

Министерство образования и науки Российской Федерации

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

**16+
ISSN 2071-6168**

**ИЗВЕСТИЯ
ТУЛЬСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
УНИВЕРСИТЕТА**

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Выпуск 11

Часть 2

**Тула
Издательство ТулГУ
2016**

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

УДК 621.3

ОЦЕНКА РАБОТОСПОСОБНОСТИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ И СИСТЕМ ПРИ ПЕРЕДАЧЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В РЕЖИМАХ НЕСИНУСОИДАЛЬНОСТИ

С.В. Гужов

Рассмотрен способ оценки дополнительных потерь электрической энергии с учётом режимов несинусоидальности в сетях жилищного хозяйства. Получены соотношения, позволяющие оценить величину потерь электрической энергии от несинусоидальности тока. Получена экономическая оценка ущерба от несинусоидальности тока в питающем кабеле и трансформаторе.

Ключевые слова: режим несинусоидальности, потери электрической энергии, частотный резонанс

Вопросам влияния высших гармонических составляющих тока и напряжения на основные элементы электротехнических комплексов и систем электроснабжения посвящено значительное число работ [1 - 7]. Последствия повышенного уровня несинусоидальности следующие: снижение эффективности процессов генерации и передачи электроэнергии, ускоренный выход из строя предохранителей и батарей конденсаторов, перегрев силовых трансформаторов, дополнительные вибрации на валу электрических двигателей. В системах электроснабжения современных крупных и крупнейших городов в последние 15 лет наблюдается устойчивый рост числа и установленной мощности электропотребителей, генерирующих в сеть гармоники тока и напряжения. При рассмотрении таких неотъемлемых составляющих электротехнических комплексов городов, как сектор жилищного хозяйства, представляется важным оценка дополнительных потерь электрической энергии с учётом режимов несинусоидальности.

Несмотря на трудности в получении достоверной информации по вопросу негативного влияния несинусоидальности напряжения на работу современных сетей с микропроцессорными нагрузками, известен случай,

когда при суммарном коэффициенте гармонических составляющих кривой напряжения $K_U=5,5\%$, регулярно отключались компьютеризированные станки термической обработки на заводе по производству труб [8]. Таким образом, если при $K_U = 4 \%$, может и не быть существенных проблем для сетей напряжением 35 кВ, то при 6%-м уровне K_U может быть ложное срабатывание микропроцессорной защиты нагрузок.

Под работоспособностью функционирования в статье понимается способность электротехнических комплексов и систем выполнять преобразование, поставку, потребление электрической энергии с заданным качеством при минимальных потерях. Под данное определение подпадает и задача функционирования электротехнической системы в режимах несинусоидальности тока и напряжения с условием потребления электрической энергии в паспортных условиях.

Наиболее чувствительны по отношению к высшим гармоническим составляющим напряжения конденсаторные установки и силовые трансформаторы.

Наличие конденсаторов, используемых для компенсации реактивной мощности, может привести к местным резонансам, которые, в свою очередь, могут вызвать чрезмерное увеличение тока в конденсаторах и их выход из строя. Дополнительные активные потери, приводящие к нагреву [9]:

$$\Delta P_{\Sigma \text{ ДИЭЛ}} = \omega \sum_{k=2}^n U_{(k)}^2 * n * C * \operatorname{tg} \delta_k, \quad (1)$$

где ω – номинальная угловая частота; $U_{(k)}$ – напряжение k -й гармоники; C – ёмкость батареи; $\operatorname{tg} \delta_k$ – коэффициент диэлектрических потерь на k -й гармонике.

В трансформаторах гармоники напряжения вызывают увеличение потерь электроэнергии на гистерезис, потерь, связанных с вихревыми токами в стали, и потерь в обмотках:

$$\Delta P_{TP} = \Delta P_{XX} \sum_{k=2}^n U_{K3}^2 + 0.607 \frac{\Delta P_{K3}}{U_{K3}} \sum_{k=2}^n \frac{1+0.5k^2}{k\sqrt{k}} U_k^2, \quad (2)$$

где ΔP_{XX} , ΔP_{K3} , U_{K3} – расчётные данные трансформатора.

Например, экспериментально измеренная кривая тока намагничивания силового трансформатора 10/0,4 кВ мощностью 25 кВ·А (рис. 1) характеризуется высоким уровнем искажений ($K_I = 76,1\%$), однако действующее значение тока составляет только 1,54А [8], что крайне мало по сравнению с номинальным значением рабочего тока.

Увеличение потерь в обмотках наиболее важно в случае преобразовательного трансформатора, т.к. наличие фильтра, присоединяемого обычно к стороне переменного тока, не снижает гармоник в трансформаторе.

Кроме того, при работе с повышенным гармоническим составом тока наблюдаются локальные перегревы бака трансформатора, сокращается срок службы изоляции [10].

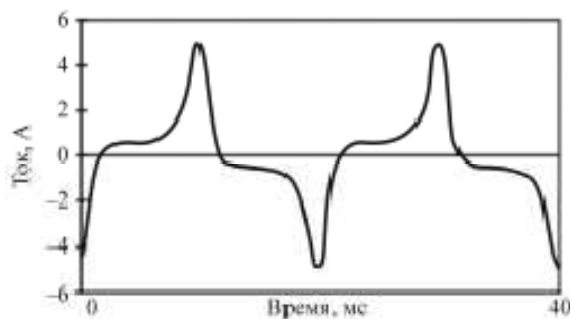


Рис. 1. Кривая тока намагничивания трансформатора 10/0,4 кВ мощностью 25 кВ·А, $K_I = 76,1\%$

Протекание гармонического состава с повышенным уровнем через силовой трансформатор даже при небольшом уровне их загрузки приводит к перегреву. Ситуация часто наблюдается при питании от трансформатора мощных нелинейных нагрузок. Известны примеры 20%-го снижения передаваемой через трансформатор мощности [11]. Различают два механизма возникновения перегрева:

1. Потери в проводнике пропорциональны квадрату действующего значения тока I_D увеличивающегося с ростом уровня искажений согласно выражению

$$I_D = \sqrt{1 + K_I^2}, \quad (3)$$

где K_I – суммарный коэффициент высших гармонических составляющих кривой тока.

$$K_I = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^n I_{k,\partial}^2}}{I_{1,\partial}}, \quad (4)$$

где $I_{k,\partial}$ и $I_{1,\partial}$ – действующие значения k -й и основной гармоник; n – количество учитываемых гармоник.

2. В результате поверхностного эффекта и эффекта близости, в трансформаторных обмотках рост частоты токов высших гармоник на 1 А вызывает больше потерь чем 1 А тока основной частоты [12].

При рассмотрении силовых трансформаторов резистивный поверхностный эффект обычно моделируется посредством разделения сопротивления на постоянную составляющую и составляющую, зависящую от частоты. Частотная составляющая сопротивления принимается прямо пропорциональной квадрату частоты [13]:

$$R_k = R_{dc} \cdot (1 + k^2 \cdot P_{ec-r}), \quad (5)$$

где R_k – активное сопротивление обмотки на частоте k -й гармоники; R_{dc} – активное сопротивление обмотки на постоянном токе; P_{ec-r} – коэффициент, учитывающий потери в обмотках от вихревых токов. P_{ec-r} варьируется от 0.01 для низковольтных трансформаторов собственных нужд с относительно небольшими проводниками до 0.1 для трансформаторов подстанций с проводниками крупного сечения.

Важная составляющая воздействия гармоник на мощные трансформаторы состоит в циркуляции утроенного тока нулевой последовательности в обмотках, соединённых в треугольник [14]. Этот фактор часто приводит к их перегрузке и последующему межвитковому КЗ.

В линии электропередачи гармоники тока приводят к дополнительным потерям мощности [15].

$$P_{ЛЭП} = 3 \cdot \sum_{k=2}^n I_k^2 \cdot r \cdot K_{rk}, \quad (6)$$

где K_{rk} – коэффициент, учитывающий влияние поверхностного эффекта ($K_{rk} \approx 0,47 \cdot k^{0,5}$).

При появлении тока гармоники с порядковым номером $k > 1$ появляется поверхностный эффект, что приводит к дополнительным потерям тепла, нагреву изоляции электроприборов и аппаратов электрической сети и снижению их службы. В кабельных линиях гармоники напряжения увеличивают воздействие на диэлектрик пропорционально увеличению максимальной амплитуды напряжения, что ускоряет его старение. В линиях сверхвысокого напряжения гармоники напряжения по той же причине (увеличение амплитуды) могут ещё вызвать увеличение потерь электроэнергии на корону [15]. Для сетей 6...35 кВ соотношение активного и реактивного сопротивлений при промышленной частоте пренебрежимо мало, т.к.:

$$\frac{r}{x} = \frac{0.1 \div 0.3}{\sqrt{k}}. \quad (7)$$

Для основных сетей энергосистем отношение r_k/x_k оказывается ещё меньше. На частотную характеристику эквивалентного сопротивления сети существенное влияние оказывает ёмкостное сопротивление прямой последовательности кабельных сетей X_{C1} . Его значение для 1-й гармоники примерно в 2 раза отличается от соответствующего сопротивления нулевой последовательности

$$X_{C1} = \frac{2U}{\sqrt{3}I_C}, \quad (8)$$

где U – линейное напряжение сети; I_C – ёмкостный ток однофазного замыкания на землю.

Особое внимание следует уделять прогнозу уровней гармонического состава напряжений и токов при расчёте возможных случаев частотных резонансов, возникающих в случае равенства значений емкостных (X_C) и индуктивных (X_L) сопротивлений в сети и у потребителей на определенной частоте. Если резонансная частота совпадает с частотой высшей гармонической составляющей то, амплитуда соответствующей гармоники напряжения увеличивается многократно. В электрической сети различают параллельный (рис. 2) и последовательный (рис. 3) резонансы.

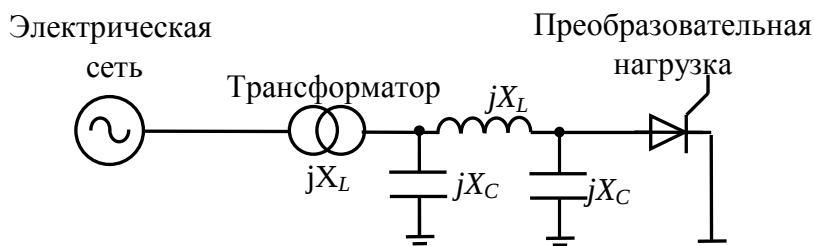


Рис. 2. Упрощённая схема замещения электрической сети при параллельном резонансе

При параллельном резонансе наибольший уровень несинусоидальности напряжения наблюдается в точке присоединения нелинейной нагрузки. Весь спектр частот гармонических составляющих тока передается ко всем электроприемникам по питающему кабелю. Резонансные токи в элементах сети вызывают значительное падение напряжения на соответствующей частоте, которое в свою очередь искажает напряжение питания. При последовательном резонансе максимальные уровни искажения фиксируются в удаленных узлах сети или на сопряженном кабеле, отходящем от шин трансформатора преобразователя.

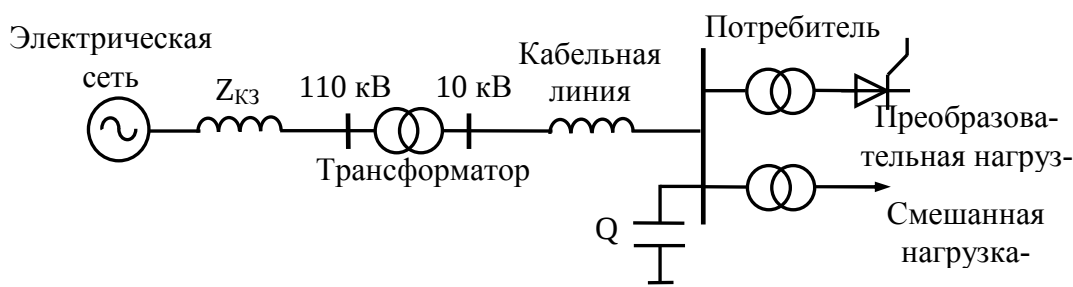


Рис. 3. Упрощённая схема замещения электрической сети при последовательном резонансе

Известно, частота параллельного резонанса $f_{рез}$ в электрической сети не зависит от значений активных сопротивлений сети или нагрузки и рассчитывается по формуле

$$f_{рез} = \frac{\omega_{рез}}{2\pi} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \cdot C}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\omega}{X_{L\text{ сист}}}} \omega X_{C\text{ сист}} =$$

$$= \frac{\omega}{2\pi} \sqrt{\frac{X_{C\text{ конд}}}{X_{L\text{ сист}}}} = f_{50\text{Гц}} \sqrt{\frac{S_{K3}}{S_{конд}}}, \quad (9)$$

где $\omega_{рез}$ – циклическая резонансная частота колебательного контура; L и C – соответственно, суммарные индуктивность и емкость электрической сети; S_{K3} – мощность короткого замыкания сети; $S_{конд}$ – мощность конденсаторной установки.

Поскольку в действующих электрических сетях активное и реактивное сопротивления не статичны, при анализе возможности возникновения частотных резонансов используют частотную характеристику входного сопротивления сети $Z_{вх}(f)$. Современные электрические сети имеют сложную разветвленную структуру и могут иметь в составе множество различных по мощности и типу установок, что создает большое количество параллельных и последовательных контуров для возникновения резонансных токов. Кроме этого, недостатками, ограничивающими применение (9), являются:

- 1) не учитывается информация о протяженности пика резонансной кривой;
- 2) требуется трудоёмкий дополнительный расчет уровней несинусоидальности на всем протяжении кабеля, а также сопряженных линий, подключенных к общим шинам трансформаторной подстанции для каждой из модернизаций сети на всех её возможных режимах;
- 3) становится весьма сложным расчёт величины сопротивления элементов питающей сети и элементов сети потребителя, а значит возможности возникновения локальных резонансов.

Способы подавления гармонической эмиссии делятся на две группы: превентивные и корректирующие. Превентивные методы основываются на минимизации уровней гармонической эмиссии в электрической сети при проектировании и монтаже электрооборудования. Корректирующие методы в основном подразумевают применение фильтрующих устройств, подразделяющихся на пассивные и активные. Пассивные фильтры широко используются для снижения уровней 5-й и 7-й гармонических составляющих тока. Большинство из них состоит из последовательно соединенных индуктивных и емкостных компонентов, обеспечивающих возникновение заземляющего контура с низким сопротивлением на частоте резонанса. Учитывая наличие значительной емкостной составляющей, в низкочастотной области около 50 Гц пассивные фильтры обеспечивают как компенсацию реактивной мощности, так и контроль уровня несинусоидальности напряжения.

В ряде случаев активные фильтры сами являются источниками гармоник тока. Например, если превышена 7-я гармоника, следует устанавливать фильтры 5-й и 7-й гармоник, поскольку только фильтр 7-й гармоники может усиливать уровень 5-й гармоники напряжения. Так следует избегать установки фильтров 3-й гармонической составляющей, поскольку подключенные к сети электродвигатели и трансформаторы — традиционные источники 3-й гармоники, значительно снижают подавляющие свойства данных фильтров [16].

К проблемам, связанным с пассивной фильтрацией, относят:

- снижение ёмкости конденсаторов из-за процессов старения с одновременным увеличением частоты резонанса фильтра;
- малая гибкость фильтра для случая модернизации потребителя либо появления неучтенных источников несинусоидальности сети.

Активные фильтры - это силовые преобразователи, компенсирующие высшие гармонические составляющие тока в режиме реального времени, что решает недостаток пассивных фильтров. Подобные фильтры имеют достаточно высокую сложность и стоимость, поэтому применение должно быть обосновано также с экономической точки зрения.

Определим потери электрической энергии в кабельной линии и трансформаторе, питающего один жилой девятиэтажный трёхподъездный дом на 108 квартир (рис. 4). Ввод α используется в качестве основного, ввод β находится в резерве. На рис. 5 приведены кривые напряжения и тока в одной фазе для 36 квартир жилого дома, присоединённых к ВРУ, в табл. 1 приведён амплитудный гармонический спектр тока. Характеристики используемого трансформатора приведены в табл. 2, кабеля приняты для сечения 120 кв.мм. класс 1 согласно [17], длина кабеля от ВРУ до КТП — 500 м.

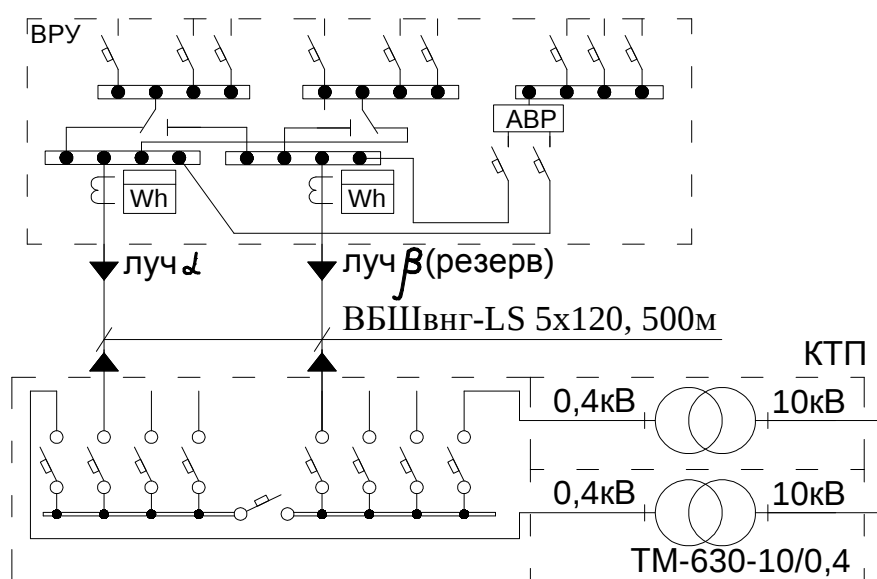


Рис. 4. Схема питания нагрузки от двухтрансформаторной КТП

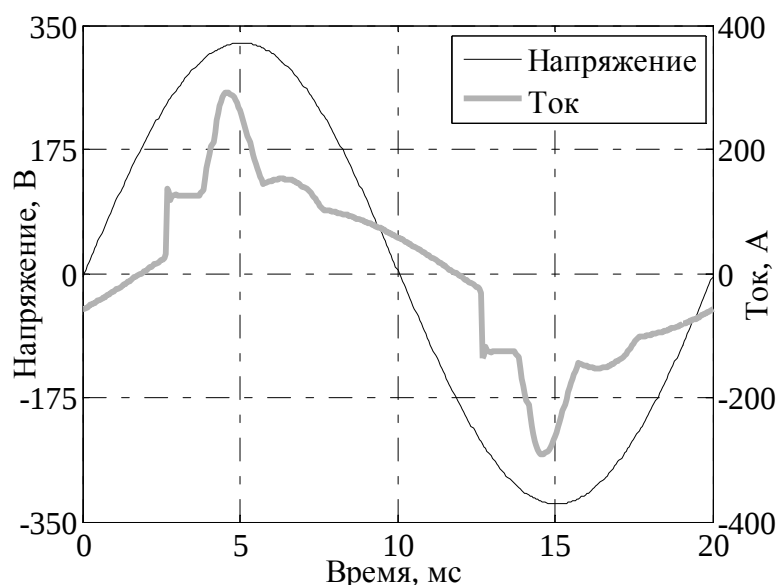


Рис. 5. Кривые напряжения и тока в одной фазе, полученного для 36 квартир жилого дома с работающей системой освещения, телевизорами и ПК в каждой квартире

Таблица 1

Амплитудный гармонический спектр тока в питающем кабеле

I_1, A	$I_3/I_1, \%$	$I_5/I_1, \%$	$I_7/I_1, \%$	$I_9/I_1, \%$	$K_I, \%$
126	29.4	12.7	7.2	9.7	36.7

Таблица 2

Технические данные масляных двухобмоточных трансформаторов общего назначения класса 6-10 кВ [20]

Тип трансформатора	Схема соедин. обм.	Потери, Вт		$U_{кз}, \%$	$I_{хх}, \%$	Сопротивление, мОм			
		хх	кз			R_T	X_T	Z_T	$Z_T^{(1)}$
ТМ-630/10/0,4	Y-Y-0	1310	7600	5,5	2	3,1	13,6	14	128

Поскольку в ГОСТ 22483-2012 [16] не нормируются электрические сопротивления однопроволочных и многопроволочных жил для высших гармоник, при расчёте был использован алгоритм вычисления сопротивлений [14]. В результате расчёта, выполненного по алгоритму [18] и формулам (1) - (5), выявлены потери в трансформаторе, равными 8,3 Вт при $\cos\varphi=0.8$. Потери в кабеле (6) - (8) составляют около 5,8 Вт на 500 м. Дополнительные потери электрической энергии в кабельной линии и трансформаторе от одного жилого дома за год составят 123,51 кВт*ч. В случае

подключения к данной КТП восьми аналогичных домов (что характерно для некоторых дворовых схем), суммарные потери составят около 1000 кВт*ч в год.

Приведённый в работе алгоритм позволяет оценочно произвести расчёт дополнительных потерь электрической энергии, возникающих в сетях электротехнических комплексов при работе в режимах несинусоидальности тока и напряжения.

Список литературы

1. Лррнлага Дж. Брэдли Д. Болжер П. Гармоники в электрических системах / пер. с англ. М. : Энергоатомиздат. 1990. 320 с.
2. Семичевский П.И. Методика расчета дополнительных потерь активных мощности и электроэнергии в элементах систем электроснабжения промышленных предприятий, обусловленные высшими гармониками: дис. ... канд. техн. наук. М., 1978. 206 с.
3. Гидалевнч Е.Д. Упрощенный расчет мощности потерь в косинусных конденсаторах при косинусоидальном напряжении // Промышленная энергетика, 1990. № 7. С. 24-30.
4. Григорьев О. [и др.]. Высшие гармоники в сетях электроснабжения 0,4 кВ // Новости электротехники, 2002. № 6(18). [Электронный ресурс]. URL: <http://www.tesla.ru/publications/files/025.pdf> (дата обращения: 14.11.2016).
5. Данилович Я.Б., Кашарский Э.Г. Добавочные потери в электрических машинах. М.: Госэнергоиздат, 1963. 164 с.
6. Кучинский Г.С., Назаров Н.И., Назарова Г.Т., Переселенцев И.Ф. Силовые электрические конденсаторы. М.: Энергия, 1975. 248 с.
7. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. М.: Энергоатомиздат, 2000. 192 с.
8. Работоспособность и качество функционирования электротехнических комплексов и систем в режимах несинусоидальности напряжения: учебное пособие / Янченко С.А., Гужов С.В. М.: Изд-во МЭИ, 2016. 44 с.
9. Конюхова Е.А. Электроснабжение объектов: учебное пособие по специальности 140409 «Электроснабжение (по отраслям)» / Е.А. Конюхова. 9-е изд., испр. М.: Академия, 2013. 320 с.
10. Атабеков Г.И. Теория нелинейных электрических цепей. М.: Советское радио, 1962. 211 с.
11. Справочник электрослужбы. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.elektrikii.ru/publ/6-1-0-114> (дата обращения: 14.11.2016).
12. Key T. Costs and benefits of harmonic current reduction for switch-mode power supplies in a commercial office building / T. Key, J.-S. Lai // IEEE Transactions on industry applications, September, 1996.

13. Grady M. Understanding power system harmonics. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.ece.utexas.edu/~grady> (дата обращения: 14.11.2016).

14. Разработка методики расчета установившихся режимов электрических сетей наружного освещения с учетом нелинейных характеристик светодиодных светильников : диссертация ... кандидата технических наук : 05.09.03 / Гужов Сергей Вадимович; [Место защиты: Моск. энергет. ин-т]. М., 2009. 147 с.

15. Жежеленко И.В. Показатели качества электроэнергии на промышленных предприятиях. М.: Энергия, 1977. 128 с.

16. Демирчян К.С, Нейман Л.Р, Коровкин Н.В, Чечурин В.Л. Теоретические основы электротехники: учебник для вузов. Том 2. СПб.: Питер, 2003. 576 с.

17. ГОСТ 22483-2012 (IEC 60228:2004) «Жилы токопроводящие для кабелей, проводов и шнуров», Москва, Стандартинформ, 2013.

18. Разработка концептуального подхода к обеспечению электромагнитной совместимости бытовых электроприемников : диссертация ... кандидата технических наук: 05.09.03 / Янченко Сергей Александрович. М., 2013. 98 с.

Гужов Сергей Вадимович, канд. техн. наук, зам. начальника отдела, GuzhovSV@yandex.ru, Россия, Москва, Национальный исследовательский университет "МЭИ"

**PERFORMANCE EVALUATION OF ELECTRO TECHNICAL COMPLEXES AND SYSTEMS
FOR TRANSMISSION OF ELECTRIC ENERGY IN MODES-SINUSOIDAL**

S.V. Guzhov

The method of assessment of additional losses of electric energy, considering non-sinusoidal regimes in networks of housing. Relations are derived allowing to estimate the size of losses of electric energy from nesenai-range current. The economic assessment of damage from non-sinusoidal current in the supply cable and the transformer.

Key words: mode-sinusoidal losses of electric energy, frequency, resonance

Guzhov Sergey Vadimovich, candidate of technical sciences, deputy head of the department, GuzhovSV@yandex.ru, Russia, Moscow, National Research University "Moscow Power Engineering Institute"