

УДК 621.316.1

doi:10.20998/2413-4295.2018.26.18

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ВЫСШИХ ГАРМОНИК НА ПОТЕРИ МОЩНОСТИ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

А. А. ПЛАХТИЙ

инженер-электроник конструкторского бюро компании «ВО ОВЕН», по совместительству старший преподаватель кафедры электротехники, электроэнергетики и электромеханики Украинского государственного университета железнодорожного транспорта, Харьков, УКРАИНА
email: a.plakhtiy1989@gmail.com

АННОТАЦИЯ В статье представлены результаты исследований влияния высших гармоник тока на сопротивление сети, потери мощности, а также КПД системы электроснабжения. На основании уравнений Бесселя первого рода представлены зависимости активного сопротивления сети от частоты высшей гармоники при влиянии скин эффекта. Установлено, что кроме влияния скин эффекта, высшие гармоники обуславливают дополнительные потери, обусловленные увеличением среднеквадратического значения тока, представлена зависимость дополнительных потерь мощности в сети от коэффициента гармонических искажений тока. Установлено, что высшие гармоники тока сети, вызванные импульсной нагрузкой, вызывают большие потери в сети, нежели высшие гармоники от источника питания.

Ключевые слова: высшие гармоники; скин-эффект; коэффициент гармонических искажений; потери в сети от высших гармоник

ANALYSIS OF POWER LOSS CAUSED BY HIGHER HARMONICS IN ELECTRICAL SUPPLY SYSTEMS

A. PLAKHTIY

engineer-electronics of the design office of the company "VO OWEN" / part-time senior lecturer of the Department of Electrical Engineering, Electricity and Electromechanics of the Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkov, UKRAINE

ABSTRACT Increasing energy efficiency is a priority for the energy sector. To realize maximum energy efficiency, a clear understanding of the significance of the component losses and methods of their elimination is necessary. This is also necessary to determine the power losses caused by higher harmonics, as well as to determine the energy-saving effect of the power active filter. The article presents the results of studies of the influence of higher current harmonics on the network resistance, network losses, as well as the efficiency of the power supply system. On the basis of the solution of differential and algebraic equations, it is established that the existing approximating expressions that determine the dependence of the network resistance on frequency, caused by the skin effect, are not accurate. For a certain frequency range, the network resistance is below the nominal. In addition, they do not take into account the effect of the cross-sectional area. Based on the solution of the Bessel functions of the first kind, a method is developed for calculating the dependence of the active resistance of the network on the frequency, which takes into account the geometric parameters of the conductor. It is established that the skin effect makes the resistance of the network a frequency-dependent parameter. Thus, the electrical network can be represented as a filter. Additional losses of energy arise in the electric network from higher harmonics due to an increase in the rms current. The dependence of additional losses in the network on the higher harmonics as a function of the resulting coefficient of current harmonic distortion is established. It is established that the higher harmonics of the current caused by the power source and the load in different ways affect the efficiency of the network.

Keywords: higher harmonics; skin effect; total harmonic distortion; power loss by higher harmonics

Введение. Постановка проблемы

Повышение энергоэффективности является приоритетным направлением энергетики и систем электроснабжения. Для реализации максимальной энергоэффективности необходимо четкое численное понимание составляющих потерь и методов их устранения. В том числе и понимание вклада высших гармоник тока в величину общих потерь.

Проблеме негативного влияния высших гармоник на системы электроснабжения уделено значительное внимание в научной литературе. Недостатком многих публикаций является общность формулировок о вреде высших гармоник. Например, «при прохождении высших гармоник возникают

дополнительные потери активной мощности и электроэнергии» [1]). При этом отсутствуют численные либо относительные данные о количестве дополнительных потерь в сети от высших гармоник, либо численное определение интенсивности старения изоляции.

В ряде публикаций [2-5] приведены выражения для расчета дополнительных потерь в сети от высших гармоник и различные эмпирические зависимости сопротивления сети от частоты обусловленные влиянием скин-эффекта, однако они достаточно сильно отличаются и дают различные значения.

Цели работы

- определение аналитических зависимостей активного сопротивления сети от частоты высшей гармоники с учетом скин-эффекта;
- определение зависимости дополнительной потерь мощности в сопротивлении сети от высших гармоник в функции от коэффициента гармонических искажений (THD) тока;
- анализ влияния высших гармоник источника питания и нагрузки на КПД сети.

Влияние высших гармоник на дополнительные потери в сети. Анализ публикаций

В ряде публикаций [2,3] указано что, дополнительные потери активной мощности В линии электропередач вызваны протеканием токов высших гармоник, вызванные скин эффектом.

$$P_{harm} = 3 \sum_{v=2}^{v=2} I_v^2 R_l k_{rv} \quad (1)$$

где v – номер гармоники; n – число учитываемых гармоник; I_v – среднеквадратической значений v -ой гармоники; R_l – активное сопротивление линии на основной частоте; k_{rv} – коэффициент, учитывающий влияния поверхностного эффекта

Для коэффициента k_{rv} дается определение его зависимости от частоты

$$k_{rv} = 0.47 \sqrt{v} \quad (2)$$

В диссертации (5) приводятся аппроксимирующие выражения для зависимостей k_{rv} от частоты при использовании которых получают несколько большее значения потерь. В соответствии с этим исследованием удельное активное сопротивление проводника на частоте v -ой гармоники равно

$$r_{0v} = r_0 (k_{pv} + k_{0v}) \quad (3)$$

где r_0 – удельное сопротивление проводника постоянному току; k_{pv} – коэффициент, учитывающий влияние поверхностного эффекта на v -ой гармоники; k_{0v} – коэффициент, учитывающий влияние эффекта близости для v -ой гармоники.

Коэффициент k_{pv} определяющий активное сопротивление проводника на высших частотах для медных проводов равен

$$k_{pv} = 0.021 \sqrt{f} \quad (4)$$

Для алюминиевых проводов k_{pv} равен

$$k_{pv} = 0.01635 \sqrt{f} \quad (5)$$

Коэффициент k_{0v} , учитывающий эффект близости определяется согласно выражения

$$k_{0v} = \frac{1.18 + k_{pv}}{k_{pv} \cdot 0.27} \cdot \left(\frac{d}{a}\right)^2 \quad (6)$$

где d – диаметр проводника, мм; a – расстояние между центрами жил, мм.

В публикации [4], на основании экспериментальных исследований приведены эмпирические зависимости активного сопротивления от частоты для различных типов проводов, приведенные в таблице 1.

Таблица 1 – Аппроксимирующие зависимости коэффициента k_{rv2} , учитывающего влияние скин эффекта для различных типов кабелей

Тип проводника	k_{rv2}
АС-400	0,3v
А-400	0,15v
Медный кабель	0,06v
Алюминиевый кабель	0,06v

Зависимости коэффициентов k_{rv} , k_{rv2} и k_{pv} для медного провода от частоты приведены на рис.1

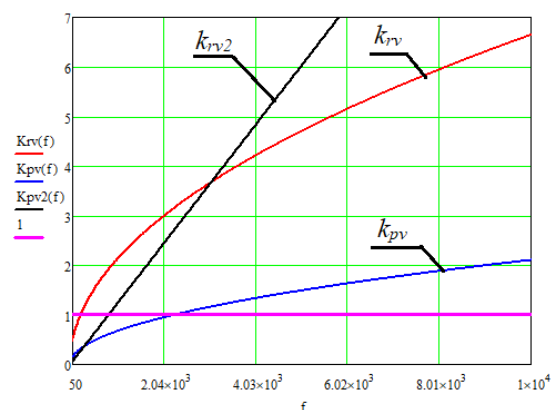


Рис. 1 – Зависимости сопротивления провода частоты на основании влияния скин-эффекта: 1 - k_{rv} ; 2 - k_{rv2} ; 3- k_{pv}

Вывод: существующие зависимости сопротивления проводников сети от частоты являются достаточно различными и неточными, так как они не учитывают геометрические свойства провода, которые влияют на скин-эффект. Кроме этого согласно выражений (2) и (4) и таблицы 1, до

определенной частоты, коэффициенты k_{rv} , k_{rv2} и k_{pv} принимают значения меньше единицы, что свидетельствует о снижении сопротивления, т.е. определенной «сверхпроводимости» проводника на частоте 150Гц, что противоречит здравому смыслу.

Определение влияния скин-эффекта на сопротивление сети исходя из уравнений Бесселя

Протекание переменного тока сопровождается электромагнитным полем вокруг проводника, которое приводит к вытеснению электрических зарядов (собственно этого же тока) от центра проводника на его поверхность. Этот эффект называется поверхностным эффектом, или скин-эффектом. В результате этого эффекта плотность тока по площади сечения провода становится неоднородной. Объемная плотность тока максимальна у поверхности проводника. При удалении от поверхности она убывает экспоненциально и на глубине Δ становится меньше в e раз. Эта глубина Δ называется толщиной скин-слоя, которая определяется согласно выражению:

$$\Delta = \sqrt{\frac{2}{\gamma \cdot \mu \cdot 2\pi f}} \tag{7}$$

где Δ – глубина проникновения тока (м);
 μ – абсолютная магнитная проницаемость, $\mu = \mu_0 \mu_r$;
 μ_0 – магнитная проницаемость вакуума, $1,25663706 \cdot 10^{-6}$ Н/А;
 μ_r – относительная магнитная проницаемость материала (μ/μ_0 безразмерная величина), для меди 0,999992; для алюминия 1,000022;
 f – частота переменного тока, Гц;
 γ – удельная электрическая проводимость, $\gamma = 1/\rho$
 ρ – удельное сопротивление проводника ($\text{Ом} \cdot \text{м}^{-1}$), меди $1,72 \cdot 10^{-8}$; для алюминия $2,7 \cdot 10^{-8}$;

Зависимость толщины скин слоя медного и алюминиевого кабеля от частоты f приведена на рис.2.

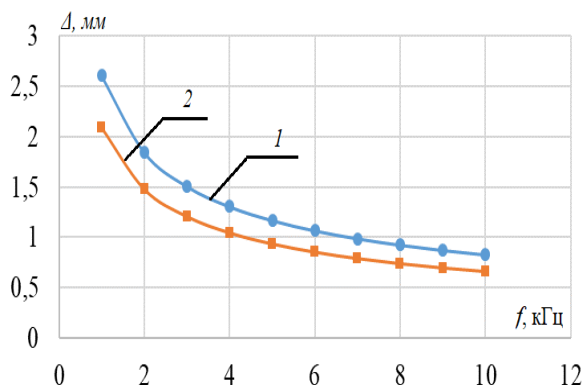


Рис. 2 – Зависимость толщины скин-слоя (мм) от частоты тока (кГц): 1 - для алюминия; 2 – для меди

Таким образом, что при достаточно большой частоте $f=10\text{кГц}$ толщина скин-слоя становится мизерно малой 0,6мм.

Для переменного напряжения плотность тока от поверхности к центру цилиндрического проводника является экспоненциально убывающей функцией, которая описывается выражением

$$J = J_s e^{-\frac{r_k}{\Delta}} \tag{8}$$

где J_s – проводимость проводника, соответствующая постоянному току; r_k – расстояние от поверхности провода к центру

По причине экспоненциального убывания плотности тока следует, что практически весь ток сосредоточен в слое толщиной в несколько Δ . В качестве примера приведём график распределения относительной плотности тока в проводнике с радиусом равным 3Δ .

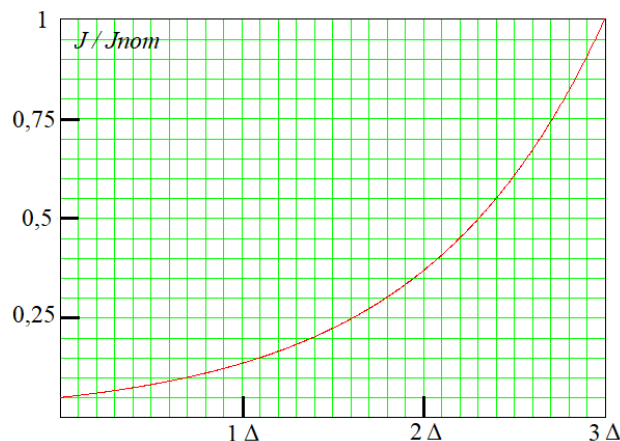


Рис. 3 – Зависимость распределения относительной плотности тока в проводе толщиной 3Δ

Так, уменьшение плотности тока в 100 раз происходит на глубине $\approx 4,6\Delta$. Таким образом, влияние скин эффекта на вытеснение тока определяется количеством скин-слоев в радиусе провода r_0/Δ . Данная неоднородность плотности тока ведет к увеличению его удельного сопротивления.

В случае, когда радиус провода больше толщины скин-слоя зависимость комплексного сопротивления провода Z от частоты тока может быть описано с помощью функции Бесселя, которая определяет распространение поля в цилиндрической системе координат [6, 7].

$$Z(f) = R + i \cdot X = \frac{q}{2 \cdot \pi \cdot r_0 \cdot \gamma} \cdot \frac{J_0(q \cdot r_0)}{J_1(q \cdot r_0)} \tag{9}$$

где R — активное сопротивление проводника;
 X — реактивное сопротивление проводника;
 i – комплексная составляющая;

r_0 — радиус провода;
 l — длина провода;
 $J_0(Z)$ — функция Бесселя первого рода, нулевого порядка;
 $J_1(Z)$ — функция Бесселя первого рода, первого порядка;
 q – волновое число.

Волновое число провода является комплексной переменной и определяется исходя из значения толщины скин-слоя.

$$q = k - i \cdot k ; k = \frac{l}{\Delta} \quad (10)$$

Функции Бесселя первого рода, являются частными каноническими решениями дифференциального уравнения Бесселя

$$x^2 \frac{d^2 y}{dx^2} + x \frac{dy}{dx} + (x^2 - \alpha^2) = 0 \quad (11)$$

Функции Бесселя первого порядка, обозначаемые $J_\alpha(z)$, являются частными решениями дифференциального уравнения Бесселя для конечных точек $x=0$ при целых и не отрицательных α

$$J_\alpha(z) = \frac{z}{2} \sum_{n=0}^{n=\infty} \frac{(-1)^n}{n!(n+1+\alpha)!} \cdot \left(\frac{z}{2}\right)^{2n+\alpha} \quad (12)$$

Функции Бесселя первого рода нулевого и первого порядка определяются как

$$J_0(z) = \sum_{n=0}^{n=\infty} \frac{(-1)^n}{n!(n+1)!} \left(\frac{z}{2}\right)^{2n} \quad (13)$$

$$J_1(z) = \sum_{n=0}^{n=\infty} \frac{(-1)^n}{n!(n+2)!} \left(\frac{z}{2}\right)^{2n+1} \quad (14)$$

Примечание: решения функций Бесселя в комплексной плоскости упрощается возможностью их решения в программе MathCad с помощью встроженных функции «J0(z)» и «J1(z)».

Активное сопротивление провода R является вещественной частью комплексного сопротивления Z .

Полученные зависимости активного сопротивления медного провода длиной 10км с различными диаметрами от частоты рассчитанных согласно выражению (9) приведены на рис.4.

Достоинство данного метода расчета сопротивления является сходимостью значения сопротивления при частоте близкой нулю сопротивлению постоянному току

$$Z(f=0) = R_{DC} = \frac{L}{\gamma \cdot S} \quad (15)$$

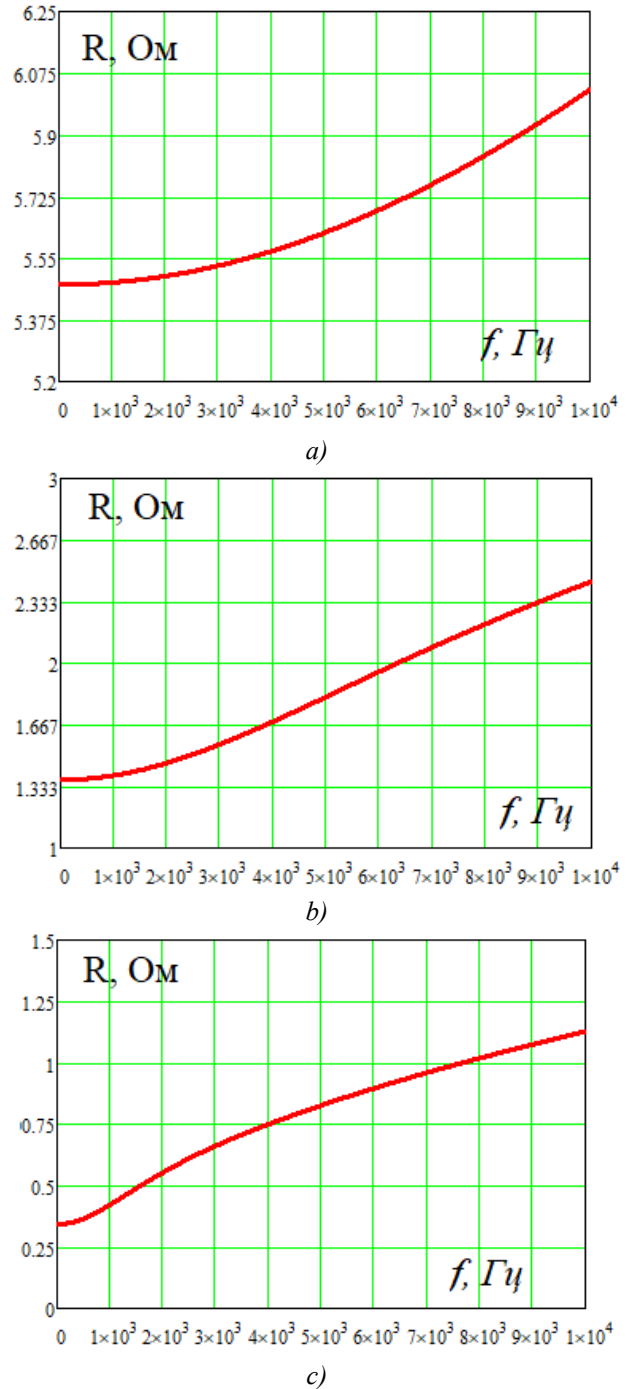


Рис. 4 – Зависимость активных сопротивлений медных проводов длиной 10 км с радиусами 1, 2, 4 мм от частоты: а - 1мм; б - 2мм; с - 4мм

Приводя полученные на рис.4 зависимости сопротивлений от частоты в относительные величины получены графики зависимости сопротивлений в относительных величинах (рис.5).

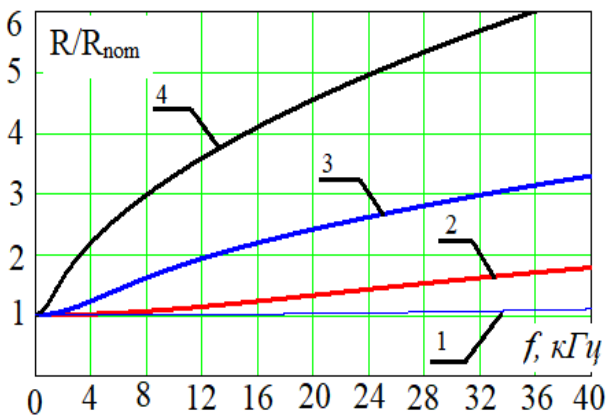


Рис. 5 – Зависимость относительных активных сопротивлений медных проводов с радиусами 1, 2, 4 мм от частоты: 1 – 0,5мм; 2 – 1мм; 3 – 2мм; 4 – 4мм

Как видно из рисунка 5, диаметр жилы провода в значительной степени влияет на эффект вытеснения тока и как результат на значение активного сопротивления на заданной частоте.

Вывод: скин-эффект делает активное сопротивление сети частотно-зависимым, т.е. по сути сопротивление сети растет с ростом частоты, предавая сопротивлению сети фильтрующие свойства для высших гармоник. В тоже время при грамотном проектировании линии электропередач с применением многожильного кабеля негативное влияние скин-эффекта можно полностью нивелировать в ограниченном диапазоне частот можно полностью подавить.

Определение дополнительных потерь в сети от высших гармоник исходя из значения коэффициента гармонических искажений тока

Предложен метод определения дополнительных тепловых потерь в электрических сетях постоянного и переменного тока от высших гармоник, которые однозначно определяются исходя из результирующего значения коэффициента гармонических искажений (англ. Total Harmonic Distortion - THD) тока сети. Данный метод справедлив в случае, когда влияние скин-эффекта на сопротивление сети с ограниченным спектром высших гармоник незначительно. В Этом случае дополнительные потери в электрической сети от высших гармоник можно рассчитать исходя из увеличения среднеквадратического значения (RMS) тока, а, следовательно, и увеличения потерь в квадратической зависимости от величины RMS значения тока.

Как известно, коэффициенты гармонических искажений по постоянному THD_{DC} и переменному току THD_{AC} определяются как

$$THD_{DC} = \frac{\sqrt{\sum_{m=1}^{m=\infty} I_m^2}}{I_{DC}} \tag{16}$$

$$THD_{AC} = \frac{\sqrt{\sum_{m=2}^{m=\infty} I_m^2}}{I_1} \tag{17}$$

где I_m – среднеквадратическое значение m -ой гармоники; I_{DC} – значение постоянной составляющей
Примечание: для дальнейших формул THD приведено в относительных величинах [от 0 до 1].

Как известно, действующее (оно же среднеквадратическое значение - RMS) значение переменного (либо постоянного пульсирующего) тока равно величине такого постоянного тока, который за время, равное одному периоду переменного тока, произведёт такую же работу (тепловой или электродинамический эффект), что и рассматриваемый переменный ток.

$$I_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) \cdot dt} \tag{18}$$

Среднеквадратическое значение постоянного тока можно также выразить через спектр высших гармоник

$$I_{RMS_DC} = \sqrt{I_{DC}^2 + \sum_{m=2}^{m=\infty} I_m^2} \tag{19}$$

где i_k – среднеквадратическое значение k -ой гармоники.

Из выражения (16) можно выразить сумму квадратов высших гармоник

$$\sum_{m=2}^{m=\infty} I_m^2 = (THD_{DC} \cdot I_{DC})^2 \tag{20}$$

Тогда среднеквадратическое значение постоянного и переменного тока можно представить в виде

$$\begin{aligned} I_{RMS_AC} &= \sqrt{I_{DC}^2 + (THD_{DC} \cdot I_{DC})^2} = \tag{21} \\ &= \sqrt{I_{DC}^2 \cdot (1 + THD_{DC}^2)} \\ I_{RMS_DC} &= I_{DC} \cdot \sqrt{(1 + THD_{DC}^2)} \end{aligned}$$

Зависимость среднеквадратического значения тока от значения THD приведена на рис.6, на котором за 100% принято RMS значение первой гармоники.

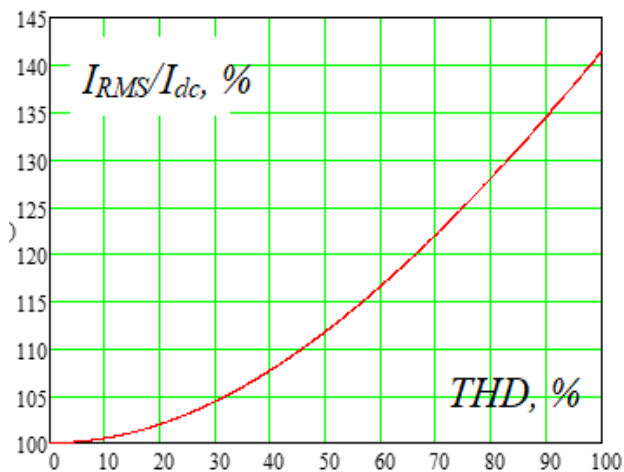


Рис. 6 – Зависимость относительного значения RMS тока от коэффициента гармонических искажений

Относительное увеличение мощности потерь, вызванное высшими гармониками можно выразить

$$\Delta P = \frac{I_{RMS}^2 \cdot R}{I_{DC}^2 \cdot R} = \frac{I_{DC}^2 \cdot R \cdot (1 + THD_{DC}^2)}{I_{DC}^2 \cdot R} \equiv 1 + THD_{DC}^2 \quad (22)$$

Таким образом, установлена однозначная зависимость между коэффициентом гармонических искажений потребляемого тока и процентом дополнительных потерь мощности.

Зависимость относительного значения дополнительных потерь от значения коэффициента гармонических искажений приведено на рис.7, на котором за 100% приняты потери, вызванные основной гармоникой, либо для DC сети постоянной составляющей тока.

На основании приведенных выражений можно определить энергосберегающий эффект в сети от применения силового активного фильтра. Типичное значение THD входного тока трехфазного выпрямителя равно от 30% до 80%. Таким образом, САФ позволяет снизить значение потерь в сети вызванное высшими гармониками до 10% до 48%.

Примечание! В программе Matlab 2017b существует блок PowerGui, который способен проводить спектральный анализ сигнала на основании быстрых преобразований Фурье (FFT), а также автоматически рассчитывать гармонический спектр сигнала и значения коэффициента гармонических искажений по постоянному току. В программе найдена ошибка! Коэффициент гармонический искажений по постоянному току в PowerGui рассчитывается согласно выражению ($\sqrt{2}$ лишний)

$$THD_{DC} = \frac{\sqrt{\sum_{m=2}^{m=\infty} I_m^2}}{I_{DC} \sqrt{2}} \quad (23)$$

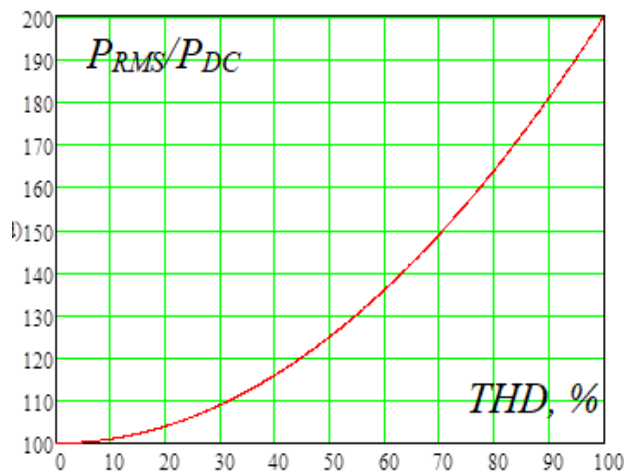


Рис. 7 – Зависимость процентного значения дополнительных от коэффициента гармонических искажений

Анализ влияния высших гармоник, генерируемых источником питания, на КПД сети

Высшие гармоники тока в системе электроснабжения могут возникать в следствие работы источника питания (например, высшие гармоники выходного напряжения трехфазного выпрямителя в линии электроснабжения постоянного тока), либо в следствие импульсного потребления тока нагрузкой.

Анализ влияния на КПД сети высших гармоник, генерируемых источником питания

В случае, когда источником высших гармоник является источник питания, например, гармоники выходного напряжения выпрямителя тяговой подстанции, который генерирует постоянную составляющую U_{DC} и сумму высших гармоник. Наличие высших гармоник ведет к увеличению среднеквадратического значения питающего напряжения U_{RMS} , тока в сети I_{RMS} , потерь в сети. При этом увеличение значения потерь в сети, сопровождается увеличением значения переданной источником мощности.

$$U_{RMS} = I_{DC} \cdot \sqrt{(1 + THD_U^2)} \quad (24)$$

$$I_{RMS} = I_{DC} \cdot \sqrt{(1 + THD_I^2)} \quad (25)$$

Чаще всего, коэффициент гармонических искажений тока и коэффициент гармонических искажений напряжения в линии электроснабжения из-за активного-индуктивного характера нагрузки не равны: $THD_U > THD_I$. При этом мощность, генерируемая источником может быть выражена

$$P_{RMS} = U_{RMS} I_{RMS} = \quad (26)$$

$$= U_{DC} I_{DC} \sqrt{(1+THD_U)^2} \sqrt{(1+THD_I)^2}$$

Данная мощность P_{RMS} , генерируемая источником расходуется на потери в активном сопротивлении сети R_c , а также на нагрузку. Потери в сети ΔP_c с учетом высших гармоник определяются

$$\Delta P_c = I_{DC}^2 \cdot R_c \cdot (1+THD_I^2) \quad (27)$$

С ростом содержания высших гармоник и роста THD происходит пропорциональное увеличение генерируемой источником и переданной в нагрузку мощности и увеличение мощности потерь в системе электроснабжения, т.е. рост потерь от гармоник пропорционален увеличению переданной мощности.

$$КПД = \frac{P_{нагрузки}}{P_{источника}} = \frac{P_{RMS} - \Delta P_{сети}}{P_{RMS}} = \quad (28)$$

$$= \frac{U_{DC} I_{DC} \sqrt{(1+THD_U)^2} \sqrt{(1+THD_I)^2} - I_{DC}^2 R_c (1+THD_I^2)}{U_{DC} I_{DC} \sqrt{(1+THD_U)^2} \sqrt{(1+THD_I)^2}}$$

Вывод: высшие гармоники напряжения источника питания не вызывают снижение КПД системы электроснабжения.

Анализ влияния высших гармоник, генерируемых импульсной нагрузкой, на КПД сети

Рассмотрим случай, когда источником высших гармоник тока является нагрузка, которая запитана постоянным напряжением U_{DC} и потребляет пульсирующий ток, который содержит постоянную составляющую I_{DC} и ряд высшую гармоник.

$$i_n(t) = I_{DC} + \sum_{m=2}^{m=\infty} i_m \sin(\omega_m t + \gamma_m) \quad (29)$$

Добавление в постоянную составляющую тока высших гармоник ведет к увеличению RMS тока, а, следовательно, и увеличению потерь в сети, но в тоже время не увеличивает суммарную потребленную на периоде энергию. Докажем, что энергия, потребляемая нагрузкой с пульсирующим током, E_{cp} будет такая же, как и в случае, если бы нагрузка потребляла только постоянную составляющую тока I_{DC} (при условии кратности периода интегрирования T периоду высшей гармоники)

$$E_{cp} = \int_0^T [i_n(t) \cdot u_n(t)] \cdot dt = \int_0^T [I_{DC} \cdot u_n(t)] \cdot dt \quad (30)$$

Для упрощения расчета приведем доказательство для одной высшей гармоники тока

$$i_n(t) = I_{DC} + i_n \cdot \sin(\omega n \cdot t) \quad (31)$$

При условии, что напряжение на нагрузке и амплитуда гармоники тока является константами справедливо выражение

$$E_{cp} = \int_0^T U_{DC} [I_{DC} + I_n \sin(\omega n \cdot t)] dt = \quad (32)$$

$$= \int_0^T [U_{DC} I_{DC}] dt + \int_0^T [U_{DC} I_n \sin(\omega n \cdot t)] dt =$$

В связи с тем, что определенный интеграл от синуса на периоде равен нулю, то энергия, потребляемая нагрузкой за период T будет равна

$$E_{cp} = U_{DC} \cdot I_{DC} \cdot T + U_{DC} \cdot I_n \cdot T \cdot 0 = U_{DC} \cdot I_{DC} \quad (33)$$

Увеличение содержания высших гармоник тока нагрузки, ведет к увеличению среднеквадратического значения тока, что вызывает дополнительный рост потерь, при этом потребляемая энергия нагрузкой остается та же. В этом случае КПД системы электроснабжения будет определяться

$$КПД = \frac{P_{нагрузки}}{P_{источника}} = \frac{U_{DC} I_{DC}}{U_{DC} I_{DC} + I_{RMS}^2 R_{сети}} =$$

$$= \frac{U_{DC} I_{DC}}{U_{DC} I_{DC} + I_{DC}^2 \cdot R_{сети} \cdot (1+THD_I^2)} \quad (34)$$

Вывод: высшие гармоники тока нагрузки вызывают снижение КПД системы электроснабжения.

Выводы проведенных исследований

1) Существующие аппроксимирующие выражения, определяющие зависимость сопротивления сети от частоты, обусловленную скин-эффектом, являются не точными т.к. они не учитывают влияние соотношения диаметра провода к толщине скин слоя. Также неточность заключается в том, что для определенного диапазона частот сопротивление сети получается ниже номинального.

2) На основании уравнений Бесселя представлен метод расчета зависимости активного сопротивления сети от частоты учитывающий геометрические параметры проводника.

3) Скин-эффект делает сопротивление сети частотно-зависимым параметром. Таким образом, электрическую сеть можно представить в виде фильтра.

4) Установлена зависимость дополнительных потерь в сети от высших гармоник в функции от результирующего коэффициента гармонических

искажений тока. Зависимость справедлива при условии отсутствия частотной зависимости сопротивления сети от частоты.

5) Установлено, что высшие гармоники, вызванные напряжением источника питания и импульсным током нагрузки, по-разному влияют на КПД сети. Высшие гармоники источника питания повышают RMS значение питающего напряжения в сети. Это ведет к одновременному увеличению потерь в сети и увеличению передаваемой мощности, как следствие при условии $THD_U > THD_I$ высшие гармоники источника питания не вызывают снижения КПД системы электроснабжения. В тоже время высшие гармоники тока нелинейной нагрузки вызывают снижение КПД линии электропередачи.

Список литературы

1. **Степанов, В. М.** Влияние высших гармоник в системах электроснабжения предприятий на потери электрической энергии / **В. М. Степанов, И. М. Базыль** // *Известия ТулГУ. Технические науки Вып.12 Ч2.* – 2013. – № 12. – с. 27-31.
2. **Жежеленко, И. В.** Электрические потери от высших гармоник в системах электроснабжения / **И. В. Жежеленко** // *Электрика.* – 2010. – № 4. – с. 3-6.
3. **Жежеленко, И. В.** Высшие гармоники в системах электроснабжения промышленных предприятий / **И. В. Жежеленко.** М.: Энергоатомиздат, 2004.
4. **Лютаревич, А. Г.** Оценка дополнительных потерь мощности от высших гармоник в элементах систем электроснабжения / **А. Г. Лютаревич, А. А. Вырва, С. Ю. Долингер, Д. С. Осипов, И. Н. Четверик** // *Омский научный вестник.* – 2009. – №1. – С.109-113.
5. **Акимжанов, Т. Б.** Разработка методики расчета добавочных потерь в воздушных линиях электроснабжения и оценка их уровня в электрических сетях. Дисс. Кат.наук. Специальность 05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические системы. 2015, Томск.
6. **Beaty, H. Wayne,** Standard Handbook for Electrical Engineers (14th ed.). McGraw-Hill, 2000. – p. 34–50.
7. **Hayt, W. H.** Engineering Electromagnetics, Sixth edition / **W. H. Hayt, J.A. Buck.** 2006, p.561.
8. **Ben, C. Johnson.** The Practical Issues involved in Designing, Specifying and Installing Skin Effect Current Tracing Systems / **C. Johnson Ben** // *IEEE Petroleum and Chemical Industry Conference Europe Conference Proceedings (PCIC EUROPE).* – 2012. – pp.1-13.
9. **Zaikin, D. I.** Round and tubular wire skin effect modeling and usage SPICE as Maxwell's equations solver / **D. I. Zaikin** // *23rd Telecommunications Forum Telfor (TELFOR).* – 2015. – P. 650 – 653. – doi: 10.1109/TELFOR.2015.7377551.
10. **Dias, R. A.** Skin effect comparative analysis in electric cables using computational simulations / **R. A. Dias, G. R. S. Lira, E. G. Costa, R. S. Ferreira, A. F. Andrade** // *2018 Simposio Brasileiro de Sistemas Eletricos (SBSE).* – 2018. – pp. 1 – 6. – doi: 10.1109/SBSE.2018.8395687.
11. **Tsuchiya, A.** Effect of Anomalous Skin Effect on Transmission-Line Loss [J] / **A. Tsuchiya, H. Onodera** // *leice Technical Report Microwaves.* – 2011. – 111(351). – 77-81.

12. **Arcega, F. J.** Study of Harmonics Thermal Effect in Conductors Produced by Skin Effect / **F. J. Arcega, A. Pardina** // *IEEE latin america transactions.* – 2014. – 12(8). – p. 1488-1495. – doi: 10.1109/TLA.2014.7014518.

Bibliography (transliterated)

1. **Stepanov, V. M., Bazyl', I. M.** Vliyaniye vysshikh garmonik v sistemakh elektrosnabzheniya predpriyatiy na poteri elektricheskoy energii [Influence of higher harmonics in power supply systems of enterprises on losses of electric energy]. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskiye nauki [Proceedings of Tula State University. Technical science]*, 2013, **12** (2), p. 27-31.
2. **Zhelezko, I. V.** Elektricheskkiye poteri ot vysshikh garmonik v sistemakh elektrosnabzheniya [Electrical losses from higher harmonics in power supply systems]. *Elektrika [Electrics]*, 2010, **4**, p. 3-6.
3. **Zhezhelenko, I. V.** Vysshkiye garmoniki v sistemakh elektrosnabzheniya promyshlennykh predpriyatiy [Higher harmonics in industrial power supply systems], Moscow, *Energoatomizdat [Energoatomizdat]*, 2004.
4. **Lyutarevich, A. G., Vyryva, A. A., Dolinger, S. Yu., Osipov, D. S., Chetverik, I. N.,** Otsenka dopolnitel'nykh poter' moshchnosti ot vysshikh garmonik v elementakh sistem elektrosnabzheniya [Estimation of additional power losses from higher harmonics in elements of power supply systems]. *Omskiy nauchnyy vestnik [Omsk Scientific Bulletin]*, 2009, **1**, p.109-113.
5. **Akimzhanov, T. B.** Razrabotka metodiki rascheta dobavochnykh poter' v vozdushnykh liniyakh elektrosnabzheniya i otsenka ikh urovnya v elektricheskikh setyakh [Development of a methodology for calculating additional losses in overhead power lines and assessing their level in electrical networks]. Diss. Kat.nauk. Spetsial'nost' 05.14.02 – Elektricheskkiye stantsii i elektroenergeticheskiye sistemy [Phd thesis, speciality 05.14.02 - Electric stations and electric power systems], Tomsk 2015.
6. **Beaty, H. Wayne.** Standard Handbook for Electrical Engineers (14th ed.). McGraw-Hill, 2000, p. 34–50.
7. **Hayt, W. H., Buck, J. A.** Engineering Electromagnetics, Sixth edition, 2006, p.561.
8. **Ben, C. Johnson.** The Practical Issues involved in Designing, Specifying and Installing Skin Effect Current Tracing Systems, *IEEE Petroleum and Chemical Industry Conference Europe Conference Proceedings (PCIC EUROPE)*, 2012, pp. 1-13.
9. **Zaikin, D. I.** Round and tubular wire skin effect modeling and usage SPICE as Maxwell's equations solver, *23rd Telecommunications Forum Telfor (TELFOR)*, 2015, 650 – 653, doi: 10.1109/TELFOR.2015.7377551.
10. **Dias, R. A., Lira, G. R. S., Costa, E. G., Ferreira, R. S., Andrade, A. F.** Skin effect comparative analysis in electric cables using computational simulations, *2018 Simposio Brasileiro de Sistemas Eletricos (SBSE)*, 2018, 1 – 6, doi: 10.1109/SBSE.2018.8395687.
11. **Tsuchiya, A., Onodera, H.** Effect of Anomalous Skin Effect on Transmission-Line Loss [J]. *leice Technical Report Microwaves*, 2011, **111**(351), 77-81.
12. **Arcega, F. J., Pardina, A.** Study of Harmonics Thermal Effect in Conductors Produced by Skin Effect. *IEEE latin america transactions*, 2014, **12**(8), 1488-1495, doi: 10.1109/TLA.2014.7014518.

Сведения об авторах (About authors)

Плахтий Александр Андреевич – инженер-электронщик конструкторского бюро компании «ВО ОВЕН» / по совместительству старший преподаватель кафедры электротехники, электроэнергетики и электромеханики Украинского государственного университета железнодорожного транспорта, Харьков, Украина; email: a.plakhtiy1989@gmail.com.

Alexandr Plakhtiy – Electronics engineer of the design office of the company "VO OIEN" / part-time senior lecturer of the Department of Electrical Engineering, Electric Power Engineering and Electromechanics of the Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkov, Ukraine; email: a.plakhtiy1989@gmail.com.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Плахтий, А. А. Анализ влияния высших гармоник на потери мощности в системах электроснабжения / **А. А. Плахтий** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серия: Новые решения в современных технологиях.* – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2018. – № 26 (1302). – Т. 1. – С. 126-134. – doi:10.20998/2413-4295.2018.26.18.

Please cite this article as:

Plakhtiy, A. Analysis of power loss caused by higher harmonics in electrical supply systems. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2018, **26** (1302), 1, 126–134, doi:10.20998/2413-4295.2018.26.18.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Плахтій, О. А. Аналіз впливу вищих гармонік на втрати потужності в системах електропостачання / **О. А. Плахтій** // *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». – 2018. – № 26 (1302). – Т. 1. – С. 126-134. – doi:10.20998/2413-4295.2018.26.18.

АНОТАЦІЯ Представлені результати досліджень впливу вищих гармонік струму на опір мережі, втрати потужності, а також ККД системи електропостачання. На підставі рівнянь Бесселя першого роду представлені залежності активного опору мережі від частоти вищої гармоніки при впливі скін ефекту. Представлена залежність додаткових втрат потужності в мережі від коефіцієнта гармонійних спотворень струму. Встановлено, що вищі гармоніки, викликані джерелом живлення і навантаженням, по-різному впливають на ККД мережі.

Ключові слова: вищі гармоніки; скін-ефект; коефіцієнт гармонійних спотворень; втрати в мережі від вищих гармонік

Поступила (received) 02.07.2018