаний тока  $D_I^*$  (по отношению к номинальному значению):

$$\frac{\Delta P_{к,п}}{\Delta P_{\Sigma}} \approx D_I^*$$

Потери энергии  $\Delta A_{к,н}$ , определяемые колебаниями:

$$\Delta A_{к,н}^{(\Sigma)} = \Delta P_{\Sigma} \sum_{j=1}^n D_{I_k}^* t_j$$

где  $D_{I_k}^*$  и  $t_j$  – дисперсия колебаний тока на каком-либо временном интервале продолжительностью  $t_j$ .

Для приближенной оценки электромагнитной составляющей ущерба, обусловленного отклонениями напряжения, исходят из предположения, что отклонения в сторону отрицательных значений приводит к увеличению тока потребителей  $\Delta I$  и дополнительным потерям активной мощности:

$$\Delta P_{доп} = 6I\Delta I r,$$

где  $r$  – эквивалентное активное сопротивление системы электроснабжения потребителей.

Относительное увеличение потерь в сравнении с потерями  $\Delta P_H$  при  $U = U_{ном}$ :

$$\frac{\Delta P_{доп}}{\Delta P_H} = 2 \frac{\Delta I}{I}.$$

Экономическая оценка установки определенного ФКУ включает в себя определение ущерба от нарушений ПКЭ. Для расчета ущерба от нарушений КЭ у потребителя необходимо учитывать конкретные факторы,

связанные с деятельностью потребителя, стоимость оборудования, стоимость производства или услуг, а также возможные потери данных и времени.

Значения экономического ущерба в обобщенном случае при отсутствии колебаний напряжения выражаются непрерывными и дифференцируемыми функциями соответствующих ПКЭ по напряжению. При отсутствии взаимной связи между отдельными ПКЭ ущерб, обусловленный каждым из них, может быть представлен степенным полиномом относительно соответствующего показателя:

$$y = \sum_{s=1}^m \left\{ \sum_{k=1}^3 [a_{s_k}^{(\text{э})} + a_{s_k}^{(\text{т})}] V_*^k + \sum_{p=1}^2 [b_{s_p}^{(\text{э})} + b_{s_p}^{(\text{т})}] \varepsilon_{2*}^p + \sum_{l=1}^2 \sum_{v=1}^n [c_{s_v}^{(\text{э})} l + c_{s_v}^{(\text{т})} l] U_{v*}^2 \right\},$$

где  $a_{s_k}^{(\text{э,т})}$ ,  $b_{s_p}^{(\text{э,т})}$ ,  $c_{s_v}^{(\text{э,т})} l$  – коэффициенты, определяемые электромагнитными (э) и технологическими (т) параметрами электрооборудования  $s$ -го вида или участка технологического потока или производства;  $V_*$ ,  $\varepsilon_{2*}$ ,  $U_{v*}$  – значения отклонения напряжения, коэффициента обратной последовательности напряжения и  $v$ -й гармонической составляющей в относительных единицах.

Переход на повсеместную автоматизацию различных технологических и бытовых процессов влечет за собой увеличение в них полупроводниковых нелинейных элементов. При выборе способа снижения влияния высших гармоник необходимо проанализировать источник и природу их возникновения и определить оптимальный способ подавления высших гармоник в сети. Для этого необходимо производить оценку потерь мощности и расчет возможного ущерба от нарушения ПКЭ для определения экономической эффективности внедряемых в сеть устройств.

### Источники

1. Тукшаитов, Р. Х. Об одном эффективном способе снижения уровня эмиссии светодиодными лампами в электросеть высших гармоник промышленной частоты / Р.Х. Тукшаитов, Р.К. Зарипов // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2023. – № 1(76). – С. 70-74.

2. Артюхов И.И. Качество электроэнергии в системах электроснабжения котельных и центральных тепловых пунктов при оснащении насосов частотно-регулируемым электроприводом / И.И. Артюхов, С.В. Молот // Градостроительство и архитектура. – 2017. – Т. 7, № 1(26). – С. 138-144.

3. Моделирование влияния величины нелинейной нагрузки на качество электроэнергии промышленных электротехнических систем / Н.Н. Портнягин, М.С. Ершов, П.Ю. Барбасов, М.Ю. Чернев // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2017. – Т. 60, № 1. – С. 61-66.

4. Костин В.Н. Влияние высших гармоник на качество напряжения и на работу конденсаторных батарей в системах электроснабжения с нелинейной нагрузкой / В.Н. Костин, А.В. Кривенко, В.А. Сериков // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2020. – № 5. – С. 431-441.

5. Фетисов, Л. В. Способы борьбы с высшими гармониками и фазовыми сдвигами на промышленных предприятиях / Л. В. Фетисов, Д. Г. Маврин, А. В. Купоросов // Проблемы и перспективы развития электроэнергетики и электротехники: Материалы III Всероссийской научно-практической конференции, Казань, 17–18 марта 2021 года. – Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2021. – С. 109-114.

6. Новокрещенов В.В. Обзор современных устройств релейной защиты и автоматики и измерительных преобразователей, используемых при модернизации электротехнических комплексов и систем / В. В. Новокрещенов, В. Р. Иванова // Тинчуринские чтения: Материалы XIV Международной молодежной научной конференции. В трех томах, Казань, 23–26 апреля 2019 года. Том 1 Ч.2. – Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2019. – С. 81-85.

7. Тукшаитов Р.Х., Семенова О.Д. О характере зависимости коэффициентов мощности и нелинейных искажений тока от уровня потребляемой мощности трансформаторами // Интеграция науки и образования в вузах нефтегазового профиля – 2022. Передовые технологии и современные тенденции: материалы Международной научно-методической конференции / редкол.: Н.Г. Евдокимова и др. – Уфа: УНПЦ «Издательство УГНТУ», 2022. – С. 361-364.