

Е.Т. Әмитов¹, А.А. Тажибаев², Д.Қ. Дюсенғалиев¹, Г.Ж. Ноғайбекова¹

¹Energo University, Алматы, Қазақстан

²ТОО TRENCO R&D, Астана, Қазақстан

E-mail: ernar_amitov.91@mail.ru

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ СУШКИ ТВЕРДОЙ ИЗОЛЯЦИИ В СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРАХ

Аннотация. Процесс сушки изоляции обмоток трансформатора оказывает непосредственное влияние на надежность и долговечность трансформатора. Удаление влаги из бумажной изоляции является необходимым этапом в процессе производства трансформаторов. Эффективная функциональность твердой изоляции трансформаторов может снижаться со временем из-за вредного воздействия температуры, влаги и воздуха, что обычно называется старением. Тепло, кислород и остаточная влага ускоряют разрушение целлюлозной изоляции трансформатора, что может привести к преждевременному выходу трансформатора из строя. В процессе сушки изоляции на заводе необходимо обеспечить уровень содержания остаточной влаги ниже 0,5% в объемной твердой изоляции. Основной целью является поддержание высокого уровня полимеризации, который обычно составляет от 1000 до 800. В данной статье исследуются факторы, способствующие деградации целлюлозной изоляции, и проводится анализ различных методов, применяемых на производственном предприятии в Казахстане. Кроме того, в работе экспериментально исследуется влияние вакуума на процесс испарения влаги и частичных разрядов в сравнении с другими методами сушки трансформаторов.

Ключевые слова. Технология сушки, полимеризация, распределительные трансформаторы, влага, синтетический эфир.

Введение.

Силовые трансформаторы (СТ) являются основными компонентами энергосистемы, так как они обеспечивают стабильное электроснабжение. Поддержание бесперебойной подачи электроэнергии требует надлежащего функционирования трансформаторов. Уровни отказов трансформаторов можно представить в виде «ванной» кривой, где первый этап характеризуется преждевременным выходом из строя [1]. Проблемы производства, вызванные некачественными материалами или системами контроля, способствуют низкому уровню отказов. Согласно статистическому исследованию, было установлено, что 48% отказов трансформаторов связаны с проблемами изоляции обмоток [2]. Производственный процесс трансформаторов существенно влияет на срок службы и качество изоляции обмоток силовых трансформаторов [3-4].

Производство крупных СТ требует комплексного производственного процесса для достижения точных характеристик из-за сложных конструкций [5]. Необходимо избегать чрезмерного попадания влаги в твердую изоляцию во время ее высыхания. Твердые изоляторы СТ обычно используют гигроскопичную целлюлозу. В тропических регионах высокий уровень влажности приводит к значительному накоплению влаги. Перед введением масляной жидкой изоляции важно дать твердой изоляции пройти процесс сушки. Избыточное удержание влаги может наблюдаться в изоляции во время процесса сушки, что может быть вызвано различными факторами, такими как материал, конструкция или проблемы управления [6]. Даже небольшое количество влаги может

повредить изоляцию СТ. Химические процессы, которые приводят к повышению содержания влаги, могут снизить диэлектрическую прочность и ускорить процесс старения [7-8]. Частичные разряды являются дополнительным теоретическим аспектом, связанным с этим явлением. Пробой изоляции может быть вызван избыточной активностью частичных разрядов, связанной с отказами [9]. Оптимальное время сушки необходимо для минимизации остаточной влаги в процессе производства [10].

Производитель играет важную роль в определении надежности и долговечности распределительных и силовых трансформаторов. Перед заливкой изоляционного масла необходимо тщательно просушить целлюлозную твердую изоляцию внутри трансформатора. Процесс старения представляет собой сложную задачу, так как деградация изоляционных материалов может ускоряться из-за окисления, гидролиза и пиролиза, вызванных свойствами материалов и функционированием трансформаторов. Поэтому важно минимизировать наличие гигроскопичной влаги на протяжении всего производственного процесса твердой изоляции для обеспечения ее безопасной и надежной работы. Проблемы с изоляцией составляют 40-48% отказов силовых трансформаторов [11]. Пиролиз выделяет монооксид углерода (СО) и углекислый газ (СО₂), вместе с кислотами, а изоляция имеет тенденцию нагреваться. Передача и распределение электроэнергии в электрических сетях взаимосвязаны через маслонеполненные силовые трансформаторы [12]. Клиенты сталкиваются с трудностями и финансовыми потерями из-за повреждения оборудования и перебоев в электроснабжении, возникающих в результате выхода трансформаторов из строя. Диэлектрическая прочность твердой изоляции уменьшается с увеличением содержания воды. Поэтому процесс сушки изоляции трансформаторов осуществляется на протяжении производственного этапа, а также при ремонте утечек и последующем намокании. Таким образом, твердая изоляция отвечает за основную часть влаги в трансформаторах, тогда как масло оказывает меньшее влияние [13].

Процедура сушки обмоток трансформаторов в Казахстане проводилась по установленной методике. Сначала температура воздуха внутри шкафа была доведена до определенного уровня. После достижения требуемой температуры обмотку подвергали дальнейшему нагреву. Затем давление внутри вакуумного сушильного шкафа понижалось, облегчая процесс вакуумной сушки [14]. Измерение температуры изоляции не проводится, и обмотки подвергаются предварительному прессованию перед началом процесса сушки [15]. Затем обмотка сушится в процессе прессования. Недостатком данной технологии сушки является повышенная деполимеризация твердой изоляции из-за неконтролируемого роста температуры изоляции, относительно длительного времени сушки и необходимости вручную регулировать осевой размер обмоток путем удаления или добавления распорок. Также деполимеризация усиливается из-за быстрого удаления влаги из твердой изоляции в процессе снижения давления. Быстрая экстракция влаги происходит из-за уменьшения температуры испарения влаги при вакуумной сушке [16].

Для того чтобы сократить количество проблем и понять причины ухудшения состояния целлюлозной изоляции, необходимо изучить методики, используемые при сушке твердой изоляции. В зависимости от факторов силовых трансформаторов и условий обслуживания на месте или в производственных условиях, эти технологии могут быть разделены на несколько классов.

Материалы и методы.

Механизмы проникновения влаги в целлюлозную изоляцию трансформатора.

Проникновение влаги в изоляцию может происходить по трем основным механизмам: остаточная влага, оставшаяся с производственного процесса, влага из окружающей среды и влага, образующаяся в результате процесса разложения целлюлозы

из-за старения [5]. Остаточная влага может поступать либо из окружающей среды, либо из самого производственного процесса. Она также может быть результатом разрушения целлюлозы из-за старения. Наличие влаги в твердой изоляции может возникать в процессе нормальной эксплуатации и при вскрытии бака трансформатора. Способность трансформатора предотвращать проникновение влаги из внешней среды не влияет на деградацию молекул целлюлозы и последующее образование воды. На рисунке 1 показано разрушение целлюлозы на более мелкие сегменты. Процесс старения целлюлозы может быть вызван такими факторами, как гидролиз, повышенные температуры, присутствие кислорода и кислотное окисление. Степень полимеризации является полезным индикатором для оценки состояния целлюлозной изоляции. Степень полимеризации / частичный разряд в новой бумаге обычно составляет от 1200 до 1250. Со временем молекулы целлюлозы начинают разрушаться, как показано на рисунке 1, что приводит к снижению значения Степень полимеризации / частичный разряд. Обычно плотность мощности находится в диапазоне от 600 до 800 единиц. Когда значение частичных разрядов падает ниже 200 единиц, бумажная изоляция для обмоток становится недостаточной. Регулярная сушка твердой изоляции трансформатора крайне важна для минимизации влияния влаги на процесс старения и физические характеристики целлюлозы. В данном исследовании подробно рассматриваются наиболее часто используемые процессы сушки в трансформаторах, заполненных маслом, для практического применения.

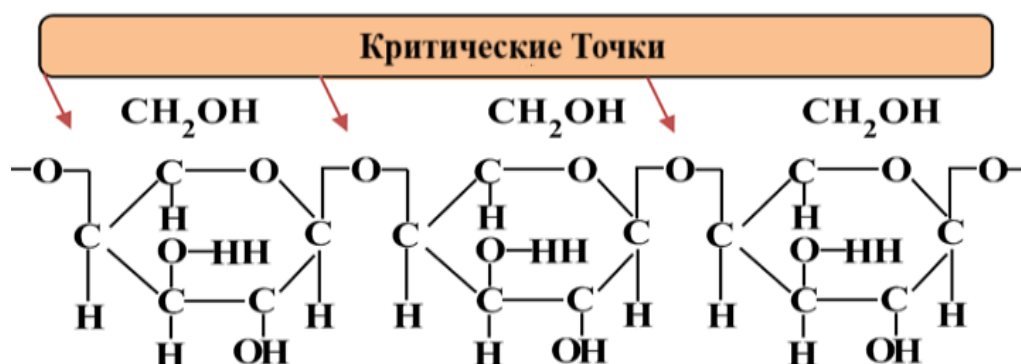


Рисунок 1 - Процессы деградации молекул целлюлозы

Методы сушки твердой изоляции в трансформаторах.

Сушка твердой изоляции — это процесс непрерывной сушки трансформаторного масла с использованием абсорбента. Такой подход можно рассматривать как профилактическую меру, поскольку он помогает контролировать и регулировать содержание влаги в твердой изоляции трансформатора во время его эксплуатации. Однако этот метод также можно считать косвенным методом сушки, так как он в первую очередь воздействует на масло, а не на твердую изоляцию. Данный процесс реализуется с помощью нескольких адсорберов, каждый из которых содержит абсорбент, подключенный к трансформатору. Абсорбент обладает высокой способностью к поглощению. Вода удаляется из масла абсорбентом по мере его прохождения через адсорберы с умеренной скоростью около 30 литров в минуту. Когда трансформатор находится в эксплуатации, влага перемещается из жидкости в твердую изоляцию. В результате твердая изоляция эффективно осушается, а циркуляция масла помогает удалить остаточную влагу. На рисунке 2 показано использование адсорберов для непрерывного удаления влаги из масла и твердой изоляции внутри трансформатора.



Рисунок 2 - Непрерывная сушка трансформаторного масла и твердой изоляции с помощью адсорберов на подстанции

Результаты и обсуждения.

Экспериментальный стенд на производственном заводе.

Сушка в паровой фазе на производственном заводе.

В наших экспериментах для удаления влаги из целлюлозной изоляции использовалась сушка в паровой фазе как показано на рисунке 3, а также сушильная камера на рисунке 4 (а). В процессе сушки применялись вакуум и нагрев для ускорения и улучшения процесса. Тепловым предшественником, использованным в этом исследовании, была уникальная органическая жидкость с температурой 110 °С. Передача тепла от сборки обмоток к твердым изоляционным элементам приводит к удалению влаги из внутреннего слоя, что вызывает ее испарение во внешнем слое в виде водяного пара. Конденсация органической жидкости и водяного пара достигалась с помощью вакуумной откачки. Органическая жидкость затем циркулировала для целей сушки. Испарение воды при минимальных затратах тепловой энергии можно регулировать, манипулируя температурой нагрева и давлением внутри камеры. Вакуумное давление было установлено на уровне 10^{-3} бар.

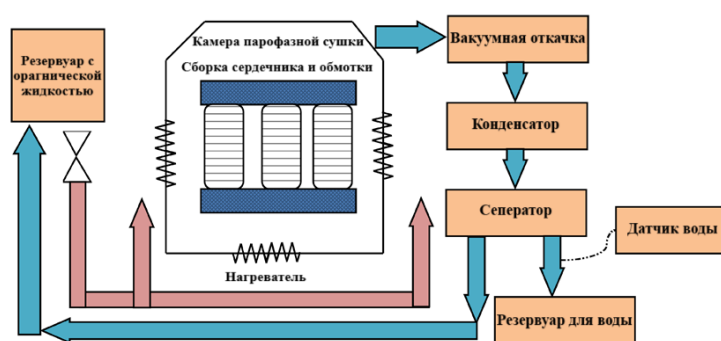


Рисунок 3 - Блок-схема камеры вакуумного сушильного шкафа для сушки силовых трансформаторов на производстве

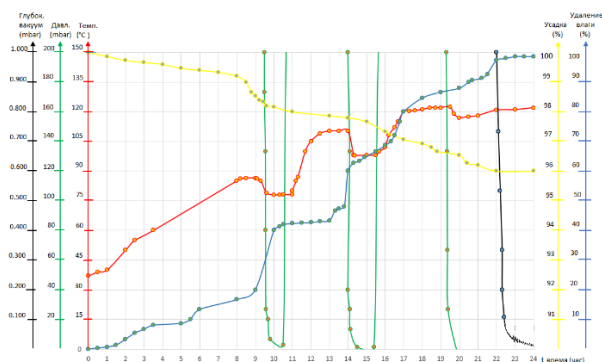
Техники нагрева и вакуумирования для сушильных камер.

В специализированных камерах на производственных заводах и в сервисных центрах используются нагрев и вакуум для облегчения процесса сушки целлюлозной изоляции. При воздействии высоких температур внутри камеры происходит испарение воды из изоляционных слоев сердечника трансформатора. После достижения нужной температуры используется вакуумный насос для создания вакуума в камере, что эффективно устраняет водяной пар и повышает эффективность процесса сушки. На рисунке 4 (а) показана сушильная камера, а на рисунке 4 (б) — схема поэтапной сушки

при изостатическом уплотнении, предложенная для внедрения. Как видно из рисунка 4 (b), время сушки значительно сокращается при использовании поэтапного процесса. В диаграмме каждая цветная линия представляет определенные параметры: температура обозначена красной линией, вакуумное давление в камере — зеленой линией. Желтая линия показывает процент усадки обмотки. Черная линия указывает на значительный вакуум, а синяя линия отражает удаление влаги из изоляции.



(a)



(b)

Рисунок 4 - Сушильные камеры для трансформатора (a), и (b) схема поэтапной сушки при изостатическом прессовании

Реализация фазового сушки с использованием изостатической прессовки.

На рисунке 5 показан изостатический пресс. Верхняя и нижняя пластины соединены с гидравлической станцией изостатического пресса. Одним из ключевых преимуществ реализации фазового сушки с использованием системы изостатической прессовки является возможность использования горячего воздуха для нагрева обмотки трансформатора. Время имеет способность регенерировать воздух. Когда температура обмотки превышает определенный порог, процесс нагрева воздуха заменяется фазой, в которой давление ВДЦ снижается. Даже в более холодных условиях более низкое давление в ВДЦ способствует более интенсивному испарению влаги из изоляции. Этот процесс приводит к нагреву изоляции трансформатора и последующему снижению деполимеризации. Процесс нагрева и снижения давления повторяется каждый раз, когда температура обмотки превышает определенный порог. Регулируя продолжительность фаз высокого вакуума, мы можем добиться более быстрого цикла сушки, при этом сохраняя необходимую фазу нагрева. Кроме того, важно поддерживать умеренную начальную интенсивность прессования, чтобы обеспечить плавный процесс сушки для твердой изоляции без прерываний. По мере достижения максимальной температуры для сушки давление прессования постепенно увеличивается до желаемой силы. Катушки равномерно стабилизируются за счет вертикального давления. Гидравлические цилиндры, насосы и

клапан регулирования давления используются для поддержания определенного уровня давления. В течение всего процесса на экране компьютера оператора отображается прикладываемая сила и сила, действующая вниз. Конструкторы трансформаторов могут рассчитать усадку твердой изоляции и высоту обмотки, поддерживая рекомендуемую силу прессования после сушки. Сокращая продолжительность сушки, можно снизить затраты на энергию и повысить производительность с использованием аппаратов вакуумной сушки. Использование изостатической прессовки в процессе сушки улучшает прочность обмотки на механические нагрузки.



а)



б)



в)



г)



д)



ж)

Рисунок 5 - Подсоединение гидравлической станции к стабилизирующему прессу (а,б); гидравлический агрегат для стабилизирующего пресса (в); подключение стабилизирующего пресса к вакуумносушильному шкафу (г), и прессование обмотки в стабилизирующем прессе (д, ж)

Оценка частичных разрядов для надежности трансформатора.

Испытания и измерения частичных разрядов (ЧР) проводились в соответствии со стандартом IEC 60270 [10]. ЧР был представлен с использованием модели ABC, которая является емкостной сетью, зависящей от кажущегося заряда. Для соединения измерительного импеданса между заземленным корпусом трансформатора и клеммой используется отвод изолятора. Для измерения и регистрации ЧР терминал соединен с коммерчески доступным прибором для измерения частичных разрядов Omicron MPD 600 с помощью экранированных коаксиальных кабелей (LiYCY). На обмотку низкого напряжения (НН) подавалось переменное напряжение, постепенно повышающееся до примерно 325 кВ, согласно методу испытания напряжением IEC 60076-3.

В процессе сушки твердая изоляция эффективно поглощает энергию теплопередачи. Целлюлоза не подвергается воздействию тепла, что помогает минимизировать загрязнение водой. Закон Фика может помочь объяснить медленное движение влаги в целлюлозе. Взаимосвязь между кажущейся величиной заряда и временем сушки представлена на рисунке 6. Из рисунка 5 видно, что результаты испытания частичных разрядов показали тенденцию к увеличению времени сушки, в частности тех периодов, которые длительностью менее 68 часов. Чрезмерное поглощение тепла в процессе сушки целлюлозной твердой изоляции может привести к разрыву полимерных цепей и снижению значения полимеризации, что может вызвать структурные повреждения. Укорочение полимерной цепи снижает физические характеристики целлюлозной изоляции, что ведет к снижению напряжения возникновения частичных разрядов. Когда периоды сушки превышают оптимальную продолжительность, тесты на кажущийся заряд показывают рост частичных разрядов из-за первых признаков старения. Период сушки менее 68 часов является недостаточным для полного удаления избыточных остатков в твердой изоляции, что приводит к повышению кажущегося заряда частичных разрядов.

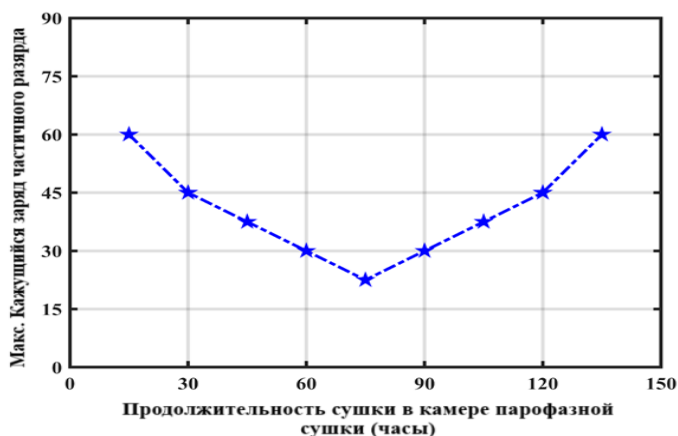


Рисунок 6 - Влияние периода сушки на результаты испытания видимого заряда при частичных разрядах

Оценка взаимосвязи между извлечением воды и частичными разрядами.

Вода обладает замечательной электрической проводимостью из-за своего минимального сопротивления. Наивысший результат теста на частичные разряды (ЧР) был зафиксирован при извлечении 150-400 граммов воды, тогда как наименьший результат наблюдался при 2,232 граммах. Согласно исследованию, проведенному Сулайманом и др. [13], количество воды, удаленной в процессе сушки, значительно влияет на наличие остаточной влаги. Это, в свою очередь, негативно коррелирует с

результатами тестов на частичные разряды и может привести к увеличению проводимости кажущегося заряда. Проводимость изоляции из крафт-бумаги, изготовленной из целлюлозы, увеличивается с ростом содержания влаги. Это связано с воздействием поляризации диэлектрической реакции и тока деполяризации. Согласно выводам [14], поверхностный частичный разряд в маслбумажной изоляции увеличивался линейно с увеличением содержания влаги в процессе испытаний. На рисунке 7 показано сравнение между извлеченным содержанием воды и результатами теста на кажущийся заряд частичных разрядов.

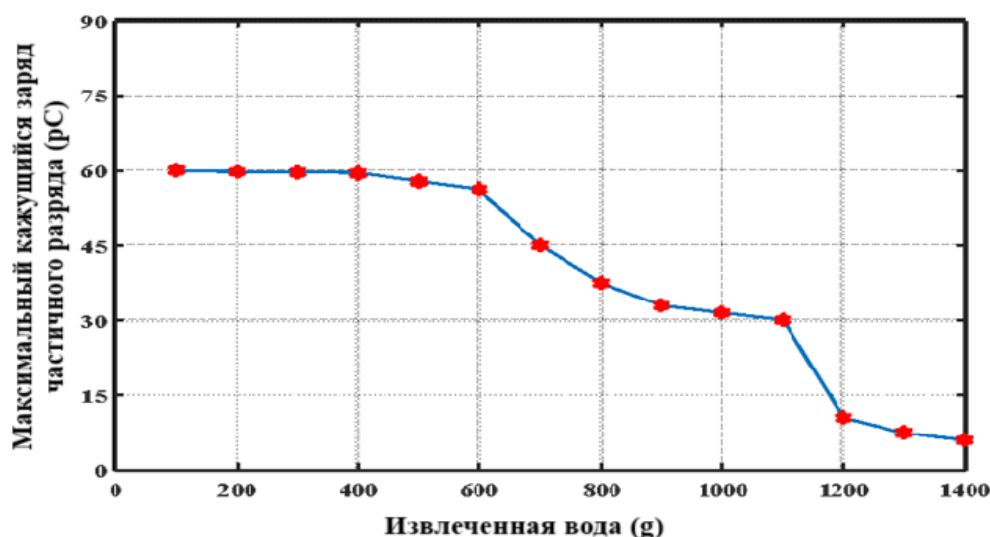


Рисунок 7 - Анализ результатов испытания видимого заряда при частичных разрядах с учетом различных уровней извлечения воды

Заключения.

Были проведены экспериментальные исследования для изучения влияния продолжительности сушки и извлечения воды на частичные разряды, возникающие при производстве силовых трансформаторов мощностью 83,3 МВА с напряжением 275/160 кВ. В ходе исследования применялись различные методы, такие как сушка в паровой фазе на производстве, методы нагрева и вакуумной сушки, а также фазовая сушка с использованием изостатической прессовки и оценка частичных разрядов. Исследование было направлено на изучение извлечения воды и частичных разрядов для понимания результатов тестирования на кажущийся заряд при различных уровнях извлечения воды. Два процедурных фактора оказали значительное влияние на результаты тестов на ЧР. После периода сушки в 68 часов минимальный уровень частичного разряда составил 21 пК, тогда как максимальный уровень частичного разряда составил 60 пК после 81 часа. Оба значения соответствовали критериям приемлемости. В результате комплексного исследования было установлено, что наиболее благоприятная продолжительность сушки составляет 67,4 часа, что подтверждается использованием полиномиальной регрессии. В то время как более короткие периоды сушки могут недостаточно удалять остаточную влагу, что приводит к повышению значений ЧР, более длительные интервалы сушки могут вызвать деградацию целлюлозы в результате чрезмерного нагрева. Важным аспектом оценки воздействия восстановления воды на остаточную влагу изоляции и результаты ЧР является понимание взаимосвязи между содержанием остаточной влаги и проводимостью заряда. Наблюдается значительное увеличение значений частичных разрядов при испытаниях, проведенных на сушке в течение 67,4 часа или более.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Lee, J. H. (2020, September). An Analysis of Power Transformer Failures using the Mixed Weibull Statistics. In 2020 International Symposium on Electrical Insulating Materials (ISEIM) (pp. 65-67). IEEE.
- [2] Christina, A., Salam, M. A., Rahman, Q. M., Wen, F., Ang, S. P., & Voon, W. (2018). Causes of transformer failures and diagnostic methods—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 1442-1456.
- [3] Foros, J., & Istad, M. (2020). Health index, risk and remaining lifetime estimation of power transformers. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 35(6), 2612-2620.
- [4] Da Silva, D. G. T., Da Silva, H. J. B., Marafão, F. P., Paredes, H. K. M., & Gonçalves, F. A. S. (2021). Enhanced health index for power transformers diagnosis. *Engineering Failure Analysis*, 126, 105427.
- [5] Trappey, A. J., Trappey, C. V., Chao, M. H., Hong, N. J., & Wu, C. T. (2021). A vr-enabled chatbot supporting design and manufacturing of large and complex power transformers. *Electronics*, 11(1), 87.
- [6] De Ligne, L., Van Acker, J., Baetens, J. M., Omar, S., De Baets, B., Thygesen, L. G., & Thybring, E. E. (2022). Moisture dynamics of wood-based panels and wood fibre insulation materials. *Frontiers in Plant Science*, 13, 951175.
- [7] Kaliappan, G., & Rengaraj, M. (2021). Aging assessment of transformer solid insulation: A review. *Materials Today: Proceedings*, 47, 272-277.
- [8] Kurzweil, P., Schell, C., Haller, R., Trnka, P., & Hornak, J. (2021). Environmental impact and aging properties of natural and synthetic transformer oils under electrical stress conditions. *Advanced Sustainable Systems*, 5(8), 2100079.
- [9] Rathod, V. B., Kumbhar, G. B., & Bhalja, B. R. (2022). Partial discharge detection and localization in power transformers based on acoustic emission: Theory, methods, and recent trends. *IETE Technical Review*, 39(3), 540-552.
- [10] Correa, W., García, D., & García, B. (2023). Power transformer temperature–moisture dynamics modeling: an experimental validation. *Electrical Engineering*, 105(2), 761-773.
- [11] Rafiq, M., Shafique, M., Azam, A., Ateeq, M., Khan, I. A., & Hussain, A. (2020). Sustainable, renewable and environmental-friendly insulation systems for high voltages applications. *Molecules*, 25(17), 3901.
- [12] Chothani, N., Raichura, M., & Patel, D. (2023). Transformer Infrastructure for Power Grid. In *Advancement in Power Transformer Infrastructure and Digital Protection* (pp. 1-26). Singapore: Springer Nature Singapore.
- [13] Arsad, S. R., Ker, P. J., Jamaludin, M. Z., Choong, P. Y., Lee, H. J., Thiviyathan, V. A., & Yang Ghazali, Y. Z. (2023). Water content in transformer insulation system: A review on the detection and quantification methods. *Energies*, 16(4), 1920.
- [14] Sawant, C., Nalawade, M., & Choudhary, N. (2017, December). Experimental Investigation of Vapour Phase Drying System. In *International Conference on Advances in Thermal Systems, Materials and Design Engineering (ATSMDE2017)*.
- [15] Naranpanawe, L., Ekanayake, C., & Saha, T. K. (2019). Measurements on pressboard to understand the effect of solid insulation condition on monitoring of power transformer winding clamping pressure. *IET Science, Measurement & Technology*, 13(2), 186-192.
- [16] Villibord, L. (2023). Finite Element Simulation of Moisture Transport in Cellulose Insulation Material of Power Transformers.

Ернар Әмитов, PhD, қауымдастырылған профессор, Energo University, Алматы, Қазақстан, ernar_amitov.91@mail.ru

Адилбек Тажібәев, докторант, TRENCO R&D ЖШС, Алматы, Қазақстан, adilbek_kentau@mail.ru

Диас Дюсенғалиев, магистрант, Energo University, Алматы, Қазақстан, d.dyussengaliyev@aes.kz

Гүлнұр Ноғайбекова, магистр, Energo University, Алматы, Қазақстан, g.nogaibekova@aes.kz

КҮШТІК ТРАНСФОРМАТОРЛАРДАҒЫ ҚАТТЫ ОҚШАМАНЫ КЕПТІРУ ӘДІСТЕРІН САЛЫСТЫРМАЛЫ ТАЛДАУ

Аңдатпа. Трансформатор орамдарының оқшамасын кептіру процесі трансформатордың сенімділігі мен ұзақ мерзімділігіне тікелей әсер етеді. Қағазды оқшауламадан ылғалды кетіру трансформаторларды өндіру процесінде қажетті қадам болып табылады. Трансформатордың оқшауламасының тиімді функционалдығы әдетте температураның, ылғалдың және ауаның зиянды әсерлеріне байланысты уақыт өте келе тозуға алып келеді. Жылу, оттегі және қалдық ылғал трансформатордың мерзімінен бұрын істен шығуына әкелетін целлюлозалық оқшауламаның нашарлауын тездетеді. Зауытта оқшауламаны кептіру процесінде көлемді қатты оқшауламадағы қалдық ылғалдың 0,5% төмен болуын қамтамасыз ету қажет. Негізгі мақсат – әдетте 1000-нан 800-ге дейін болатын жоғары полимеризациялану жылдамдығын сақтау. Бұл мақалада целлюлоза оқшауламасының бұзылуына ықпал ететін факторлар қарастырылады және Қазақстандағы өндірістік зауытта қолданылатын әртүрлі әдістер талданады. Сонымен қатар жұмыста трансформаторларды кептірудің басқа әдістерімен салыстырғанда ылғалдың булану процесіне және ішінара разрядтарға вакуумның әсері эксперименталды түрде зерттеледі.

Түйінді сөздер. Кептіру технологиясы, полимеризациялану, тарату трансформаторлары, ылғал, синтетикалық эфир.

Yernar Amitov, PhD, ассоциированный профессор, Energo University, Алматы, Қазақстан, ernar_amitov.91@mail.ru

Adilbek Tajibayev, doctoral student, LLP TRENCO R&D, Almaty, Kazakhstan, adilbek_kentau@mail.ru

Dias Dyussengaliyev, master student, Energo University, Almaty, Kazakhstan. d.dyussengaliyev@aes.kz

Gulnur Nogaibekova, master, Energo University, Almaty, Kazakhstan, g.nogaibekova@aes.kz

COMPARATIVE ANALYSIS OF DRYING METHODS FOR SOLID INSULATION IN POWER TRANSFORMERS

Abstract. The drying process of transformer winding insulation has a direct impact on the reliability and durability of the transformer. Removing moisture from paper insulation is a necessary step in the transformer manufacturing process. The effective functionality of transformer solid insulation can decrease over time due to the harmful effects of temperature, moisture and air, which is commonly referred to as aging. Heat, oxygen and residual moisture accelerate the degradation of transformer cellulose insulation, which can lead to premature failure of the transformer. During the insulation drying process at the factory, it is necessary to

ensure that the residual moisture content in the bulk solid insulation is below 0.5%. The main objective is to maintain a high polymerization level, which is usually between 1000 and 800. This paper investigates the factors that contribute to the degradation of cellulose insulation and analyzes the different methods used in a manufacturing plant in Kazakhstan. In addition, the paper experimentally investigates the effect of vacuum on the process of moisture evaporation and partial discharges in comparison with other transformer drying methods.

Keywords. Drying technology, polymerization, distribution transformers, moisture, synthetic ether.

Редакцияға түсті / Поступила в редакцию / Received 15.08.2024
Жариялауға қабылданды / Принята к публикации / Accepted 26.12.2024