

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ФАКТИЧЕСКОГО НАГРЕВА ТОКОВЕДУЩИХ ЧАСТЕЙ В РАСЧЕТЕ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ ОТ ВЫСШИХ ГАРМОНИК

Долгих Надежда Николаевна

аспирант кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Омского государственного технического университета, РФ, г. Омск

Горовой Сергей Анатольевич

студент Омского государственного технического университета, РФ, г. Омск

Скороходов Вячеслав Игорьевич

студент Омского государственного технического университета, РФ, г. Омск

EVALUATION OF INFLUENCE OF ACTUAL HEATING OF CURRENT PARTS IN CALCULATION OF ADDITIONAL POWER LOSSES FROM HIGHER HARMONICS

Nadezda Dolgikh

post-graduate student of the department "Electricity supply of industrial enterprises" Omsk State Technical University, Russia, Omsk.

Sergey Gorovoy

student of the department "Electricity supply of industrial enterprises" Omsk State Technical University, Russia, Omsk

Vyacheslav Skorohodov

student of the department "Electricity supply of industrial enterprises" Omsk State Technical University, Russia, Omsk

Аннотация. В статье приведен численный эксперимент показывающий влияние фактического нагрева токоведущих частей, вызванный высшими гармониками, на относительную погрешность расчета потерь.

Abstract. The article presents a numerical experiment showing the effect of the actual heating of current-carrying parts, caused by higher harmonics, on the relative error of calculating losses.

Ключевые слова: пакетное вейвлет преобразование; высшие гармоники; потери мощности; температурная зависимость сопротивления.

Keywords: packet wavelet transformation; higher harmonics; power loss; temperature dependence of resistance.

Введение

В связи с увеличением доли электрических приёмников, имеющих нелинейную вольт-амперную характеристику, одной из актуальных задач для энергоснабжающих организаций остается обеспечение качества электроэнергии. Широкое распространение частотно-регулируемого электропривода, силовой электроники, выпрямительных устройств электроники и светодиодных источников света определяет необходимость контроля и анализа несинусоидальных режимов систем электроснабжения. Степень допустимости несинусоидальных режимов определяется уровнем высших гармоник, регламентированным действующими в России [1], Европейском Союзе [2] и США [3] нормативных документах. Высшие гармоники в токоведущих частях являются причиной возникновения:

- дополнительных потерь мощности и энергии;
- повышения фактической температуры токоведущих частей выше допустимого уровня;
- ускорению процесса старения (выхода из строя) изоляции и т.д.

Как показали исследования [4], в рабочем диапазоне температур токоведущих частей активное сопротивление может изменяться в диапазоне до 40%. Следовательно, для корректного расчета дополнительных потерь следует учитывать фактическую температуру токоведущих частей, в том числе дополнительный нагрев, вызываемый высшими гармониками [4]. Анализ влияния высших гармоник на изменение температуры и срок службы кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена посвящена работа [5]. Авторы провели численные эксперименты в программе MATLAB, подтвердившие сокращение срока службы как для алюминиевых, так и для медных жил кабелей. [5]. Негативное влияние высших гармоник на срок службы изоляции силовых кабелей при несинусоидальных режимах системы электроснабжения исследовано в статье [6]. С помощью программы SABER была исследована длительность срока службы изоляции кабеля при синусоидальных и несинусоидальных режимах. Расчеты показали, что наличие высших гармоник может сократить срок службы изоляции в два раза [6]. В работе [7] авторы исследуют дополнительный нагрев токоведущих частей при несимметричной нагрузке, имеющей нелинейную вольт-амперную характеристику. В работе [10] авторы рассмотрели алгоритм учета температурной зависимости токоведущих частей в расчетах потерь мощности и энергии при наличии высших гармоник. Расчет показал, что при установке ФКУ погрешность снижения потерь мощности при неучете нагрева составляет 40 %. В работе [10] было определено, что при больших коэффициентах загрузки (более 0,3) необходимо учитывать нагрев проводников.

Численный эксперимент

Известно, что активное сопротивление металлических проводников зависит от температуры. Эту зависимость можно выразить следующей формулой:

$$R = R_0 \cdot [1 + \alpha \cdot (\theta_{окр} + \theta_n)] \quad (1)$$

где R_0 – сопротивление проводника при 0° С; α – температурный коэффициент

сопротивления; $\theta_{окр}$ – температура окружающей среды; θ_n – превышение температуры проводника над температурой окружающей среды.

Для того чтобы рассчитать несинусоидальный режим с учетом температуры, необходимо в той или иной форме задать функциональную зависимость температуры проводников от параметров режима электрической сети. Эта зависимость для разных элементов сети имеет разный вид, который определяется уравнениями теплового баланса [8].

Уравнение теплового баланса трансформатора в стационарном режиме [8]:

$$\frac{P^2 + Q^2}{U^2} R_m = A_m \Theta_m^{1,25} \quad (2)$$

Кабель, проложенный в воздухе, охлаждается путем переноса тепла от наружной поверхности к окружающему воздуху путем конвекции. Наряду с этим некоторое значение имеет и передача тепла посредством теплового излучения.

Уравнения теплового баланса кабеля в воздухе в стационарном режиме [8]:

$$\frac{P_{кл}^2 + Q_{кл}^2}{U_{кл}^2} R_k = \frac{\Theta_{ж}}{S_k + A_k \Theta_n^{-0,25}} = \frac{\Theta_n^{1,25}}{A_k} = \frac{\Theta_{ж} - \Theta_n}{S_k}, \quad (3)$$

где A_k -коэффициент теплоотдачи;

Θ_n - превышение температуры поверхности кабеля над температурой окружающей среды (перегрев поверхности кабеля), К;

S_k - тепловое сопротивление кабеля для всей длины, °С/Вт, которое определяется по формуле:

$$S_k = S_{к.уд} / l_k, \quad (4)$$

где $S_{к.уд}$ - тепловое сопротивление 1м кабеля, °С·м/Вт.

Для системы электроснабжения, представленной на рисунке 1, были проведены физические эксперименты по измерению показателей качества электроэнергии в части несинусоидальности. Были получены фактические осциллограммы напряжения на секциях шин 6 кВ (рис. 2) и спектральный состав напряжения (рис. 3). В результате эксперимента было установлено, что фактические уровни 5-й и 7-й гармоник не соответствуют требованиям ГОСТ [1] по критерию n-ной гармонической составляющей. Уровень 5-й гармоники достигает значения 9% (рис. 3), ГОСТ [1] допускает не более 4%; уровень 7-й гармоники достигает 4% при требовании ГОСТ не более 3%.

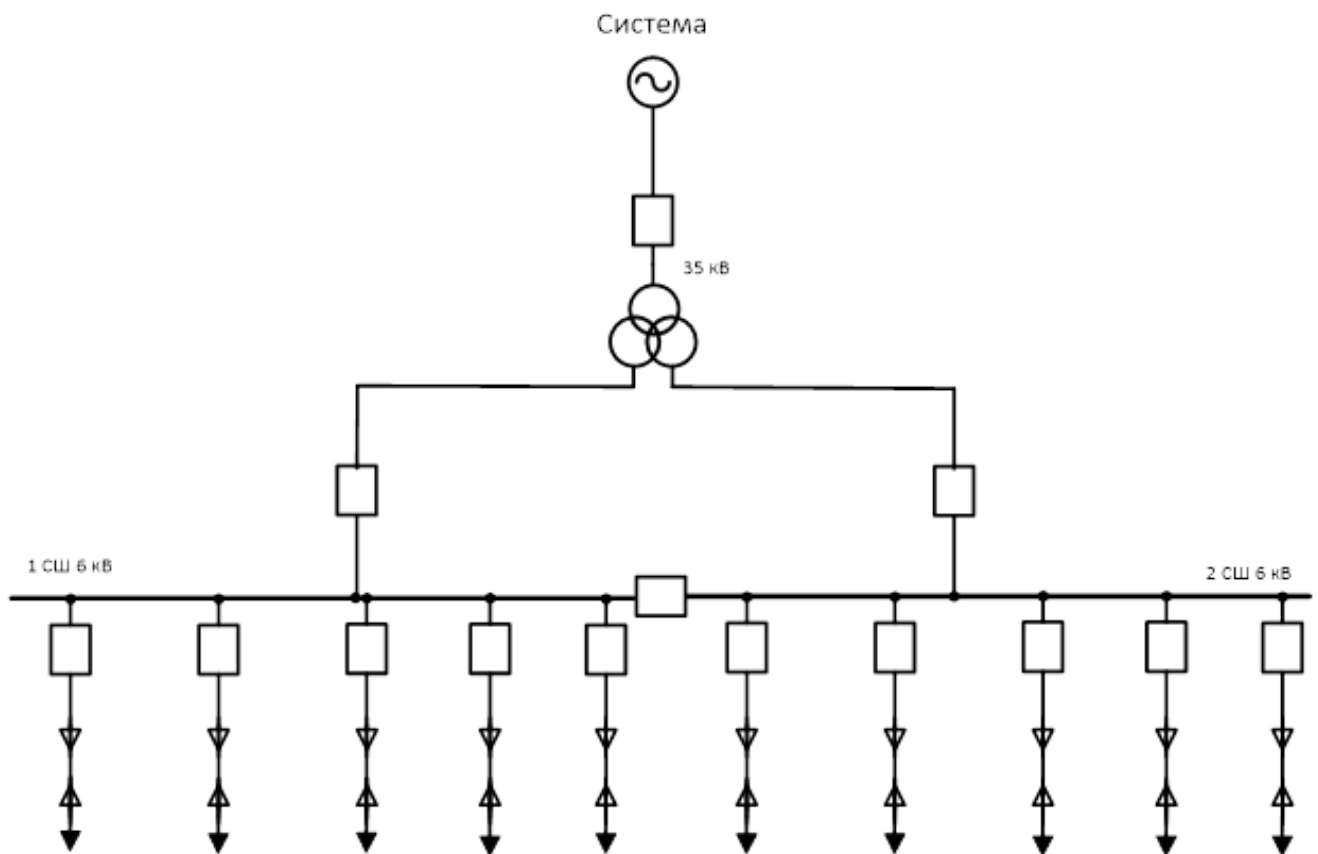


Рисунок 1. Исследуемая система электроснабжения 6 кВ

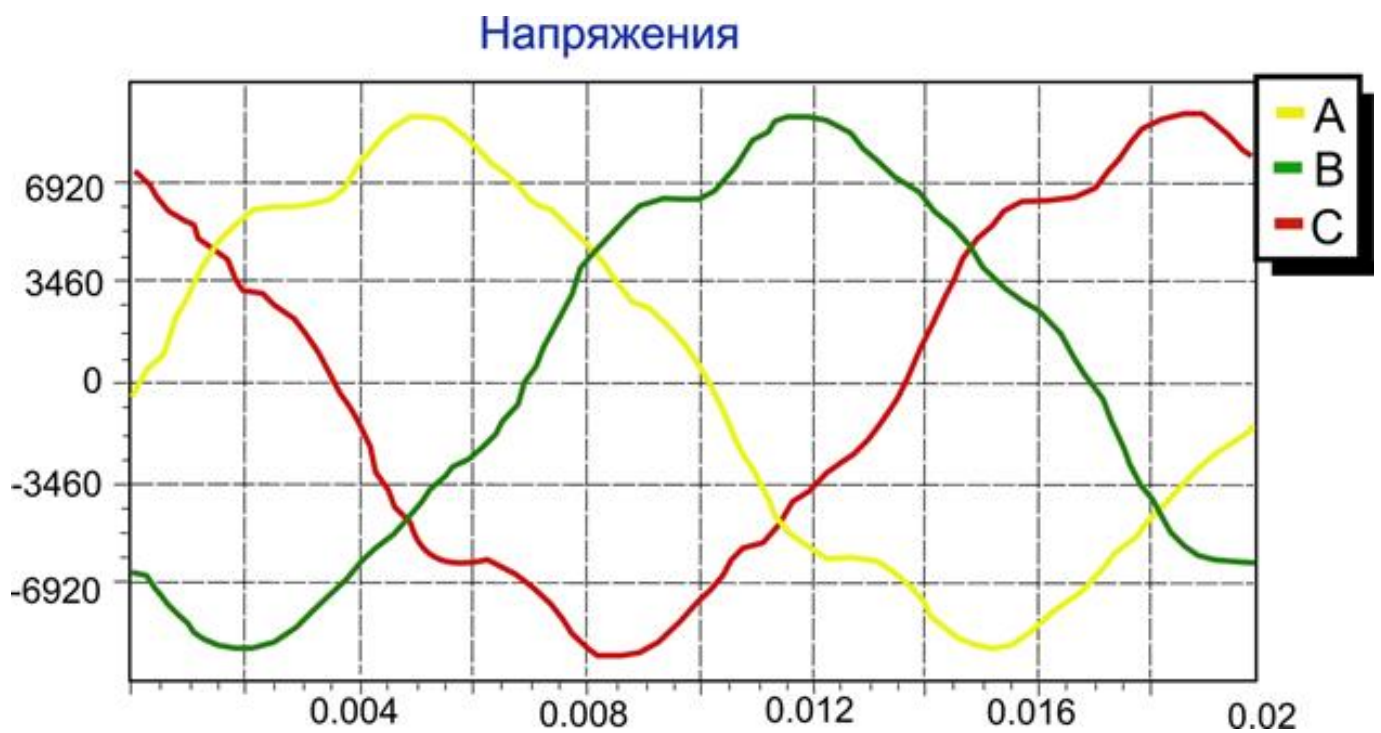


Рисунок 2. Осциллограммы напряжений в исследуемой сети 6 кВ

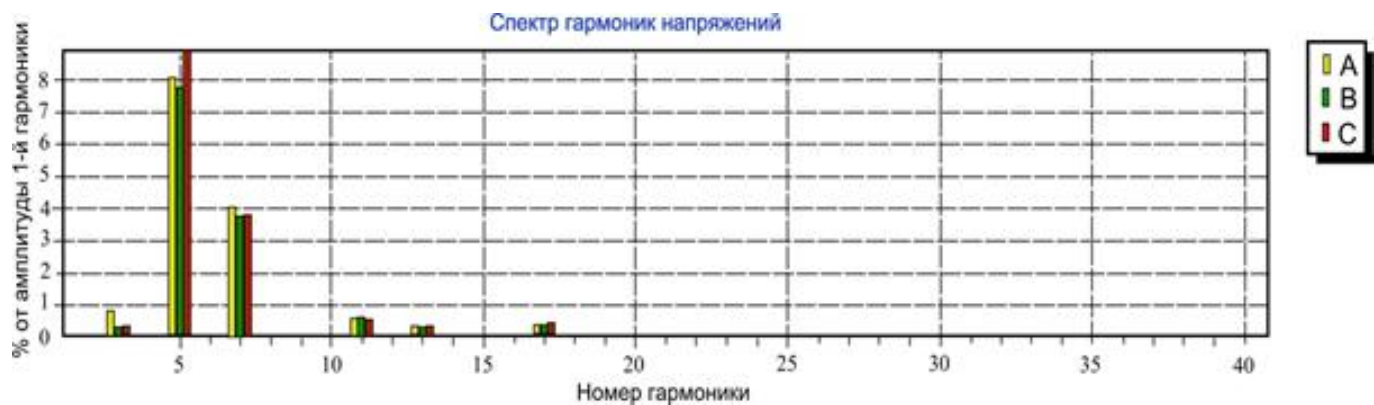


Рисунок 3. Спектральный состав напряжений в исследуемой сети 6 кВ

По фактически измеренным значениям высших гармоник (рис. 3) на основании уравнений (1-4) была произведена оценка потерь в кабеле и трансформаторе при условии изменения коэффициента загрузки в соответствии с суточным графиком нагрузки. При этом коэффициента загрузки изменялся от 40 до 80%.

Таблица 1.

Относительная погрешность расчета потерь без учета фактического нагрева

Коэффициент Загрузки , о.е.	Погрешность определения потерь мощности при неучете фактического нагрева , ΔP , %
0,4	8,4
0,5	10,8
0,6	13,7
0,7	17,3
0,8	21,6

Для оценки степени влияния коэффициента гармонических составляющих на увеличение дополнительных потерь мощности была построена зависимость (рис. 4), отражающая изменение относительных потерь при росте доли высших гармоник.

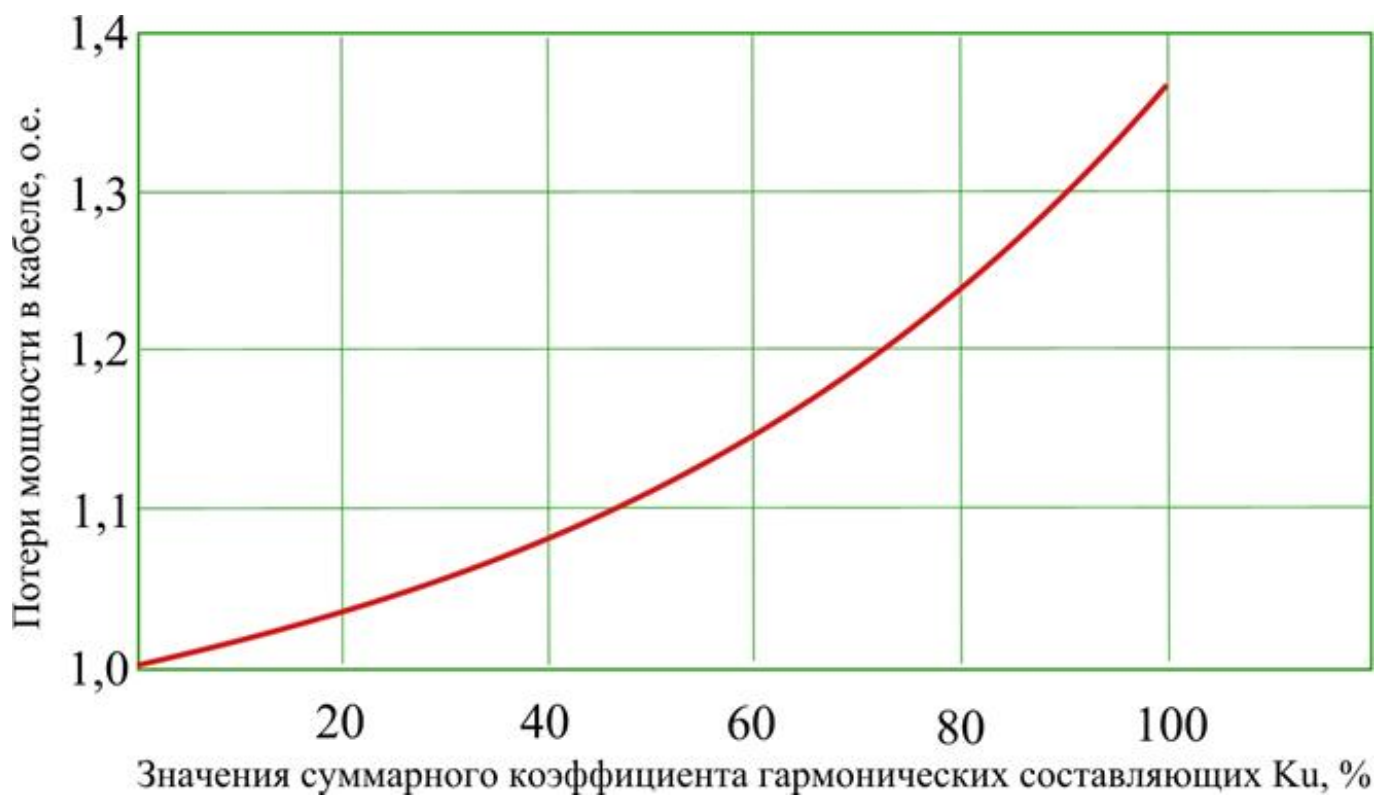


Рисунок 4. Рост относительных потерь в кабеле при увеличении коэффициента гармонических составляющих

Для анализа потерь мощности и энергии при нестационарных режимах систем электроснабжения вместо преобразования Фурье (БПФ) целесообразно использовать современный математический аппарат вейвлет преобразования. Вейвлет преобразование [9] несёт информацию не только об амплитуде и частоте, но и о длительности (времени) присутствия той или иной гармоник в сигнале.

Выводы

Учет фактического нагрева токоведущих частей от высших гармоник позволит уточнить расчет потерь мощности и энергии в токоведущих частях, что в конечном итоге окажет влияние на технико-экономическое обоснование внедрения мероприятий по фильтрации высших гармоник. Учет нагрева дает возможность уточнить расчетное снижение потерь до 40%.

Список литературы:

1. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Введ. с 01.07.2014. – Москва: Стандартинформ, 2014. – 16 с.
2. IEC 61000-4-7:2002 Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-7: Testing and measurement techniques - General guide on harmonics and interharmonics measurements and instrumentation, for power supply systems and equipment connected thereto
3. 519-2014 - IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems. DOI: 10.1109/IEEESTD.2014.6826459
4. Гапиров Р.А., Осипов Д.С Расчет потерь мощности в элементах системы электроснабжения с учетом высших гармоник и зависимости сопротивлений токоведущих частей от температуры

// Промышленная энергетика, 2015. № 1. С. 16-21.

5. K. D. Patil, W. Z. Gandhare, "Effects of harmonics in distribution systems on temperature rise and life of XLPE power cables". Power and Energy Systems (ICPS), 2011 International Conference, Chennai, India, pp. 1-6, 23 February 2012 DOI: 10.1109/ICPES.2011.6156680

6. C.R. Pacheco, J.C. De Oliveira and O.C.N. Souto, "Insulated cable thermal and life expectancy estimation under non-sinusoidal operating conditions," Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies, 2000. Proceedings. DRPT 2000. International Conference on, 4-7 April 2000, London, UK. pp. 672-677. DOI: 10.1109/DRPT.2000.855746

7. J. Desmet, D. Putman, F. D'Hulster, and R. Belmans, "Thermal analysis of the influence of nonlinear, unbalanced and asymmetrical loads on current conducting capacity of lv-cables", in IEEE Power Tech Conference, Bologna, Italy, Jun. 23-26, 2003. DOI: 10.1109/PTC.2003.1304798

8. Осипов Д.С. Учет нагрева токоведущих частей в расчетах потерь мощности и электроэнергии при несинусоидальных режимах систем электроснабжения: дис.... канд. техн. наук. Омский гос. тех. университет, Омск, 2005.

9. Файфер Л.А., Осипов Д.С., Ерёмин Е.Н., Долгих Н.Н. Применение пакетного вейвлет-преобразования для определения составляющих мощности при несинусоидальных режимах // Вестник Иркутского государственного технического университета, 2016. № 8 (115). С. 136-145.

10. Осипов Д.С., Коваленко Д.В., Горюнов В.Н., Долгих Н.Н. Расчет дополнительных потерь мощности при несинусоидальных режимах систем электроснабжения с учетом температурной зависимости сопротивления токоведущих частей // I региональная научно-техническая конференция «Ученые Омска – региону», 2016. С. 44-48.