



ТЕПЛОВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МАСЛОНАПОЛНЕННОГО СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА ТМ-160/10

Нгуен Тиен, К.Х. Гильфанов*

¹Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

*kamil.gilfanov@yandex.ru

Резюме: Представлены результаты моделирования тепловых характеристик сухого и маслонаполненного силового трансформатора ТМ-160/10 в режимах холостого хода и короткого замыкания. Определены электрические, геометрические и тепловые характеристики трансформатора ТМ-160/10. Компьютерное моделирование выполнено в среде программного пакета ANSYS 17.1. Определены 2D-распределения температуры и плотности тепловых потоков в трансформаторе в продольном и поперечном разрезах. Показано, что использование трансформаторного масла для охлаждения трансформатора существенно уменьшает температуры в активной части. Распределение температур занимает диапазон 67-91 °С. Соответственно температура наиболее нагретой части равна 91 °С и также соответствует обмотке низкого напряжения. Проведено изучение зависимости наиболее нагретой точки трансформатора от режима работы. Предложена формула для расчета максимальной температуры трансформатора в зависимости от потери мощности.

Ключевые слова: силовой трансформатор, сухой и маслонаполненный, тепловые потоки, температура в наиболее нагретых точках, компьютерное моделирование.

Для цитирования: Нгуен Тиен, Гильфанов К.Х. Тепловое моделирование маслонаполненного силового трансформатора ТМ - 160/10 // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2019. Т. 21. №5. С. 141-151. doi:10.30724/1998-9903-2019-21-5-141-151.

THERMAL MODELLING OF OIL-FILLED POWER TRANSFORMER TM-160/10

Nguyen Tien, KH Gilfanov*

Kazan state Power engineering university, Kazan, Russia

*kamil.gilfanov@yandex.ru

Abstract: The results of modeling the thermal characteristics of the dry and oil-filled power transformer TM-160/10 in idle and short circuit modes are presented. The electrical, geometric and thermal characteristics of the TM-160/10 transformer are determined. Computer modeling is performed in the software package ANSYS 17.1. The 2D distributions of temperature and density of heat flows in the transformer in the longitudinal and transverse sections are determined. It is shown that the use of transformer oil for cooling the transformer significantly reduces the temperatures in the active part. The temperature distribution occupies the range of 67-91 °C. Accordingly, the temperature of the most heated part is 91 °C and also corresponds to the low voltage winding. The dependence of the most heated point of the transformer on the operating mode was studied. A formula is proposed for calculating the maximum temperature of a transformer as a function of power loss.

Keywords: power transformer, dry and oil filled, heat fluxes, temperature at the most heated points, computer simulation.

For citation: Nguen Tien, Gilfanov KH. Thermal modelling of oil-filled power transformer TM - 160/10. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2019; 21(5):141-151. (In Russ). doi:10.30724/1998-9903-2019-21-5-141-151.

Введение

Силовые трансформаторы представляют собой наибольшую часть капитальных вложений в передающие и распределительные подстанции. Кроме того, отключения силового трансформатора наносят значительный экономический ущерб электрической сети. Одним из наиболее важных параметров, определяющих ресурс трансформатора, является значение температуры наиболее горячей точки, которая в свою очередь, определяется плотностью тепловых потоков. В работах [1-3] показано, что максимальная температура является функцией нагрузок, перегрузок, режимов охлаждения и времени. Также замечено [4-6], что традиционные методы расчета дают заниженные значения максимальных температур, особенно в тех случаях, когда тепловые переходные процессы не достигли установившихся состояний. Важной задачей является повышение качества трансформаторов, разработка наиболее прогрессивных технологий их производства, создание и применение наиболее современных и высокоэффективных материалов, а также уменьшение потерь энергии при их работе [7]. Решение этих задач невозможно без глубокого понимания и изучения тепловых режимов трансформатора.

При нагрузке трансформатора, приводящей к режимам работы с температурой, превышающей допустимые нормами значения, износ изоляции повышается, происходит снижение надежности, а срок службы уменьшается. Защита трансформатора от перегрева вследствие недопустимых температур эксплуатации связана или с необходимостью уменьшения нагрузки, то есть нарушением его основной функции, или с применением средств форсирования охлаждения.

Целью данной работы является моделирование тепловых режимов трансформатора, исследование распределения тепловых потоков и температур в трансформаторе при различных режимах охлаждения и потерях мощности.

Согласно действующим стандартам [8-10] превышением температуры какой-либо части трансформатора называется разность температур этой части и охлаждающей среды. Допустимые превышения температуры активной части трансформатора оказывают влияние на внутреннее устройство, размеры, нагрузочную способность, стоимость и режимы эксплуатации трансформатора.

Согласно стандарту, соответствующему рекомендациям 76 МЭК превышение средней температуры обмотки над температурой окружающей среды не должно превышать 65°C [11]. Наибольшее же превышение температуры масла в баке под крышкой бака трансформатора над температурой окружающей среды не должно превышать 60 °С.

Наибольшая допустимая температура окружающей среды для воздуха составляет +40 °С, а для воды +25 °С. Если температуры воздуха или воды превышают допустимые, то нормы нагрева снижаются на число градусов, соответствующее превышению. В рекомендациях МЭК износ изоляции, определяемый температурой наиболее нагретой точки обмотки и длительностью ее воздействия, отнесен к температуре 98°C, которая обычно характерна для длительной нагрузки и температуры окружающего воздуха 20°C. Для изоляционных материалов, относящихся к классу нагревостойкости А, допускается достижение температуры наиболее нагретой точки до 115 °С.

Однако, контроль за соответствием температуры самой нагретой точки трансформатора допустимой температуре является затруднительным для трансформаторов, поскольку ее положение в пространстве не является стационарным, использование оптоволоконных датчиков температуры не столь эффективно, поэтому ее определение экспериментальными методами или с помощью моделирования является актуальной задачей.

Расчет параметров силового маслонаполненного трансформатора

В качестве объекта исследования выбран стержневой маслонаполненный трехфазный трансформатор ТМ-160/10, параметры которого представлены в табл. 1.

Расчет основных электрических величин и геометрических размеров трансформатора, необходимых для моделирования произведен согласно методике [12].

В качестве обмоток высокого напряжения (ВН) и низкого напряжения (НН) приняты цилиндрические многослойные обмотки из круглого провода.

Для испытательного напряжения ВН $U_{исп1} = 35$ кВ определены изоляционные расстояния [12]: $a_{12} = 9$ мм, $l_{02} = 30$ мм, $a_{22} = 10$ мм, $\delta_{12} = 3$ мм (рис. 1).

Электрические характеристики трансформатора ТМ-160/10	
Тип трансформатора	ТМ-160/10
Мощность	160 кВА
Частота	50 Гц
Число фаз	3
Первичное напряжение	$(10000 \pm 3 \times 2\%)$ В
Вторичное напряжение U_2	3150 В
Система охлаждения	масляное естественное
Схема и группа соединения обмоток	Y/Y
Напряжение короткого замыкания	4,5 %
Ток холостого хода	2,4 %
Потери холостого хода	510 Вт
Потери короткого замыкания	2650 Вт

Для испытательного напряжения НН $U_{исп2} = 18$ кВ изоляционное расстояние: $a_{01} = 15$ мм, $l_{01} = 30$ мм (рис. 1).

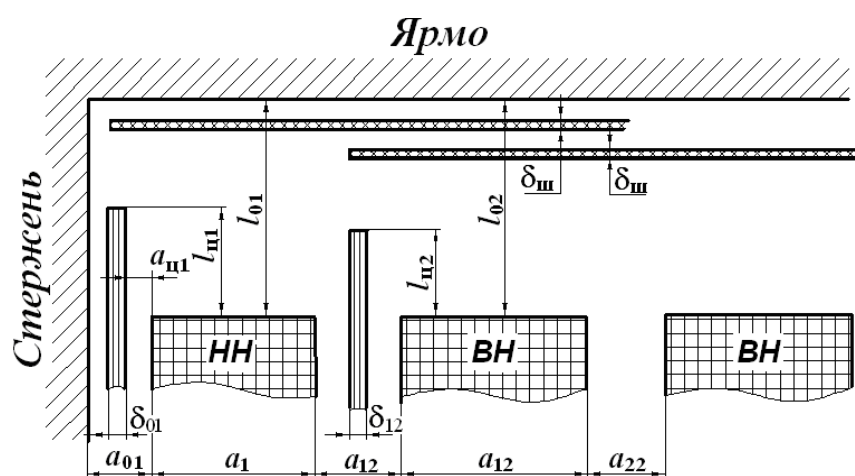


Рис. 1. Главная изоляция обмоток

Выбрана стержневая конструкция с числом 6, $k_{кр} = 0,913$ без прессующей пластины. При мощности 160 кВА охлаждающие каналы в магнитопроводе не предусматриваются [12]. В качестве материала магнитной системы трансформатора принимается холоднокатаная электротехническая сталь марки 3404 с плотностью 7650 кг/м^3 .

Диаметр стержня сердечника $d = 0,150$ м. Коэффициент приведения идеального поля рассеяния к реальному полю $k_p \approx 0,95$.

Средний диаметр канала между обмотками $d_{12} = 0,227$ м.

Высота обмотки $l = 0,263$ м. Активное сечение стержня $\Pi_c = 0,0153 \text{ м}^2$.

Число витков обмоток НН, приходящееся на одну фазу $w_2 = 327$.

Провод обмотки ПВ диаметром 3,55 мм с сечением $9,895 \text{ мм}^2$.

Число витков в слое $w_{сл2} = 65,48$. Число слоев в обмотке $n_{сл2} = 5$.

Размеры обмотки НН - внутренний диаметр $D_{2min} = 180$ мм, внешний диаметр $D_{2max} = 221$ мм. Площадь поверхности обмотки НН $\Pi_2 = 0,324 \text{ мм}^2$.

Потери короткого замыкания $P_{k2} = 382,78$ Вт, масса провода обмотки НН $G_2 = 18,16$ кг.

Плотность теплового потока на поверхности обмотки НН $q_2 = 1,183 \text{ кВт/м}^2$.

Число витков обмотки ВН при номинальном напряжении $w_{н2} = 1038$.

Число витков на одной ступени регулирования обмотки напряжения при соединении обмотки ВН в звезду $w_p = 36$.

Принята многослойная цилиндрическая обмотка из круглого медного провода ПБ диаметром $d_1 = 1,9$ мм, сечением $3,14 \text{ мм}^2$.

Число витков в одном слое $w_{сл1} = 109$. Число слоев $n_{сл1} = 9,58$.

Внутренний диаметр обмотки «доканальной» $D_{lin} = 239$ мм, «послеканальной» $D_{1min511} = 269$ мм. Наружный диаметр обмотки «доканальной» $D_{1max14} = 261$ мм, «послеканальной» $D_{1max} = 307$ мм. Полная охлаждаемая поверхность обмотки ВН $\Pi_1 = 0,888 \text{ мм}^2$.

Потери короткого замыкания $P_{k1} = 514,96$ Вт.

Масса провода «доканальной» части обмотки $G_{1,14} = 9,522$ кг, масса провода «послеканальной» части обмотки $G_{1,10} = 15,27$ кг.

Плотность теплового потока на поверхности обмотки ВН $q_1 = 0,58$ кВт/м².

Размеры масляного бака:

изоляционное расстояние от изолированного отвода обмотки ВН (внешней) до собственной обмотки $s_1 = 28$ мм и равное ему расстояние этого отвода $s_2 = 28$ мм до стенки бака;

– изоляционное расстояние от неизолированного или изолированного отвода обмотки НН до обмотки ВН $s_3 = 25$ мм;

– изоляционное расстояние от отвода НН до стенки бака $s_4 = 33$ мм;

– диаметр изолированного отвода обмотки ВН $d_1 = 20$ мм;

– диаметр изолированного отвода от обмотки НН $d_2 = 10$ мм;

– минимальная ширина бака $B = 0,451$ м;

– длина бака $A = 1,007$ м;

– минимальное расстояние от ярма до крышки бака $0,4$ м;

– глубина бака $H_6 = 1,093$ м.

Моделирование тепловых режимов маслонаполненного трансформатора.

Создание модели

Моделирование теплообмена и гидродинамики проведено в среде трансформатора в пакете программ свободно распространяемой версии *Ansys 17.1 (ANSYS Free Student Product Downloads)* [14-16]. Ввиду того, что точный расчет маслонаполненного трансформатора ограничен вычислительными ресурсами компьютера, использована упрощенная модель трансформатора ТМ-160/10.

В качестве обмоток НН и ВН, а также обмоток изоляции приняты цилиндрические поверхности, которые создаются в модуле создания геометрии *Design Modeler* программы *Ansys 17.1*. Предварительно создается эскиз (*Sketch*), который затем преобразуется в объемную фигуру с помощью операции *Extrude*. Созданные таким образом модели обмоток НН и ВН трансформатора и изоляции для одной фазы в соответствии с расчетной геометрией показаны на рис. 2, а.

Далее с помощью инструмента *Translate* создаются модели еще двух фаз трансформатора, а также в модель было добавлено ярмо. Полученная таким образом, модель активной части трансформатора представлена на рис. 2, б.

После этого модель «помещается» в маслонаполненный бак.

Далее в программе задаются характеристики физической модели. Для чего в модуле *Model Ansys Steady-State Thermal* задаются характеристики материалов обмоток, стержней, ярма, изоляции и окружающей их среды (рис. 3). В качестве материала обмоток принимаем медь (*Copper*), материал сердечника – сталь (*Structural Steel*), охлаждающей среды – трансформаторное масло (*Engineer oil*). Зависимость теплофизических характеристик масла от температуры задается из справочных данных простыми интерполяционными формулами.

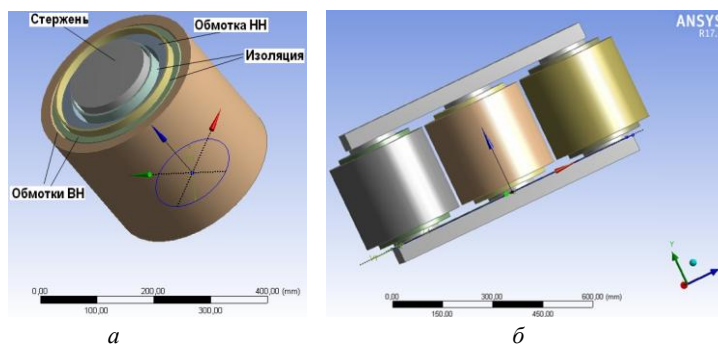


Рис. 2. Модель обмоток одной фазы (а) и активной части (б) трансформатора ТМ-160/10, созданная в *Design Modeler* программы *Ansys 17.1*

Details of "HV1"	Details of "Core"	Details of "Solid"
Graphics Properties Definition <input type="checkbox"/> Suppressed No <input type="checkbox"/> Stiffness Behavior Flexible Coordinate System Default Coordinate System Reference Temperature By Environment Behavior None Material Assignment Copper Nonlinear Effects Yes	Graphics Properties Definition <input type="checkbox"/> Suppressed No <input type="checkbox"/> Stiffness Behavior Flexible Coordinate System Default Coordinate System Reference Temperature By Environment Behavior None Material Assignment Structural Steel Nonlinear Effects Yes	Graphics Properties Definition <input type="checkbox"/> Suppressed No <input type="checkbox"/> Stiffness Behavior Flexible Coordinate System Default Coordinate System Reference Temperature By Environment Behavior None Material Assignment Engine Oil Nonlinear Effects Yes

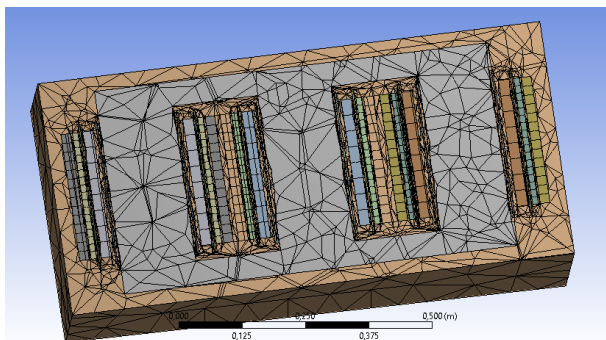
а)

б)

в)

Рис. 3. Окно задания свойств материала обмоток (а), сердечника (б), охлаждающей среды (в)

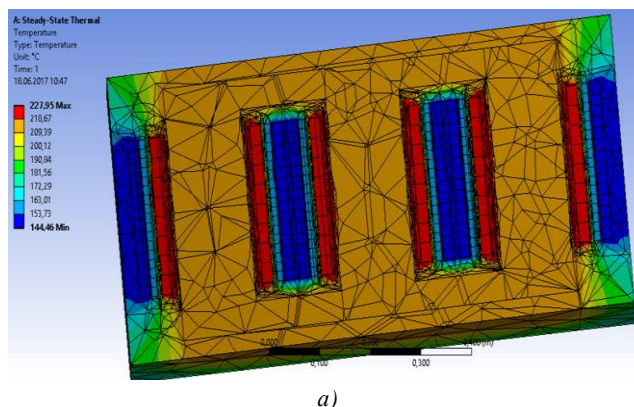
Аналогично задается теплопроводность продольной изоляции $\lambda = 0,17 \text{ Вт/(м·К)}$ в моделируемом трансформаторе.

Рис. 4. Расчетная сеточная область трансформатора *Mesh* (в разрезе) в *Ansys Steady-State Thermal*

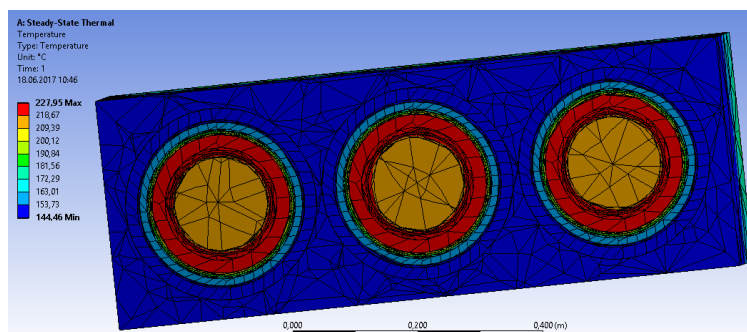
Далее в *Ansys Steady-State Thermal* задается расчетная сеточная область *Mesh*, которая рассчитывается автоматически на основании геометрической модели (рис. 4). Применялась треугольная сетка, минимальный размер которой 5 мм, ограничивается версией используемого вычислительного пакета.

Моделирование тепловых режимов работы маслонаполненного трансформатора. Режим короткого замыкания

Режим короткого замыкания задается в *Ansys Steady-State Thermal* путем указания удельных тепловых потоков q (*Heat Flux*). Плотность теплового потока на поверхности обмотки НН в режиме короткого замыкания $q_{2кз} = 1183 \text{ Вт/м}^2$, с обмотки ВН – $q_{2кз} = 580 \text{ Вт/м}^2$.



а)



б)

Рис. 5. Распределение температур в трансформаторе в продольном (а) и поперечном (б) разрезе при работе в режиме короткого замыкания. Охлаждающая среда – воздух

Также для корректного моделирования в модель вводится условие передачи теплоты конвекцией (*Convection*) и обозначаем все границы между жидкостью и твердым телом с помощью инструмента *Fluid Solid Interface*.

Сначала для проверки работы активной части трансформатора и продольной изоляции проводится моделирование при отсутствии заполнения трансформатора маслом, то есть при воздушном охлаждении. Распределение температур в различных областях трансформатора вблизи активной части, полученное в результате моделирования представлено на рис. 5, а распределение плотности тепловых потоков – на рис. 6.

Из представленных скриншотов ясно, что при охлаждении воздухом температуры, при которых работает трансформатор, оказываются существенно выше допустимых 144-235 °С. Температура наиболее горячих точек соответствует примерно 225 °С и характерна для обмотки НН, также высокой оказывается температура сердечника $t = 210$ °С. Благодаря наличию изоляции температура обмоток ВН оказывается существенно ниже, но, тем не менее, также превышает допустимое значение. Наибольшая плотность тепловых потоков, как и следовало ожидать, оказывается вблизи обмоток, по мере удаления же от них интенсивность тепловых потоков быстро убывает.

Проведено аналогичное моделирование работы в режиме короткого замыкания при масляном наполнении трансформатора. Распределение температур и плотности тепловых потоков показано на рис. 7-8.

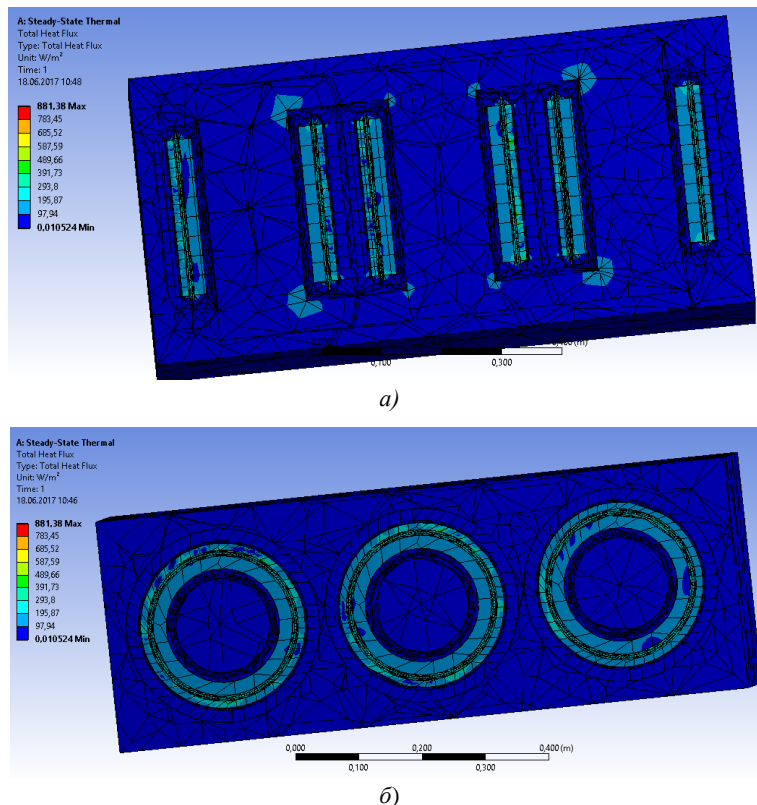


Рис. 6. Распределение плотности теплового потока в трансформаторе в продольном (а) и поперечном (б) разрезе при работе в режиме короткого замыкания. Охлаждающая среда – воздух

Рис. 7-8 свидетельствуют, что использование трансформаторного масла для наполнения трансформатора существенно уменьшает температуры в активной части. Распределение температур занимает диапазон 67-91°С. Соответственно температура наиболее нагретой части равна 91°С и также соответствует обмотке НН.

Режим холостого хода

Потери в режиме холостого хода для трансформатора ТМ-160/10 составляют 510 Вт. Соответствующие плотности теплового потока обмоток трансформатора для обмотки НН $q_{\text{НН}}^{\text{ХХ}} = 227 \text{ Вт/м}^2$, соответственно ВН $q_{\text{ВН}}^{\text{ХХ}} = 111 \text{ Вт/м}^2$.

Параметры *Heat Flux* и *Heat Flux2* изменяются в соответствии с этими данными и проводится моделирование в *Ansys Steady-State Thermal*. Результаты свидетельствуют о том, что при работе в режиме холостого хода при воздушном охлаждении оказываются в допустимых пределах, а и при масляном охлаждении – существенно ниже номинальных. Максимальная температура в маслonaполненном трансформаторе в режиме холостого хода составляет всего 35 °С.

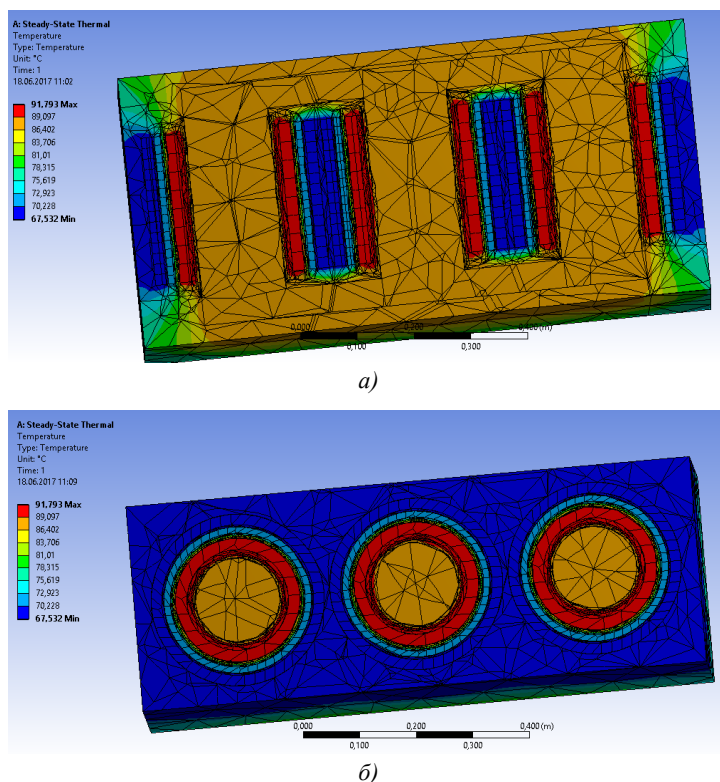


Рис. 7. Распределение температур в трансформаторе в продольном (а) и поперечном (б) разрезе при работе в режиме короткого замыкания. Охлаждающая среда – трансформаторное масло

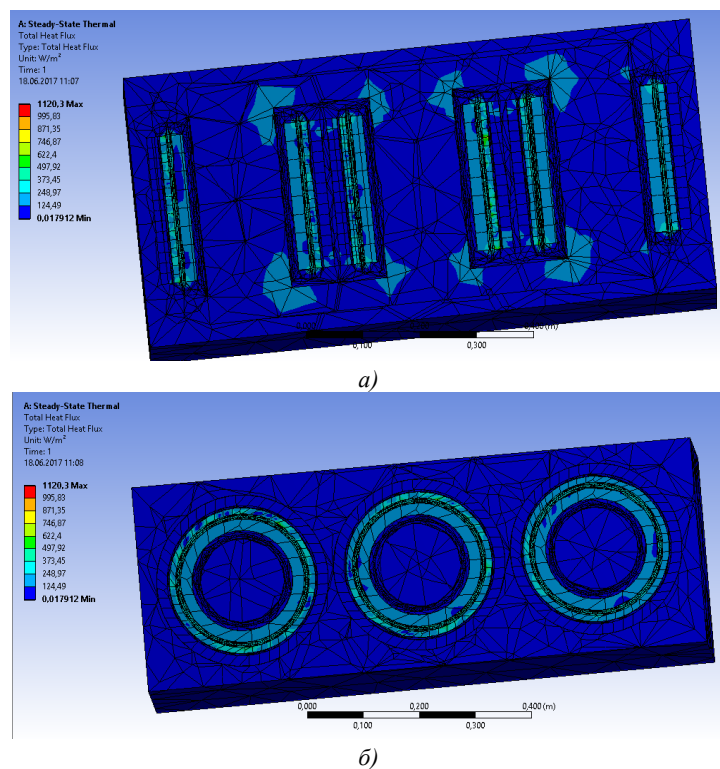


Рис. 8. Распределение плотности теплового потока в трансформаторе в продольном (а) и поперечном (б) разрезе при работе в режиме короткого замыкания. Охлаждающая среда – трансформаторное масло

Зависимость максимальной температуры трансформатора от режима работы
 Срок службы трансформатора определяется максимальной температурой его обмоток, зависящей от режима работы трансформатора. Для исследования зависимости максимальной температуры трансформатора ТМ-160/10 от режима его работы проведено

моделирование в диапазоне потерь от холостого хода (510 Вт) до короткого замыкания (2650 Вт). Соответствующие распределения температур представлены на рис. 9-11.

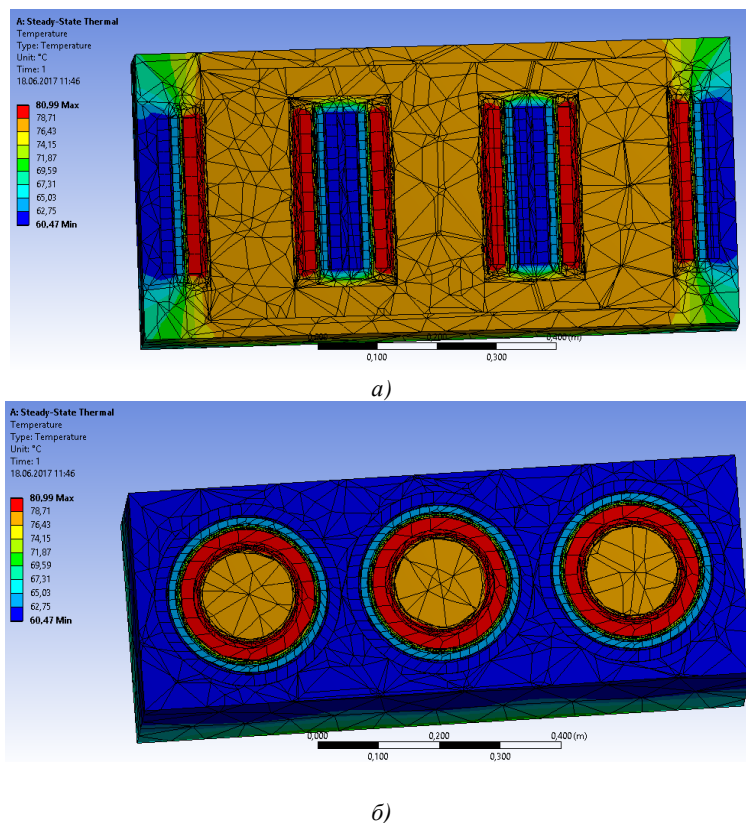


Рис. 9. Распределение температур в маслонаполненном трансформаторе в продольном (а) и поперечном (б) разрезе при потерях $P = 2240$ Вт

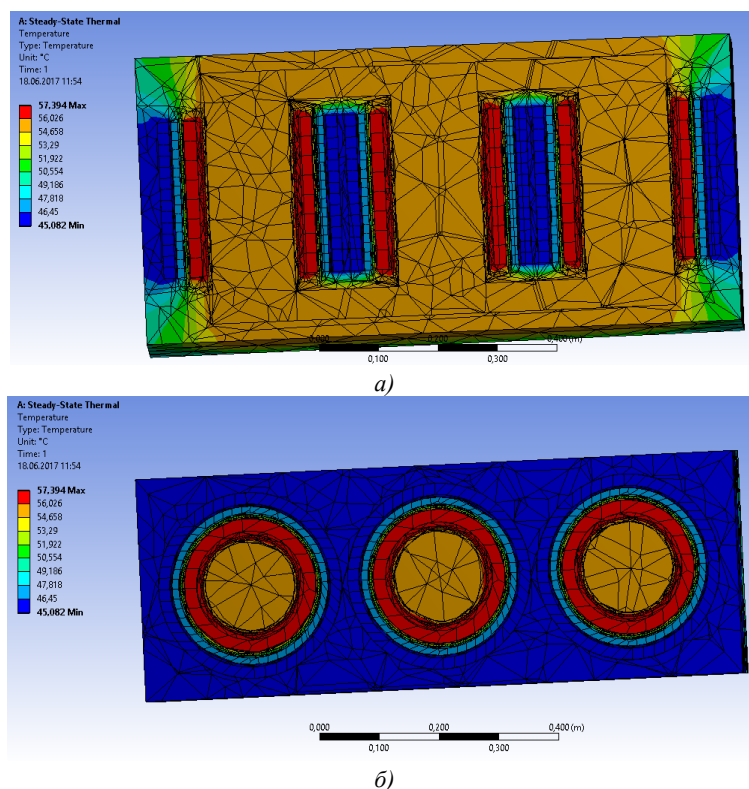


Рис. 10. Распределение температур в маслонаполненном трансформаторе в продольном (а) и поперечном (б) разрезе при потерях $P = 1344$ Вт

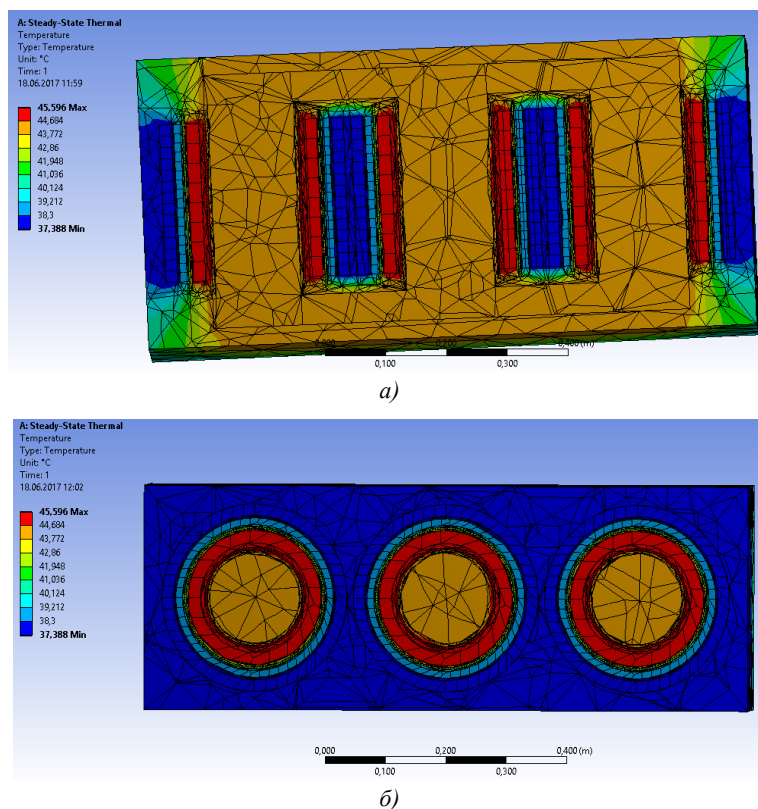


Рис. 11. Распределение температур в маслонаполненном трансформаторе в продольном (а) и поперечном (б) разрезе при потерях $P = 896$ Вт

На основании полученных данных, определяются температуры наиболее нагретых точек трансформатора и строится график зависимости максимальной температуры трансформатора от потерь (рис. 12). Результаты расчета представлены в табл. 2.

Таблица 2

Значения максимальных температур трансформатора в зависимости от потерь мощности

Потери мощности P , Вт	Плотность теплового потока обмотки НН, Вт/м^2	Плотность теплового потока обмотки ВН, Вт/м^2	Максимальная температура, $^{\circ}\text{C}$
2650	1183	580	91
2240	1000	490	81
1792	800	392	69
1344	600	294	57
896	400	196	46
510	227	111	35

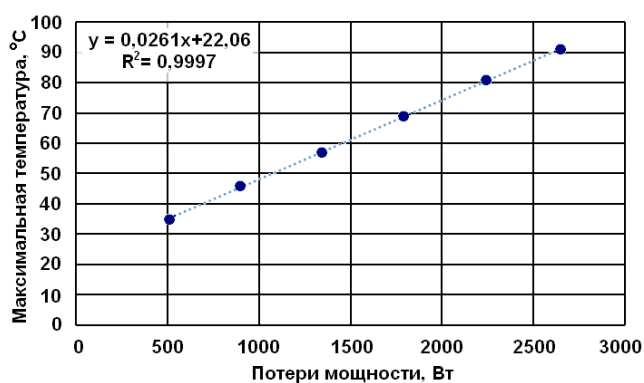


Рис. 12. Зависимость максимальной температуры трансформатора от потерь мощности

Как видно из рис. 12, полученная зависимость хорошо аппроксимируется прямой, описываемой уравнением:

$$t = 0,0261 \cdot P + 22,06, \text{ } ^\circ\text{C.} \quad (1)$$

Как показано в [11], срок службы изоляции экспоненциально убывает в зависимости от температуры. Можно сделать вывод, что экспоненциальная зависимость будет справедлива и для взаимосвязи между сроком службы изоляции и мощностью потерь трансформатора с учетом (1).

Выводы

Проведено моделирование *Ansys* 17.1 в среде тепловых режимов работы трансформатора как в «сухом», так и в маслonaполненном исполнении. Определено распределение температур в активной части трансформатора и вблизи нее, а также тепловых потоков и установлена зависимость максимальной температуры (наиболее нагретой точки) от потерь мощности в диапазоне режимов холостого хода и короткого замыкания, определяющей его ресурс.

Литература

1. Thamir M. Abdul Wahhab, Methaq Talib Jabbar. «Design and Simulation of 11/0.4 kV Distribution Transformer Using ANSYS» // Eng. & Tech. Journal. 2014. V. 32. Pt(A). N.2. pp.414-438.
2. Constantin D., Nicolae P. M., and. Nitu C. M. «3D Finite Element Analysis of a three phase power transformer» // Full Paper sent for EUROCON 2013 Conference, Zagreb, Croatia, 2013.
3. Marina A.T., Eleftherios IA., Antonios GS. (2012). Power transformer thermal analysis by using an advanced coupled 3D heat transfer and fluid flow FEM model // International Journal of Thermal Sciences, Elsevier 2012.
4. Mohammadali Salari, Pascal Bayrasy, Klaus Wolf. Thermal analysis of a three phase transformer with coupled simulation. Available at: URL: <https://www.researchgate.net/publication/276057920> 17.09.2018. Accessed to: 6 March 2019.
5. Gastelurrutia Jon., Carlos Ramos Juan., Larraona Gorka S., et al. (Numerical modelling of natural convection of oil inside distribution transformers // Applied thermal engineering. 2011. V.31. Issue 4. pp. 493-505.
6. Pendyala R., Suhaib U.I, Lian RL, et al. «CFD Analysis of Heat Transfer Performance of Nanofluids in Distributor Transformer» // 4th International Conference on Process Engineering and Advanced Materials Procedia Engineering. 2016. V.148. pp. 1162-1169.
7. Присмотрова Л.К. Проектирование силовых и специальных трансформаторов. Киров: Издательство: Вятский государственный университет. 2006. 246 с.
8. Арутюнов Ю.А., Бородин О.Н., Чашин Е.А. Проектирование силовых трансформаторов с использованием методов оптимизации. Доступно по: // URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/proektirovanie-silovyh-transformatorov-s-ispolzovanie-metodovoptimizatsii>. Ссылка активна на: 6.03.2019.
9. Встовский А.Л., Встовский С.А., Силин Л.Ф. Проектирование трансформаторов. Красноярск: Изд-во Сибирского федерального университета, 2013. 120 с.
10. Арутюнов Ю.А., Бородин О.Н., Дробязко А.А., и др. Проектирование силовых трансформаторов с использованием методов оптимизации // Омский научный вестник. Электротехника. Энергетика. 2017. № 6 (156). С. 47-53
11. Киш, Л. Нагрев и охлаждение трансформаторов. // Перевод М.А. Бики. Москва: Энергия, 1980-180 с.
12. Тихомиров, П.М. Расчет трансформаторов. М.: Энергоатомиздат. 1986-528 с.
13. Mohammadali Salari., Pascal Bayrasy., Klaus Wolf. Thermal analysis of a three phase transformer with coupled simulation. Available at: // URL: <https://www.researchgate.net/publication/276057920> 17.09.2018. Accessed to: 06 March. 2019.
14. Моделирование процессов теплообмена средствами пакета конечно-элементного анализа ANSYS. Доступно по: <http://lib.knigi-x.ru/23raznoe/126936-1.php>. 2018.
15. Нгуен Тиен, Гильфанов К.Х. Тепловой CFD расчет силового трансформатора ТМ-160/10 // Материалы 4 Национальной научно-практической. конференции «Приборостроение и автоматизированный электропривод в топливно-энергетическом комплексе и жилищно-коммунальном хозяйстве»; 6-7 декабря 2018 г: в 2 т. Ред.кол: Э.Ю. Абдуллазянов и др. Казанский государственный энергетический университет. 2018. Т. 1. С. 191-196.
16. Использование технологии ANSYS Workbench для генерации конечно-элементных сеток доступно по URL: <https://sapr.ru/article/6779>. Ссылка активна на: 30 мая 2019.

Авторы публикации

Нгуен Тиен – аспирант, Казанский государственный энергетический университет. Email: kamil.gilfanov@yandex.ru.

Гильфанов Камилъ Хабибович – д-р. техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Автоматизация технологических процессов и производств», Казанский государственный энергетический университет. Email: kamil.gilfanov@yandex.ru.

References

1. Thamir M. Abdul Wahhab, Methaq Talib Jabbar, "Design and Simulation of 11/0. 4 kV Distribution Transformer Using ANSYS. *Eng. & Tech. Journal*. 2014;32(2): 414-438. Pt(A).
2. Constantin D, Nicolae PM, and. Nitu CM. «3D Finite Element Analysis of a three phase power transformer». Full Paper sent for EUROCON 2013 Conference, Zagreb, Croatia, 2013.
3. Marina AT, Eleftherios IAmoiralis, Antonios GK. Souflaris Power transformer thermal analysis by using an advanced coupled 3D heat transfer and fluid flow FEM model International. *Journal of Thermal Sciences, Elsevier*. 2012.
4. Mohammadali Salari, Pascal Bayrasy, Klaus Wolf. *Thermal analysis of a three phase transformer with coupled simulation*. Available at: URL: <https://www.researchgate.net/publication/276057920> 17.09.2018. Accessed to: 06 March 2019.
5. Gastelurrutia Jon, Carlos Ramos Juan, Larraona Gorka S, et al. Numerical modelling of natural convection of oil inside distribution transformers. *Applied thermal engineering*. 2011;31(4):493-505.
6. Rajashekhar Pendyala, Suhaib Umer Ilyas, Lian Rui Lim, Narahari Marneni "CFD Analysis of Heat Transfer Performance of Nanofluids in Distributor Transformer" *4th International Conference on Process Engineering and Advanced Materials Process Engineering*. 2016;148:1162-1169.
7. Prismotrova LK. *Design of power and special transformers*. Kirov: Publishing house, 2006. 246 p.
8. Designing power transformers using optimization methods. Available at: URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/proektirovanie-silovyh-transformatorov-s-ispolzovaniem-metodov-optimizatsii>. Accessed to: 06 March 2019.
9. Vstovsky AL., Vstovsky SA., Silin LF. *Design of transformers*. Krasnoyarsk: Siberian publishing House . federal. University's. 2013. P.120.
10. Arutyunov YuA, Borodin ON, Drobyazko AA, et al. Design of power transformers using optimization methods. *Omsk scientific Bulletin. Electrical engineering. Energy*. 2017;6(156):47-53.
11. Kish L. *Heating and cooling of transformers*. Moscow: Energiya, 1980. 180 p.
12. Tikhomirov PM. *Calculation of transformers*. Moscow: Energoatomizdat, 1986-528 p.
13. Mohammadali Salari, Pascal Bayrasy, Klaus Wolf. *Thermal analysis of a three phase transformer with coupled simulation*. Available at: URL: <https://www.researchgate.net/publication/276057920> 17.09.2018. Accessed to: 06 March 2019.
14. *Modeling of heat transfer processes by means of ANSYS finite element analysis package*. Available at: <http://lib.knigi-x.ru/23raznoe/126936-1.php>. 2018. Accessed to: 06 March 2019.
15. Thien N, Gilfanov KH. Thermal CFD calculation of power transformer TM-160/10 / Mater. 4th National Academy of Sciences - pract. Conf. "Instrument-making and automated electric drive in the fuel and energy complex and housing and communal services". 2018. Kazan, 6-7 December. Abdullazyanov EY et al. Kazan State Power Engineering University. 2018. pp. 191-196.
16. *Using ANSYS Workbench technology to generate finite element meshes*. Available at: URL: <https://sapr.ru/article/6779>. Accessed to: 30 May 2019.

Authors of the publication

Nguyen Tien – Kazan state Power engineering university, Kazan, Russia. Email: kamil.gilfanov@yandex.ru.

Kamil H Gilfanov – Kazan state Power engineering university, Kazan, Russia. Email: kamil.gilfanov@yandex.ru.

Поступила в редакцию

30 октября 2018 г.