

Список использованной литературы

1. Применение импульсной закалки для упрочнения сменных деталей глубокорыхлителей / Г. И. Анискович, В. Г. Мисько, М. А. Шевчук, М. М. Шукан // Аграрная наука и инновационное развитие АПК: состояние, проблемы и перспективы : сборник материалов международной научной конференции, Смоленск, 18 апреля 2024 года. – Смоленск: Смоленская государственная сельскохозяйственная академия, 2024. – С. 163–168.
2. Анискович, Г. И. Применение импульсной закалки для упрочнения сменных деталей глубокорыхлителей / Г. И. Анискович, М. А. Шевчук // Техническое и кадровое обеспечение инновационных технологий в сельском хозяйстве : материалы Международной научно-практической конференции, Минск, 16-17 октября 2024 г. : в 2 ч. - Минск : БГАТУ, 2024. – Ч. 2. – С. 40–42.
3. Макаров, С. С. Математическая модель охлаждения цилиндрической заготовки одномерным нестационарным потоком воды / С. С. Макаров, К. Э. Чекмышев, Е. В. Макарова // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. – 2014. – № 4 (207). – С. 195–201.
4. Макаров С.С., Чекмышев К.Э., Храмов С.Н., Макарова Е.В. Математическое моделирование охлаждения при закалке осесимметричных металлических заготовок // Вестник ИжГТУ им. М.Т. Калашникова. Ижевск: Из-во ИжГТУ, 2014. №3 (63). С. 38–43.
5. Новиков, И. И. Теория термической обработки металлов : учебник для вузов / И. И. Новиков. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Металлургия, 1986. – 480 с.
6. Зиновьев, В. Е. Теплофизические свойства металлов при высоких температурах : справ. изд. / В. Е. Зиновьев. – М. : Металлургия, 1989. – 384 с.

УДК 621.316

А.И. Зеленькевич, канд. техн. наук, доцент,

В.М. Збродыга, канд. техн. наук, доцент,

*УО «Белорусский государственный аграрный технический университет»,
г. Минск*

Н.Е. Шевчик, канд. техн. наук,

*РНПУП «Институт энергетики Национальной академии наук Беларуси»,
г. Минск*

Е.А. Дерюгина, канд. техн. наук, доцент,

Белорусский национальный технический университет, г. Минск

НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕРМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ТРАНСФОРМАТОРЕ СО СХЕМОЙ СОЕДИНЕНИЯ ОБМОТОК «ЗВЕЗДА-ДВОЙНОЙ ЗИГЗАГ» ПРИ ПИТАНИИ РЕЗКО ПЕРЕМЕННЫХ НАГРУЗОК

Ключевые слова: трансформатор, схема соединения «звезда-двойной зигзаг», термическое моделирование, нестационарные тепловые процес-

сы, резкопеременная нагрузка, зарядные станции, высшие гармоники, тепловая модель.

Key words: transformer, star-double zigzag connection, thermal modeling, transient thermal processes, rapidly changing load, charging stations, higher harmonics, thermal model.

Аннотация: В статье рассмотрены особенности моделирования тепловых процессов в трансформаторе со схемой соединения обмоток «звезда-двойной зигзаг с нулевым проводом» при работе на резкопеременные и нелинейные нагрузки, характерные для зарядной инфраструктуры электромобилей. Предложена тепловая модель, учитывающая частотно-зависимые потери в обмотках, дополнительные потери в магнитопроводе от высших гармоник, а также потери от циркулирующих токов нулевой последовательности.

Summary: This article examines the specifics of modeling thermal processes in a transformer with a star-double zigzag connection with a neutral conductor when operating with rapidly varying and nonlinear loads typical of electric vehicle charging infrastructure. A thermal model is proposed that takes into account frequency-dependent winding losses, additional losses in the magnetic circuit due to higher harmonics, and losses due to circulating zero-sequence currents.

С ростом потребления электрической энергии, с изменением состава и характера электрических нагрузок в сельских электрических сетях проблема обеспечения ее качества становится все более актуальной. Внедрение электрических мобильных машин и механизмов с соответствующей зарядной инфраструктурой ужесточает требования к обеспечению нормативных уровней качества электрической энергии. Выбор средств обеспечения качества электрической энергии в электроустановках сельскохозяйственных потребителей целесообразно выполнять из конструктивно простых и надежных устройств, с относительно невысокой стоимостью, простых и надежных в эксплуатации, например, использовать трансформатор со специальной схемой соединения обмоток «звезда-двойной зигзаг с нулевым проводом» ($Y/2Z_n$) [1,2], который устойчив к искажающим воздействиям со стороны нагрузки и способен обеспечить высокий уровень симметрии и синусоидальности напряжения.

Для проведения корректной оценки ресурса, допустимых режимов перегрузки и выбора конструктивных параметров трансформатора со схемой соединения $Y/2Z_n$ необходимо проводить детализированное моделирование термических процессов в трансформаторе при резкопеременных нагрузках. В отличие от стационарного режима, где температура опреде-

ляется средними потерями, в зарядной инфраструктуре решающую роль играют нестационарные тепловые процессы, обусловленные импульсным характером нагрузки и широким спектром гармоник.

Тепловая модель строится на базе эквивалентной RC -сети использующей аналогию тепловых и электрических процессов, в которой «узлы» соответствуют элементам конструкции – обмотки (отдельно для полуобмоток зигзага), магнитопровод, изоляция (масло) и окружающая среда. Базовое уравнение теплового баланса для каждого «узла» имеет вид

$$C_{th} \frac{dT}{dt} = P_{loss}(t) - \frac{(T - T_{amb})}{R_{th}} - \frac{\sum (T - T_i)}{R_{th,ij}},$$

где C_{th} – тепловая ёмкость узла,

R_{th} – тепловое сопротивление к окружающей среде,

$P_{loss}(t)$ – мгновенные потери, зависящие от тока и его спектра.

Ключевым отличием режима с зарядными станциями является временная зависимость $P_{loss}(t)$, так как потери состоят из нескольких составляющих

$$P_{loss}(t) = P_{Cu}(t) + P_{Fe}(t) + P_{stray}(t) + P_{hf}(t).$$

Потери в обмотках (в меди)

$$P_{Cu}(t) = \sum R(\omega) i^2(t),$$

где $R(\omega)$ – частотно-зависимое сопротивление.

При наличии гармоник эффективное значение тока возрастает

$$I_{rms,eff}^2 = I_1^2 + \sum I_h^2,$$

что может увеличивать потери на 20...50% даже при той же активной мощности.

Потери в магнитопроводе (в стали)

$$P_{Fe} \approx k_h f B^n + k_e f^2 B^2,$$

где первая часть это гистерезисные потери, вторая часть это вихревые потери. При наличии высокочастотных гармоник (до 10-20 кГц) вклад вихревых потерь возрастает пропорционально f^2 , что делает их существенными даже при малой амплитуде магнитной индукции B .

Дополнительные потери (рассеяния)

$$P_{stray} \propto (I_h^2 f_h^m),$$

обусловлены токами в конструктивных элементах, т.е. бак, крепления, экраны и т.д., и особенно чувствительны к высокочастотным компонентам.

Высокочастотные потери в обмотках P_{hf} связаны со скин-эффектами и эффектом близости и могут быть выражены через коэффициент повышения

$$P_{hf} \approx k_{hf}(\omega)P_{Cu},$$

где k_{hf} достигает 1,2-1,5 в диапазоне частот 5-20 кГц.

Для трансформатора со схемой соединения Y/Z дополнительно учитывается специфический компонент – потери P_{circ} от циркулирующих токов нулевой последовательности, которые локализованы в отдельных полюбмотках, что приводит к температурной неравномерности

$$P_{circ} \approx R_{int}(\omega)I_{circ}^2,$$

где I_{circ} может достигать 0,2-0,4 $I_{ном}$ при несимметричных и нелинейных нагрузках.

Следует учитывать также динамику нагрева, то есть различие постоянных времени нагрева для обмотки $\tau_{windings} \approx 5-15$ мин, для трансформаторного масла $\tau_{oil} \approx 30-90$ мин, для магнитопровода $\tau_{core} \approx 20-60$ мин, что показывает, что быстрые изменения нагрузки не успевают полностью отразиться на температуре трансформаторного масла, но вызывают значительные колебания температуры первичной и вторичной обмоток.

При импульсном DC-режиме зарядных станций, который характеризуется скачками нагрузки от 0,3 до 1,0 $S_{ном}$ с периодом 1-10 с средние потери возрастают на 10-20%, но пиковые мгновенные значения могут достигать 30%, при этом температура обмоток колеблется с амплитудой 15°C, а средняя температура может достигать 110°C при номинальном классе изоляции 120°C. При несимметричном AC-режиме потери увеличиваются на 5-10%, но возникает градиент температуры между полюбмотками, который может достигать 10-15°C из-за неравномерного распределения токов, что ускоряет локальное старение изоляции. При стохастическом режиме, который характеризует работу нескольких зарядных станций образующих «зарядный хаб» наблюдается эффект «теплового накопления», то есть при случайных колебаниях нагрузки средняя температура выше, чем при равномерной нагрузке той же мощности, на 10°C, при этом дополнительные потери могут составлять до 15%.

Критически важен также и анализ степени старения изоляции, которое описывается законом Аррениуса

$$V \propto e^{\frac{-Ea}{kT}},$$

где срок службы V резко уменьшается с ростом температуры. Практически используется правило, что увеличение температуры на 6-8°C сокращает срок службы изоляции в 2 раза, т.е. дополнительные 10-15°C в режимах зарядных станций могут уменьшить ресурс трансформатора на 30...50% при длительной эксплуатации. При этом дополнительно рекомендуется учитывать тип системы охлаждения трансформатора, например для масляных трансформаторов

$$P_{\text{охл}} \approx k_{\text{cool}} (T - T_{\text{amb}})^n,$$

где $n \approx 1,2-1,5$.

В данном выражении при наличии принудительного охлаждения коэффициент k_{cool} увеличивается, что существенно снижает перегрев в динамических режимах.

Подводя итог, можно сделать вывод, детализированная термическая модель показывает, что основную проблему при работе трансформатора со схемой соединения обмоток $Y/2Zn$ с зарядными станциями составляют не столько средние потери, сколько их неравномерность и динамичность, которые приводят к локальным перегревам, ускоренному старению изоляции и необходимости закладывать запас по мощности до 20-30% либо применять усиленные системы охлаждения и мониторинга температуры в реальном времени.

Список использованной литературы

1. Прищепов, М.А. Работа трансформатора со схемой соединения обмоток «звезда-двойной зигзаг с нулевым проводом» при несимметричной нагрузке / М.А. Прищепов, В.М. Збродыга, А.И. Зеленькевич // Агропанорама. – 2018. – № 6. – С. 25–31.

2. Прищепов, М.А. Работа трансформатора со схемой соединения обмоток «звезда-двойной зигзаг с нулевым проводом» при нелинейном характере нагрузки / М.А. Прищепов, В.М. Збродыга, А.И. Зеленькевич // Агропанорама. – 2018. – № 1. – С. 9–19.

УДК 631.362.3

Э.Г. Нуруллин, д-р техн. наук, профессор,

Р.А. Файзуллин, канд. техн. наук,

Э.Н. Давлетшин, аспирант

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский государственный аграрный университет»,
г. Казань*

nureg@mail.ru

МАЛОГАБАРИТНЫЙ ВИБРАЦИОННЫЙ СЕПАРАТОР ЗЕРНА

Ключевые слова: первичная очистка зерна; вибрационный сепаратор; конструктивно-технологическая схема.

Keywords: primary grain cleaning; vibrating separator; design and technological scheme.

Аннотация. В статье рассмотрена конструкция малогабаритного вибрационного сепаратора зерна, предназначенного для выполнения первич-