

УДК 621.311.1

Б.В. Цыганенко,
Национальная комиссия, осуществляющая государственное
регулирование в сферах энергетики и коммунальных услуг,

В.В. Кирик,
Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТА УСТАНОВКИ РЕЗЕРВНЫХ ПЕРЕМЫЧЕК РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ

Представлен метод многоцелевой оптимизации конфигурации распределительной сети в послеаварийных режимах, с использованием теории нечетких множеств. Синтезирован нечеткий логический контроллер для определения рейтингов выключателей резервных перемычек с учетом потерь напряжения в наиболее удаленном участке, коэффициента мощности на главном участке при допустимости режима по току. Передаточная характеристика синтезированного нечеткого логического контроллера позволяет определить по входным расчетным параметрам сети рейтинги коммутационных элементов резервных перемычек для разных конфигураций схем сети и сформировать две резервные перемычки с максимальными значениями рейтингов, для которых уточняются потери мощности, и по минимальному значению потерь принимается решение использования данной перемычки.

Ключевые слова: распределительные сети, реконфигурация, оптимизация, нечеткая логика

Надійшла 08.09.2016

Received 08.09.2016

УДК 621.314

С.В. Казанський, канд. техн. наук, доц., В.І. Моссаковський, інженер, А.В. Яковенко, магістрант
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ДИНАМІЧНЕ 3D-МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛОВОГО СТАНУ СИЛОВИХ ОЛИВНИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ

Розглянуто особливості дослідження внутрішнього теплового стану силових оливних трансформаторів. Наведено послідовність динамічного 3D-моделювання теплових режимів за різних умов експлуатації силових оливних трансформаторів в електричних мережах.

Мета дослідження: визначення найвищого значення температури ізоляції обмоток для підвищення експлуатаційної надійності електричних мереж і систем за рахунок інтенсифікації навантажувальної здатності силових оливних трансформаторів.

Методика реалізації: запровадження новітніх алгоритмів і програм динамічного 3D-моделювання термодинамічних процесів нагрівання оливи та ізоляції обмоток силових оливних трансформаторів для автоматизованого контролю внутрішнього теплового стану.

Результати дослідження: визначено доцільність застосування програмного пакету SolidWorks для проведення динамічного 3D-моделювання теплових режимів силових оливних трансформаторів; проаналізовано отримані результати щодо уточнення навантажувальної здатності силових оливних трансформаторів.

Висновки: показано, що впровадження сучасних програмних пакетів динамічного 3D-моделювання дозволяє побудувати ефективну систему автоматизованого контролю внутрішніх теплових режимів силових оливних трансформаторів в електричних мережах.

Ключові слова: силовий трансформатор, динамічне моделювання, тепловий режим, навантажувальна здатність.

Вступ. Підтримання надійної роботи обладнання електроенергетичних систем і електричних мереж є загальнонаціональним стратегічним завданням, яке впливає на економічну безпеку держави [1]. Одним із найголовніших елементів системи передавання електричної енергії є силові трансформатори, надійна та ефективна робота яких є запорукою забезпечення надійності електропостачання.

Підвищення навантажувальної здатності силових оливних трансформаторів є нагальним практичним завданням, оскільки в електричних мережах існує значний дефіцит трансформаторної потужності, що ускладнює підключення нових споживачів та гальмує розвиток мереж.

Загальні вимоги щодо визначення теплового стану та навантажувальної здатності силових оливних трансформаторів викладено в міждержавному стандарті МГОСТ 14209-97 [2] та оновленому стандарті ІЕС 60076-7 [3]. Зазначені нормативні документи, зокрема, визначають методика розрахунку температури найбільш нагрітої точки ізоляції обмоток $\Theta_h(t)$ силових оливних трансформаторів з різними системами охолодження оливи. При цьому зазначається, що ця температура є функцією від значення струмового навантаження, а також температури оливи та температури навколишнього середовища і її може бути визначено опосередкованим розрахунковим шляхом або за допомогою моделювання. Крім того, значення $\Theta_h(t)$, а також інтегральне значення теплового старіння ізоляції обмоток L_h є критеріями допустимості та тривалості перевантаження.

Мета і завдання моделювання. Безпосереднє визначення температури $\Theta_h(t)$ ізоляції обмоток силових оливних трансформаторів є досить складним технічним завданням, оскільки розташувати на поверхні ізоляції датчики температури, які могли би працювати тривалий час (бажано впродовж всього терміну експлуатації трансформатора) практично неможливо (хоча останнім часом надходить інформація про практичні спроби здійснення таких вимірів). Крім того, що найголовніше, неможливо визначити де саме встановлювати такий датчик, оскільки це місце може змінюватись (тобто «мігрувати» всередині бака) залежно від багатьох факторів – симетричності струмового навантаження фаз, конструктивних особливостей роботи охолоджувальної системи, погодних умов тощо. Саме тому найефективнішим методом визначення значення $\Theta_h(t)$ ізоляції обмоток є динамічне моделювання. Широке використання динамічних моделей пов'язане, перш за все, з тим, що дає змогу різко скоротити обсяг і масштаби натурних експериментів [4].

Метою динамічного 3D-моделювання теплових режимів силових оливних трансформаторів є візуалізація термодинамічних температурних полів оливи та ізоляції обмоток силових трансформаторів у різних експлуатаційних режимах з урахуванням конструктивних особливостей та температурних умов навколишнього середовища.

Для досягнення зазначеної мети в процесі моделювання вирішувались такі завдання:

- відтворення конструктивних елементів (включно із системою охолодження) силового оливного трансформатора та охолоджуючого середовища (трансформаторної оливи);
- розрахунок значень температури найбільш нагрітої точки ізоляції як функції струму навантаження та температури оливи силового трансформатора;
- структурне моделювання температури $\Theta_h(t)$ ізоляції обмоток та інтегрального значення теплового старіння ізоляції обмоток L_h ;
- побудова 3D-алгоритму просторового пошуку місця розташування точки $\Theta_h(t)$ на поверхні ізоляції обмоток;
- динамічне відтворення зміни внутрішніх температурних полів за різних експлуатаційних умов.

Результати моделювання. Моделювання проводилося на прикладі силового оливного трансформатора ТДН-16000/110 (система охолодження – ONAF) із застосуванням програмного пакету SolidWorks.

Загальний вигляд моделі трансформатора та системи охолодження наведено на рис. 1. Створена модель за габаритами та площиною поверхні внутрішнього та зовнішнього теплообміну відповідає фактичним параметрам трансформатора ТДН-16000/110. Певні труднощі виникли із моделюванням теплообмінних процесів у внутрішньому просторі трансформатора, оскільки параметри та характеристики трансформаторної оливи відсутні в бібліотеці SolidWorks.

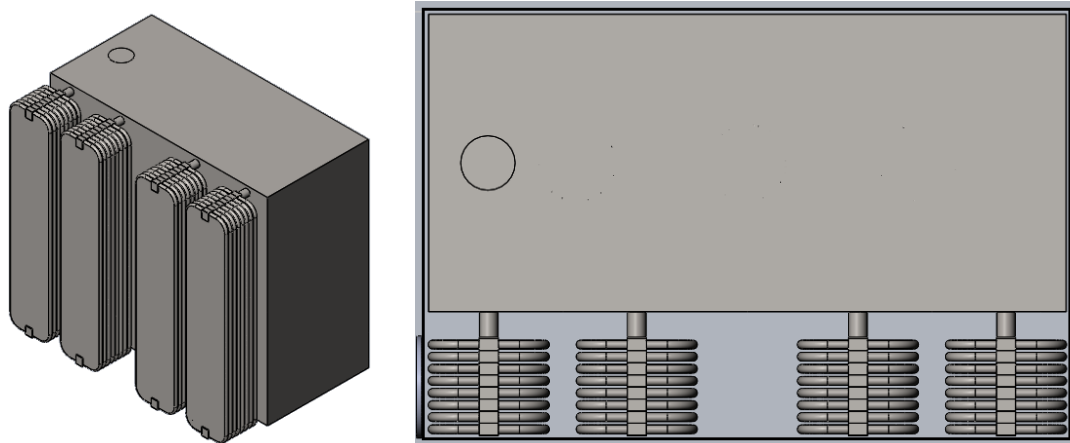


Рисунок 1 – Загальний вигляд моделі трансформатора та системи охолодження

Для визначення температури ізоляції та інтегрального значення теплового старіння ізоляції обмоток силових оливних трансформаторів з системою охолодження ONAF згідно [1] використовуються такі розрахункові співвідношення:

температура найбільш нагрітої точки ізоляції обмоток, °C

$$\theta_h = \theta_a + \Delta\theta_{br} \cdot \left[\frac{1 + R \cdot K^2}{1 + R} \right] + H_{qr} \cdot K^y, \quad (1)$$

де θ_a – температура навколишнього середовища; $\Delta\theta_{br}$ – перевищення температури оливи над температурою навколишнього середовища; R – відношення втрат потужності за номінального навантаження до втрат холостого ходу; K – коефіцієнт навантаження; H_{qr} – градієнт температури найбільш нагрітої точки ізоляції обмоток; y – емпіричний коефіцієнт обмоток трансформаторів (для різних систем охолодження);

перевищення температури оливи над температурою навколишнього середовища в кінці інтервалу часу t , °C

$$\Delta\theta_{bt} = \Delta\theta_{bi} + (\Delta\theta_{bu} - \Delta\theta_{bi}) \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_0}} \right), \quad (2)$$

де $\Delta\theta_{bi}$ – початкове значення перевищення температури оливи над температурою навколишнього середовища; $\Delta\theta_{bu}$ – усталене значення перевищення температури оливи над температурою навколишнього середовища в кінці інтервалу часу t за навантаження, незмінного впродовж цього інтервалу; τ_0 – теплова стала нагрівання оливи трансформатора;

відносна швидкість теплового старіння ізоляції обмоток

$$V = \frac{\text{швидкість зношення при } \theta_h}{\text{швидкість зношення при } 98^\circ\text{C}} = 2^{\frac{\theta_h - 98}{6}} \quad (3)$$

де θ_h – фактичне значення температури найбільш нагрітої точки ізоляції обмоток, визначене за виразом (1); 98 °C – значення температури ізоляції обмоток, за якого відносна швидкість теплового старіння ізоляції дорівнює одиниці;

відносне значення теплового старіння ізоляції обмоток (скорочення терміну використання) впродовж декількох інтервалів часу

$$L = \frac{1}{t} \int_{t_1}^t V dt \quad \text{або} \quad L = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N V_n, \quad (4)$$

де n – порядковий номер інтервалу часу; N – загальні кількість інтервалів часу спостереження.

Наступний крок – моделювання просторового розподілу температури внутрішніх елементів силового трансформатора (магнітопровід, олива, ізоляція обмоток) за різних експлуатаційних умов (значення струмового навантаження та температура навколишнього середовища, а також стан системи охолодження).

Нижче наведено результати моделювання розподілу температури в магнітопроводі без обмоток (рис. 2), магнітопроводі з обмотками нижчої (рис. 3) та вищої (рис. 4) напруги, а також розподіл температур у повздовжньому зрізі трансформатора (рис. 5) за наступних експлуатаційних умов:

- температура навколишнього середовища -20°C ;
- швидкість вітру -2 м/с ;
- струмове навантаження – номінальне;
- система охолодження – не працює

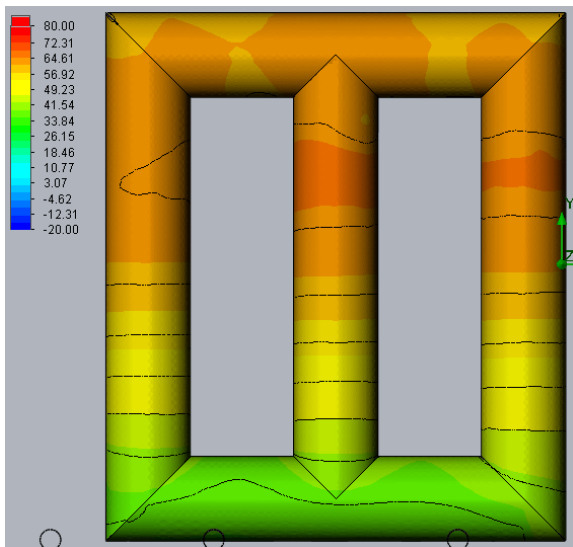


Рисунок 2 – Результати моделювання розподілу температури магнітопровода без обмоток

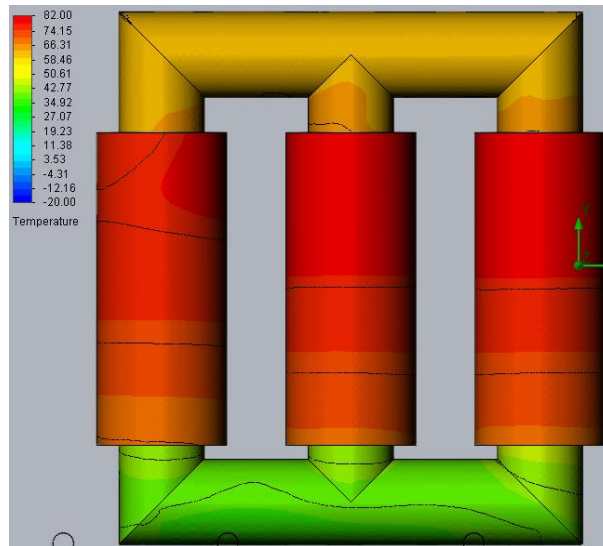


Рисунок 3 – Результати моделювання розподілу температури магнітопровода з обмотками нижчої напруги

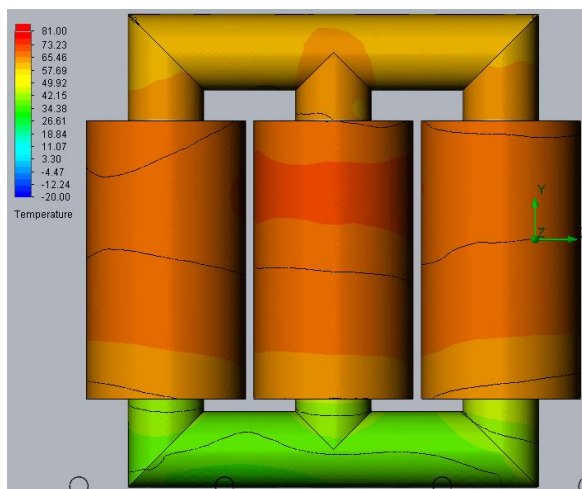


Рисунок 4 – Результати моделювання розподілу температури магнітопровода з обмотками вищої напруги

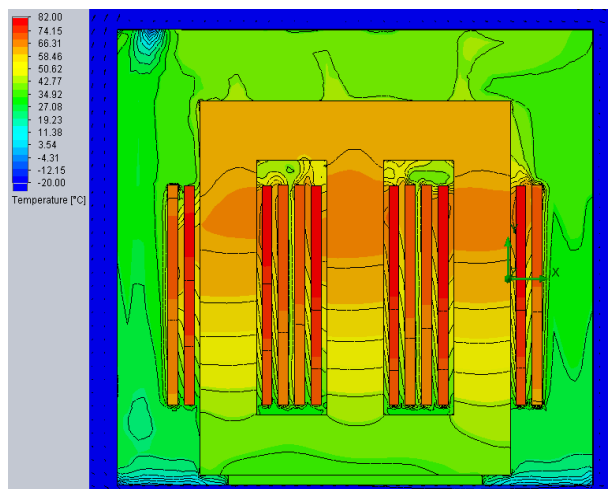


Рисунок 5 – Результати моделювання розподілу температури у повздовжньому зрізі трансформатора

На рис. 6 – 9 наведено результати моделювання розподілу температури в магнітопроводі та в обмотках за аналогічних експлуатаційних умов, крім температури навколишнього середовища, яка становить $+40^{\circ}\text{C}$.

На рис. 10 – 13 наведено результати моделювання розподілу температури в магнітопроводі та в обмотках за температури навколишнього середовища $+40^{\circ}\text{C}$ та ввімкненої системи охолодження.

Аналіз наведених результатів моделювання свідчить що значення найбільш нагрітої точки ізоляції обмоток $\theta_n(t)$, як і зазначалося вище, переміщується на поверхні обмоток нижчої напруги. Тому наступним кроком було 3D-моделювання траєкторії переміщення цієї точки. Результати моделювання переміщення найбільш нагрітої точки ізоляції обмоток наведено на рис. 14.

На заключному етапі створено динамічну модель зміни температури у часі залежно від значення навантаження та інших початкових експлуатаційних умов роботи силового оливного трансформатора.

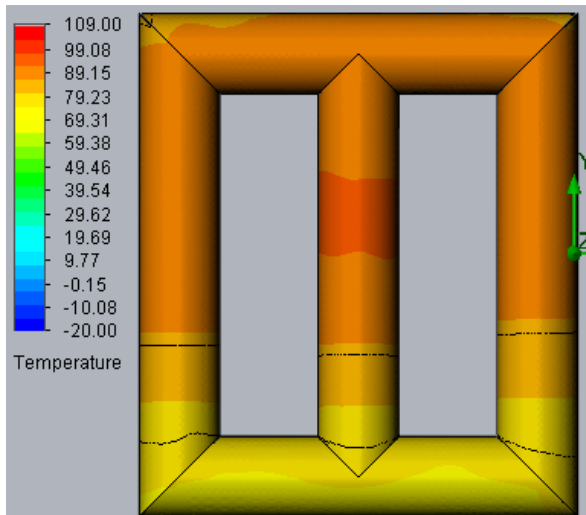


Рисунок 6 – Результати моделювання розподілу температури магнітопровода без обмоток

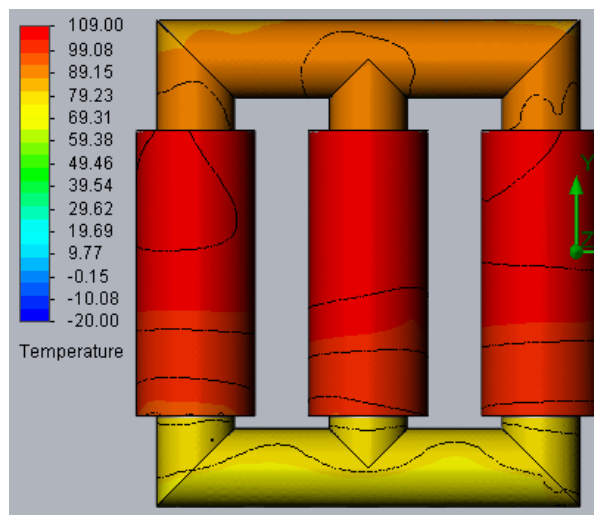


Рисунок 7 – Результати моделювання розподілу температури магнітопровода з обмотками нижчої напруги

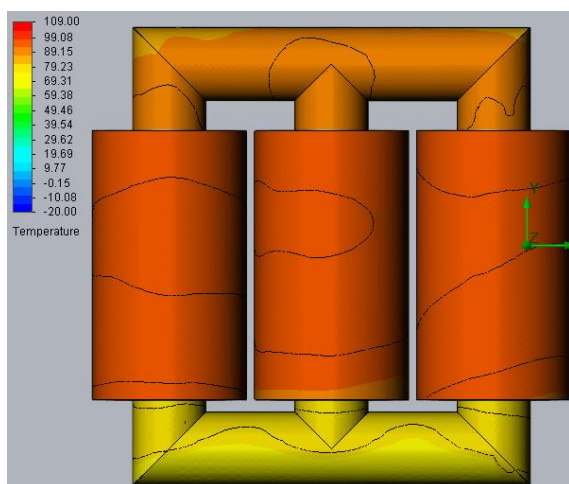


Рисунок 8 – Результати моделювання розподілу температури магнітопровода з обмотками вищої напруги

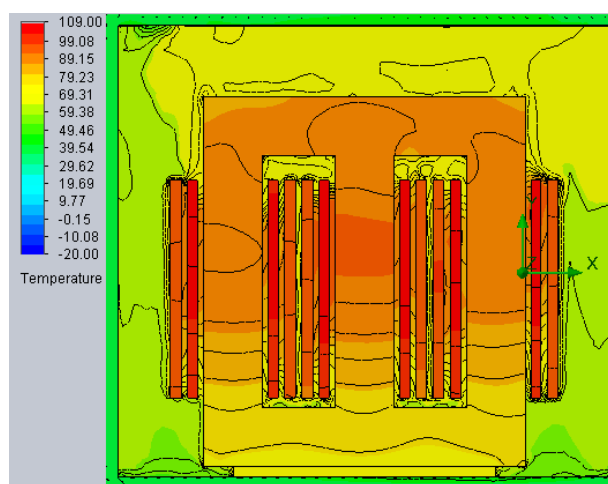


Рисунок 9 – Результати моделювання розподілу температури у поздовжньому зрізі трансформатора

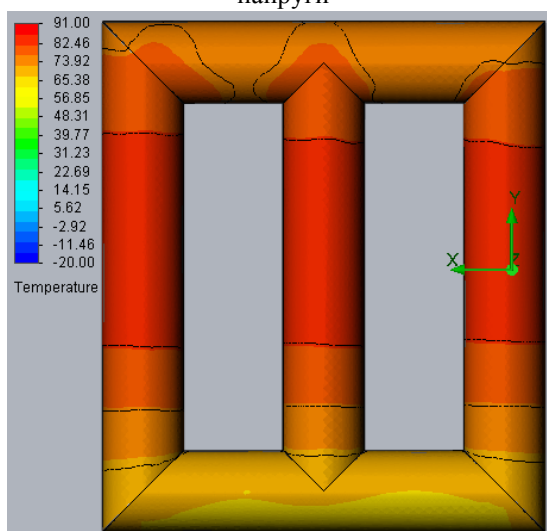


Рисунок 10 – Результати моделювання розподілу температури магнітопровода без обмоток

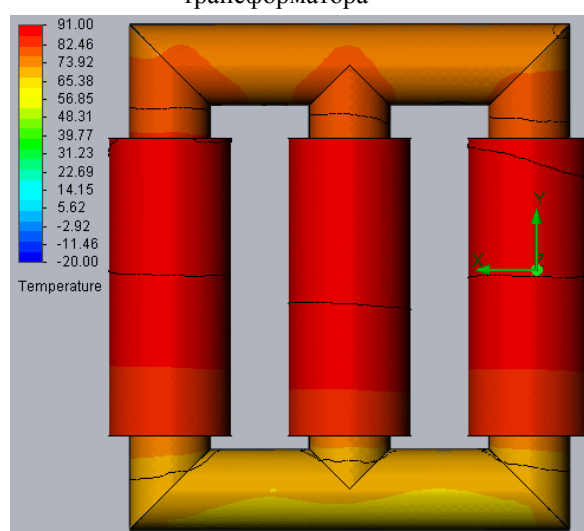


Рисунок 11 – Результати моделювання розподілу температури магнітопровода з обмотками нижчої напруги

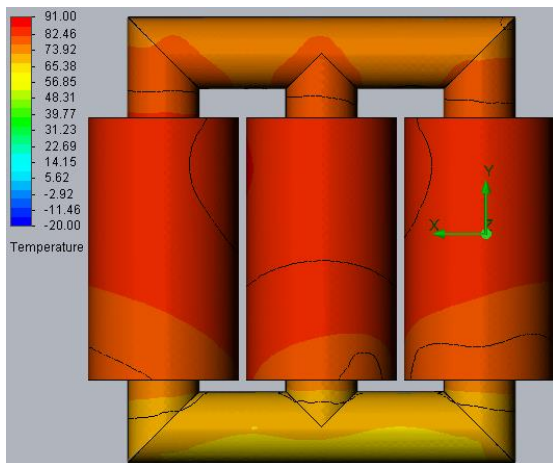


Рисунок 12 – Результати моделювання розподілу температури магнітопровода з обмотками вищої напруги

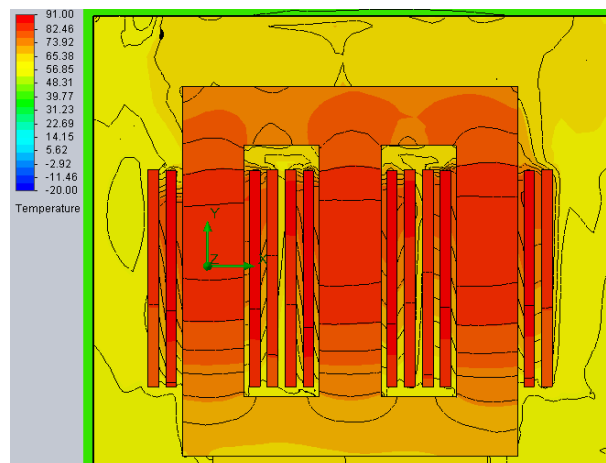


Рисунок 13 – Результати моделювання розподілу температури у повздовжньому зрізі трансформатора

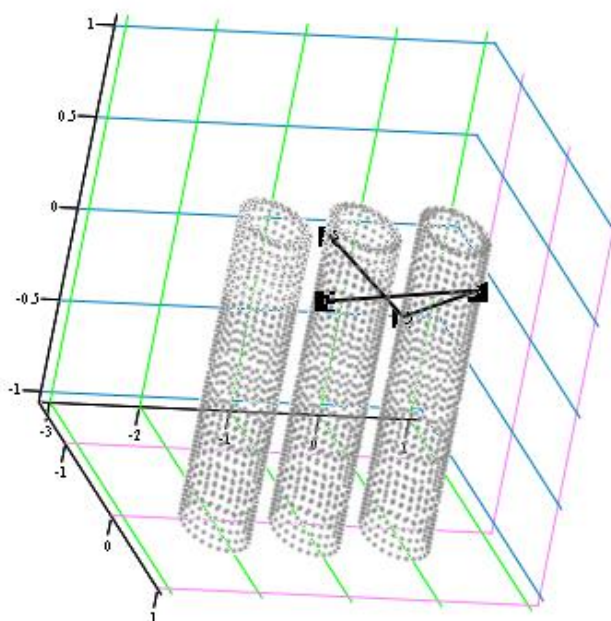


Рисунок 14 – Результати моделювання переміщення найбільш нагрітої точки ізоляції обмоток

Висновки. Забезпечення ефективної роботи силових трансформаторів – запорука надійного електропостачання. При цьому інтенсифікація навантажувальної здатності силових оливних трансформаторів можлива лише за умови постійного автоматизованого моніторингу їх внутрішнього теплового стану.

Створена динамічна 3D-модель теплових режимів силових оливних трансформаторів дозволяє з високою точністю визначити значення та місце знаходження найбільш нагрітої точки ізоляції обмоток та відслідкувати динаміку її переміщення за різних умов експлуатації.

Список використаної літератури

1. Казанський С.В. Надійність електроенергетичних систем: навчальний посібник [Текст] / С.В. Казанський, Ю.П. Матеєнко, Б.М. Сердюк. – К.: НТУУ «КПІ», 2011. – 216 с. – ISBN 978-966-622-453-1.
2. МГОСТ 14209-97 (МЭК 354) Руководство по нагрузке силовых масляных трансформаторов. Дата введения 2002.01.01.

3. IEC 60076-7:2005 Power transformers - Part 7: Loading guide for oil-immersed power transformers. Released: 2005-12-15.

4. Хусаїнов Д.Я. Моделювання динамічних систем: навчальний посібник [Текст] / Д.Я. Хусаїнов, І.І. Харченко, А.В. Шатирко. – К.: Київський ун-т, 2011. – 135 с. – ISBN 966-439-483-0.

S. Kazanskiy, V. Mossakovskiy, A. Yakovenko

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

DYNAMIC 3D-SIMULATION OF THERMAL MODES OF OIL POWER TRANSFORMERS

The content considered the feature of oil power transformers internal thermal mode researchers. It shows in 3D-vision the sequence of non-stationary thermal modes of oil power transformers under external environment in electrical networks.

Objective: operational reliability growth of electrical networks and systems through the intensification of the capacity load of oil power transformers determining the highest temperature level of winding insulation.

Results: introduction of advanced algorithms and CAD-systems for thermal modes 3D-visualisation of oil power transformers and automatic control of the internal thermal states of both winding insulation and oil.

Conclusions: introduction of advanced CAD-systems of non-stationary 3D-visualisation allows for the creation of automated control system of internal thermal modes of oil power transformers.

Key words: power transformer, non-stationary simulation, thermal mode, load capacity.

References

1. Kazansky S. Reliability of power systems: training aid [Text]/S. Kazansky, Y. Mateyenko, B. Serdyuk. – К.: NTUU «KPI», 2011. – P.216 – ISBN 978-966-622-453-1.

2. MGOST 14209-97 (IEC 354) Manual load power oil transformers. Date of introduction 2002.01.01.

3. IEC 60076-7: 2005 Power transformers - Part 7: Loading guide for oil-immersed power transformers. Released: 2005-12-15.

4. Khusianov D. Modeling of dynamic systems: training aid [Text]/ D.Khusianov, I. Kharchenko, A. Shatyрко. – К.: Kyiv University, 2011. – P.135 – ISBN 966-439-483-0.

УДК 621.314

С.В. Казанский, канд. техн. наук, доц., **В.И. Моссаковский**, инженер, **А.В. Яковенко**, магистрант

Национальный технический университет Украины

«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

ДИНАМИЧЕСКОЕ 3D-МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ

СИЛОВЫХ МАСЛЯНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Рассмотрены особенности исследования внутреннего теплового состояния силовых масляных трансформаторов. Приведена последовательность динамического 3D-моделирования тепловых режимов в различных условиях эксплуатации силовых масляных трансформаторов в электрических сетях.

Цель исследования: определение наивысшего значения температуры изоляции обмоток для повышения эксплуатационной надежности электрических сетей и систем за счет интенсификации нагрузочной способности силовых масляных трансформаторов.

Методика реализации: внедрение передовых алгоритмов и программ динамического 3D-моделирования термодинамических процессов нагрева масла и изоляции обмоток силовых масляных трансформаторов для автоматизированного контроля внутреннего теплового состояния.

Результаты исследования: определена целесообразность применения программного пакета SolidWorks для проведения динамического 3D-моделирования тепловых режимов силовых масляных трансформаторов; проанализированы полученные результаты в части уточнения значения нагрузочной способности силовых масляных трансформаторов.

Выводы: показано, что внедрение современных программных пакетов динамического 3D-моделирования позволяет создать эффективную систему автоматизированного контроля внутренних тепловых режимов силовых масляных трансформаторов в электрических сетях.

Ключевые слова: силовой трансформатор, динамическое моделирование, тепловой режим, нагрузочная способность.

Надійшла 04.10.2016

Received 04.10.2016