

2.4.3. Электроэнергетика

Научная статья

УДК 621.3.017.3

<http://doi.org/10.37493/2307-907X.2023.4.3>

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НЕСИНУСОИДАЛЬНОСТИ НАПРЯЖЕНИЯ НА ПОТЕРИ ХОЛОСТОГО ХОДА ТРАНСФОРМАТОРОВ

Петров Антон Васильевич¹, Мартусенко Виталий Евгеньевич^{2*},
Гордиенко Ксения Сергеевна³, Редькин Вячеслав Владимирович⁴

^{1, 2, 3, 4} Северо-Кавказский федеральный университет (д. 1, ул. Пушкина, 355017, Ставрополь, Российская Федерация)

¹ anvpetrov@ncfu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6274-0851>

² vmartusenko@ncfu.ru

³ lvizalis1@gmail.com

⁴ venzeli4@mail.ru

* Автор, ответственный за переписку

Аннотация. В работе проведено исследование влияния высших гармоник на величину потерь в стали трансформаторов. Приведено описание экспериментальной установки для определения величины потерь холостого хода при различных уровнях несинусоидальности и фазовых соотношений высших гармоник. Проведены экспериментальные исследования влияния частоты и начальной фазы высших гармоник в спектре напряжения на величину потерь холостого хода трансформатора.

Ключевые слова: трансформатор напряжения, несинусоидальность, высшие гармоники, начальная фаза, потери холостого хода.

Для цитирования: Петров А.В., Мартусенко В.Е., Гордиенко К.С., Редькин В.В. Экспериментальное исследование влияния несинусоидальности напряжения на потери холостого хода трансформаторов // Вестник Северо-Кавказского федерального университета. 2023. № 4 (97). С. 27–38. <http://doi.org/10.37493/2307-907X.2023.4.3>

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 18.05.2023;

одобрена после рецензирования 31.05.2023;

принята к публикации 09.06.2023.

Research article

EXPERIMENTAL STUDY OF THE INFLUENCE OF NON-SINUSOIDAL VOLTAGE ON NO-LOAD LOSSES OF TRANSFORMERS

Anton V. Petrov¹, Vitalij E. Martusenko^{2*}, Ksenija S. Gordienko³, Vjacheslav V. Redkin⁴

^{1, 2, 3, 4} North-Caucasus Federal University (1, Pushkin st., 355017, Stavropol, Russian Federation)

¹ anvpetrov@ncfu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6274-0851>

² vmartusenko@ncfu.ru

³ lvizalis1@gmail.com

⁴ venzeli4@mail.ru

* Corresponding author

Abstract. The study of the influence of higher harmonics on the value of the no-load losses of transformers is carried out. The description of an experimental setup for determining the value of idling losses at various levels of non-sinusoidality and phase ratios of higher harmonics is given. Experimental studies of the influence of the frequency and the initial phase of the higher harmonics in the voltage spectrum on the value of the transformer idling losses have been carried out.

Keywords: voltage transformer, non-sinusoidality, higher harmonics, initial phase, no-load losses.

For citation: Petrov AV., Martusenko VE., Gordienko KS., Redkin VV. Experimental study of the influence of non-sinusoidal voltage on no-load losses of transformers. Newsletter of North-Caucasus Federal University. 2023;4(97):27–38. <http://doi.org/10.37493/2307-907X.2023.4.3> (In Russ.).

Conflict of interest: the authors declare no conflicts of interests.

The article was submitted 18.05.2023;

approved after reviewing 31.05.2023;

accepted for publication 09.06.2023.

Введение / Introduction. Бурное развитие силовой электроники в последние десятилетие послужило причиной широкого распространения электроприемников с импульсными блоками питания. Это, в свою очередь, вывело проблему несинусоидальности токов и напряжений в распределительных сетях на новый уровень. Практически все бытовые и офисные электроприемники, имеющие в своем составе электронное управление, можно смело отнести к нелинейным потребителям. Даже с учетом относительно небольшой единичной мощности таких потребителей их огромное количество определяет достаточно высокий уровень несинусоидальности токов и напряжений в электрических сетях низкого напряжения [1].

Трансформаторы, как и любой другой электромагнитный аппарат, весьма чувствительны к наличию высших гармоник (ВГ) в спектре питающего напряжения. При этом следует помнить, что трансформатор в определенной степени сам является нелинейным элементом. В данной связи становится достаточно актуальным вопрос о взаимном влиянии нелинейности самого трансформатора и несинусоидальности питающей его сети.

Анализ источников, посвященных работе трансформаторов в условиях несинусоидальности, проведенный в рамках выполнения данной работы, позволил сделать вывод о том, что в основном авторы рассматривают процесс воздействия несинусоидальных токов на работу трансформаторов. Это вполне объяснимо с учетом изложенного ранее. Проблема несинусоидальности токов в настоящее время все более и более обостряется. При этом наблюдается некий дисбаланс в области работ, посвященных воздействию несинусоидальных напряжений на работу трансформатора.

Тем не менее, анализ работ, посвященных исследованиям в этой области [2-6] позволил выделить следующий перечень негативных явлений, сопровождающих работу трансформатора в условиях несинусоидальности напряжения питания. В частности к этим явлениям следует отнести:

- возникновение дополнительных потерь в магнитопроводе, вызванных вихревыми токами высокой частоты;
- увеличение потерь на гистерезис;
- появление локального насыщения магнитной системы (как временного, так и пространственного);
- ускоренное старение изоляции;
- появление дополнительных потоков рассеяния при наличии гармоник нулевой последовательности.

При этом, как правило, исследователи сопоставляют уровень дополнительных потерь в трансформаторе с суммарным коэффициентом высших гармонических составляющих [2, 4], либо проводят оценку добавочных потерь с учетом отдельных гармоник, оперируя только действующими значениями ВГ в спектре кривой напряжения [3, 7].

Отметим, что при одном и том же уровне несинусоидальности напряжений, форма кривой напряжения будет определяться не только амплитудным спектром сигнала, но и фазовыми соотношениями гармоник. В рамках данного исследования предполагается, что ввиду нелинейности магнитной системы трансформатора, величина потерь в стали будет зависеть не только от величины отдельных ВГ в спектре напряжения, но и от их фазовых сдвигов относительно основной гармоники (ОГ).

Таким образом, целью данной работы является исследование зависимости потерь в стали трансформатора от фазовых соотношений гармоник в спектре первичного напряжения питания.

Материалы и методы исследований / Materials and methods of research. Для достижения указанной цели в рамках данной работы была разработана и собрана экспериментальная установка, позволяющая производить оценку потерь холостого хода трансформатора при различной форме кривой первичного напряжения.

Для исследования потерь в трансформаторе при появлении в спектре питающего напряжения высших гармоник была собрана экспериментальная установка (рис. 1), включающая в себя:

- однофазный многообмоточный трансформатор ОСМ 016-У3 мощностью 160 ВА;
- испытательный комплекс OMICRON CMC 356 в качестве источника напряжения заданного спектра;
- систему сбора данных NI CompactDAQ-9172 с подключенными модулями NI 9225 и NI 9239;
- ноутбук с установленным программным обеспечением Test Universe, LabVIEW и MS Excel.

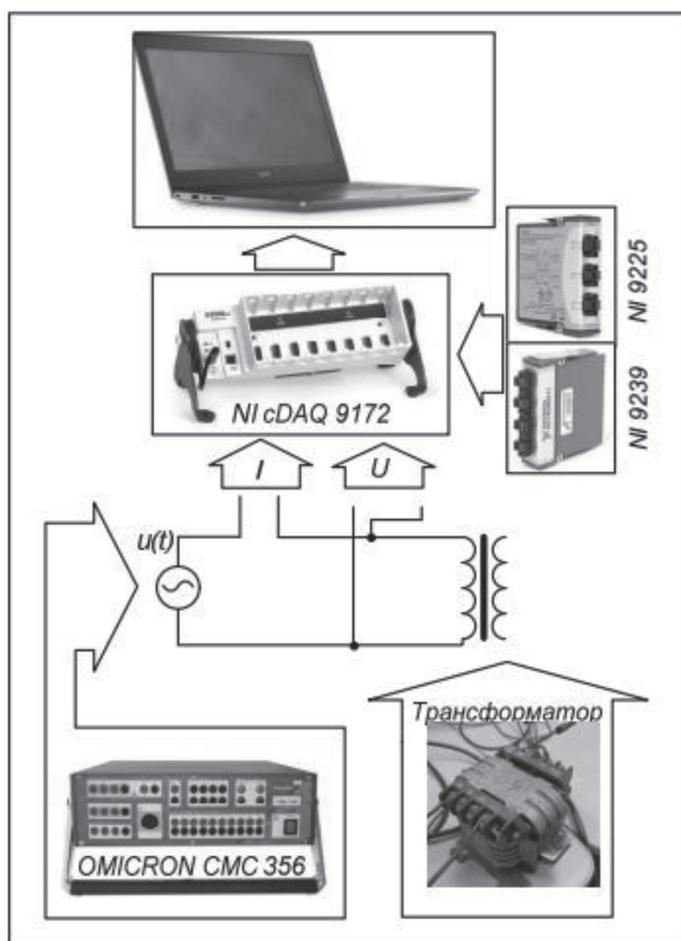


Рис. 1. Условная схема экспериментальной установки

Программное обеспечение эксперимента включало в себя программный комплекс Test Universe для обеспечения заданных режимов, среду графического программирования LabVIEW для обеспечения измерений и табличный редактор MS Excel для обработки результатов измерений.

В программном комплексе Test Universe был задействован модуль Harmonics, управляющий испытательным комплексом OMICRON и позволяющий генерировать тестовые сигналы, состоящие из сигнала напряжения или тока с заданным спектральным составом (рис. 2). Модуль Harmonics позволяет задавать основную гармонику трех сигналов напряжения и трех сигналов тока с наложением спектральных составляющих с номерами до 40-й в режиме источника напряжения и до 20-й включительно в режиме источника тока.

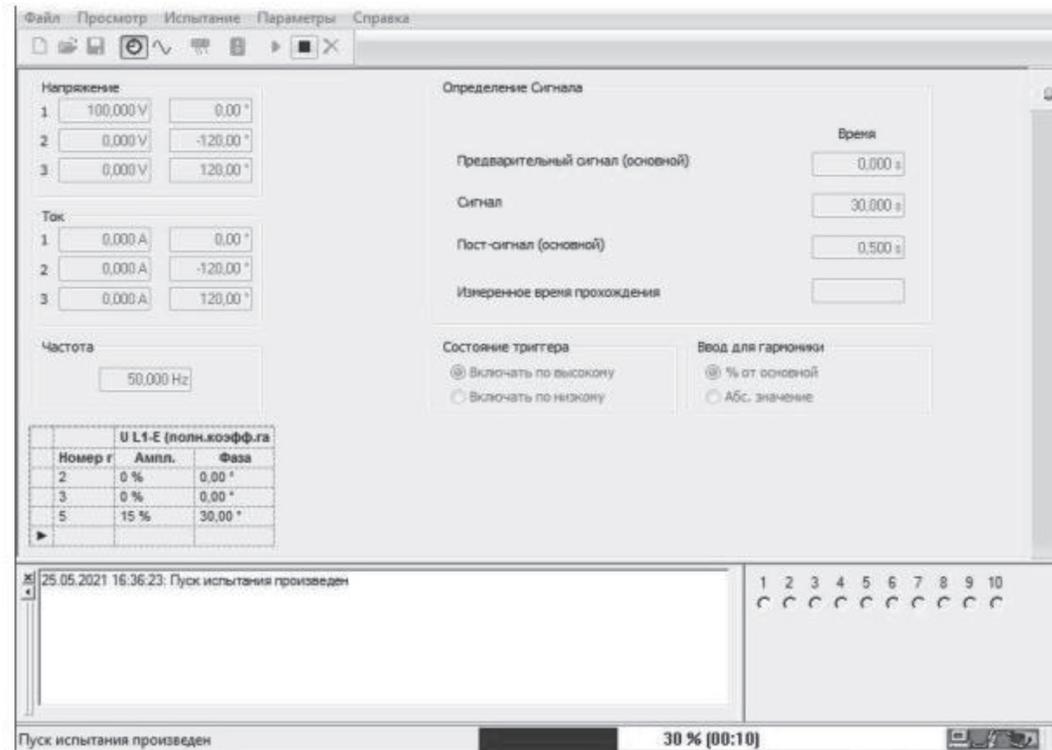


Рис. 2. Модуль Harmonics программного комплекса Test Universe

В среде графического программирования LabVIEW был создан виртуальный прибор (рис. 3), позволяющий производить считывание и обработку оцифрованных сигналов с системы сбора данных NI cDAQ-9172, с последующим экспортом результатов в текстовый файл.

Разработанный виртуальный прибор совместно с системой сбора данных позволяет производить синхронизированные измерения мгновенных значений тока и напряжения однофазного электроприемника. Результаты измерений экспортировались в текстовый файл в виде последовательностей единичных измерений мгновенных значений. Из текстового файла данные экспортировались в табличный редактор MS Excel для дальнейшей обработки.

В табличном редакторе данные обрабатывались посредством алгоритма дискретного преобразования Фурье по прямоугольному окну интегрирования. Помимо этого, производился расчет активной мощности, потребляемой исследуемым трансформатором на холостом ходу за период основной частоты сигнала первичного напряжения:

$$P = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N u_j i_j \quad (1)$$

где N – количество единичных отсчетов за период; u_j, i_j – мгновенные значения напряжения и тока.

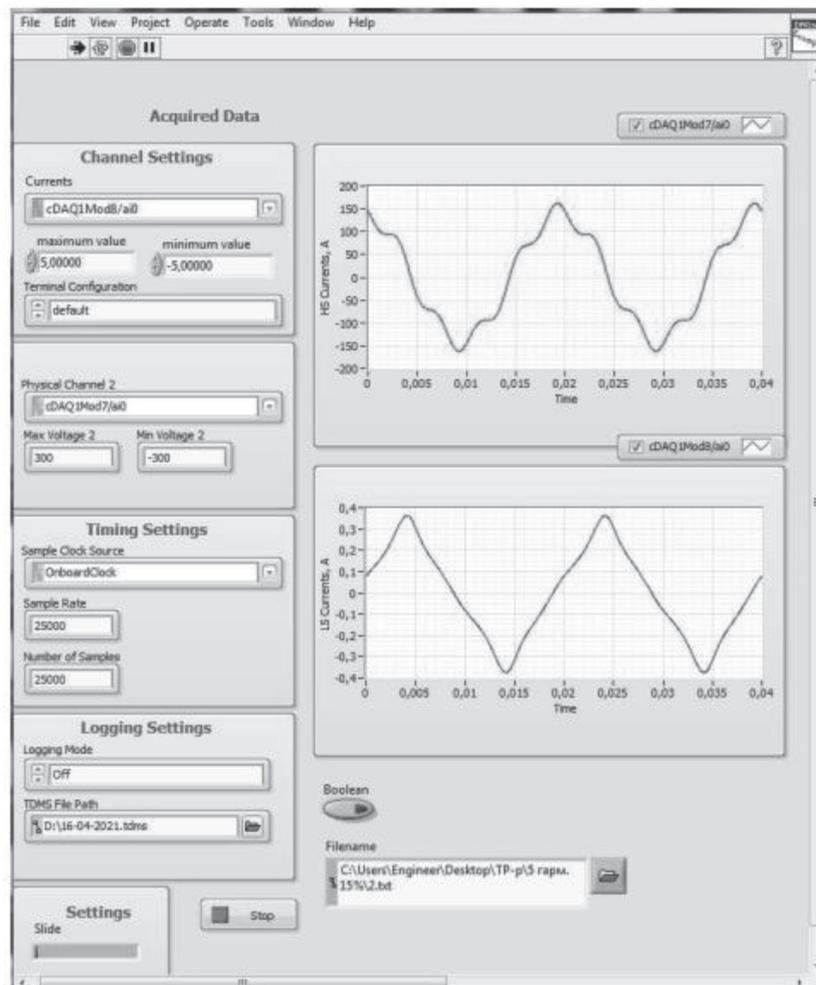


Рис. 3. Лицевая панель виртуального прибора

Предварительно был проведен опыт холостого хода для определения параметров ветви намагничивания, входящей Т-образную схему замещения трансформатора.

Для реализации опыта холостого хода на первичную обмотку трансформатора было подано напряжение немного ниже номинального для минимизации влияния эффекта насыщения на результаты измерений. Поскольку номинальное напряжение той обмотки, которая принята за первичную составляет 110 В, на вход было подано напряжение синусоидальной формы и частотой 50 Гц с действующим значением равным 99,98 В. Осциллограммы напряжения и тока в данном режиме приведены на рис. 4.

Как можно увидеть из осциллограммы тока, его форма в значительной степени искажена. Расчет спектрального состава показал, что в спектре тока достаточно явно присутствуют 3-я, 5-я и 7-я гармоники. Суммарный коэффициент высших гармоник тока составил:

$$THD_I = 13,9\%$$

При этом напряжение подавалось от эталонного источника и его суммарный коэффициент высших гармоник составлял:

$$THD_U < 0,01\%$$

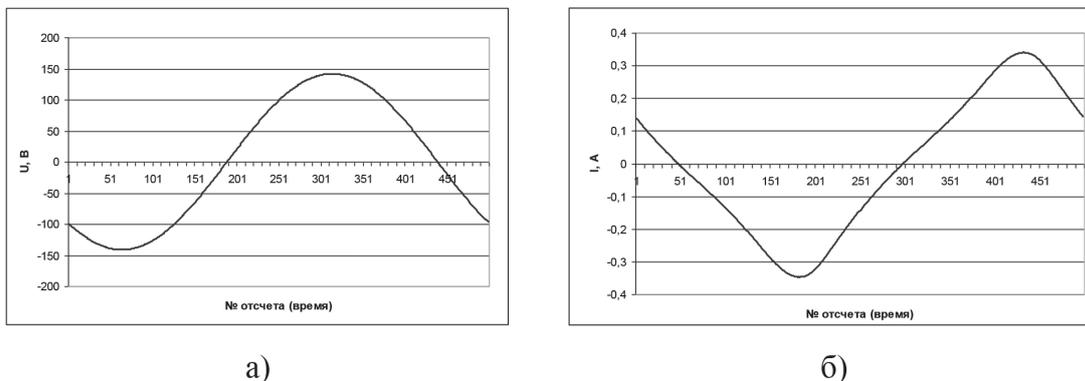


Рис. 4. Осциллограмма напряжения на первичной обмотке (а) и тока (б) трансформатора на холостом ходу (напряжение питания 99,98 В)

Таблица 1

Результаты опыта холостого хода

$U_1, \text{В}$	$I_{xx}, \text{А}$	$P_{xx}, \text{Вт}$	$Z_0, \text{Ом}$	$X_0, \text{Ом}$	$R_0, \text{Ом}$
99,98	0,2104	3,287	475,1	469,3	74,23

Для более объективной оценки параметров холостого хода был проведен расчет параметров холостого хода для 1-й гармоники тока при напряжении питания 99,98 В.

Результаты расчета представлены в таблице 2.

Таблица 2

Результаты расчета параметров холостого хода по 1-й гармонике

$U_1, \text{В}$	$I_{xx(1)}, \text{А}$	$P_{xx(1)}, \text{Вт}$	$Z_{0(1)}, \text{Ом}$	$X_{0(1)}, \text{Ом}$	$R_{0(1)}, \text{Ом}$
99,98	0,2084	3,287	479,7	473,7	75,67

Как можно увидеть из сравнения данных таблиц 3.1 и 3.2 параметры, определенные с использованием только 1-й гармоники тока, достаточно сильно совпадают с результатами, полученными в опыте без выделения ОГ тока.

Для оценки активного сопротивления магнитной системы в Т-образной схеме замещения трансформатора, активное сопротивление первичной обмотки R_1 было отделено активного сопротивления холостого хода R_0 :

$$R_\mu = R_0 - R_1 \quad (2)$$

Активное сопротивление трансформатора было измерено на постоянном токе и составило:

$$R_1 = 4,243 \text{ Ом.}$$

Полученные данные позволили отделить потери в ветви намагничивания от суммарных потерь активной мощности на холостом ходу.

Результаты исследований и их обсуждение / Research results and their discussion. В процессе экспериментальных исследований были проведены опыты, при которых в спектр напряжения питания были введены дополнительные гармонические составляющие. Эксперименты предусматривали поочередный ввод в спектр напряжения высших гармоник с номерами 3 и 5. Как правило, в сигналах тока и напряжения реальных сетей отсутствуют четные гармоники, поэтому в рамках эксперимента ВГ с четными номерами не рассматривались.

Гармоники вводились в спектр напряжения с различной амплитудой и различной начальной фазой. В процессе обработки результатов определялись потери активной мощности, из которых отделялись потери на активном сопротивлении первичной обмотки.

В рамках первого этапа эксперимента в спектр первичного напряжения была введена 3-я гармоника. В процессе эксперимента было проведено три серии опытов при различном уровне степени несинусоидальности результирующего сигнала. Формировались следующие уровни несинусоидальности: 5, 10 и 15 %.

В пределах каждой серии начальная фаза вводимой гармоники изменялась от 0 до 180° с шагом в 30°. В качестве примера на рис. 5 и 6 приведены осциллограммы напряжений и токов при различных начальных фазах 3-й гармоники напряжения. При этом начальная фаза вводимой гармоники отсчитывалась от начальной фазы ОГ.

В процессе эксперимента производилась оценка и расчет следующих параметров: действующее значение напряжения U_1 ; действующее значение тока холостого хода ИХХ; активная мощность холостого хода P_0 ; потери активной мощности в первичной обмотке ΔP_1 ; потери активной мощности в ветви намагничивания ΔP_μ .

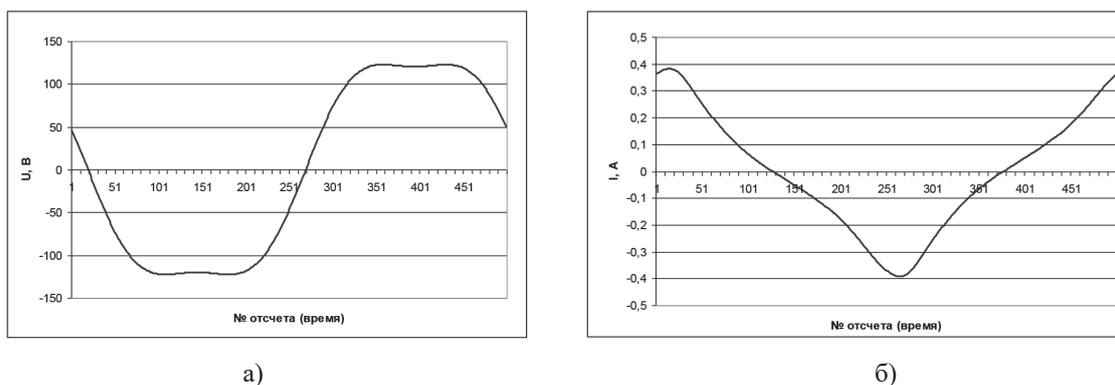


Рис. 5. Осциллограмма напряжения (а) и тока (б) при наличии в спектре напряжения 3-й гармоники с начальной фазой $\psi U(3) = 0^\circ$ ($\text{THD}_U = 15\%$)

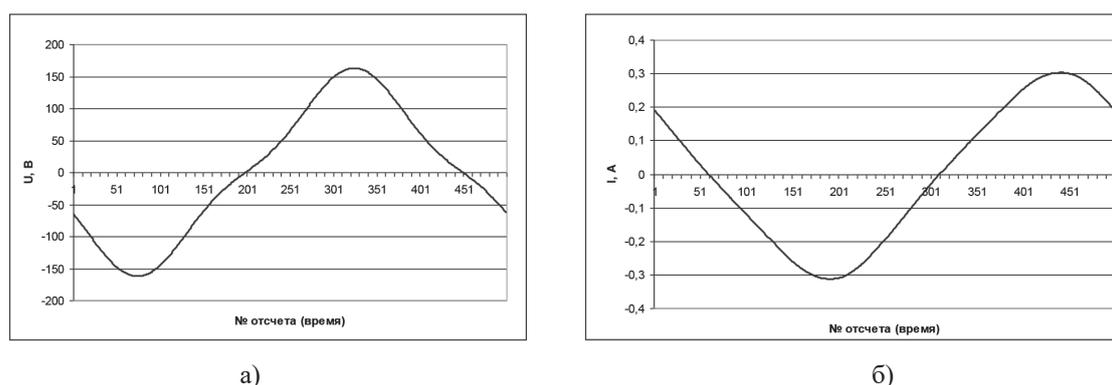


Рис. 6. Осциллограмма напряжения (а) и тока (б) при наличии в спектре напряжения 3-й гармоники с начальной фазой $\psi U(3) = 180^\circ$ ($\text{THD}_U = 15\%$)

Аналогичным образом был проведен эксперимент с введением в спектр напряжения 5-й гармоники. На рис. 7 и 8 приведены осциллограммы токов и напряжений при различных фазовых сдвигах 5-й гармоники относительно ОГ.

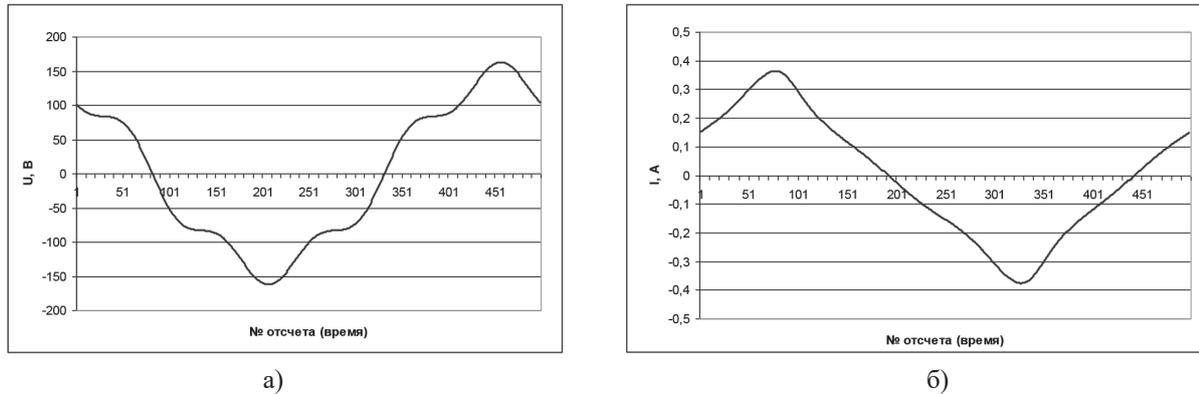


Рис. 7. Осциллограмма напряжения (а) и тока (б) при наличии в спектре напряжения 5-й гармоники с начальной фазой $\psi U(5) = 0^\circ$ ($THD_U = 15\%$)

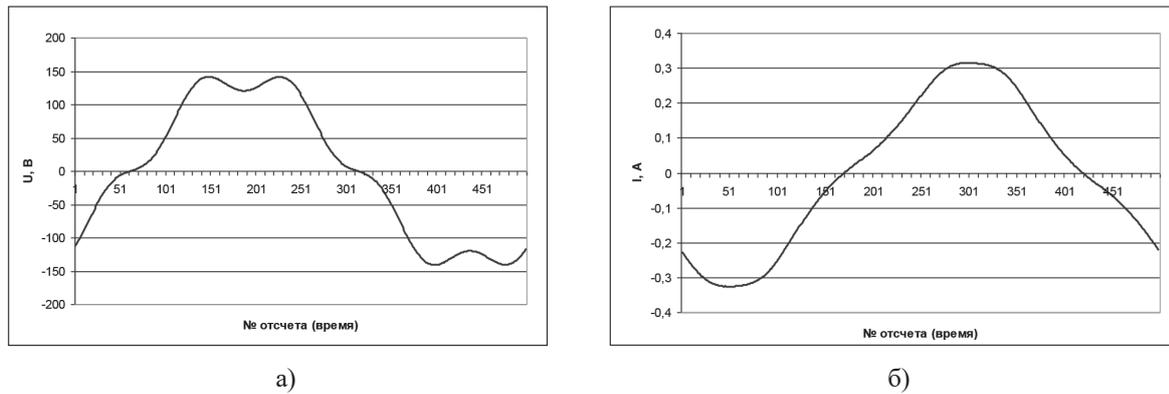


Рис. 8. Осциллограмма напряжения (а) и тока (б) при наличии в спектре напряжения 5-й гармоники с начальной фазой $\psi U(5) = 180^\circ$ ($THD_U = 15\%$)

Результаты оценки потерь активной мощности в ветви намагничивания при различных фазовых соотношениях ВГ и ОГ приведены в таблицах 3 и 4, а также на рис. 9 и 10.

Таблица 3

Результаты оценки потерь активной мощности при наличии в спектре напряжения 3-й гармоники

$THD_U, \%$	$\psi U(3), \text{град}$	$U_r, \text{В}$	$I_{\text{ХХ}}, \text{А}$	$P_0, \text{Вт}$	$\Delta P_r, \text{Вт}$	$\Delta P_\mu, \text{Вт}$
5	0	100,11	0,2133	3,3	0,193	3,107
	30	100,11	0,2121	3,288	0,1917	3,091
	60	100,11	0,2117	3,27	0,1902	3,079
	90	100,11	0,2105	3,254	0,188	3,066
	120	100,11	0,2092	3,244	0,1857	3,059
	150	100,11	0,2085	3,232	0,1844	3,048
	180	100,11	0,2086	3,182	0,1846	2,997
10	0	100,48	0,2162	3,362	0,1983	3,163
	30	100,48	0,2152	3,354	0,1964	3,158
	60	100,48	0,213	3,348	0,1924	3,1381
	90	100,48	0,2105	3,266	0,1879	3,078

THD _U , %	$\psi U(3)$, град	U_p , В	I_{XX} , А	P_0 , Вт	ΔP_p , Вт	ΔP_μ , Вт
10	120	100,48	0,2081	3,212	0,1838	3,029
	150	100,48	0,2068	3,165	0,1814	2,984
	180	100,48	0,2068	3,142	0,1814	2,96
15	0	101,1	0,2195	3,435	0,2044	3,231
	30	101,1	0,218	3,424	0,2016	3,223
	60	101,1	0,2148	3,383	0,1957	3,187
	90	101,1	0,2107	3,307	0,1884	3,119
	120	101,1	0,2071	3,229	0,182	3,047
	150	101,1	0,2051	3,152	0,1784	2,974
	180	101,1	0,2052	3,117	0,1787	2,938

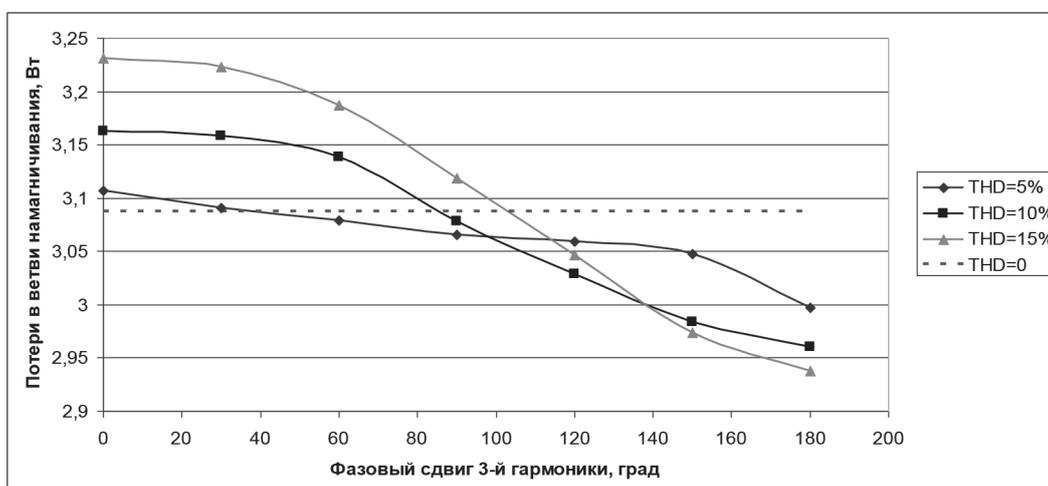


Рис. 9. Зависимость потерь в ветви намагничивания от начальной фазы 3-й гармоники при различном уровне несинусоидальности

Таблица 4

Результаты оценки потерь активной мощности при наличии в спектре напряжения 5-й гармоники

THD _U , %	$\psi U(3)$, град	U_p , В	I_{XX} , А	P_0 , Вт	ΔP_p , Вт	ΔP_μ , Вт
10	0	100,48	0,2115	3,3001	0,1898	3,1104
	30	100,48	0,211	3,295	0,1889	3,1061
	60	100,48	0,2104	3,2767	0,1879	3,0888
	90	100,48	0,21	3,253	0,1871	3,0659
	120	100,48	0,2099	3,225	0,1869	3,0381
	150	100,48	0,2102	3,1984	0,1875	3,011
	180	100,48	0,2109	3,1903	0,1887	3,0016
15	0	101,1	0,212	3,3517	0,1908	3,161
	30	101,1	0,2113	3,3456	0,1895	3,1561
	60	101,1	0,2105	3,3199	0,188	3,1318

THD _U , %	$\psi U(3)$, град	U, В	I _{XX} , А	P ₀ , Вт	ΔP_1 , Вт	ΔP_μ , Вт
15	90	101,1	0,2105	3,3195	0,188	3,1045
	120	101,1	0,2094	3,2435	0,1861	3,0575
	150	101,1	0,2098	3,2041	0,1868	3,0173
	180	101,1	0,2111	3,1809	0,189	2,9919

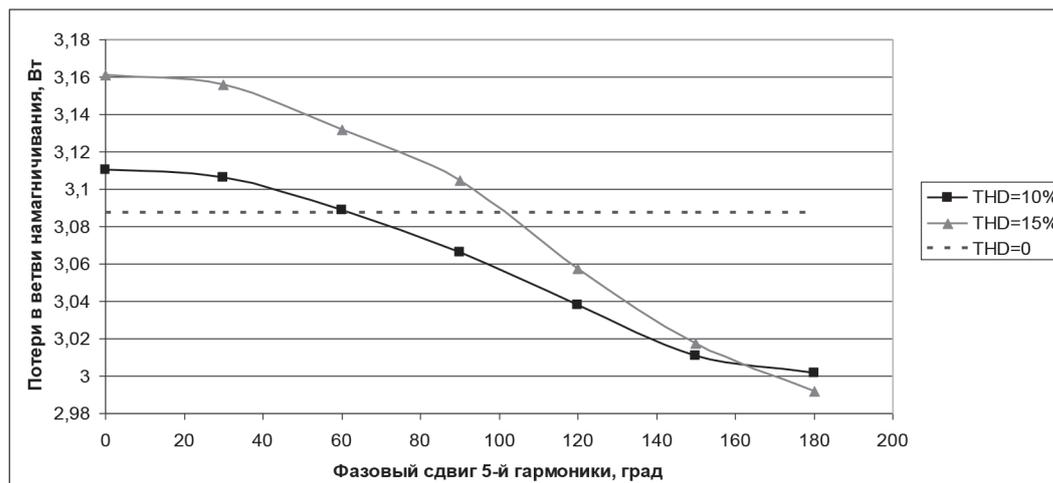


Рис. 10. Зависимость потерь в ветви намагничивания от начальной фазы 5-й гармоники при различном уровне несинусоидальности

Приведенный анализ показывает, что при одном и том же уровне несинусоидальности фазовый сдвиг высших гармоник заметно влияет на величину активных потерь в ветви намагничивания. Причем возможны ситуации, при которых меньший уровень несинусоидальности напряжений соответствует большему уровню потерь в ветви намагничивания. Об этом свидетельствует наличие точек пересечения на графиках рис. 9 и 10.

Заключение / Conclusion. На основании всего изложенного можно сформулировать следующие выводы:

- 1) Экспериментально выявлено, что потери холостого хода трансформатора зависят не только от уровня высших гармоник, но и от соотношения начальных фаз этих гармоник. Предположительная причина этого – нелинейность кривой намагничивания трансформатора и возникновение явления насыщения.
- 2) Анализ показал, что при одном и том же уровне несинусоидальности фазовый сдвиг высших гармоник заметно влияет на величину активных потерь в ветви намагничивания. Причем возможны ситуации, при которых меньший уровень несинусоидальности напряжений соответствует большему уровню потерь в ветви намагничивания.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Анализ спектрального состава токов в сетях, питающих коммунально-бытовую нагрузку / А. В. Петров, Д. А. Костюков, И. А. Орсев, А. Ю. Шпигоцкая // Актуальные проблемы инженерных наук : Материалы VII-й (64) ежегодной НПК Северо-Кавказского федерального университета «Университетская наука - региону», Ставрополь, 03–29 апреля 2019 года. Ставрополь: Издательский дом "Тэсэра", 2019. С. 53–59.

2. Моделирование работы силового трансформатора при высоком уровне высших гармоник / Р. Г. Вильданов, А. Р. Вахитова, И. И. Габидуллин, Р. И. Кудояров // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2017. № 133. С. 24–29.
3. Определение потерь в стали трансформатора при различных частотах и несинусоидальности магнитного потока с учетом соотношения гистерезисных и вихревых потерь / В. П. Чайковский, Е. П. Насыпаная, А. И. Мартынюк // Электромашиностроение и электрооборудование. 2008. № 71. С. 61–63.
4. Васильева Т. Н., Аронов Л. В. Дополнительные потери мощности в силовых трансформаторах, обусловленные несинусоидальностью напряжений // Технические науки в России и за рубежом (II) : материалы II Международной научной конференции, Москва, 20–23 ноября 2012 года. Москва: КТ "Буки-Веди", 2012. С. 79–81.
5. Зябкин А. А., Вейнблат А. В. Зависимость добавочных потерь в трансформаторах ТМПН от частоты и несинусоидальности питающего напряжения // Культура, наука, образование: проблемы и перспективы : материалы II Всероссийской НПК, Нижневартовск, 08 февраля 2013 года / Ответственный редактор А. В. Коричко. Нижневартовск: Нижневартовский государственный университет, 2013. С. 80–82.
6. Ефремов Н. С., Рыбаков Л. М. О высших гармониках тока, генерируемых трансформаторами малой мощности // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2012. № 8. С. 54–58.
7. Оценка дополнительных потерь мощности от высших гармоник в элементах систем электроснабжения / А. Г. Лютаевич, А. А. Вырва, С. Ю. Долингер [и др.] // Омский научный вестник. 2009. № 1(77). С. 109–113.

REFERENCES

1. Analysis of the spectral composition of currents in networks supplying domestic loads / Petrov A. V., Kostyukov D. A., Orsaev I. A., Shpigotskaya A. Yu. // Actual problems of engineering sciences: Materials of the VIIth (64) the annual scientific and practical conference of the North Caucasus Federal University "University science – the region", Stavropol, April 03–29, 2019. Stavropol: Tesera Publishing House, 2019. P. 53–59. (In Russ.).
2. Modeling the operation of a power transformer at a high level of higher harmonics / Vildanov R.G., Vakhitova A.R., Gabidullin I.I., Kudoyarov R.I. // Polythematic network electronic scientific journal of the Kuban State Agrarian University. 2017. No. 133. P. 24–29. (In Russ.).
3. Chaikovskiy V.P., Nasypanaya E.P., Martynuk A.I. Determination of losses in transformer steel at different frequencies and non-sinusoidality of the magnetic flux, taking into account the ratio of hysteresis and eddy losses. 2008. No. 71. P. 61–63. (In Russ.).
4. Vasilyeva T.N., Aronov L.V. Additional power losses in power transformers due to non-sinusoidal voltages // Technical sciences in Russia and abroad (II): materials of the II International Scientific Conference, Moscow, November 20–23, 2012. Moscow: KT "Buki-Vedi", 2012. P. 79–81. (In Russ.).
5. Zyabkin A. A., Veinblat A. V. Dependence of additional losses in TOSP transformers on the frequency and non-sinusoidality of the supply voltage // Culture, science, education: problems and prospects: Materials of the II All-Russian Scientific and Production Complex, Nizhnevartovsk, February 08, 2013 / Managing editor A.V. Korichko. Nizhnevartovsk: Nizhnevartovsk State University, 2013. P. 80–82. (In Russ.).
6. Efremov N. S., Rybakov L. M. On higher current harmonics generated by low power transformers // Electrical equipment: operation and repair. 2012. No. 8. P. 54–58. (In Russ.).
7. Lyutarevich A. G., Vyrva A. A., Dolinger S. Yu. [et al.] Estimation of additional power losses from higher harmonics in elements of power supply systems // Omsk Scientific Bulletin. 2009. No. 1 (77). P. 109–113. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Петров Антон Васильевич – доцент, кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизированных электроэнергетических систем и электроснабжения Инженерного института СКФУ, anvpetrov@ncfu.ru, Scopus ID: 57210523416.

Мартусенко Виталий Евгеньевич – старший преподаватель кафедры автоматизированных электроэнергетических систем и электроснабжения Инженерного института СКФУ, vmartusenko@ncfu.ru.

Гордиенко Ксения Сергеевна – студент кафедры автоматизированных электроэнергетических систем и электроснабжения Инженерного института СКФУ, 1vizalis1@gmail.com.

Редькин Вячеслав Владимирович – студент кафедры автоматизированных электроэнергетических систем и электроснабжения Инженерного института СКФУ, venzeli4@mail.ru.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Anton V. Petrov – Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, the Department of Automated Electric Power Systems and Power Supply, Engineering Institute, North-Caucasus Federal University, anvpetrov@ncfu.ru, Scopus ID: 57210523416.

Vitalij E. Martusenko – Senior Lecturer, the Department of Automated Electric Power Systems and Power Supply, Engineering Institute, North-Caucasus Federal University, vmartusenko@ncfu.ru.

Ksenija S. Gordienko – student, the Department of Automated Electric Power Systems and Power Supply, Engineering Institute, North-Caucasus Federal University, 1vizalis1@gmail.com.

Vjacheslav V. Redkin – student, the Department of Automated Electric Power Systems and Power Supply, Engineering Institute, North-Caucasus Federal University, venzeli4@mail.ru.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.