

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК 621.31

DOI: 10.22213/2410-9304-2020-2-4-13

Система исследования работы однофазного трансформатора с нелинейной нагрузкой

В. К. Барсуков, кандидат технических наук, профессор, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова,
Ижевск, Россия

О. Л. Гизатуллина, старший преподаватель, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

М. Л. Новоселов, старший преподаватель, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

В работе представлено исследование однофазного силового трансформатора с использованием системы, построенной на базе промышленного контроллера и плат сбора данных от компании National Instruments в качестве аппаратной части и среды графического программирования NI LabVIEW в качестве программной части. Показан способ изменения типа нагрузки при помощи транзистора, работающего в ключевом режиме, что позволяет более точно моделировать работу импульсной нагрузки по сравнению с системами на базе симистора. В графическом виде представлена информация о форме тока в первичной и вторичной обмотке трансформатора, спектральный состав токов и петли гистерезиса, характеризующей потери на перемагничивание сердечника. В табличном виде представлена информация процентного отношения высших гармоник к основной. Для получения результатов трансформатор последовательно подключался к нагрузке с различным коэффициентом нелинейных искажений по току, от 5 до 44 %, что соответствует 100 и 30 % открытию транзистора. При сравнении результатов работы трансформатора с активной и импульсной нагрузкой показано увеличение высших гармоник тока и амплитудного значения тока во вторичной обмотке трансформатора при импульсной нагрузке и, как следствие этого, заметное увеличение потерь на перемагничивание в стали, характеризующееся уширением петли гистерезиса. По полученным результатам сделаны выводы о необходимости внедрения мероприятий по фильтрации высших гармоник либо корректировки коэффициента загрузки трансформатора в меньшую сторону.

Ключевые слова: нелинейная нагрузка, высшие гармоники, потери в трансформаторе, NI LabVIEW.

Введение

Рост нелинейных потребителей, особенно в бытовом секторе, является следствием использования устройств и электронной техники с импульсными источниками питания. Рост числа и популярность импульсных источников питания объясняется тем, что они имеют высокий коэффициент полезного действия (КПД), меньшие габариты при той же номинальной мощности и экономически выгодны в производстве по сравнению с линейными источниками питания, но, потребляя ток в импульсном режиме, они становятся источниками высших

гармоник в электрических сетях [1]. Высшие гармоники оказывают влияние на большую часть компонентов электросети, вызывая следующие негативные факторы:

- перегрев вращающихся машин из-за возникающих вихревых токов и поверхностного эффекта в проводниках статора и ротора [2];
- преждевременное старение изоляции кабельных линий [3];
- перегрев трансформаторов, связанный с вихревыми токами в стали и увеличением потерь на гистерезис [4], а также с воздействием утроенного протекающего тока ну-

левой последовательности при соединении трехфазного трансформатора по схеме «треугольник» [5];

- сокращение срока службы изоляции трансформаторов;

- нарушения в работе и ложные срабатывания устройств релейной защиты и автоматики, основанных на измерении сопротивлений на основной частоте [6];

- увеличение погрешностей при использовании измерительных трансформаторов напряжения [7];

- перегрев и выход из строя батарей статических конденсаторов, реактивное сопротивление которых падает с ростом частоты гармоник.

Одним из важнейших компонентов электрической сети является трансформатор. Основными параметрами, характеризующими работу трансформатора, являются: номинальное напряжение первичной и вторичной обмоток, номинальный ток первичной и вторичной обмоток, номинальная мощность. Все эти параметры указаны в паспорте изделия и характерны для работы трансформатора при синусоидальном напряжении на линейную нагрузку. При увеличении доли нелинейных потребителей искажается форма напряжения как питающей сети 0,4 кВ, так и распределительных сетей 6–10 кВ, появляется эффект «срезанных» вершущек, уменьшающий значение действующего напряжения у синусоидального сигнала. При значительной просадке напряжения при этом эффекте на подстанции срабатывает система автокоррекции и

напряжение увеличивается до номинального, при этом искаженная форма синусоиды остается и до потребителей идет напряжение с формой, приближенной к трапецеидальной. При изменении формы напряжения в сети изменяется характер работы трансформатора [8], и его параметры будут отличаться от паспортных значений.

Целью данной работы является создание измерительной системы исследования однофазного трансформатора, которая позволяет определять основные параметры работы трансформатора в режиме реального времени, снимать характеристики потерь трансформатора с возможностью изменения типа нагрузки от полностью активной до импульсной, с различным коэффициентом нелинейных искажений (КНИ).

Аппаратная часть системы

Для снятия основных параметров трансформатора в измерительной системе применяются устройства сбора данных NI-USB6009 (рис. 1), для изменения характера нагрузки используются: блок формирования опорного сигнала (ФОС), устройство-шасси NI cRIO-9076 на основе промышленного контроллера реального времени с использованием перенастраиваемого интерфейса ввода-вывода для цифровых линий NI 9401 и блок формирования нагрузки (ФН). Для ограничения напряжения первичной цепи при подаче его на устройство NI USB-6009, а также для его обеспечения гальванической развязки с сетью используется блок гальванической развязки (БГР).

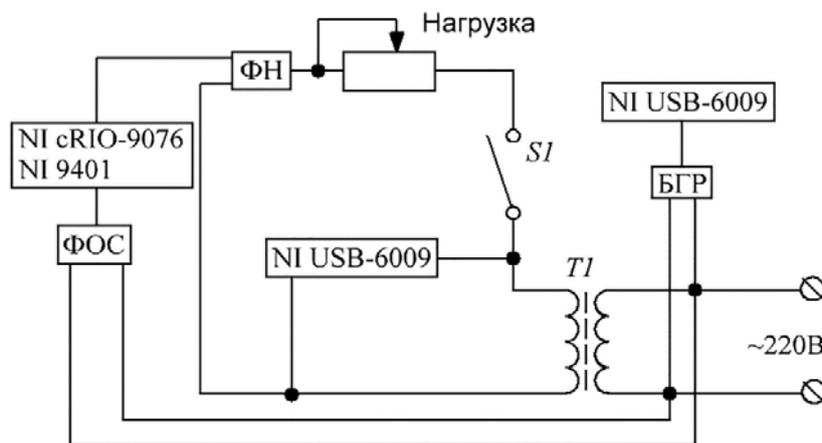


Рис. 1. Функциональная схема измерительной системы

Блок ФОС используется для синхронизации устройства NI cRIO-9076 с электрической сетью. Основными компонентами схемы (рис. 2) являются трансформатор $T1$, диодный мост $VD1$ и логическая микросхема

$IC1$. Трансформатор уменьшает фазное напряжение и обеспечивает гальваническую развязку от питающей сети. Диодный мост формирует импульсный сигнал с частотой 100 Гц.

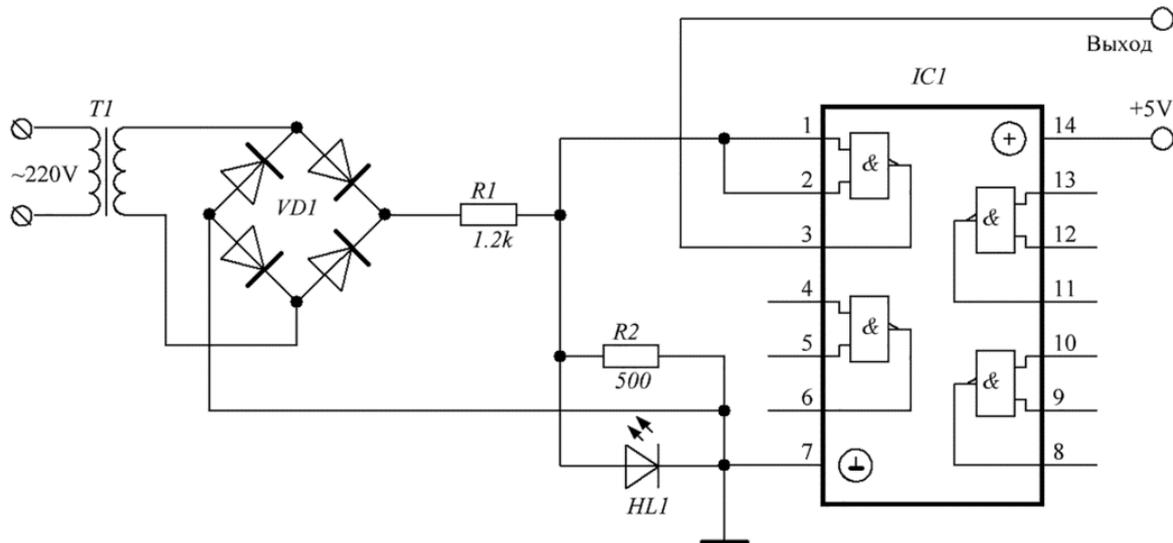


Рис. 2. Электрическая принципиальная схема блока формирования опорного сигнала

Микросхема преобразует этот сигнал в логический для дальнейшего его использования в устройстве NI cRIO-9076 с модулем NI 9401. Промышленный контроллер реального времени NI cRIO-9076 имеет малые задержки, управляя сигналами на цифровых входах с частотой до 100 нс, он позволяет очень точно регулировать время включения и выключения транзистора, при этом про-

исходит имитация работы трансформатора на импульсную нагрузку.

Управляемые импульсы с модуля NI 9401 подаются в блок формирования нагрузки. Схема блока (рис. 3) состоит из оптопары $VA1$, управляющей полевым транзистором $VT1$. Транзистор в открытом состоянии формирует подключение нагрузки к трансформатору через диодный мост $VD1$.

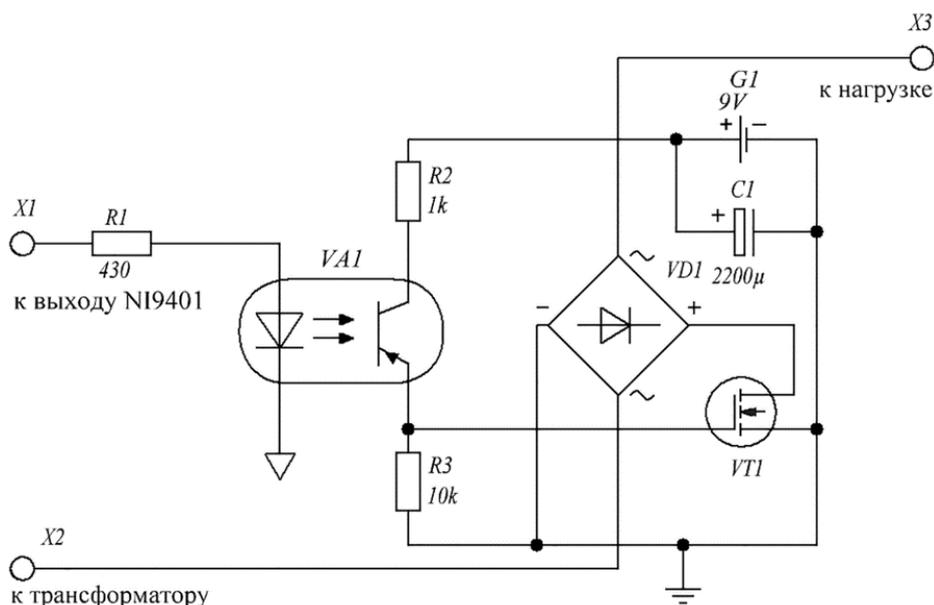


Рис. 3. Электрическая принципиальная схема блока формирования нагрузки

Программная часть системы

Программа, выполненная в среде графического программирования NI LabVIEW, называется виртуальным прибором. Поток данных поступает на аналоговые входы устройств NI-USB6009 и оцифровывается с частотой дискретизации 5 кГц. Далее оцифрованные значения напряжений и токов первичной и вторичной обмоток испытываемого трансформатора обрабатываются в виртуальном приборе. Виртуальный прибор реализует следующие задачи:

- формирование осциллограмм токов и напряжений в обмотках;
- вычисление среднеквадратичного значения тока в обмотках трансформатора по формуле

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt},$$

где T – период изменения тока в обмотке, $i(t)$ – мгновенное значение тока в обмотке;

- вычисление среднеквадратичного значения напряжения в обмотках трансформатора:

$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt},$$

где T – период изменения напряжения в обмотке; $u(t)$ – мгновенное значение напряжения в обмотке;

- вычисление значения активной мощности, потребляемой из сети:

$$P_1 = \frac{1}{T} \int_0^T [u_1(t) \cdot i_1(t)] dt;$$

- вычисление значения полной мощности в первичной обмотке трансформатора:

$$S = U_1 \cdot I_1;$$

- построение кривой намагничивания $B = f(H)$ для магнитопровода трансформатора;
- вычисление коэффициент нелинейных искажений (КНИ) тока:

$$THD_i = \sqrt{\frac{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}{I_1}} \cdot 100\%,$$

где I_1 – значение первой гармоники тока; h – порядковый номер гармоники.

Виртуальный прибор в среде графического программирования NI LabVIEW состоит из двух частей: блок-диаграмма и лицевая панель. Блок-диаграмма состоит из набора функциональных блоков, блоков управления, индикации, линий связи, логических элементов, констант и т. д., в конечном итоге вся схема представляет собой совокупность математических операций, представленных в графическом виде. Лицевая панель виртуального прибора представляет собой совокупность индикаторов, выводящих информацию, необходимую пользователю, и элементов управления, необходимых для контроля работы программы и корректировки параметров при наладке. Общий вид структуры блок-диаграммы представлен на рис. 4.

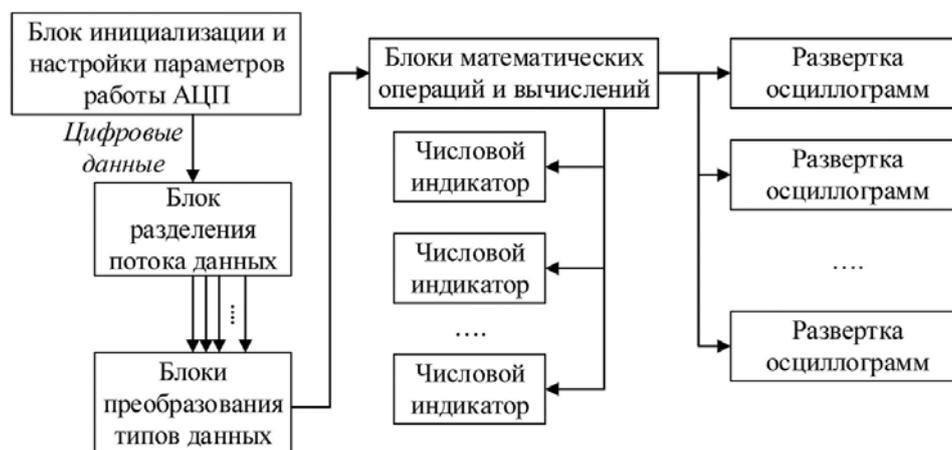


Рис. 4. Структурная схема блок-диаграммы виртуального прибора

Блок инициализации и настройки параметров работы аналого-цифрового преобразователя (АЦП) инициализирует работу АЦП с возможностью настройки следующих параметров: частота дискретизации, количество точек для вывода оцифрованных данных, диапазон входных напряжений, синхронизация с входным сигналом.

Блок разделения потока данных позволяет выделить отдельные каналы данных из общего потока, получаемого с АЦП, и работать с каждым каналом в отдельности.

Блоки преобразования типов данных необходимы для конвертирования данных одного типа, чаще всего динамического, в тип данных, необходимый для правильной ра-

боты блоков математических операций и вычислений.

Блоки математических операций и вычислений – основная часть программы, все математические преобразования и вычисления производятся при помощи этих блоков. Вся информация, полученная в ходе вычисления, выводится на лицевую панель виртуального прибора при помощи числовых и графических индикаторов.

Блок-диаграмма виртуального прибора представлена на рис. 5.

Для контроллера NI cRIO-9076 используется свой виртуальный инструмент, блок-диаграмма которого представлена на рис. 6.

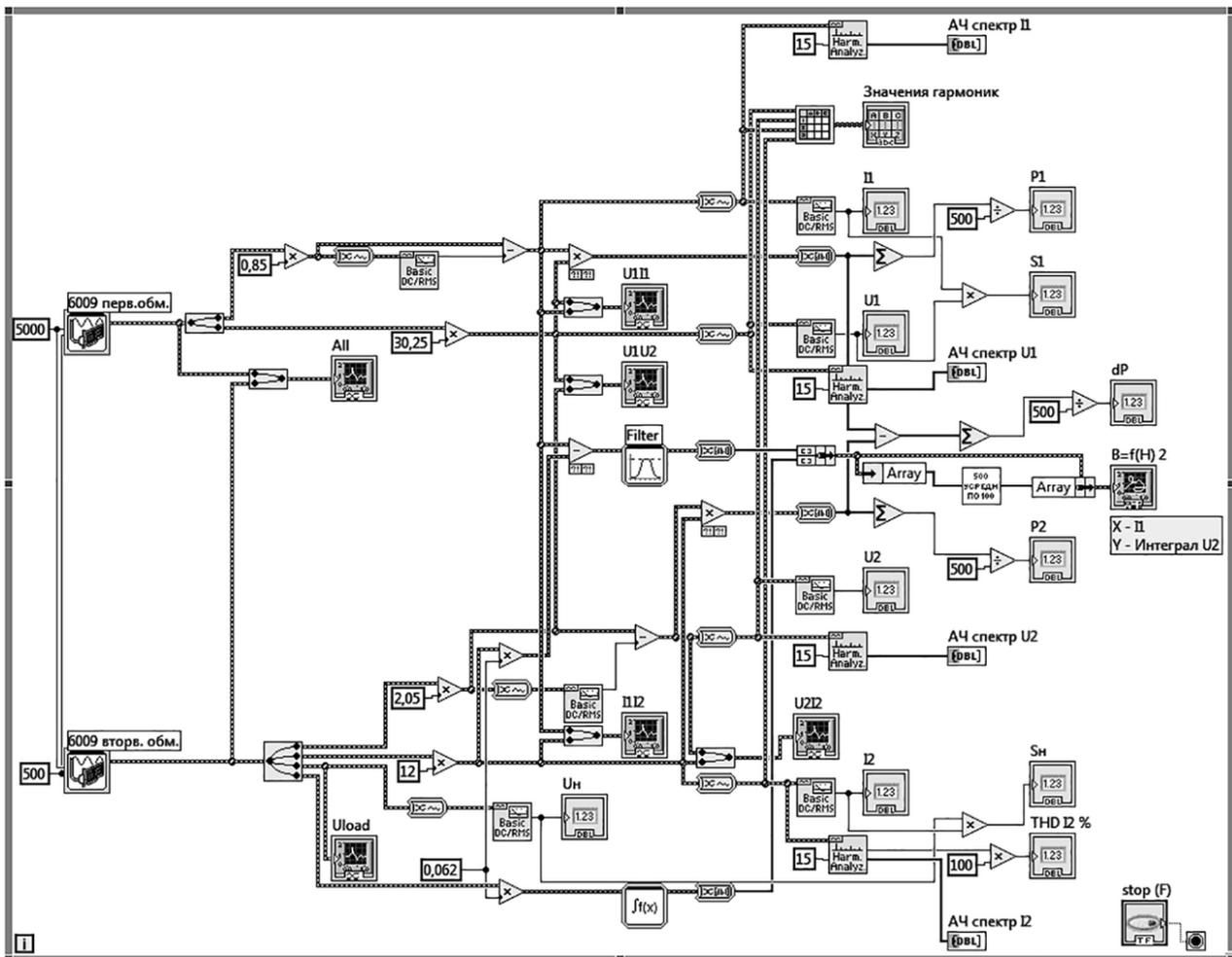


Рис. 5. Блок-диаграмма виртуального прибора

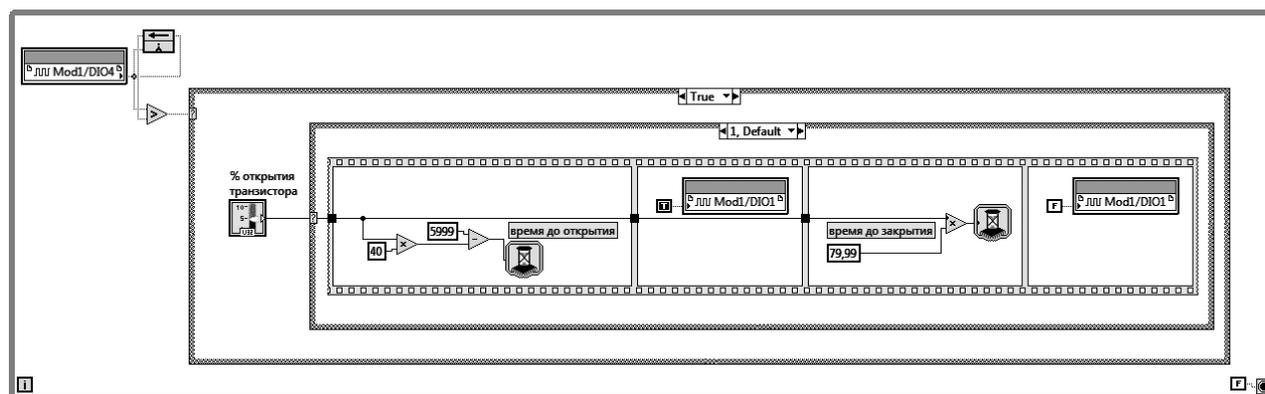


Рис. 6. Блок-диаграмма виртуального прибора для контроллера NI cRIO-9076

Виртуальный прибор позволяет регулировать время открытия и закрытия транзистора, в результате можно в реальном времени изменять форму напряжения на на-

грузке, моделируя тип нагрузки от активной до импульсной.

Пример формы напряжения на нагрузке при различной степени открытия транзистора представлен на рис. 7.

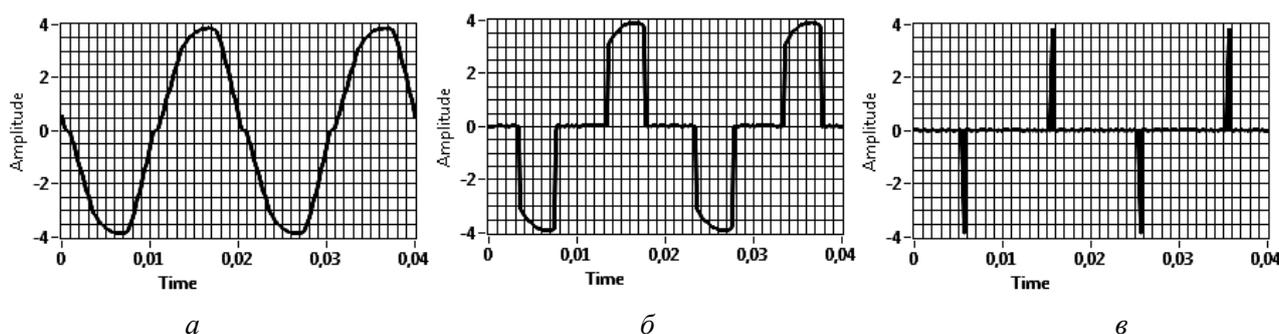


Рис. 7. Формы напряжения на нагрузке:
 а – транзистор открыт на 100 %, б – на 50 %, в – на 1 %

Эксперимент

Для эксперимента был выбран однофазный силовой трансформатор ТС-180-2 мощностью 180 ВА. При подключении трансформатора на линейную активную нагрузку при номинальном напряжении формируется петля гистерезиса, представленная на рис. 8. КНИ тока во вторичной обмотке равен 5 %. Гармонические спектры токов первичной и вторичной обмоток представлены на рис. 10. По гармоническому составу тока видно увеличенную третью гармонику в первичной обмотке, она составляет около 22 % от величины первой гармоники. Значения высших гармоник в процентном отношении относи-

тельно первой гармоники вычислены по формуле

$$THD_{i\%} = \frac{THD_{iN}}{THD_{i1}} \cdot 100\%,$$

где THD_{iN} – КНИ тока в N -й гармонике; THD_{i1} – КНИ тока в первой гармонике. Результаты представлены в табл. 1. Форму тока в обмотках трансформатора можно увидеть на рис. 9. Явление несинусоидального тока в первичной обмотке трансформатора объясняется искаженной формой питающего напряжения в сети и нелинейностью петли гистерезиса.

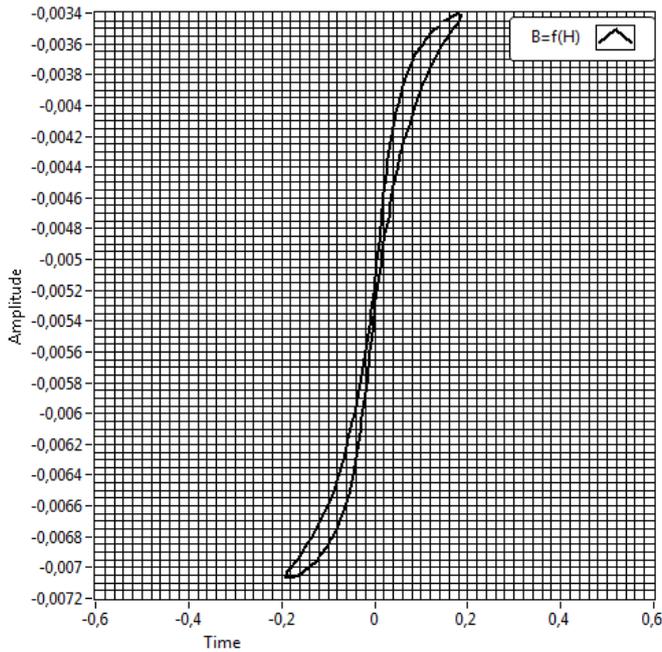


Рис. 8. Петля гистерезиса при подключении линейной активной нагрузки

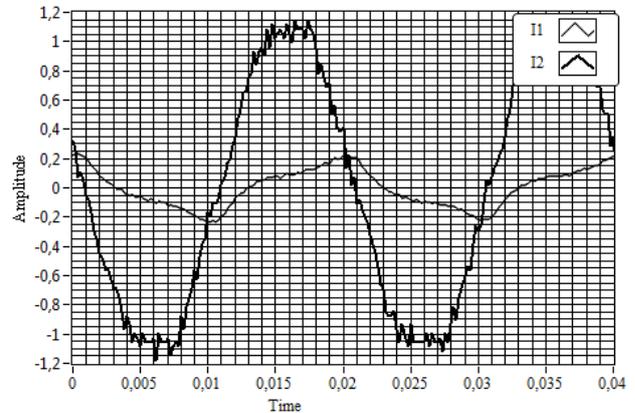
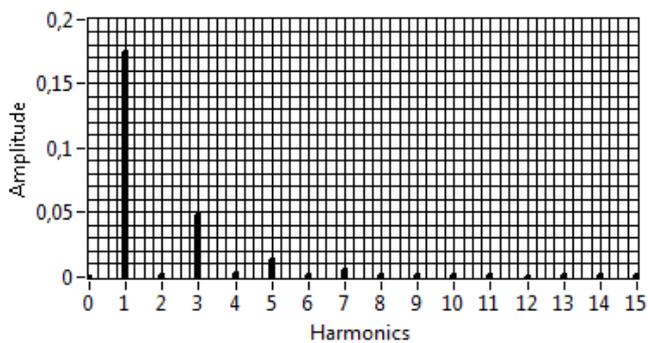


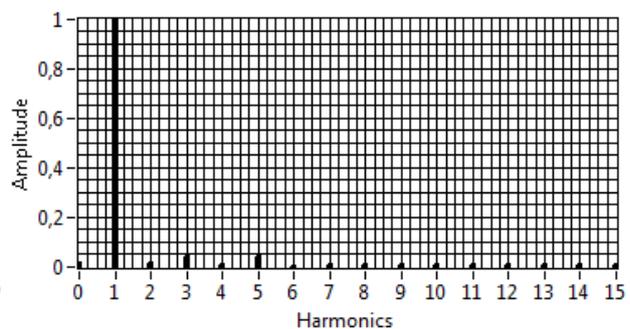
Рис. 9. Форма тока в первичной I_1 и вторичной I_2 обмотках трансформатора

Таблица 1. Процентное соотношение токов высших гармоник к первой

$THD_i\%$	3	5	7	9	11	13	15
I_1	27,5	1,8	7,6	0,5	3,1	0,4	1,1
I_2	3,4	0,6	3,3	0,2	0,6	0,5	0,9



а



б

Рис. 10. Амплитудный спектр гармоник тока в первичной (а) и вторичной (б) обмотках при подключении линейной активной нагрузки

При подключении трансформатора на импульсную нагрузку, без изменения значения полной мощности, характеристика перемещения сердечника будет иметь вид, представленный на рис. 11. Форма петли изменяется по причине протекания импульсных токов по обмоткам трансформатора, при этом потери на перемещение возросли, по сравнению с активной нагрузкой. КНИ тока вторичной обмотки равен

44 %. Гармонический состав тока (рис. 10) показывает рост высших гармоник тока как в первичной обмотке: наибольшее изменение по 7-й и 11-й гармоникам – прирост составляет около 3 %, так и во вторичной обмотке: наибольший прирост отмечен в 3-й и 7-й гармониках, он составляет около 30 и 20 % соответственно (табл. 2). Токи первичной и вторичной обмоток представлены на рис. 12, 13.

Таблица 2. Процентное соотношение высших гармоник к первой

$THD_i\%$	3	5	7	9	11	13	15
I_1	27,9	1,4	10,9	0,6	6,6	0,4	2,3
I_2	32,4	1,1	22,9	0,8	12,5	0,6	2,6

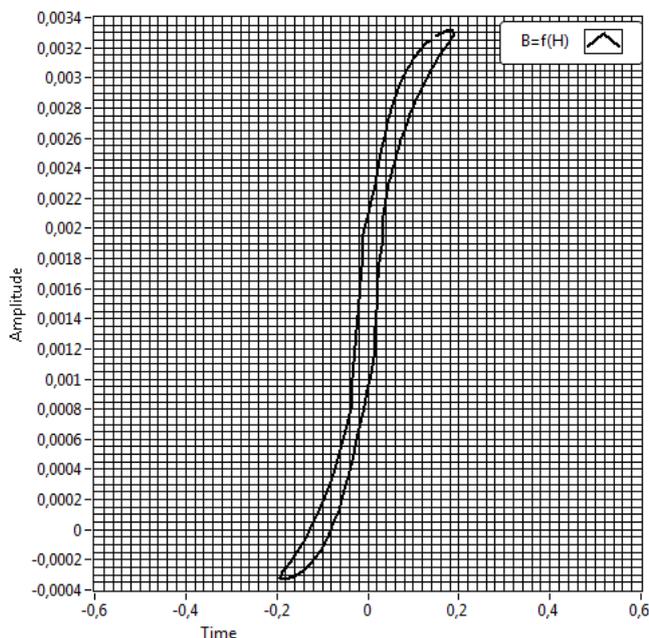


Рис. 11. Петля гистерезиса при подключении импульсной нагрузки

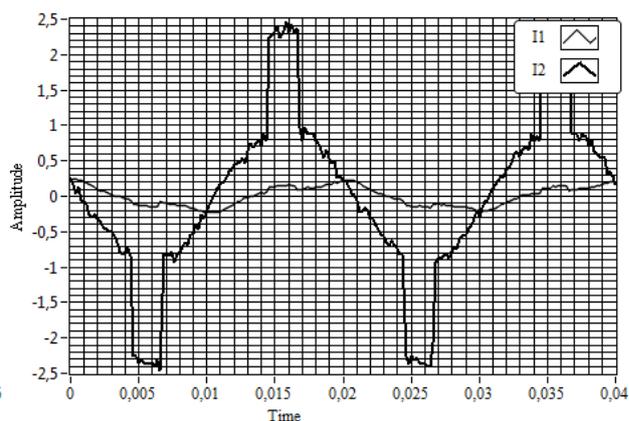


Рис. 12. Форма тока в первичной и вторичной обмотках трансформатора

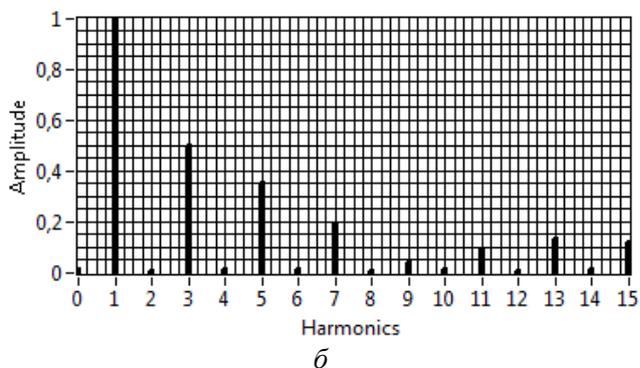
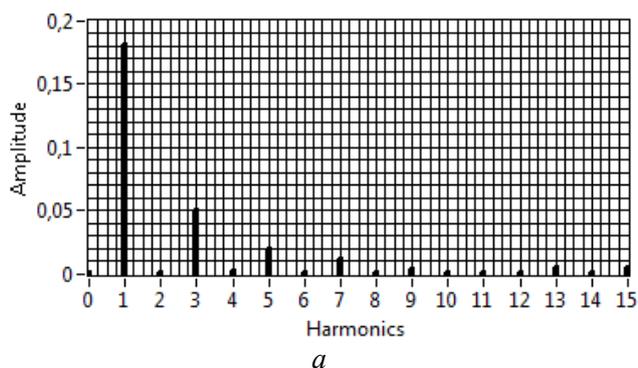


Рис. 13. Амплитудный спектр гармоник тока в первичной (а) и вторичной (б) обмотках при подключении импульсной нагрузки

Анализ результатов

Таким образом, при увеличении импульсного тока во вторичной обмотке меняется форма тока и в первичной, при этом активная мощность, снимаемая со вторичной обмотки трансформатора, увеличилась почти на 70 %. А учитывая, что значение амплитуды тока во вторичной обмотке при подключении к импульсной нагрузке примерно в 2 раза превышает значение амплитуды тока при подключении к линейной на-

грузке (рис. 9; 12), необходимо разрабатывать систему мероприятий [9], уменьшая гармониками силовыми фильтрами высших гармоник [10] или корректируя коэффициент загрузки трансформатора, если он подключен к потребителям с импульсным характером потребления тока [11]. В противном случае возможно увеличение потерь, перегрев и преждевременный выход трансформатора из строя.

Выводы

Полученная система позволяет исследовать работу трансформатора при различной нагрузке, при этом тип нагрузки формируется при помощи промышленного контроллера реального времени, который благодаря высокой частоте способен управлять транзистором, коммутирующим нагрузку, с высокой точностью. Данную систему можно применять для лабораторных и исследовательских работ студентов направления 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» по дисциплине «Электрические и электронные аппараты». Дальнейшее развитие системы предполагает расширение функционала и получение возможности исследования трехфазных трансформаторов.

Библиографические ссылки

1. Новоселов М. Л., Барсуков В. К., Гизатулина О. Л. Анализ параметров работы низковольтной трехфазной электрической сети // Промышленная энергетика. 2018. № 9. С. 17–24.
2. Гайнуллина Л. Т., Угаров Д. О. Анализ воздействий на электроустановки гармонических искажений, вносимых нелинейной нагрузкой // Наука. Технологии. Инновации : сборник статей по итогам Международной научно-практической конференции. Магнитогорск, 2019. С. 6–12.
3. Стрижиченко А. В. Оценка влияния несинусоидальности и несимметрии токов и напряжений на дополнительные потери мощности в линиях и трансформаторах // Управление качеством электрической энергии : сборник трудов Международной научно-практической конференции. М., 2016. С. 194–199.
4. Шерязов С. К., Пятков А. В. Потери мощности в трансформаторах, вызванные нелинейной нагрузкой сельских потребителей // Достижения науки и техники АПК. 2017. № 11. С. 72–74.
5. Новоселов М. Л., Барсуков В. К., Гизатулина О. Л. Способы моделирования работы трехфазной сети с различными типами нагрузок // Интеллектуальные системы в производстве. 2016. № 1. С. 79–85.
6. Баженов Н. Г., Филина О. А., Озерова Е. Ю. Влияние характеристик трансформатора на качество автоматического регулирования в системах электроснабжения // Вестник МЭИ. 2019. № 5. С. 62–67.

7. Артемов А. И., Андреев Е. С. Погрешности измерительных трансформаторов напряжения при нелинейной нагрузке // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2017. № 3. С. 58–65.

8. Pejovskia D., Najdenkoskib K., Digalovski M. Impact of different harmonic loads on distribution transformers // Procedia Engineering. 2017. Vol. 202. Pp. 76–87.

9. Инженерно-технические мероприятия по снижению аварийности и электротравматизма в сетях электроснабжения / В. С. Шкрабак, Л. А. Голдобина, П. С. Орлов, В. В. Морозов, Р. В. Шкрабак // Вестник аграрной науки дон. 2018. № 43. С. 90–99.

10. Повышение энергоэффективности производства за счет применения силовых фильтров высших гармоник / О. В. Нос, А. С. Востриков, А. А. Штанг, Е. Ю. Малякко // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2019. № 12. С. 28–36.

11. Янченко С. А., Цырук С. А., Куликов А. И. Анализ методов разгрузки трансформаторов в сетях с высоким уровнем несинусоидальности тока // Промышленная энергетика. 2017. № 7. С. 44–53.

References

1. Novoselov M.L., Barsukov V.K., Gizatulina O.L. [Analysis of the parameters of the low-voltage three-phase electric network]. *Promyshlennaya energetika*, 2018, no. 9, pp. 17-24 (in Russ.).
2. Gainullina L.T., Ugarov D.O. *Analiz vozdeistvii na elektroustanovki garmonicheskikh iskazhenii, vnosimykh nelineinoi nagruzkoj* [Analysis of the effects on electrical installations of harmonic distortion introduced by non-linear load]. *Nauka. Tekhnologii. Innovatsii: sbornik statei po itogam Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [The science. Technologies. Innovation: collection of articles following the results of the International scientific-practical conference]. Magnitogorsk, 2019, pp. 6-12 (in Russ.).
3. Strizhichenko A.V. *Otsenka vliyaniya nesinusoidal'nosti i nesimmetrii tokov i napryazhenii na dopolnitel'nye poteri moshchnosti v liniyakh i transformatorakh* [Assessment of the influence of non-sinusoidality and asymmetry of currents and voltages on additional power losses in lines and transformers]. *Upravlenie kachestvom elektricheskoi energii: sbornik trudov Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Electric Energy Quality Management: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference]. 2016, pp. 194-199 (in Russ.).

4. Sher'yazov S.K., Pyatkov A.V. [Power losses in transformers caused by non-linear load of rural consumers]. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK*, 2017, no. 11, pp. 72-74 (in Russ.).
5. Novoselov M.L., Barsukov V.K., Gizatullina O.L. [Methods of modeling the operation of a three-phase network with various types of loads]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*, 2016, no. 1, pp. 79-85 (in Russ.).
6. Bazhenov N.G., Filina O.A., Ozerova E.Yu. [Influence of transformer characteristics on the quality of automatic regulation in power supply system]. *Vestnik MEI*, 2019, no. 5, pp. 62-67 (in Russ.).
7. Artemov A.I., Andreenkov E.S. [Errors of measuring voltage transformers with non-linear load]. *Elektrooborudovanie: ekspluatatsiya i remont*, 2017, no. 3, pp. 58-65 (in Russ.).
8. Pejovskia D., Najdenkoskib K., Digalovski M. [Impact of different harmonic loads on distribution transformers]. *Procedia Engineering*, 2017, no. 202, pp. 76-87.
9. Shkrabak V.S., Goldobina L.A., Orlov P.S., Morozov V.V., Shkrabak R.V. [Engineering and technical measures to reduce accidents and electrical injuries in power supply networks]. *Vestnik agrarnoi nauki dona*, 2018. No. 43, pp. 90-99 (in Russ.).
10. Nos O.V., Vostrikov A.S., Shtang A.A., Malyavko E.Yu. [Improving the energy efficiency of production through the use of power filters of higher harmonics]. *Izvestiya tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov*, 2019, no. 12, pp. 28-36 (in Russ.).
11. Yanchenko S.A., Tsyruk S.A., Kulikov A.I. [Analysis of methods of unloading transformers in the networks with a high level of working current unsinusoidality]. *Promyshlennaya energetika*, 2017, no. 7, pp. 44-53 (in Russ.).

Research Work of Single-phase Transformer with Different Types of Loads

V. K. Barsukov, PhD in Engineering, Professor, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia
O. L. Gizatullina, Senior lecturer, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia
M. L. Novoselov, Senior lecturer, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

The paper presents a study of a single-phase power transformer using a system built based on an industrial controller and data acquisition boards from National Instruments as hardware and NI LabVIEW graphical programming environment as a software part. A method of changing the type of load using a transistor operating in the key mode is shown, allowing more accurate simulation of the operation of the pulse load, compared with systems based on the triac. Information on the current shape in the primary and secondary windings of the transformer, the spectral composition of the currents, and the hysteresis loop characterizing the core magnetization reversal losses are presented in graphical form. The table information on the percentage of higher harmonics to the main one is given. To obtain the results, the transformer was connected in series to the load with a different coefficient of non-linear distortion in current, from 5 % to 44%, which corresponds to 100% and 30% opening of the transistor. When comparing the results of operation of a transformer with an active and pulsed load, an increase in the higher harmonics of the current and the amplitude of the current in the secondary winding of the transformer with a pulsed load is shown, and, as a result, a noticeable increase in the magnetization reversal losses in steel, characterized by a broadening of the hysteresis loop. Based on the results obtained, conclusions are drawn about the need to implement measures for filtering higher harmonics or to reduce the load factor of the transformer.

Keywords: non-linear load, higher harmonics, losses in the transformer, NI LabVIEW.

Получено: 02.06.2020