

Еникеева Эльза Рашитовна, Доцент, к.т.н.,
ГБОУ ВО «Альметьевский государственный нефтяной институт»
г. Альметьевск, РТ

Языков Сергей Леонидович, Студент,
ГБОУ ВО «Альметьевский государственный нефтяной институт»
г. Альметьевск, РТ

ПРОЦЕСС НИЗКОЧАСТОТНОЙ СУШКИ В ПРОИЗВОДСТВЕ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Аннотация: В статье рассмотрен принцип низкочастотного нагрева сушки изоляции трансформатора за счет подачи регулируемого тока низкой частоты на его высоковольтные (HV) обмотки.

Ключевые слова: изоляция трансформатора, высоковольтные обмотки, трансформатор.

Одним из важных процессов в производстве трансформаторов является эффективное удаление влаги из целлюлозной изоляции. Качество сушки изоляционного материала самым непосредственным образом сказывается на параметрах диэлектрика и определяет надежность трансформатора.

После изготовления распределительного или силового трансформатора и до момента заливки его изолирующим маслом, следует тщательно просушить твердую изоляцию внутри трансформатора.

Как правило, в качестве изолирующего материала используется целлюлоза, молекулы которой состоят из длинных цепочек глюкозных колец. Если изоляцию не просушить, она теряет изолирующие свойства, снижая электрическую и механическую прочность трансформатора.

Для сушки изоляции в больших силовых трансформаторах в основном применяются следующие методы: циркуляция горячего воздуха в вакуумной камере; сушка паром, которая тоже выполняется в вакуумной камере. Для трансформаторов специальной конструкции, так называемых броневых трансформаторов, используют метод сушки аэрозольным распылением горячего масла.

Для нагрева трансформаторов изнутри используются низкочастотные токи, подаваемые в высоковольтные обмотки трансформатора.

Однако независимо от используемого метода, процесс сушки получается дорогостоящим энергоемким. В результате, при выборе подходящей процедуры сушки, основное внимание уделяется времени обработки и общему потреблению энергии.

Вместо горячего воздуха или паров растворителя, для нагрева трансформаторов изнутри используются низкочастотные токи, подаваемые в высоковольтные (HV) обмотки трансформатора.

Низкочастотный нагрев (LFH) – это уникальный процесс сушки изоляции трансформатора за счет подачи регулируемого тока низкой частоты на его высоковольтные (HV) обмотки. Основное влияние на скорость сушки и ее качество оказывает температура объекта сушки и глубина вакуума. Для более крупных трансформаторов метод LFH используется в сочетании с циркуляцией горячего воздуха.

Процесс LFH позволяет равномерно нагреть высоковольтные и низковольтные обмотки трансформатора изнутри, путем подачи тока низкой частоты малого напряжения на высоковольтные обмотки, при этом низковольтные обмотки замыкаются накоротко.



При низкой частоте (0,4 – 2 Гц) и малом сопротивлении проблем с высоким напряжением не возникает, а магнитная связь создает хорошо контролируемый ток в низковольтной обмотке. В ходе процесса высоковольтные и низковольтные обмотки трансформатора нагреваются до типичной температуры сушки 110 – 120 °С, как и в процессе сушки парами растворителя.

Для мониторинга процесса сушки, и особенно температуры обмотки, следует использовать специальные методы контроля, предотвращающие образование перегретых участков и, как следствие, повреждение изоляции. Для непрерывного слежения за токами, напряжениями, сопротивлениями и глубиной вакуума используют уникальную систему управления и мониторинга.

Контроль глубины вакуума необходим потому, что в вакууме понижается напряжение пробоя, а непрерывный мониторинг температур высоковольтной и низковольтной обмоток позволяет оптимизировать процесс сушки.

Система очень точно определяет температуры высоковольтной и низковольтной обмоток и позволяет независимо нагревать высоковольтные обмотки, если их температура оказывается ниже температуры низковольтных обмоток.

Какие выгоды дает этот процесс? Дело в том, что при использовании сушки методом низкочастотного нагрева, качество изоляции трансформатора значительно улучшается, по сравнению с более традиционными системами, использующими вакуумную сушку горячим воздухом.

Это связано с тем, что в ходе такого процесса источником тепла является сама обмотка, что является идеальным местом нагрева для извлечения влаги из изоляции. Кроме того, температуру обмотки можно контролировать с высокой точностью.

В результате время сушки значительно сокращается по сравнению с обычными системами, использующими горячий воздух и вакуум, а это, в свою очередь, позволяет сэкономить до 50 процентов энергии – что при сушке одного небольшого силового трансформатора составляет порядка 2000 кВтч.

Подобно любой традиционной системе сушки, система LFH является частью сушильной установки, состоящей из вакуумного автоклава или вакуумированной оболочки трансформатора, вакуумной насосной станции (рис. 1) и т. п.

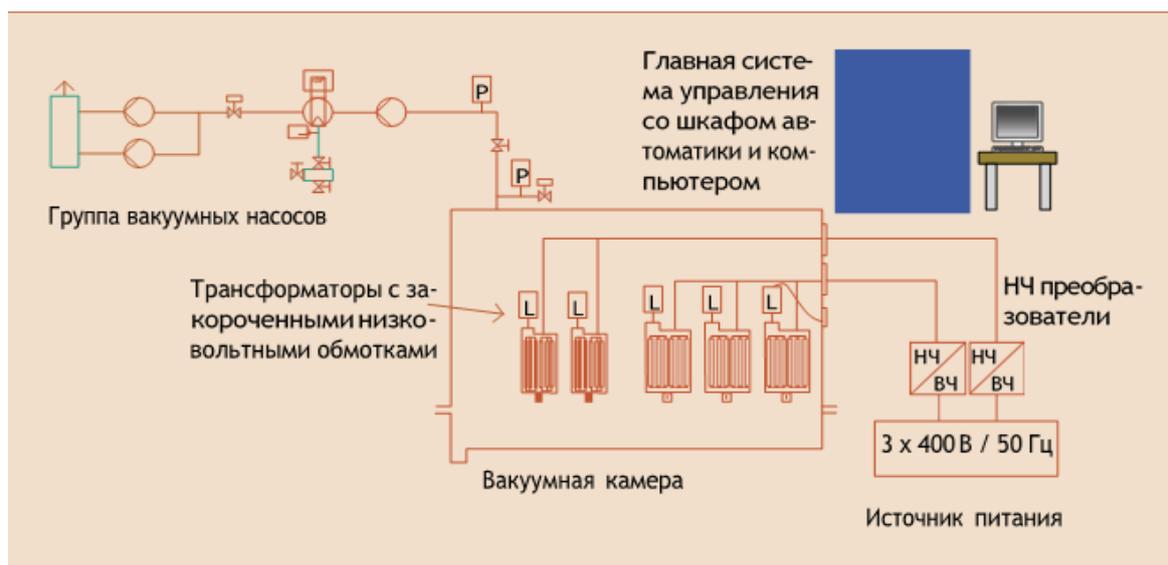


Рисунок 1 - Схема установки сушки методом LFH



Нагревание распределительных трансформаторов токами низкой частоты позволяет упростить структуру сушильной установки. В ее состав входит конусный автоклав, вакуумный насос, низкочастотные преобразователи для нагрева трансформатора изнутри и система управления.

Сразу же после сушки система управления заполняет емкости трансформатора изолирующим маслом. В такой установке низкочастотные токи нагревают только обмотки трансформатора – сам конусный автоклав при этом не нагревается.

Традиционной системе сушки горячим воздухом для завершения процесса сушки потребовалось бы, как минимум, вдвое больше времени.

В результате такой метод сушки распределительных трансформаторов обеспечивает минимальные затраты энергии и дает другие преимущества, такие как ускорение процесса сушки, высокая производительность, простота управления и автоматическое заполнение маслом после сушки.

Сушка силовых трансформаторов мощностью от 500 кВА до 30 МВА выполняется в оболочке трансформатора. Низкочастотный ток подается на высоковольтные выводы при закороченных низковольтных выводах, горячий воздух для циркуляции внутри трансформатора поступает по гибким воздуховодам.

Если после сушки не требуется дополнительное уплотнение трансформатора (что зависит от его конструкции), его можно заполнять маслом сразу же после вакуумирования.

Преимущество такого метода заключается в том, что трансформатор после сушки не подвергается воздействию атмосферы. После заполнения изолирующим маслом для создания нужного давления в оболочке трансформатора может использоваться азот.

Традиционной системе сушки горячим воздухом для завершения процесса сушки потребовалось бы, как минимум, вдвое больше времени. Если небольшая сушильная установка с циркуляцией горячего воздуха потребляет 50 кВт и работает в течение 80 часов, общие затраты энергии на сушку небольшого силового трансформатора составляют 4000 кВтч.

При снижении времени сушки на 50 процентов, экономия энергии при сушке одного трансформатора методом LFH составит, по меньшей мере, 2000 кВтч.

Установка оборудования LFH в существующий вакуумный автоклав для сушки горячим воздухом может существенно сократить время сушки и улучшить результаты.

Методы вакуумной сушки горячим воздухом широко применяются для сушки небольших трансформаторов, поэтому существует громадный потенциал обновления таких систем установкой LFH.

Система нагрева LFH предлагает мобильное альтернативное решение Конвертер LFH вместе с системой управления и принадлежностями можно доставить к месту установки трансформатора в контейнере или в автоприцепе. Нагрев и сушка трансформатора могут выполняться в сочетании с традиционной циркуляцией горячего масла или с аэрозольным распылением горячего масла.

Сочетание аэрозольного распыления горячего масла с нагревом LFH позволяет нагревать обмотки до более высоких температур, что позволяет значительно сократить время сушки, по сравнению с традиционным методом циркуляции горячего масла, и обеспечивает уровень остаточной влажности менее 1 процента.

При этом уровень влажности приближается к исходным значениям, достигаемым в процессе производства трансформаторов. Этот метод уже успешно применили для сушки на месте установки более 40 силовых трансформаторов с номинальной мощностью до 400 МВА.



Измерения на больших трансформаторах показали, что при использовании традиционных методов сушки с циркуляцией горячего масла и вакуума средняя скорость экстракции влаги составляет примерно 2,5 литра в день, тогда как метод аэрозольного распыления горячего масла с LFH обеспечивает скорость экстракции до 20 литров в день.

При влажности изоляции от 3 до 1,5 процентов LFH работает в восемь раз быстрее традиционных методов, что позволяет сэкономить большое количество энергии и эффективнее использовать производственные ресурсы.

Список литературы:

1. Техническое описание и руководство по эксплуатации Б 6.0106.04.
2. Еникеева Э.Р., Муравьева Е.А. Интеллектуальная система сигнализации и противоаварийной защиты технологических объектов. //В сборнике: Достижения, проблемы и перспективы развития нефтегазовой отрасли. Материалы Международной научно-практической конференции. 2018. С. 419-423.
3. [https://transform.ru/sst/\\$books/b000009.htm](https://transform.ru/sst/$books/b000009.htm)
4. <https://pue8.ru/podstantsii/607-sushka-transformatorov.html>
5. <https://elekom.ru/article/v-kakih-sluchayah-neobhodima-sushka-transformatora>
6. <https://en-trans.ru/blog/sposoby-sushki-transformatora/>
7. <https://kratko-obo-vsem.ru/articles/methods-for-drying-and-warming-transformers.html>
8. <https://electricalschool.info/main/electroremont/1387-sushka-transformatorov.html>

