

Измерения структуры полей излучения объектов и первичная обработка полученных результатов проводилась с использованием экспериментальных образцов измерительных аппаратно-программных комплексов компактного антенного полигона, разработанного и изготовленного ранее.

При анализе структуры полей в ближней и дальней зонах использовалось представление, что поле объекта с дефектом является векторной суммой полей свободного объекта и поля рассеяния дефекта, т. е. поле рассеяния дефекта (термин «рассеяния» употребляется в широком смысле) является разностью АФР полей свободного объекта и объекта с дефектом.

Анализ структуры спектров сферических гармоник показал наличие изменений указанной структуры для объектов с дефектами по сравнению со свободными объектами. Важнейшими результатами такого анализа являются следующие:

– структура и величина комплексной разности спектров сферических гармоник однозначно

связаны с наличием, величиной и даже расположением дефекта;

– поле, восстановленное из разности спектров полностью совпадает с полем рассеяния дефекта, полученным путем вычитания АФР полей излучения.

**Вывод.** Математическое моделирование и экспериментальные исследования показали, что использование спектра сферических гармоник позволяет восстановить поле излучения антенн с высокой точностью и однозначно реагирует на наличие амплитудных и фазовых дефектов в излучающей апертуре.

#### Литература

1. Методы измерения характеристик антенн СВЧ / Л. Н. Захарьев [и др.]. – М. – 1985. – 368 с.
2. Бахрах, Л. Д. Методы измерения излучающих систем в ближней зоне / Л. Д. Бахрах, С. Д. Кременецкий, А. П. Курочкин. – Л. – 1985. – 272 с.
3. Вуд, П. Анализ и проектирование зеркальных антенн / П. Вуд. – М. – 1984. – 208 с.

УДК 621.314

### ДИАГНОСТИКА ИЗОЛЯЦИИ ТРАНСФОРМАТОРОВ С ПОМОЩЬЮ ФИГУР ЛИССАЖУ

Громыко И.Л., Галушко В.Н.

*Белорусский государственный университет транспорта  
Гомель, Республика Беларусь*

**Аннотация.** Разработана технология представления исходных данных в виде фигур Лиссажу для сверточных нейронных сетей. Данная технология позволяет: сократить затраты на создание и обновление базы данных испытаний; выявлять и классифицировать неисправности; оценивать остаточный ресурс трансформатора; самосовершенствоваться на основе накопления опыта реальных ситуаций.

**Ключевые слова:** трансформатор, изоляция, фигуры Лиссажу.

### DIAGNOSTICS OF TRANSFORMER INSULATION WITH THE HELP OF LISSAGE FIGURES

Hramyko I., Galushko V.

*Belarusian State University of Transport  
Gomel, Republic of Belarus*

**Abstract.** A technology for presenting initial data in the form of Lissajous figures for convolutional neural networks has been developed. This technology allows: to reduce the cost of creating and updating a test database; identify and classify faults; evaluate the residual life of the transformer; self-improvement based on the accumulation of experience in real situations.

**Key words:** transformer, insulation, Lissajous figures.

*Адрес для переписки: Громыко И.Л., ул. Громоной, 3, кв. 27, Гомель 246030, Республика Беларусь  
e-mail: ivangromyko95@mail.ru*

Существующая система технического диагностирования трансформаторов требует доработки. Это объясняется следующими причинами: используемая на практике нормативная документация по эксплуатации трансформаторов не учитывает в полной мере современные методы по технической диагностике; отсутствием современных знаний по технической диагностике у выпускников высших учебных заведений и низкой квалификации в этой области у лиц, принимающих решения; недоверием к новой организации ремонта и нежеланием уходить от системы организации

ремонта энергетического оборудования по регламенту из-за закладываемых значительных денежных средств на проведение ремонтных работ по старой схеме; недостаточным количеством, высокой стоимостью современных и эффективных приборов технического диагностирования; плохой организацией повышения квалификации специалистов всех уровней по проблемам технической диагностики оборудования; низкой достоверностью проводимых диагностических работ.

В Республике Беларусь и за рубежом в последнее время наблюдается тенденция перехода от

планово-предупредительных ремонтов к ремонту по фактическому состоянию оборудования [1]. Для возможности реализации обслуживания оборудования по фактическому состоянию ведутся активные разработки и внедрение автоматизированных комплексных систем диагностики и диагностики, позволяющие в различных режимах без отключения оборудования, оценивать его текущее техническое состояние [Комбинированные системы сбора передачи технологической и диагностической информации АСУ ТП электроустановок [2]. Такие системы помогают выявлять различного вида дефекты, некоторые – формировать технические рекомендации продлению срока эксплуатации, планировать сервисное обслуживание и ремонтные циклы.

Современные автоматизированные системы диагностики состояния трансформаторов и электрических машин чаще всего разрабатываются для конкретного вида оборудования и их применение на других типах оборудования требует трудоемкой настройки библиотеки базы данных и значительной технической доработки. Этот недостаток можно избежать за счет применения самообучающихся интеллектуальных систем. Применение искусственных нейронных сетей позволяет унифицировать диагностические исследования, не прибегая к созданию библиотек баз данных для каждого типа трансформатора. Также оптимизируется применение данных систем за счет простоты практического применения и устранения человеческого фактора при анализе результатов. Причем с ростом числа исследований снижается вероятность ошибки, а системный подход (оценка множества факторов между собой в динамике) [3].

Большинство производителей программного обеспечения и оборудования в сфере мониторинга состояния трансформаторов достигло больших результатов. В то же время существующие технологии в сфере программного обеспечения позволяют перейти на качественно новый уровень, связанный с применением алгоритмов машинного обучения.

Состояние изоляции обмоток трансформатора можно оценить, измеряя всего несколько параметров: сопротивление изоляции постоянному току  $R_{ISO}$ , коэффициенты абсорбции  $DAR$ , поляризации  $PI$  и диэлектрического разряда  $DD$ . Значения этих величин позволяют обнаружить расслоение и загрязнение, определить ток утечки, степень влажности и старения, т.е. сделать вывод о пригодности изоляции обмоток к дальнейшей эксплуатации.

В данной публикации предлагается новая технология оценки состояния качества изоляции с помощью межобмоточных напряжений, схема измерения которых представлена на рис. 1. Измерения проводились на трансформаторе ПОбС-5АУЗ.

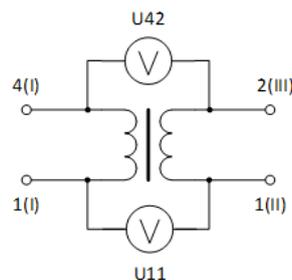


Рисунок 1 – Схема измерения межобмоточных напряжений

Измерения проводились с помощью двухканального осциллографа MDSO ISDS205A (рис. 2).

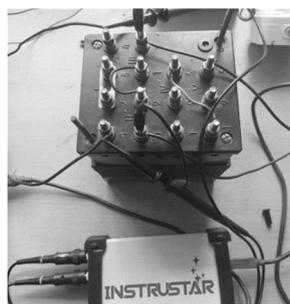


Рисунок 2 – Измерение межобмоточных напряжений осциллографом

Для учета не только величин данных напряжений, но и их начальных фаз, были построены фигуры Лиссажу, для различных состояний изоляции трансформатора. Данные фигуры представлены на рис. 3.

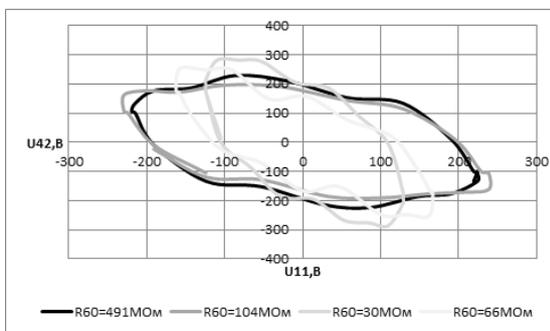


Рисунок 3 – Фигуры Лиссажу межобмоточных напряжений, при различных состояниях изоляции трансформатора

Как видно из данного рисунка, фигуры Лиссажу при нормальном состоянии трансформатора ( $R_{60} \geq 100 \text{ MOhm}$ ) практически не отличаются. Фигура Лиссажу с ростом увлажненности изоляции обмоток изменяет свои размеры и наклон. При этом характер (емкостной, индуктивный или активный) и величина (коэффициент нагрузки изменялся от холостого хода до 1,2 номинальной нагрузки) нагрузки не изменяют данные фигуры (рис. 4).

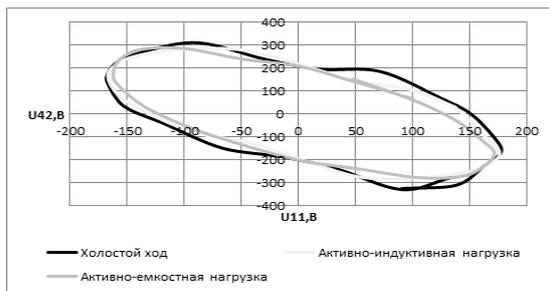


Рисунок 4 – Фигуры Лиссажу при различных нагрузках

Таким образом, полученные фигуры Лиссажу можно использовать для оценки качества изоля-

ции. Данные графические материалы авторы используют в качестве дополнительных исходных данных разработанной системы, основанной на применении сверточных нейронных сетей для цели диагностики, классификации неисправностей трансформаторов и оценки остаточного ресурса.

#### Литература

1. Яхья, А. А. Проблемы энергетики / А. А. Яхья, В. М. Левин. – 2019. – № 21 (6). – С. 11–18.
2. Проблемы энергетики / А. Н. Васев [и др.]. – 2018. – № 20 (11–12). – С. 16–26.
3. Вопросы современной науки и практики / А. И. Хальясмаа [и др.] // Университет им. В. И. Вернадского. – 2013. – № 1 (45). – С. 289–300.

УДК 658.51

### ИНСТРУМЕНТЫ БЕРЕЖЛИВОГО ПРОИЗВОДСТВА Гузаревич И.А., Домениковский Э.И., Спесивцева Ю.Б.

*Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь*

**Аннотация.** Рассмотрены инструменты бережливого производства на примере промышленного предприятия машиностроительного профиля.

**Ключевые слова:** инструменты бережливого производства.

### LEAN MANUFACTURING TOOLS Guzarevich I., Domenikovskiy E., Spesivtseva Y.

*Belarusian National Technical University  
Minsk, Republic of Belarus*

**Abstract.** The lean manufacturing tools are considered on the example of an industrial machine-building enterprise.  
**Key words:** lean manufacturing tools.

*Correspondence address: Spesivtseva Y.B., pr. Nezavisimosti, 65, Minsk 220113, Republic of Belarus  
e-mail: spesivtseva@bntu.by*

Инструменты бережливого производства используют при стремлении улучшить процессы и предотвратить любую возможность возникновения дефектов [1]. Феномен бережливого производства – это философия, подходы которой являются универсальными для разных стран и отраслей промышленности [2].

Каждый из инструментов интересен сам по себе, однако наиболее эффективно использовать их в комплексе. Большинство из них универсальны и подходят как организациям, выпускающим продукцию, так и оказывающим услуги.

Рассмотрим как применяются принципы бережливого производства в цеху мелкой штамповки (ЦМШ) промышленного предприятия машиностроительного профиля.

5S – организация рабочего места, свободного от беспорядка и обеспечивающего эффективную, безопасную и эргономичную работу [3]. Инструмент реализуется пятью следующими действиями.

**Сортировка.** На рабочем столе прессы нет ничего лишнего. Все предметы, которые в данный момент не нужны убраны в специальные кармашки.

**Рациональное расположение.** Рабочие штампы в цеху пронумерованы и расположены согласно своему номеру на специальных полках, откуда снимаются (и куда ставятся) с помощью крана ручного управления. Такой прием помогает найти и достать нужный штамп за минимальное время.

**Уборка.** После окончания работы рабочий обязан убрать свое рабочее место от отходов. На некоторых штампах очистка отходов проводится регулярно в течении рабочего дня для поддержания работоспособности штампа.

**Стандартизированная работа** – процессы должны быть согласованы, задокументированы и контролироваться. Это базовый уровень, с которого начинается оптимизация. В ЦМШ все процессы задокументированы. При установке нового штампа на прессовый станок проводится наладка станка. В процессе работы, производится выборочный контроль деталей для проверки, нужна ли станку подналадка. Стабильность вышеперечисленных процессов обеспечивается соблюдением норм, установленных в документации.