

СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ ВЫЯВЛЕНИЯ ВИТКОВЫХ ЗАМЫКАНИЙ В СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРАХ

Р. А. ФЁДОРОВ¹

¹uust-FedorovR@yandex.ru

¹ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий» (УУНИТ)

Аннотация. В работе предложены три критерия для сравнения методов выявления витковых замыканий в обмотках силовых трансформаторов. Предложенные критерии: возможность непрерывного контроля параметров трансформатора; возможность выявления повреждений без необходимости отключения трансформатора от нагрузки; способность обнаружить такие замыкания до этапа их развития, на котором они могут быть определены повсеместно применяемыми газовыми реле. На основе этих критериев проведено сравнение различных известных методов выявления витковых замыканий в силовых трансформаторах. В результате работы показаны наиболее важные направления для дальнейших исследований методов обнаружения витковых замыканий в обмотках трансформаторов.

Ключевые слова: метод; силовой трансформатор; диагностика; витковое замыкание; межвитковое замыкание.

ВВЕДЕНИЕ

Силовые трансформаторы являются важными элементами энергосистемы, поскольку позволяют изменять уровень тока и напряжения для снижения потерь при передаче электроэнергии на большие расстояния. При этом неотъемлемыми элементами силовых трансформаторов являются обмотки, осуществляющие преобразование электрической энергии в энергию магнитного поля и обратно. Повреждение межвитковой изоляции в обмотках является одним из самых частых видов повреждений в трансформаторах [1]. Оно приводит к замыканию витков в обмотке, которое, в свою очередь, может приводить к непреднамеренному изменению коэффициента трансформации. Кроме этого, витковые замыкания при длительном протекании развиваются в более серьезные повреждения, постепенно охватывая всё большее число витков катушки трансформатора. Повсеместно используемые устройства газовой и дифференциальной защиты способны выявить такие повреждения только на поздних этапах, когда создаваемый ими режим близок к короткому замыканию, а затронутые повреждением элементы трансформатора требуют дорогостоящего ремонта.

Выявление витковых замыканий на ранних этапах их образования затрудняется из-за отсутствия легко обнаруживаемых признаков. В статье представлены существующие решения по обнаружению витковых замыканий, в том числе на ранних этапах их протекания, а также произведено их сравнение.

Актуальность темы подтверждается многочисленными исследованиями в направлении методов выявления витковых замыканий, проведенных за последние десятилетия. Решение вопроса позволит снизить риски развития серьезных повреждений в силовых трансформаторах благодаря своевременному выявлению межвитковых замыканий, что, в свою очередь, снизит стоимость ремонтов таких повреждений.

СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ ОБНАРУЖЕНИЯ ВИТКОВЫХ ЗАМЫКАНИЙ

Исследования в области обнаружения витковых замыканий в силовых трансформаторах проводятся с 1970 гг. [2]. С тех пор сформировалась современная техническая документация, описывающая основные методы защиты силовых трансформаторов. В последние десятилетия развитие технологий, в частности, измерительных систем и средств обработки информации, открыло путь для новых и более современных способов контроля состояния трансформаторов.

На сегодняшний день можно выделить несколько основных направлений, в рамках которых проводятся исследования и реализуются новые технические решения. Популярным направлением является контроль состояния трансформатора в реальном времени, предполагающий анализ параметров трансформатора без необходимости прерывания его эксплуатации. Именно к этой категории относятся повсеместно используемые методы выявления витковых замыканий, установленные технической документацией. Так, правила устройства электроустановок предписывают использование газовых реле для защиты от витковых замыканий в обмотках трансформаторов мощностью 6,3 МВ·А и более [3]. Газовые реле способны реагировать на различные виды внутренних замыканий в баке трансформатора, в том числе на витковые замыкания, поскольку их протекание сопровождается разложением масла и образованием газов. При активном газообразовании пузырьки газа, проходя через расширитель трансформатора, вызывают срабатывание установленного в нём реле. Этот способ приемлем для предотвращения аварий, возможных при длительном протекании витковых замыканий, но способен выявлять повреждения только на поздних их этапах, когда в масле начинается значительное газообразование из-за охватывания дугой всё большего числа витков обмотки [4].

В дополнение к газовой защите дифференциальная защита трансформаторов, применяемая согласно [3], также может среагировать на витковые замыкания, поскольку при таких замыканиях электрический ток в катушке течёт только по виткам, которые не затронуты повреждением. Это приводит к уменьшению фактического количества витков, участвующих в работе катушки, а значит, к изменению коэффициента трансформации силового трансформатора. Дифференциальное реле, уставки которого рассчитаны на корректный коэффициент трансформации, может среагировать на изменение токов на вводах трансформатора, вызываемое повреждением. Однако, как и газовая защита, дифференциальные реле не способны реагировать на витковые замыкания на ранней стадии, когда изменение коэффициента трансформации мало, и повреждение не образует высокие дифференциальные токи [5]. Использование дополнительных технических средств с целью более раннего обнаружения витковых замыканий позволит предотвратить дальнейшие повреждения и своевременно произвести замену поврежденных элементов.

К способам диагностики, не требующим вывода трансформатора из работы, относятся также методы непрерывного хроматографического контроля. Они отличаются способностью выявлять медленно развивающиеся дефекты до наступления той стадии их развития, на которой происходит срабатывание газовых реле и дифференциальной защиты [6]. Научная литература также предлагает методы определения повреждений при помощи нейронных сетей, которые анализируют электрические параметры трансформатора и тоже предполагают контроль состояния обмоток без необходимости отключения трансформатора от нагрузки [5, 7]. Тем не менее рассмотренные исследования методов диагностики, основанных на нейронных сетях, не подтверждают возможность использования таких методов для надежного выявления повреждений на ранних стадиях их развития.

Кроме вышеописанных вариантов выявления витковых замыканий, позволяющих осуществлять контроль параметров трансформатора непрерывно, существуют методы, которые основаны на периодическом измерении параметров для выявления признаков повреждения. Так, согласно [8], старение и нарушение витковой изоляции также может быть выявлено при помощи анализа пробы масла, взятой из бака трансформатора. Взятая проба масла анализи-

руется в лаборатории при помощи методов химического анализа и хроматографии с целью определения признаков различных повреждений – например, повышенных концентраций газов, возникающих при разложении масла электрической дугой. Как и методы газовой и дифференциальной защиты, этот метод диагностики применяется повсеместно для масляных трансформаторов, поскольку анализ пробы масла не только позволяет выявлять витковые замыкания, но и может указать на наличие многих других видов повреждений.

Витковые повреждения оказывают некоторое влияние на электрические параметры трансформатора даже на ранних стадиях, но вызываемые изменения составляют очень малую долю от тех величин тока и мощности, которые фиксируются измерительными приборами, когда трансформатор находится под нагрузкой. Таким образом, выявление витковых замыканий на ранних стадиях путем анализа электрических параметров является сложной задачей из-за погрешности измерительных приборов и непостоянности нагрузки трансформатора. Поэтому помимо вышеописанных методов для контроля состояния обмоток трансформатора предлагаются методы, основанные на анализе электрических параметров трансформатора в режиме холостого хода [2, 4]. При таком способе диагностики трансформатор периодически выводится в холостой ход, и персоналом производится измерение определенных параметров – в самом простом случае, значений силы тока. Поскольку на холостом ходу ток трансформатора не зависит от нагрузки и определяется параметрами внутренней цепи самого трансформатора, отклонение тока холостого хода от ожидаемого значения может указывать на наличие повреждения в обмотках.

Для рассмотренных методов, осуществляющих контроль параметров не непрерывно, а через определённые интервалы времени, характерна способность выявлять витковые замыкания на ранних стадиях, обусловленная более точными процедурами сбора и анализа контролируемых параметров. Тем не менее эта способность ограничивается частотой проведения процедур. Например, анализ пробы масла не способен будет своевременно обнаружить повреждение, возникшее через месяц после очередной пробы, если организация, обслуживающая трансформатор, производит такие пробы раз в 2 года [9].

На данный момент одной из ключевых нерешённых проблем является сложность обнаружения повреждений на ранней стадии: повсеместно используемые методы дифференциальной защиты и газовые реле полагаются на заметные изменения, предшествующие выходу трансформатора из строя, но не способны выявить признаки повреждения на более ранних этапах. Методы, связанные с периодическим анализом параметров трансформатора, более чувствительны к развивающимся повреждениям, но их скорость обнаружения дефектов ограничена частотой производства соответствующих методу мероприятий. Измерения на холостом ходу возможны только при отключении трансформатора от нагрузки и ограничены частотой таких отключений, происходящих при его обслуживании, а пробы масла берутся с длинными интервалами, которые могут исчисляться в годах [9].

Также выявлены недостатки при использовании современных методов контроля состояния трансформаторов в реальном времени, связанные, в первую очередь, со стоимостью производства и установки соответствующего оборудования. Эти вопросы остаются актуальными, так как витковым замыканиям подвержены, среди прочего, потребительские силовые трансформаторы. Их большое количество в распределительных сетях страны требует поиска решений с минимальной стоимостью установки и эксплуатации [2].

Для выявления возможных направлений для дальнейших исследований предложено сравнение известных методов выявления витковых замыканий по трем критериям, определённым на основе основных сходств и различий между ними:

1. Способность обнаружения витковых замыканий на ранних этапах их образования.

Критерий принимается выполненным, если метод способен фиксировать вызываемые витковыми замыканиями изменения до начала значительного газообразования, которое может быть выявлено повсеместно используемыми газовыми реле.

2. Возможность непрерывного контроля параметров трансформатора.

Критерий принимается выполненным для методов, которые предполагают постоянный контроль параметров или автоматический контроль с малым интервалом времени (менее одного дня), и принимается невыполненным для методов, которые основаны на проведении периодических процедур с более длинным интервалом времени между измерениями (более одного дня).

3. Возможность обнаружения витковых замыканий в трансформаторе, находящемся под нагрузкой.

Критерий принимается выполненным для методов, которые не требуют отключения трансформатора от нагрузки для измерения его параметров.

Результаты сравнения выбранных методов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты сравнения методов выявления витковых замыканий по предложенным критериям

	Диф. защита	Газовые реле	Анализ проб масла	Контроль параметров холостого хода	Непрерывный контроль с помощью хроматографии	Методы с использованием нейронных сетей
Возможность обнаружения повреждений без отключения трансформатора от нагрузки	+	+	+	-	+	+
Возможность непрерывного контроля параметров трансформатора	+	+	-	-	+	+
Способность определять витковые замыкания на ранних этапах их образования	-	-	+	+	+	-

В ходе сравнения были сделаны следующие основные выводы:

1. Из рассмотренных решений, всем предложенным критериям отвечает метод непрерывного контроля с помощью хроматографии. Метод активно применяется сегодня для диагностики повреждений в силовых трансформаторах, но имеет крупный недостаток в виде высокой стоимости требуемого для его применения оборудования. Из-за этого недостатка на текущий момент непрерывный хроматографический анализ применяется обычно в ситуациях, когда силовой трансформатор имеет высокую мощность и играет важную роль в электрической сети. Для таких трансформаторов экономическая выгода от своевременного выявления повреждений и замены элементов оправдывает высокую стоимость технической реализации метода.

2. Методы, позволяющие выявить витковые замыкания на ранних стадиях, имеют либо высокую стоимость из-за необходимости установки специализированного оборудования, либо не способны осуществлять непрерывный контроль параметров, что снижает скорость обнаружения дефектов из-за высокого интервала между процедурами измерения и анализа контролируемых параметров. Как подчеркивается в [2], последние могут оказаться особенно полезны для сельских сетей, где применяется большое количество маломощных трансформаторов. Для оборудования в таких сетях снижение стоимости реализации методов является приоритетной целью для исследований.

3. На текущий момент методы с использованием нейронных сетей не подходят для обнаружения витковых замыканий на ранних стадиях, и поэтому не способны надежно выявлять витковые замыкания быстрее, чем используемые в совокупности дифференциальные и газовые реле. Тем не менее, согласно [7], такие методы уже сегодня пригодны в случаях, когда газовая защита не может быть использована для выявления повреждений – например, в трансформаторах с воздушным охлаждением.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании полученных данных и сделанных выводов, можно предложить следующие пути для дальнейшего исследования:

1. Стоит обратить внимание на методы с использованием нейронных сетей, поскольку их недостаток – невозможность обнаружения витковых замыканий на ранней стадии – недостаточно изучен, и существует вероятность его разрешения при дальнейших исследованиях.

2. Необходимы дополнительные исследования метода непрерывного контроля с помощью хроматографии, поскольку его единственным значительным недостатком является высокая стоимость по сравнению с более простыми и менее чувствительными методами. В связи с этим востребованы способы снижения затрат на производство и применение оборудования для хроматографии масла в силовых трансформаторах.

3. Недостатки методов, требующих периодического вывода силовых трансформаторов в режим холостого хода, менее значимы для потребителей третьей категории надежности электроснабжения. Поскольку в сельских сетях страны применяется большое количество понижающих трансформаторов малой мощности, интерес представляет дальнейшее развитие методов, позволяющих сделать заключение о наличии повреждения при помощи анализа электрических параметров трансформаторов на холостом ходу.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Антонов В. О.** Анализ статистики технологических отказов функциональных узлов силовых трансформаторов 35 кВ и выше // Вестник науки. 2024. Т. 4. № 1(70). С. 755–762. EDN WGPJDS.
2. **Белов А. В.** Выявление признаков межвитковых замыканий в обмотках потребительских силовых трансформаторов // АПК России. 2017. Т. 24. № 4. С. 970–979. EDN ZXVQUT.
3. **Правила** устройства электроустановок: 7-е издание (ПУЭ). М.: Норматика, 2024. 464 с. ISBN 978-5-4374-1688-4
4. **Разработка** способов и средств выявления межвитковых замыканий в обмотках силовых трансформаторов / А. В. Белов, О. Р. Шаймухаметова, Ю. П. Ильин [и др.] // АПК России. 2024. Т. 31. № 1. С. 38–44. DOI 10.55934/2587-8824-2024-31-1-38-44. EDN KSMQDN.
5. **Куликов А. Л.** Использование машинного обучения и искусственных нейронных сетей для распознавания витковых замыканий в силовых трансформаторах // Электричество. 2022. № 10. С. 34–44. DOI 10.24160/0013-5380-2022-10-34-44. EDN YWIVUG.
6. **Файфер Л. А.** Существующие методы мониторинга силовых трансформаторов // Молодой ученый. 2016. № 12 (116). С. 412–415
7. **Галушко В. Н.** Повышение надежности трансформаторов с помощью комплексного анализа данных приборного учета при межвитковых коротких замыканиях // Вестник Белорусского государственного университета транспорта: наука и транспорт. 2021. № 1(42). С. 85–89. EDN RTUPTY.
8. **Голоднов Ю. М.** Контроль за состоянием трансформаторов. М.: Энергоатомиздат, 1988. 88 с ISBN 5-283-00973-4
9. **СТО 34.01-23.1-001-2017.** Стандарт организации ПАО «Россети». Объем и нормы испытаний электрооборудования.

ОБ АВТОРАХ

Фёдоров Роман Андреевич, студ. ИЭТИ.

METADATA

Title: Comparison of methods of turn-to-turn fault detection in power transformer windings

Author: R.A. Fedorov¹

Affiliation:

¹ Ufa University of Science and Technology (UUST), Russia.

Email: ¹ uust-fedorovR@yandex.ru

Language: Russian.

Source: Molodezhnyj Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa University of Science and Technology), no. 1 (32), pp. 118-123, 2025. ISSN 2225-9309 (Print).

Abstract: The paper suggests three criteria that can be used to compare methods of detection of turn-to-turn faults in power transformer windings. Following criteria are suggested: capability for continuous control of transformer parameters; capability for fault detection without putting the transformer offline; capability for detection of such faults before they develop to the stage at which they could be detected by universally used Buchholz relays. Comparison of various known methods of turn-to-

turn fault detection in power transformers is performed on the basis of the suggested criterions. In the result, the paper identifies most important directions for further research of methods of transformer winding fault detection.

Keywords: Transformer, diagnostics, winding fault, turn-to-turn fault.

About authors:

Fedorov Roman Andreevich, student, INSTITUTE OF ELECTROTECHNICAL ENGINEERING (UUST).