



АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ ПОДХОДОВ К МОНИТОРИНГУ И ДИАГНОСТИКЕ СОСТОЯНИЯ АКТИВНОЙ ЧАСТИ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Архипова Ольга Владимировна,
Югорский государственный университет
Ханты-Мансийск, Россия
E-mail: arkh82@mail.ru

Ковалев Владимир Захарович,
доктор технических наук, профессор,
Югорский государственный университет
Ханты-Мансийск, Россия
E-mail: vz_kovalev@mail.ru

Сайфуллин Руслан Вадикович,
аспирант,
Югорский государственный университет
Ханты-Мансийск, Россия
E-mail: saifullinrv96@gmail.com

Предмет исследования: мониторинг и диагностика состояния активной части силовых трансформаторов.

Цель исследования: определение перспективных тенденций развития методик мониторинга и диагностики состояния активной части силовых трансформаторов.

Объект исследования: силовые трансформаторы.

Метод исследования: критический системный анализ.

Основные результаты исследования: рассматривается проблема мониторинга и диагностики состояния активной части силовых трансформаторов, включая обмотки. Отмечается значительное число (более четырех миллионов штук) распределительных трансформаторов, находящихся в эксплуатации в Российской Федерации. Анализируются причины аварийных отказов указанного класса силовых трансформаторов. Выделяется одна из основных причин отказов – витковое замыкание в обмотке трансформатора. Акцентируется внимание на проблеме мониторинга состояния активной части трансформатора и на диагностике развития витковых коротких замыканий в обмотке трансформатора. Показывается наличие нескольких групп методов мониторинга и диагностики витковых замыканий обмоток трансформатора. Показывается экономическая привлекательность мониторинга и диагностики по реакции на искусственные электромагнитные воздействия, и мониторинга и диагностики по реакции на естественные электромагнитные воздействия.

Ключевые слова: витковое короткое замыкание, активная часть трансформатора, мониторинг и диагностика состояния активной части силовых трансформаторов.

ANALYSIS OF EXISTING APPROACHES TO MONITORING AND DIAGNOSTICS OF THE ACTIVE PART OF POWER TRANSFORMERS

Olga V. Arkhipova
Yugra State University,
Khanty-Mansiysk, Russia
E-mail: arkh82@mail.ru

Vladimir Z. Kovalev
Doctor of Technical Sciences, Professor,
Yugra State University,
Khanty-Mansiysk, Russia
E-mail: vz_kovalev@mail.ru

Ruslan V. Saifullin
Postgraduate Student,
Yugra State University,
Khanty-Mansiysk, Russia
E-mail: saifullinrv96@gmail.com

Subject of research: monitoring and diagnostics of the condition of the active part of power transformers.

Purpose of research: identification of promising trends in the development of methods for monitoring and diagnosing the state of the active part of power transformers.

Object of research: power transformers.

Methods of research: critical system analysis.

Main results of research: the problem of monitoring and diagnosing the condition of the active part of power transformers, including windings, is considered. It is noted that a significant number (more than four million units) of distribution transformers are in operation in the Russian Federation. The causes of emergency failures of the specified class of power transformers are analyzed. One of the main causes of failures is highlighted – a winding circuit in the transformer winding. Attention is focused on the problem of monitoring the state of the active part of the transformer and on the diagnosis of the development of short circuits in the transformer winding. The presence of several groups of methods for monitoring and diagnosing winding circuits of transformer windings is shown. The economic attractiveness of monitoring and diagnostics based on the reaction to artificial electromagnetic influences, and monitoring and diagnostics based on the reaction to natural electromagnetic influences is shown.

Keywords: winding short circuit, the active part of the transformer, monitoring and diagnostics of the condition of the active part of power transformers.

ВВЕДЕНИЕ

Структура современной энергетической системы характеризуется значительными расстояниями от мест генерации электрической энергии до мест ее потребления. Задача минимизации электрических потерь при транспортировке электрической энергии и ее последующего оптимального потребления требует в нынешних условиях шесть-семь циклов трансформации транспортируемой электрической энергии. Одновременно требуются решения задачи надежности и качества

поставляемой электрической энергии при обязательном учете устойчивого роста потребления электрической энергии и соответствующей необходимости обеспечения «маневрового» фонда. Указанные выше обстоятельства приводят к формированию запаса мощности эксплуатируемых трансформаторов, особенно на низких напряжениях, сопряженных с непосредственным потребителем. Как следствие, «общая мощность всех трансформаторов, установленных в сети, превышает генераторную мощность в 6–7 раз»



[21], и в настоящее время, по ряду независимых оценок, в РФ находится в эксплуатации более четырех миллионов распределительных трансформаторов. Из них в эксплуатации наиболее распространены распределительные трансформаторы мощностью 25–630 кВА, напряжением 6–10 кВ [21].

Отметим, что «потребление электроэнергии в России в 2023 году увеличилось на 2,4 % и составило 1 121,6 млрд кВт·ч» [22].

Анализ работ, посвященных надежности трансформаторного парка наиболее распространенных серий 10/0,4 кВ, показывает, что число годовых аварийных отказов силовых трансформаторов характеризуется показателем

$$k_{\text{ao}} = (0,07 - 0,09) \cdot N_{\text{ТЭ}} \quad (1)$$

где $N_{\text{ТЭ}}$ количество трансформаторов, находящихся в эксплуатации. Статистика показывает, что основная причина выхода из строя указанного класса трансформаторов – витковые короткие замыкания, которые составляют около 55,2 % всех отказов, далее идут следствия дефектов главной изоляции, еще около 15,6 %, итого – практически более 70 % отказов [11]. Эти же причины отказов приводят и к наиболее опасным и тяжелым последствиям для собственно силового трансформатора. Как правило, это вызывается витковым коротким замыканием [33–36]. Причины появления данных видов повреждений очень многообразны [10, 12, 26, 34], отрицательные экономические последствия весьма значительны из-за возникающих нарушений технологических процессов, обеспечиваемых трансформаторами, и существенных затрат на последующий ремонт или замену самих трансформаторов. Своевременное принятие правильных решений в рамках процедур технического обслуживания и ремонта (ТОиР) по обнаружению и недопущению развития дефектов до аварийного состояния обеспечат высокий коэффициент готовности, сокращение времени простоя, снижение затрат на ремонты, продление срока службы оборудования [1, 2, 10].

Спрогнозировать развитие подобных дефектов достаточно проблематично, следовательно, выявление данных дефектов на ранней стадии их развития является актуальной задачей как российской, так и международной электроэнергетики.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Глобальным трендом в данном направлении является цифровизация в электроэнергетике [4, 9, 19, 24] и построение современных технологий диагностики, прогноза

как собственно процессов, развивающихся в трансформаторах, так и процессов в электроэнергетических комплексах и системах, содержащих трансформаторы [3, 29, 32, 38, 39]. Как следствие, возникают и задачи управления [12, 23, 26] на основе цифровизации.

Отметим, что Россия первой в мировом сообществе (2021 г.) ввела в действие ГОСТ [5], формализующий само понятие «цифровой двойник изделия».

Большая значимость сохранения работоспособности трансформатора на протяжении его жизненного цикла требует выполнения целого спектра мероприятий, обеспечивающих получение достоверной информации о состоянии его компонент. Как правило, данные мероприятия классифицируются по различным признакам [3]: мониторинг по показаниям измерительной аппаратуры без отключения трансформатора и без прикосновения к элементам трансформатора; мониторинг работающего трансформатора с прикосновением к отдельным его конструктивным элементам, например, при отборе масла или вибродиагностике; обследования, выполняемые при выведенном из работы трансформаторе, например, обследование обмоток или коммутационной аппаратуры; специальные обследования трансформатора в процессе его ремонта.

Стоимость систем мониторинга и диагностики трансформаторов составляет, по данным [3], около 2,6 % от стоимости самого трансформатора, что, учитывая огромное количество трансформаторов, находящихся в эксплуатации (более 4 млн штук [21]), требует значительных финансовых затрат. Соответственно, возникает задача – выделить наиболее потенциально опасные направления проявления возможных дефектов и сосредоточиться на их мониторинге. Это позволит обеспечить достаточную надежность функционирования трансформаторов и минимизировать возможные ущербы от аварийного выхода трансформаторов из строя при существенном снижении затрат на мониторинг.

По мнению многих авторов, наибольшую опасность представляют витковые короткие замыкания, возникающие в ходе эксплуатации трансформаторов [6, 7, 8, 27, 28]. Характерные причины их образования приведены в таблице 1.

В свою очередь, методы мониторинга и диагностики витковых замыканий обмоток трансформатора можно разделить на несколько групп:

- мониторинг и диагностика по химическому изменению состава и характеристик масла;

Таблица 1. Характерные причины образования виткового замыкания в обмотках трансформатора (таблица построена по данным работы [40]).

Недостатки организации производственного процесса	Дефекты, возникшие из-за нарушений заводского регламента изготовления и не выявленные своевременно
	Дефекты, возникшие из-за нарушений регламента по эксплуатации
	Дефекты, возникшие в ходе нарушений регламента проведения ремонтных работ
Деградация изоляции	Механическая деградация из-за пусковых токов асинхронных электродвигателей
	Механическая деградация из-за вибрации обмоток
	Механическая деградация из-за ударного воздействия токов короткого замыкания
	Тепловая деградация из-за теплового воздействия токов короткого замыкания
	Тепловая деградация из-за теплового воздействия длительной перегрузки
	Тепловая деградация из-за теплового воздействия высших гармоник
	Электрическая деградация из-за воздействия высших гармоник и приложенного напряжения
	Химическая деградация из-за изменения характеристик масла
	Химическая деградация из-за загрязнения изоляции
Перенапряжения	Атмосферные перенапряжения
	Внутренние перенапряжения
	Дуговые перенапряжения

- мониторинг и диагностика по тепловым характеристикам работающего трансформатора;

- мониторинг и диагностика по вибрационным и акустическим характеристикам работающего трансформатора;

- мониторинг и диагностика по совокупности анализируемых характеристик (напряжения, химических и тепловых);

- мониторинг и диагностика по реакции на искусственные электромагнитные воздействия;

- мониторинг и диагностика по реакции на естественные электромагнитные воздействия.

Наименее затратны последние два вида мониторинга и диагностики витковых коротких замыканий обмоток трансформатора. Это обусловлено: хорошо развитой теорией стационарных, квазистационарных и переходных электромагнитных процессов в трансформаторах [14-18], высокой степенью совпадения реальных электромагнитных

процессов с аналогичными процессами описываемыми их цифровыми двойниками [20, 30]; относительной легкостью масштабирования, тиражирования и адаптации к конкретной номенклатуре эксплуатируемого трансформаторного парка [13, 25]; относительной дешевизной материальных носителей реализаций методик мониторинга и диагностики (микрокомпьютеры); возможностью использования в качестве измерительной аппаратуры штатных измерительных трансформаторов и другой штатной аппаратуры и измерительных каналов [25, 31, 37].

Отмеченные обстоятельства хорошо коррелируются с работой [39], где проанализировано более 40 патентов и 60 публикаций, и отмечается, что в методах диагностики силового оборудования электростанций «наиболее часто используются измерения электрических величин», причем это относится как к анализируемому в указанной работе патентным источником, так и к научной литературе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

1. Основная причина выхода из строя рассматриваемого в статье класса трансформаторов – витковые короткие замыкания, которые составляют около 55,2 % всех отказов.

2. Наименее затратны в настоящее время системы мониторинга и диагностики витковых коротких замыканий обмоток трансформатора, базирующиеся на обработке результатов искусственных или естественных электромагнитных воздействий на токоведущие части трансформатора.

3. Развитие теории цифровых двойников необратимо ведет к росту количества систем мониторинга и диагностики базирующихся на симбиозе различных технологий: вибрационных, тепловых, химических, электромагнитных, акустических и других.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ефремова, И. А. Автоматизированный контроль и диагностика технического состояния трансформаторов на железнодорожном транспорте / И. А. Ефремова, О. Н. Козменков, И. П. Гордеев, Е. М. Плохов. – Текст: непосредственный // Вестник транспорта Поволжья. – 2020. – № 3(81). – С. 21-27.
- Алюнов, А. Н. Об эффективности цифровой системы проактивной диагностики силовых трансформаторов / А. Н. Алюнов, О. С. Вяткина, А. Е. Немировский. – Текст: непосредственный // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2020. – Т. 24, № 5(154). – С. 966-976.
- Андреев, К. А. Проблемы устройств мониторинга и диагностики трансформаторов под нагрузкой / К. А. Андреев. – Текст: непосредственный // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2012. – № 1. – С. 380-388.
- Бутырин, П. А. Цифровизация и аналитика в электротехнике. Цифровые двойники трансформаторов / П. А. Бутырин, М. Е. Алпатов. – Текст: непосредственный // Электричество. – 2021. – № 10. – С. 4-10.
- ГОСТ Р 57700.37–2021 «Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения».
- Громыко, И. Л. Диагностика межвитковых замыканий в трансформаторах с помощью приборного учета данных и искусственного интеллекта / И. Л. Громыко, В. О. Белькин. – Текст: непосредственный // Приборостроение-2022: материалы 15-й Международной научно-технической конференции, 16-18 ноября 2022 года, Минск, Республика Беларусь / редкол.: О. К. Гусев (председатель) [и др.]. – Минск : БНТУ. – 2022. – С. 18-20.
- Громыко, И. Л. Диагностика трансформатора с использованием комплексного анализа данных приборного учета при межвитковых замыканиях / И. Л. Громыко, В. Н. Галушко, В. О. Белькин. – Текст: непосредственный // Разработка и эксплуатация электротехнических комплексов и систем энергетики и наземного транспорта: Материалы IV международной научно-практической конференции в рамках Научно-образовательного форума, Омск, 10 декабря 2020 года. – Омск: Омский государственный университет путей сообщения. – 2020. – С. 69-82.
- Гуков, Д. В. Определение параметров схемы замещения силового трансформатора с учётом неравномерного насыщения магнитопровода при работе под нагрузкой / Д. В. Гуков, С. Д. Загуляев, С. М. Иванов. – Текст: непосредственный // Военный инженер. – 2022. – № 4(26). – С. 37-41.
- Дарьян, Л. А. Цифровые двойники электроэнергетического оборудования. Образы и экспертизы. Часть 2 / Л. А. Дарьян, Л. Н. Контарович. – Текст: непосредственный // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2021. – № 2(65). – С. 32-39.
- Зайнакова, И. Ф. Исследование характерных дефектов силовых масляных трансформаторов и обоснование методов диагностики / И. Ф. Зайнакова, А. С. Хисматуллин. – Текст: непосредственный // Наука. Технология. Производство. – 2016: Современные методы и средства диагностики электроэнергетического и электротехнического оборудования, средств и систем автоматики: материалы Всероссийской научно-технической конференции, посвященной 60-летию филиала УГНТУ в г. Салавате, Салават, 17–19 ноября 2016 года / Уфимский государственный нефтяной технический университет, филиал в г. Салавате. – Салават: Уфимский государственный нефтяной технический университет. – 2016. – С. 114-118.
- Иванова, З. Г. Стратегия обслуживания на основе результатов диагностирования состояния активной части силовых трансформаторов с учетом смещения резонансных частот в зависимости от увлажнения и наличия витковых замыканий в обмотках / З. Г. Иванова, Л. М. Рыбаков. – Текст: непосредственный // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2014. – № 103. – С. 545-566.
- Инаходова, Л. М. Фрактальная математическая модель срока эксплуатации силовых трансформаторов распределительных электрических сетей 6-10 КВ / Л. М. Инаходова, А. Л. Фролов. – Текст: непосредственный // Российская Арктика. – 2023. – Т. 5, № 4(23). – С. 45-56.
- Исмагилов, Ф. Р. Метод определения наличия короткозамкнутого витка в обмотках трансформатора / Ф. Р. Исмагилов, И. Ф. Янгиров, Д. В. Максудов. – Текст: непосредственный // Дефектоскопия. – 2014. – № 10. – С. 34-39.
- Исаев, Ю. Н. Расчет частотной зависимости элементов схемы замещения обмоток силового трансформатора при его диагностике коротким импульсом / Ю. Н. Исаев, О. В. Васильева. – Текст: непосредственный // Электротехнические комплексы и системы управления. – 2014. – № 1. – С. 60-66.

15. Исаев, Ю. Н. Метод диагностики обмоток трансформатора на наличие дефектов в виде короткозамкнутых витков / Ю. Н. Исаев, Г. А. Елгина. – Текст: непосредственный // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 2. – С. 28.
16. Исаев, Ю. Н. Математическая модель трансформатора при его диагностике коротким импульсом / Ю. Н. Исаев, В. А. Колчанова, Г. А. Елгина, А. В. Лавринович. – Текст: непосредственный // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 6. – С. 6.
17. Исаев, Ю. Н. Расчет параметров распределенной схемы замещения обмоток трансформатора с учетом влияния скин-эффекта / Ю. Н. Исаев, Е. В. Старцева. – Текст: непосредственный // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2015. – Т. 326, № 9. – С. 47-55.
18. Климова, Т. Г. Оценка параметров схемы замещения двухобмоточного трансформатора на базе синхронизированных векторных измерений / Т. Г. Климова, В. С. Смирнов. – Текст: непосредственный // Интеллектуальная электротехника. – 2023. – № 1(21). – С. 102-117.
19. Колесников, И. Е. Единая модель цифровой диагностики состояния силового трансформатора / И. Е. Колесников, А. В. Коржов, К. Е. Горшков. – Текст: непосредственный // Приборы. – 2021. – № 3(249). – С. 51-56.
20. Колчанова, В. А. Моделирование трансформаторной обмотки при воздействии импульса напряжения в среде MATLAB Simulink / В. А. Колчанова, Ю. Н. Исаев, Г. А. Елгина. – Текст: непосредственный // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 6. – С. 21.
21. Костинский, С. С. Обзор состояния отрасли трансформаторного производства и тенденций развития конструкции силовых трансформаторов / С. С. Костинский. – Текст: непосредственный // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2018. – Т. 20, № 1-2. – С. 14-32.
22. Краткий отчет о функционировании ЕЭС России в 2023 году. – URL: https://www.sops.ru/fileadmin/files/company/reports/disclosure/2024/ups_rep2023.pdf (дата обращения 08.02.2024). – Текст: электронный.
23. Левин, В. М. Дистанционный мониторинг и управление состоянием трансформаторов в распределительных электрических сетях / В. М. Левин, П. А. Петушков, М. А. Швец. – Текст: непосредственный // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2023. – Т. 25, № 2. – С. 97-109.
24. Левин, В. М. Цифровые модели предиктивной аналитики для удаленного мониторинга трансформаторного оборудования / В. М. Левин, А. А. Яхья. – Текст: непосредственный // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики: Материалы 93-его заседания семинара. В 2-х книгах, Волжский, 13–17 сентября 2021 года / Отв. редактор Н. И. Воропай. Том Выпуск 72. Книга 1. – 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук. – 2021. – С. 393-402.
25. Литвинов, И. И. Исследование возможности применения амплитудно-фазного анализа трансформатора для диагностики / И. И. Литвинов, О. В. Танфильев, И. Н. Бузмаков. – Текст: непосредственный // Ползуновский альманах. – 2020. – № 1. – С. 134-137.
26. Семенова, К. В. Моделирование аварийных режимов трансформаторных подстанций на основе технологии цифровых двойников для предотвращения техногенных аварий / К. В. Семенова, А. И. Тихонов, И. С. Снитко [и др.]. – Текст: непосредственный // Современные проблемы гражданской защиты. – 2022. – Т. 42, № 1. – С. 83-92.
27. Мустафин, Р. Г. Дифференциальный способ обнаружения витковых замыканий в трехфазном трансформаторе / Р. Г. Мустафин, Р. Ф. Ярыш. – Текст: непосредственный // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2020. – Т. 22, № 3. – С. 78-89.
28. Мустафин, Р. Г. Обнаружения витковых замыканий обмоток трансформаторов по параметрам переходного процесса / Р. Г. Мустафин. – Текст: непосредственный // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2019. – Т. 21, № 3. – С. 14-23.
29. Оганян, Р. Г. Исследование метода мониторинга и прогнозирования параметров мультифизических процессов электротехнических устройств (на примере силового трансформатора) / Р. Г. Оганян, Н. И. Горбатенко, М. В. Ланкин. – Текст: непосредственный // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2021. – № 2(210). – С. 34-40.
30. Пехота, А. Н. Технология использования сверточных нейронных сетей при диагностике состояния трансформаторов / А. Н. Пехота, В. Н. Галушко, И. Л. Громыко. – Текст: непосредственный // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия С. Фундаментальные науки. – 2021. – № 12. – С. 63-69.
31. Поляков, В. С. Онлайн диагностика активной части силовых трансформаторов / В. С. Поляков. – Текст: непосредственный // Материаловедение. Энергетика. – 2021. – Т. 27, № 3. – С. 63-76.
32. Тихонов, А. И. Разработка технологии создания цифровых двойников силовых трансформаторов на основе цепных моделей и 2D-моделей магнитного поля / А. И. Тихонов, А. В. Стулов, И. В. Еремин [и др.] // Южно-Сибирский научный вестник. – 2020. – № 1(29). – С. 76-82.
33. Ровкина, Н. Г. Система непрерывного контроля параметров обмоток силовых трансформаторов на основе имитации динамических режимов работы / Н. Г. Ровкина, В. З. Ковалев, А. А. Зябкин. – Текст: непосредственный // Омский научный вестник. – 2011. – № 3(103). – С. 191-193.
34. Ровкина, Н. В. Исследование причин возникновения дефектов силовых трансформаторов, питающих установки погружных электроцентробежных насосов нефтяных скважин / Н. В. Ровкина, В. В. Сушков,

- А. А. Зябкин. – Текст: непосредственный // Омский научный вестник. – 2012. – № 3(113). – С. 231-235.
35. Русов, В. А. Оперативная оценка технического состояния и диагностика дефектов силовых трансформаторов в условиях эксплуатации / В. А. Русов. – Текст: непосредственный // Энергоэксперт. – 2023. – № 1(85). – С. 38-42.
36. Рыбаков, Л. М. Комплексная оценка состояния силовых трансформаторов в процессе их эксплуатации / Л. М. Рыбаков, С. В. Ласточкин, А. И. Соловьев, А. В. Шабалин. – Текст: непосредственный // Архивариус. – 2019. – № 10(43). – С. 23-27.
37. Фролов, А. Л. Опытная модель схемы диагностирования силовых трансформаторов с использованием согласующих трансформаторов / А. Л. Фролов. – Текст: непосредственный // Энергия единой сети. – 2022. – № 3-4. – С. 58-63.
38. Хальясмаа, А. И. Применение технологии цифрового двойника для анализа и прогнозирования состояния трансформаторного оборудования / А. И. Хальясмаа, И. С. Ревенков, А. В. Сидорова. – Текст: непосредственный // Вестник Казанского государственного энергетического университета. – 2022. – Т. 14, № 3(55). – С. 99-113.
39. Хлебцов, А. П. Развитие методов и устройств диагностики силового электрооборудования трансформаторных подстанций / А. П. Хлебцов, Л. Х. Зайнутдинова, А. Н. Шилин. – Текст: непосредственный // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2020. – Т. 16, № 3. – С. 14-27.
40. Козубай, И. Разработка технических средств и метода диагностики повреждения обмоток силового масляного трансформатора 10/0,4 кВ / И. Козубай, У. А. Калматов, Т. С. Борукеев, О. С. Суйумбаев. – Текст: непосредственный // Журнал «Вестник КРСУ». – 2023. – Т. 23, № 4. – С. 21-28.