

Ожидаемый срок службы трансформатора

Как долго прослужат ваши трансформаторы?

Ключевые слова: техническое обслуживание, мониторинг, ожидаемый срок службы, управление автопарком, техническое обслуживание

Предисловие

Поскольку операторы сетей сталкиваются с изменением климата, старением инфраструктуры и ростом спроса со стороны электромобилей, ожидаемый срок службы трансформаторов стала критически важной проблемой. В статье рассматриваются факторы, влияющие на долговечность трансформатора, подчеркивая влияние роста сети и ограничений цепочки поставок на доступность трансформатора. В статье рассматриваются передовые технологии мониторинга трансформатора, такие как Анализ растворенных газов, позволяющий определить, какие трансформаторы в стареющей парке нуждаются в замене, а не ждать, пока они выйдут из строя.

1. Введение

Пока операторы сетей борются с восстановлением после COVID, глобального потепления, суровых погодных явлений, целями по достижению нулевого уровня выбросов углерода, электромобилями, возобновляемой энергией и экстремальными проблемами с цепочкой поставок, общепринятой является одна концепция: свет должен оставаться включенным. В Соединенных Штатах эти проблемы усугубляются правительственными постановлениями, требующими более эффективных трансформаторов. В среднем КПД трансформатора составляет около 94–98% и даже выше. Установление более строгих требований

к повышению эффективности трансформаторов приведет к появлению дополнительных ограничений и увеличению сроков поставки. Большинство людей не осознают, с какими трудностями сталкиваются сетевые предприятия, обеспечивая надежное электроснабжение. Однако они могут перестать воспринимать электроэнергию как должное, если они потеряют ее, и ее нельзя будет немедленно восстановить по разным причинам. Одной из этих причин может быть то, что у местного сетевого предприятия больше нет запаса трансформаторов, необходимых для восстановления питания. В таких местах, как Калифорния, где ежедневно добавляется более 1000 электромобилей, сеть испытывает небывалую нагрузку. Незапланированные

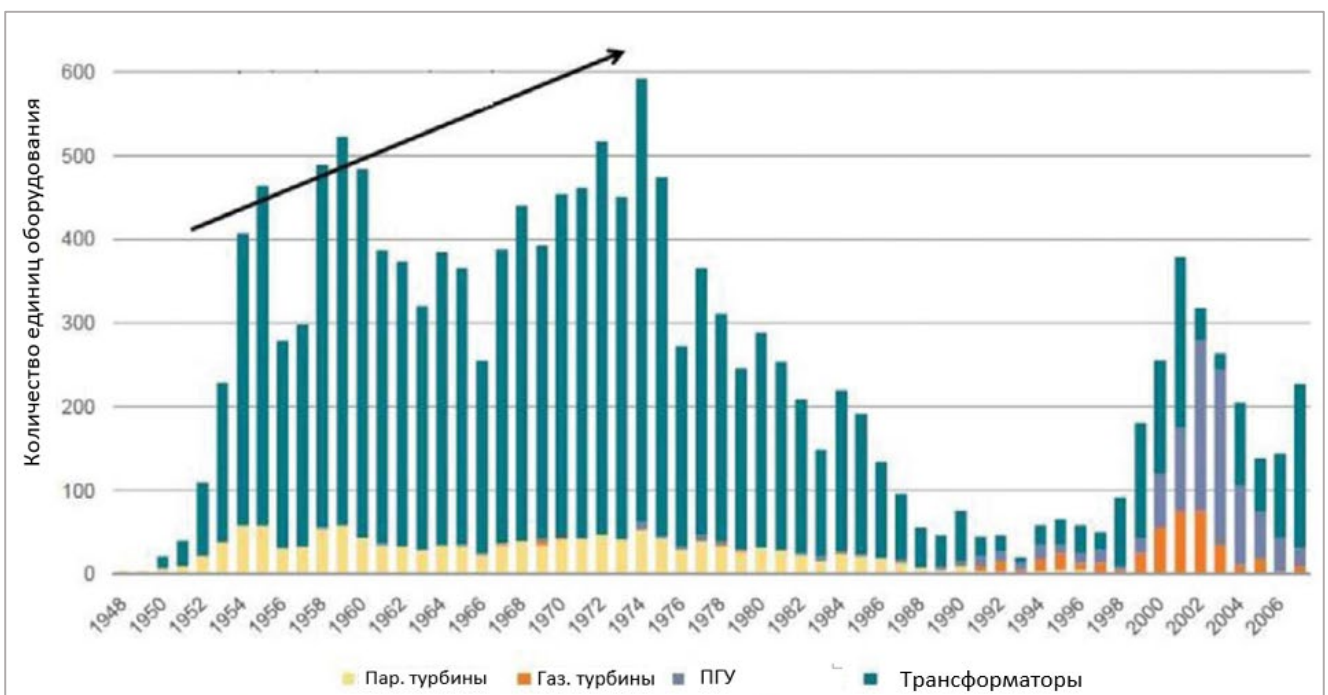


Рисунок 1. Статистика вводов оборудование с номинальной мощностью более 100 МВА (без учета замен существующего оборудования) в Северной Америке

нагрузки на трансформаторы в местах с заряжающимися транспортными средствами могут сократить срок службы трансформатора. Нагрузка может включать гармоники, вызванные электроникой зарядного устройства. Гармоники могут увеличить потерю нагрузки трансформатора, повысить температуру трансформатора и, следовательно, еще больше сократить срок службы трансформатора. Бытовые зарядные устройства также могут вызывать дисбаланс напряжения между фазами [1]. Существует не только нехватка трансформаторов для поддержки замены, но также нехватка трансформаторов для поддержки подключения к сети новых потребителей (население, станции зарядки электромобилей, промышленность).

2. Факторы, определяющие срок службы трансформатора

Пытаясь понять, как долго прослужит трансформатор, мы можем представить это как покупку поддержанного автомобиля. Ожидаемая продолжительность жизни автомобиля будет зависеть от того, как его водят, где его водят, истории технического обслуживания и т. д. Она также будет зависеть от его текущих условий эксплуатации. Было ли проведено рекомендуемое техническое обслуживание? Попадал ли автомобиль в какие-либо аварии и т. д.? Есть много того, что нужно учесть.

Аналогично, неудивительно,

что вопросы для силовых трансформаторов немного отличаются, но общий подход тот же. Чтобы понять, как долго прослужит трансформатор, вам нужно рассмотреть ряд важных факторов, включая производителя, возраст и насколько тяжелых условиях он эксплуатировался.

Поскольку в настоящее время срок поставки новых силовых трансформаторов составляет от 1 до 3+ лет, как эксплуатационным организациям справляться со своими стареющими трансформаторными парками? Возраст сам по себе не обязательно является показателем ухудшения состояния, но чем дольше трансформатор подвергался воздействию высоких температур и повторяющимся неисправностям, тем меньше вероятность, что он переживет будущее повышение нагрузки и возможные повреждения в сети. Эти реальные эксплуатационные условия снижают механическую прочность твердой изоляции, повышая вероятность выхода из строя электросетевого оборудования.

Одна из ключевых вещей, которую хочет знать каждое предприятие электроэнергетики, — это как долго прослужат её трансформаторы. Замена трансформаторов требует значительных усилий от многих подразделений предприятия, включая закупку, доставку, монтаж, испытания, и, не забывайте, финансы. Для покрытия этих расходов

должны быть деньги.

Помимо существенных затрат, предприятия сталкиваются с длительным временем ожидания новых заказов на трансформаторы. Конечно, это не так просто, как заглянуть в хрустальный шар, чтобы предсказать, когда трансформатор выйдет из строя. Необходимо учитывать множество факторов. Спецификация трансформатора, конструкция, производитель, результаты заводских испытаний, история обслуживания и эксплуатационная история — все это влияет на срок службы трансформатора.

Один из способов оценить срок службы трансформаторов — это изучить общедоступные данные. Приблизительное представление можно получить, изучив данные, которые использовались для получения стандартов растворенных газов в трансформаторном масле для 2019 Std IEEE C57.104 –IEEE Guide for the Interpretation of Gases Generated in Mineral Oil-Immersed Transformers [2]. Набор данных, использованный для получения стандарта, содержал около 1,4 миллиона образцов масла из более чем 300 000 трансформаторов. Многие лаборатории и эксплуатирующие компании предоставили данные для разработки стандарта.

Данные показывают, что для трансформаторов возрастом 60 лет и старше было проанализировано очень мало образцов масла.

ISO 18095 Компоненты силового трансформатора и категории повреждений

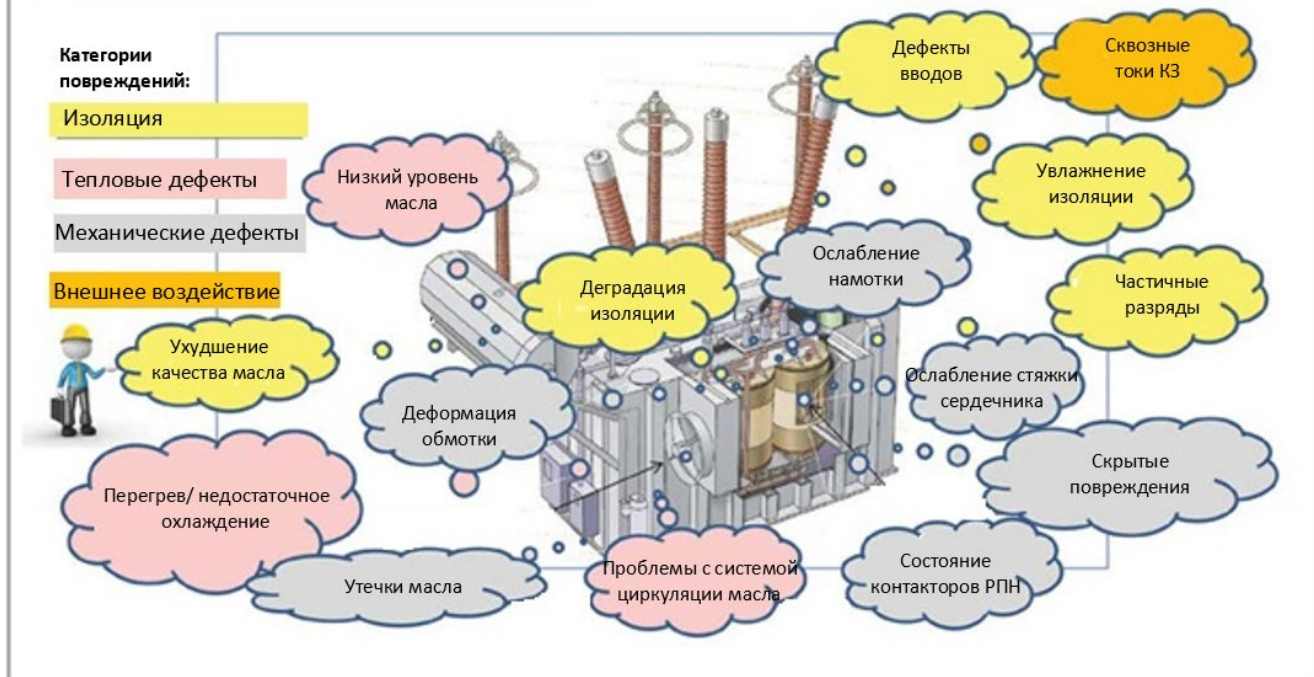


Рисунок 2. В соответствии со стандартом ISO 18095 [5] существует множество возможных вариантов выхода трансформатора из строя

Аналогичные данные, опубликованные в 2015 CIGRE Transformer Reliability Survey, показывают возрастной профиль более 7000 трансформаторов из североамериканского набора данных по находящимся в эксплуатации трансформаторам [3]. Хотя рост и падение данных из года в год в некоторой степени указывают на периоды расширения сети, важно, что тенденция от 45 до 60 лет указывает на то, что после 45 лет трансформаторы, скорее всего, будут выведены из эксплуатации, и практически нет никаких ожиданий, что трансформатор прослужит более 65 лет. На рис. 1 диаграмма из исследования Министерства энергетики США 2014 года по крупным силовым трансформаторам показывает,

что, поскольку строительство электрической инфраструктуры в Северной Америке было запланировано для ожидаемой будущей мощности, в 1990-х годах в сеть было добавлено очень мало трансформаторов мощностью более 100 МВА, поэтому многие заводы, производящие крупные силовые трансформаторы в Северной Америке, закрылись в то время или вскоре после этого. Следовательно, многие новые крупные силовые трансформаторы в Северной Америке необходимо импортировать из стран, которые все еще производят эти дорогие, критически важные активы. Помимо данных, имеющих в IEEE и CIGRE, несколько организаций собирают данные о трансформаторах,

находящихся в эксплуатации, и об отказах трансформаторов. Одна из таких организаций— Doble Engineering. Помимо сбора данных о различных отказах, они работают с владельцами трансформаторов с целью понять, как продлить срок службы этих критически важных активов. Как показано на схеме на рис. 2, трансформаторы гораздо сложнее, чем большинство людей осознает. Многие факторы способствуют сокращению срока службы трансформатора. Чаще всего люди пытаются упростить показатели отказов трансформаторов до понятных понятий на основе статистической теории. Одной из распространенных теорий, часто применяемых к отказам

трансформаторов, является кривая ванны (рис. 3). Эта концепция, по-видимому, имеет смысл, поскольку отказы случаются, когда новые трансформаторы выходят из строя из-за проблем с проектированием, производством или транспортировкой.

После того, как трансформатор проработает около пяти лет, владельцы ожидают увидеть надежный срок службы в течение 30 лет. После 30 лет интенсивность отказов начинает быстро расти

К сожалению, эта модель не

доказала свою точность, поскольку она не учитывает реальное проектирование, строительство, эксплуатацию и техническое обслуживание. Если трансформаторы подвергаются повторяющимся сквозным замыканиям или системы охлаждения не обслуживаются, эти типы эксплуатационных проблем, скорее всего, приведут к преждевременному выходу из строя.

Диаграмма на рис. 4 иллюстрирует фактические данные более 25 000 трансформаторов в базе

данных Doble. Каждая линия представляет собой частоту отказов трансформаторов, произведенных в определенное десятилетие. Например, трансформаторы, произведенные в 1950-х годах, имели очень низкие частоты отказов, пока трансформаторам не исполнилось около 40 лет. В отличие от трансформаторов, произведенных в 1980-х годах, у них были высокие частоты отказов в 11-30-диапазон лет.

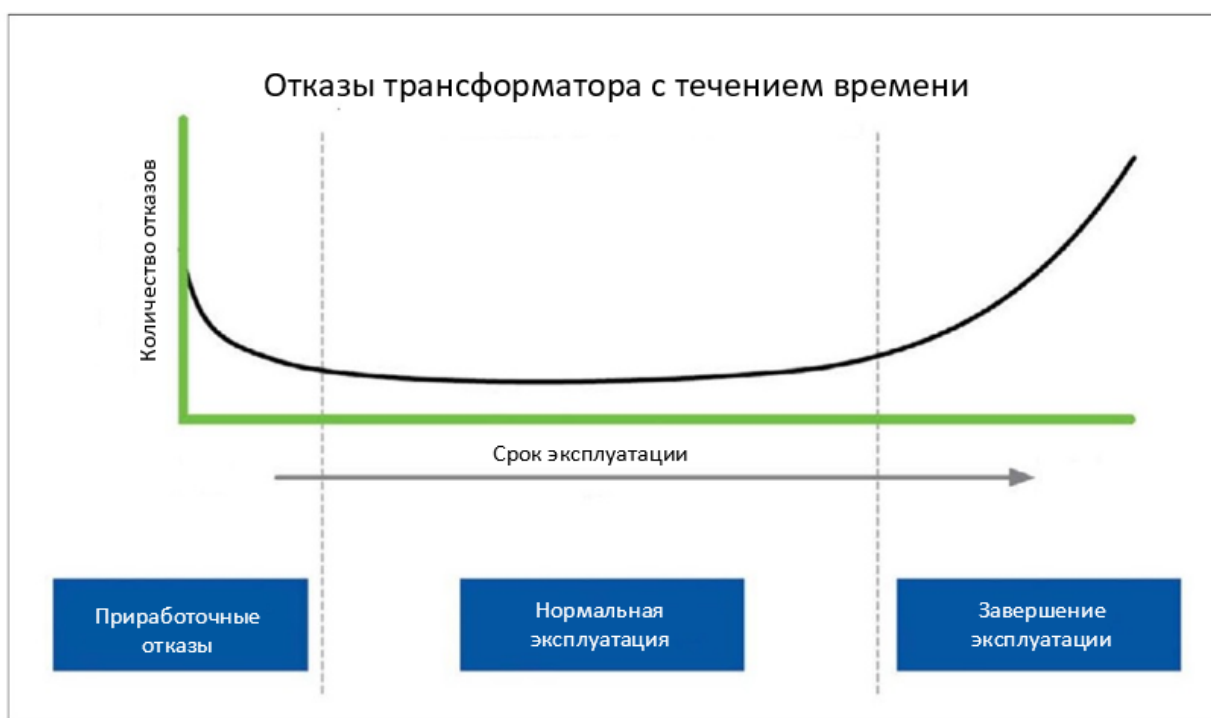


Рисунок 3. Отказ трансформатора с течением времени

3. Стратегии и технологии управления парком трансформаторов

Теперь, когда сроки поставки трансформаторов увеличились с месяцев до лет, а цены удвоились или утроились, какие стратегии используют эксплуатанты, чтобы справиться с

растущим спросом и сокращением предложения? Одна из стратегий, которая нравится многим, — это стратегия «ничего не делать». Другими словами, пусть трансформаторы гудят с минимальным или нулевым обслуживанием и надеются

на лучшее. Для многих небольших классов трансформаторов именно это и делает большинство эксплуатирующих компаний.

Если трансформатор выходит из строя, они его меняют. Эта стратегия хорошо работает,

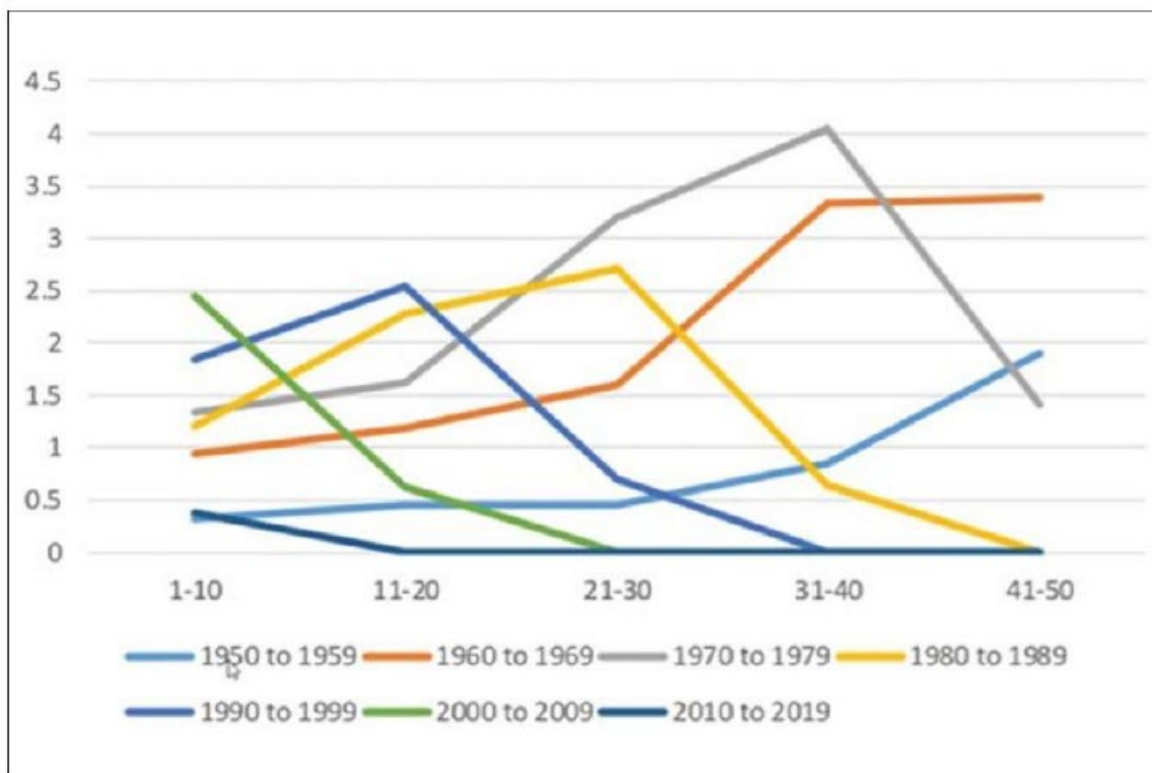


Рисунок 4. Частота отказов силовых трансформаторов. Каждая линия представляет частоту отказов трансформаторов, произведенных в определенном десятилетии.

когда есть достаточный запас резервных трансформаторов под рукой и если стандартные трансформаторы легко найти в ассортименте производителей. К сожалению, запасы сокращаются.

Следующая стратегия, которую большинство сетевых компаний применяют на более крупных трансформаторах, заключается в периодическом отборе проб масла и попытке диагностировать проблемы до выхода из строя.

Все предпочитают менять трансформаторы по графику, а не в экстренных случаях. Эта стратегия хорошо работает, если неисправности развиваются медленно и есть время проанализировать пробу, повторно взять пробу для подтверждения, оценить состояние и определить следующие действия, такие как лабораторное

офлайн-тестирование, чтобы понять, может ли трансформатор оставаться в эксплуатации. К сожалению, поскольку сеть становится все больше, лаборатории с трудом справляются. Обычно

получение результатов занимает 15 дней или меньше, но в последнее время в Северной Америке получение результатов может занять до 30-90 дней. Эта стратегия становится все более сложной в реализации. В редких случаях трансформаторы выходили из строя до того, как из лаборатории приходили результаты.

К счастью, теперь доступны технологии, которые помогают владельцам трансформаторов управлять своим парком в режиме реального времени. На протяжении многих лет эксплуатационных службы полагались на такие данные,

как температура и нагрузка, чтобы понять работу своих трансформаторов в реальном времени. Сегодня доступно множество вариантов онлайн-мониторинга, которые варьируются от крупных решений для мониторинга до менее сложных, компактных решений. По мере развития этих решений технология теперь позволяет осуществлять онлайн-мониторинг практически каждого аспекта работы трансформаторов в реальном времени. Цель состоит в том, чтобы обнаружить проблемы задолго до выхода из строя, чтобы трансформатор можно было отремонтировать в полевых условиях или вывести из эксплуатации на плановой основе, а не иметь дело с аварийным отключением. Наиболее широко используемый инструмент

для оценки состояния трансформатора — измерение растворенных газов в трансформаторном масле. Когда внутри трансформатора происходят тепловые и/или дуговые неисправности, трансформаторное масло и твердая изоляция разрушаются и образуют известный набор газов, растворённых в масле. Анализируя газы, растворённые в трансформаторном масле, можно оценить состояние трансформатора. Ценность решений для онлайн-мониторинга заключается в том, что они предупреждают операторов, когда внутри трансформатора повышается уровень аварийного газа. IEEE C57.104 2019 года не только предоставляет информацию о типичных значениях концентраций растворённых газов (АРГ - анализ растворенных газов), но также дает указания по скорости изменения газа и рекомендации по отбору проб вплоть до ежедневного отбора проб в зависимости от выявленного состояния. Организовать такой отбор проб трансформаторного масла — довольно трудная задача. Онлайн-мониторы АРГ могут предоставлять данные дистанционно, без отправки персонала на объекты и без организации работ на оборудовании, которое подвержено высокому риску отказа. Итак, как эксплуатирующие организации оценивают, какой из их трансформаторов выйдет из строя следующим?

В то время как некоторые критические трансформаторы могут использовать многогазовый АРГ, мониторинг вводов, мониторинг частичных разрядов и другие формы мониторинга, большинство владельцев не в состоянии развернуть крупные системы мониторинга на всех своих трансформаторах. Им необходимо выбрать стратегию, которая обеспечит максимальную отдачу от потраченных средств. Владельцы трансформаторов должны платить не только за оценку первоначальных затрат на внедрение системы мониторинга и диагностики, но и техническое обслуживание, необходимое для поддержания работоспособности системы в течение всего срока службы. Большинство эксплуатирующих организаций в Северной Америке не заинтересованы в трате капитальных средств и хотят минимизировать сумму расходов на техническое обслуживание. Поэтому надежность решения по диагностике является ключом к обеспечению максимальной выгоды от системы в течение срока службы трансформатора. Обычно предпочтение отдается решениям с минимальными или отсутствующими требованиями к обслуживанию. На протяжении более 40 лет онлайн-мониторы использовали концентрацию водорода в трансформаторном масле в качестве основного индикатора изменения

состояния трансформатора. Когда внутри трансформатора возникают серьезные проблемы, концентрация водорода увеличивается, что является ключевым индикатором того, что может быть что-то, что требует срочного решения. Когда концентрация водорода увеличивается, операторы могут выполнить отбор и анализ масла в лаборатории, чтобы понять серьезность проблемы. Для больших трансформаторов, где оправданы многогазовые системы диагностики, концентрацию этих газов можно оценить практически в режиме реального времени. Для небольших трансформаторов или больших трансформаторов без многогазового мониторинга АРГ контроль водорода предупреждает пользователей о том, что внутри трансформатора образуются газы, и нужно предпринять действия для понимания серьезности ситуации. Многие эксплуатирующие организации внедряют стратегию, при которой системы мониторинга концентрации водорода сигнализируют о возможной проблеме, а затем на место направляется бригада с портативным многогазовым монитором для проведения более полной диагностики.

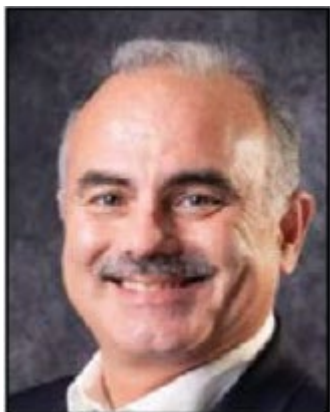
4. Заключение

Поскольку определение ожидаемого срока службы трансформатора является сложной задачей, онлайн-мониторинг может

оповещать пользователей об изменениях в состоянии трансформатора, чтобы они могли сосредоточиться на своих наиболее проблемных устройствах. В зависимости от класса активов трансформатора, конструкции и других факторов большинство эксплуатантов ожидают, что их трансформаторы прослужат от 40 до 60 лет. Поскольку средний возраст трансформатора в Северной Америке составляет около 40 лет, эксплуатирующие организации должны оценить, как лучше всего управлять своим парком, учитывая сегодняшние проблемы. Гораздо более вероятно, что трансформатор можно будет отремонтировать, если неисправности будут обнаружены до аварийного отключения. С нехваткой трансформаторов и быстрым расширением сети, в том числе из-за интеграции возобновляемых источников энергии и электромобилей, как никогда важно гарантировать, что каждый трансформатор будет работать как можно дольше.

Любой крупный отказ трансформатора создает дополнительную нагрузку на оставшуюся в работе сеть, если не будет реализована стратегия быстрого ремонта или замены на запасной трансформатор. Правильное управление активами трансформаторов позволяет эксплуатирующим организациям соответствовать ожиданиям потребителей и поддерживать бесперебойность подачи электроэнергии.

Авторы:



Leon White, в настоящее время является генеральным директором Hedrich North America, лидера в области систем сушки трансформаторов, возобновляемых источников энергии и других коммунальных приложений.

Ранее он был вице-президентом по продажам трансформаторной продукции в корпорации H2scan. У Леона более 30 лет опыта работы в сфере электроэнергетики и продаж, включая обширный опыт работы с электрическими подстанциями и онлайн-мониторингом трансформаторов. Он профессиональный инженер и член IEEE Power and Energy Society. Он получил степени электротехника и MBA в Университете Южного Иллинойса в Эдвардсвилле.



Dr. Tony McGrail из компании Doble Engineering Company проводит анализ состояния, критичности и рисков для владельцев/операторов подстанций.

Ранее доктор МакГрэйл более 10 лет проработал в National Grid в Великобритании и США в качестве специалиста по оборудованию подстанций, уделяя особое внимание силовым трансформаторам, выключателям и комплексному мониторингу состояния. Тони также взял на себя роль менеджера по активам

подстанций, чтобы выявлять риски и возможности для инвестиций в стареющую инфраструктуру. Доктор МакГрэйл является членом IET, бывшим председателем Совета IET, членом IEEE, ASTM, ISO, CIGRE и IAM, а также участником SFRA и других стандартов.

Ссылки:

- [1] Srivastava, A., Manas, M. & Dubey, R.K. Electric vehicle integration's impacts on power quality in distribution network and associated mitigation measures: a review. J. Eng. Appl. Sci. 70, 32 (2023). <https://doi.org/10.1186/s44147-023-00193-w>
- [2] C57.104 IEEE Guide for the Interpretation of Gases Generated in Mineral Oil-immersed Transformers, IEEE SA, 2019, <https://standards.ieee.org/ieee/C57.104/7476/>
- [3] Transformer Reliability Survey, Technical Brochure 642, CIGRE, 2015, <https://www.e-cigre.org/publications/detail/642-transformer-reliability-survey.html>
- [4] Large Power Transformers and the U.S. Electric Grid, U.S. Department of Energy, 2014, <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2014/04/f15/LPTStudyUpdate-040914.pdf>
- [5] Doble presentation, 2024.