

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-2-125-136>

УДК 621.3.04; 004.94

Анализ электромагнитных и тепловых процессов асинхронного двигателя с помощью 3D-моделирования

А. Н. Пехота¹), В. Н. Галушко²), Б. М. Хрусталеv¹), Д. В. Мирош²)

¹)Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь),

²)Белорусский государственный университет транспорта (Гомель, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2024
Belarusian National Technical University, 2024

Реферат. Представлены результаты исследований и анализ электромагнитных и тепловых процессов, проходящих в асинхронном двигателе. Представлены сведения о создании модели конструкции вспомогательного асинхронного двигателя с различными параметрами по методике Гольдберга и описан порядок выбора варианта с наилучшими электромеханическими характеристиками. Определены основные факторы, оказывающие влияние на методы расчета с учетом скорости старения, температуры и распределения температурного поля, а также срока службы изоляции. Исследования позволили разработать и применить 3D-модели электромагнитных процессов с использованием специальных программ, в интерактивном режиме без описания сложных векторных уравнений теории поля, используя при этом происходящие тепловые процессы. Определено совокупное влияние на срок службы изоляции факторов температуры, влажности при различных воздействиях агрессивных сред. Сравнение характеристик реального, модельного и рассчитанного по стандартной методике АД позволило рассчитать ошибку с учетом поправочного коэффициента относительно данных, применяемых в расчетных методах оценки, и использовать данное значение в новых методиках расчета и моделирования. Предложенные 3D-модели электромагнитных и тепловых процессов, протекающих в асинхронных двигателях, позволяют: оценить эффективность электрической машины; усовершенствовать конструкцию с учетом критериев пропускной способности электротехнической стали и температуры обмоток; создают предпосылки для более точных прогнозов при оценке остаточного ресурса изоляции на основе температурных полей.

Ключевые слова: асинхронный электродвигатель, электромагнитные процессы, тепловые процессы, 3D-модели электромагнитных процессов, векторные уравнения теории поля, срок службы электроизоляции, скорость старения изоляции

Для цитирования: Анализ электромагнитных и тепловых процессов асинхронного двигателя с помощью 3D-моделирования / А. Н. Пехота [и др.] // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2023. Т. 67, № 2. С. 125–136. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-67-2-125-136>

Analysis of Electromagnetic and Thermal Processes of an Induction Motor Using 3D Modeling

A. N. Pekhota¹), V. N. Galushko²), B. M. Khrustalev¹), D. V. Mirosh²)

¹)Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus),

²)Belarusian State University of Transport (Gomel, Republic of Belarus)

Abstract. The results of research and analysis of electromagnetic and thermal processes taking place in an induction motor are presented. Information is presented on the creation of a design

Адрес для переписки

Пехота Александр Николаевич
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 293-93-52
tg_v_fes@bntu.by

Address for correspondence

Pekhota Aleksandr N.
Belarusian National Technical University
65/2, Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 293-93-52
tg_v_fes@bntu.by

model of an auxiliary induction motor with various parameters according to the Goldberg method and the procedure for selecting the option with the best electromechanical characteristics is described. The main factors influencing the calculation methods, taking into account the aging rate, temperature and distribution of the temperature field, are determined, as well as the service life of the insulation. The research has made it possible to develop and apply 3D models of electromagnetic processes using special programs, interactively without describing complex vector equations of field theory, while using the ongoing thermal processes. The cumulative effect of temperature and humidity factors on the insulation service life under various influences of aggressive media has been determined as well. A comparison of the characteristics of the real induction motor (IM), the model IM and the one calculated according to the standard methodology made it possible to calculate the error taking into account the correction factor relative to the data used in the calculation methods of assessment, and to use this value in new calculation and modeling methods. The proposed 3D models of electromagnetic and thermal processes taking place in asynchronous motors make it possible to evaluate the efficiency of an electric machine; improve the design taking into account the criteria of electrical steel throughput and winding temperature; they also create prerequisites for more accurate forecasts when assessing the insulation residual life based on temperature fields.

Keywords: induction electric motor, electromagnetic processes, thermal processes, 3D models of electromagnetic processes, vector equations of field theory, service life of electrical insulation, calculation of insulation aging rate

For citation: Pekhota A. N., Galushko V. N., Khrustalev B. M., Mirosh D. V. (2024) Analysis of Electromagnetic and Thermal Processes of an Induction Motor Using 3D Modeling. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 67 (2), 125–136. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-2-125-136> (in Russian)

Введение

Более половины мирового энергопотребления в промышленности и энергетике потребляется с применением асинхронных двигателей (АД), что имеет значимый фактор, так как это электрооборудование является наиболее массовой продукцией электромашиностроения.

Диагностика технического состояния двигателей, работающих в качестве ответственных приводов, является важной задачей, авария которых может вызвать задержку целого технологического процесса. Проблема обеспечения высокого уровня надежности при работе электродвигателей ежегодно становится все более актуальной проблемой, ввиду того что устаревание данного вида оборудования значительно опережает темпы модернизации.

В настоящее время применяется ряд методов диагностирования электрических машин, основными из которых являются электромагнитные, вибрационные, тепловые и амплитудно-частотной токовой диагностики. Зачастую использование традиционных методов диагностирования бывает экономически неоправданным. При этом энерго- и ресурсосбережение – приоритетные направления научных исследований для всех стран, а направление научных исследований, представленное авторами, позволяет добиться существенного повышения технико-экономических показателей за счет повышения надежности электромеханического оборудования, применения новых методов диагностирования асинхронных электродвигателей.

Основная часть

Коллективом белорусских ученых БНТУ и БелГУТ проведены научно-практические исследования, позволившие разработать и применить 3D-модели электромагнитных процессов, проходящих в асинхронном двигателе марки АЭ-92-402 при помощи *Ansys Maxwell*. Применение данной программы позволило с использованием метода конечных элементов выполнить моделирование.

Асинхронный двигатель АЭ-92-402 был выбран для исследования ввиду своей распространенности. Он характеризуется простой конструкцией, высокой надежностью и сравнительно небольшой стоимостью. Данный тип двигателя нашел применение не только на промышленных предприятиях, но и на Белорусской железной дороге, где, в частности, используется на электровозах ВЛ80 С. Так как данный двигатель больше не производится, его замена на такой же невозможна. В случае выхода из строя его необходимо заменять на более современный аналог, например двигатель АНЭ-225L4УХЛ2.

Согласно статистическим данным, ежегодно из строя выходят в среднем 28 двигателей, из них по причине межвиткового замыкания обмотки статора – 27 %; пробоя обмотки статора – 5 %; перегрева обмотки статора – 2 %. С целью разработки энергоэффективного и надежного отечественного АД были поставлены и реализованы следующие задачи исследования:

1) создана модель вспомогательного асинхронного двигателя АЭ92-402 электровоза. Разработаны конструкции с различными параметрами (число пазов, ширина зубца и т.д.) двигателя по методике Гольдберга и выбран вариант с наилучшими электромеханическими характеристиками. Смоделирован и оптимизирован полученный вариант с помощью 3D-проекта электромагнитных полей;

2) получена картина распределения температурного поля в номинальном режиме работы и на холостом ходу с целью прогнозирования наработки на отказ изоляции обмоток статора по температурному критерию.

Известно достаточно много конечно-элементных пакетов прикладных программ (ППП), в которых расчеты электромагнитных систем доведены до совершенства. В данной статье при выборе программного средства были рассмотрены возможности таких программ, как *Ansis Multiphysics*, *Maxwell*, *COMSOL Multiphysics*, *ELCUT*, *Elmer* и *Code Aster (Salome)* [1, 2].

Весь расчет с помощью этих программ проводится обычно в интерактивном режиме. При этом не нужно писать сложные векторные уравнения теории поля. Программа сама разбивает моделируемое пространство на конечные элементы (треугольники, прямоугольники, тетраэдры, параллелепипеды и пр.). Необходимо только построить модель, ввести свойства материалов и граничные условия, запустить расчет и вывести его результаты в числовом и графическом виде. Весь процесс анализа весьма нагляден,

как правило, он сопровождается графическими построениями на экране компьютера.

При разработке проекта большое значение уделялось возможности 3D-моделирования и широкому набору возможностей, поэтому выбор был сделан в пользу Ansys Electronics Desktop от Ansys. Данное программное обеспечение обладает возможностью расчета электромагнитных процессов, электрических машин и проведения междисциплинарных расчетов [4] и позволяет одновременно исследовать механические, электрические и тепловые 3D-параметры электрической машины

В качестве аналитического расчета использовался источник [8], дополненный расчетом электромеханических характеристик в программе Mathcad и магнитным расчетом в программе Femm. При проектировании использовались следующие требования к исполнению: по степени защиты от внешних воздействии и по способу охлаждения – закрытое исполнение (IP44) с наружным обдувом от вентилятора, расположенного на валу двигателя (IC0141); общие технические данные основаны на ГОСТ 19523; способ охлаждения – по ГОСТ 20459; способ монтажа – по СТ СЭВ 246; климатические условия и категория размещения – по ГОСТ 15150 и 15543; надежность по ГОСТ 27.002.

При аналитическом расчете также применялось решение дифференциальных уравнений для Т-образной схемы замещения в программе Mathcad:

$$\vec{U}_s = R_s \vec{i}_s + \frac{d}{dt} \vec{\Psi}_s + j\omega_k \vec{\Psi}_s; \quad (1)$$

$$0 = R_r \vec{i}_r + \frac{d}{dt} \vec{\Psi}_r + j(\omega_k - \omega) \vec{\Psi}_s; \quad (2)$$

$$M = 1,5 p J_m (\vec{\Psi}_s \times \vec{i}_s); \quad (3)$$

$$J_\Sigma \frac{d}{dt} \omega = M - M_c, \quad (4)$$

где $\vec{i}_s, \vec{i}_r, \vec{\Psi}_s, \vec{\Psi}_r, \vec{U}_s$ – мгновенные значения обобщенных пространственных векторов токов, потокосцеплений и напряжений обмоток статора и ротора; R_s, R_r – активные сопротивления фаз обмоток статора и ротора, ω, ω_k – угловые скорости ротора и координатных осей соответственно; M, M_c – электромагнитный момент двигателя и момент его сопротивления на валу; J_Σ – суммарный момент инерции; p – число пар полюсов.

Ниже приведены наиболее важные пункты расчетов АД, а затем моделирования.

Проектирование асинхронных двигателей начинают с определения главных размеров: внутреннего диаметра D_1 , длины сердечника статора l_1 и т. д. (табл. 1–4, рис. 1–4) [5, 6].

Таблица 1

Результаты расчета асинхронных двигателей
Calculation results for asynchronous motors

№ пункта	Условные обозначения	Двигатель № 1	Двигатель № 2
1	Изоляция класса нагревостойкости	<i>F</i>	<i>F</i>
2	<i>h</i> , мм	200	200
3	$D_{н1}$, мм	359	359
4	D_1 , мм	239,12	239,12
5	A'_1 , А/см	433,2	421,8
6	B'_δ , Тл	0,77	0,765
7	l_1 , мм	190	194
8	q_1	3	3
9	z_1	36	38
Сердечник ротора			
10	z_2	38	48
Обмотка статора			
11	w_1	108	104
12	Φ , Вб	0,017	0,0175
13	B_δ , Тл	0,749	0,757
14	I_1 , А	51,95	59,949
15	A_1 , А/см	448,35	394,21
16	J_1 , А/мм ²	5,63	6,98
17	$A_1 J_1$, А ² /(см · мм ²)	2524,21	2751,58
18	$(A_1 J_1)_{доп}$, А ² /(см · мм ²)	2730	2892,5

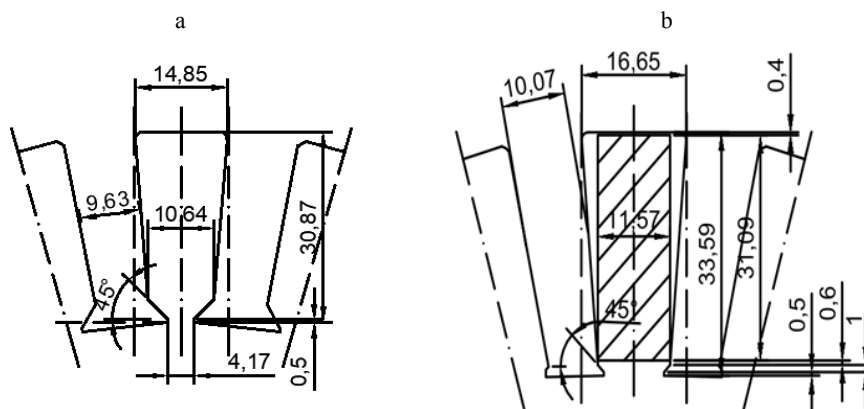


Рис. 1. Вид трапецидального полузакрытого паза статора
 Fig. 1. Type of trapezoidal semi-closed stator groove

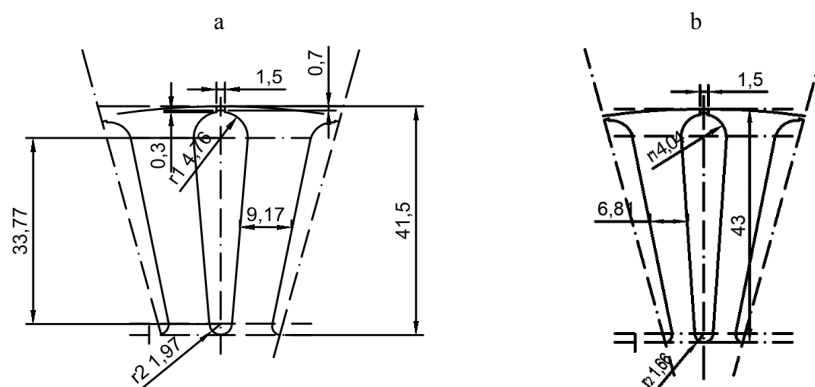


Рис. 2. Вид овальных закрытых пазов короткозамкнутого ротора
Fig. 2. View of oval closed slots of a short-circuited rotor

Таблица 2

Расчет режимов холостого хода и номинального
Calculation of idle and nominal stroke modes

№ п/п	Условные обозначения	Двигатель № 1	Двигатель № 2
1	I_1, A	42,97	42,99
2	$\cos\varphi_0$	0,884	0,886
3	$A_1, A/см$	370,79	424,308
4	$J_1, A/мм^2$	4,65	10,02
5	$A_2, A/см$	309,87	353,86
6	$I_{ст}, A$	612,36	466,08
7	$J_{ст}, A/мм^2$	2,28	1,96
8	$\eta, \%$	92,39	91,94
9	Проверка $P_1, Вт$ $P_2, Вт$	43308 40008	43465 39921

Таблица 3

Рабочие характеристики первого варианта двигателя
Performance characteristics of the first motor variant

Характеристика	Отдаваемая мощность в долях от номинальной P_2					
	0	$0,25P_2$	$0,5P_2$	$0,75P_2$	P_2	$1,25P_2$
$P_2, Вт$	0	10000	20000	30000	40000	50000
s	0,00012	0,0035	0,0071	0,011	0,0153	0,0204
I_{a1}, A	1,118	10,032	19,12	28,46	37,95	47,79
I_{p1}, A	11,346	11,76	13,24	15,95	20,073	26,083
I_1, A	11,401	15,46	23,26	32,63	42,93	54,45
$\cos\psi$	0,0981	0,6489	0,822	0,87	0,884	0,8774
$P_1, Вт$	1510,39	11620,52	21933,19	32478,29	43290,78	54462,57
η	0	86,05	91,18	92,36	92,3984	91,806
$M, Н\cdot м$	0	63,89	128,25	193,13	258,641	324,96
$n_2, об/мин$	1499,81	1494,66	1489,26	1483,4	1476,941	1469,38

Таблица 4

Рабочие характеристики второго варианта двигателя
 Performance characteristics of the second motor variant

Характеристика	Отдаваемая мощность в долях от номинальной P_2					
	0	$0,25P_2$	$0,5P_2$	$0,75P_2$	P_2	$1,25P_2$
P_2 , Вт	0	10000	20000	30000	40000	50000
s	0,00013	0,0037	0,0075	0,01161	0,01605	0,02107
I_{a1} , А	1,162	10,088	19,206	28,55	38,13	48,078
I_{p1} , А	12,516	12,85	14,11	16,39	19,86	24,81
I_1 , А	12,569	16,34	23,83	32,9301	42,99	54,105
$\cos\psi$	0,0925	0,61	0,805	0,8672	0,8869	0,8886
P_1 , Вт	1560,82	11682,9	22097,9	32693,2	43576,4	54824,8
η	0	85,59	90,506	91,76	91,79	91,19
M , Н·м	0	63,906	128,303	193,24	258,82	325,18
n_2 , об/мин	1499,8	1494,37	1488,67	1482,58	1475,93	1468,4

При создании 3D-модели двигателя в Ansys Electronics использовались результаты предварительного расчета. Многие операции создания модели АД автоматизированы, например такие, как визуализация параметров пазов статора и ротора (рис. 3а), укладка трехфазной обмотки статора (рис. 3б), причем имеется аналитический инструментарий редактирования их характеристик.

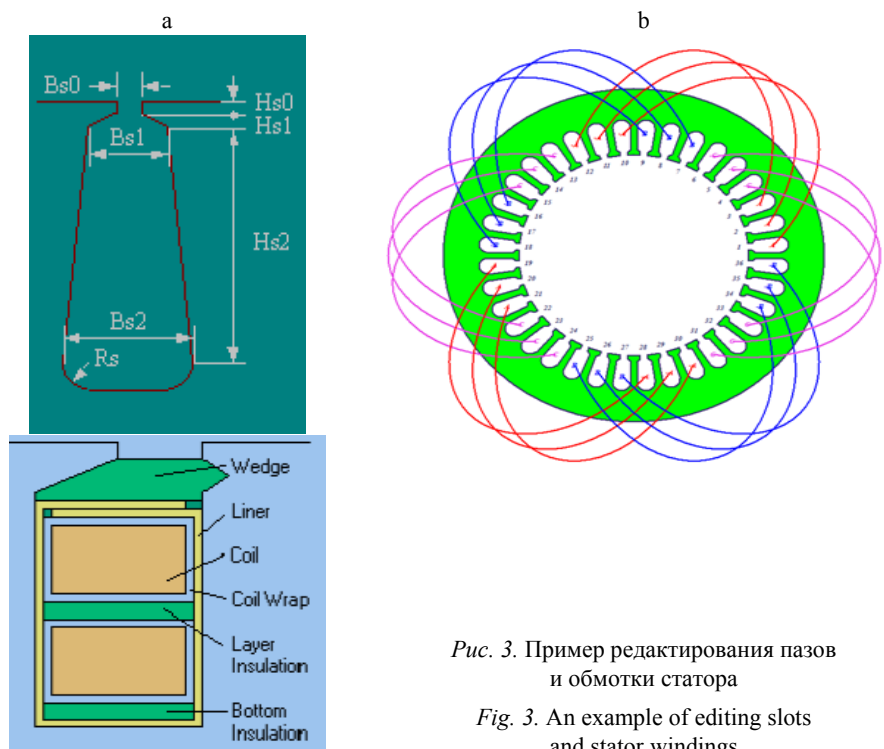


Рис. 3. Пример редактирования пазов и обмотки статора

Fig. 3. An example of editing slots and stator windings

Проверка (Validate) и предварительный расчет (Analyze All) ускоряют выполнение проекта. Результаты представляются в виде таблиц данных, набора характеристик и изображений.

Анимированную модель электромагнитных процессов (рис. 4) можно получить в виде как непосредственно поля с цветовой дифференциацией различных физических величин, так и векторов.

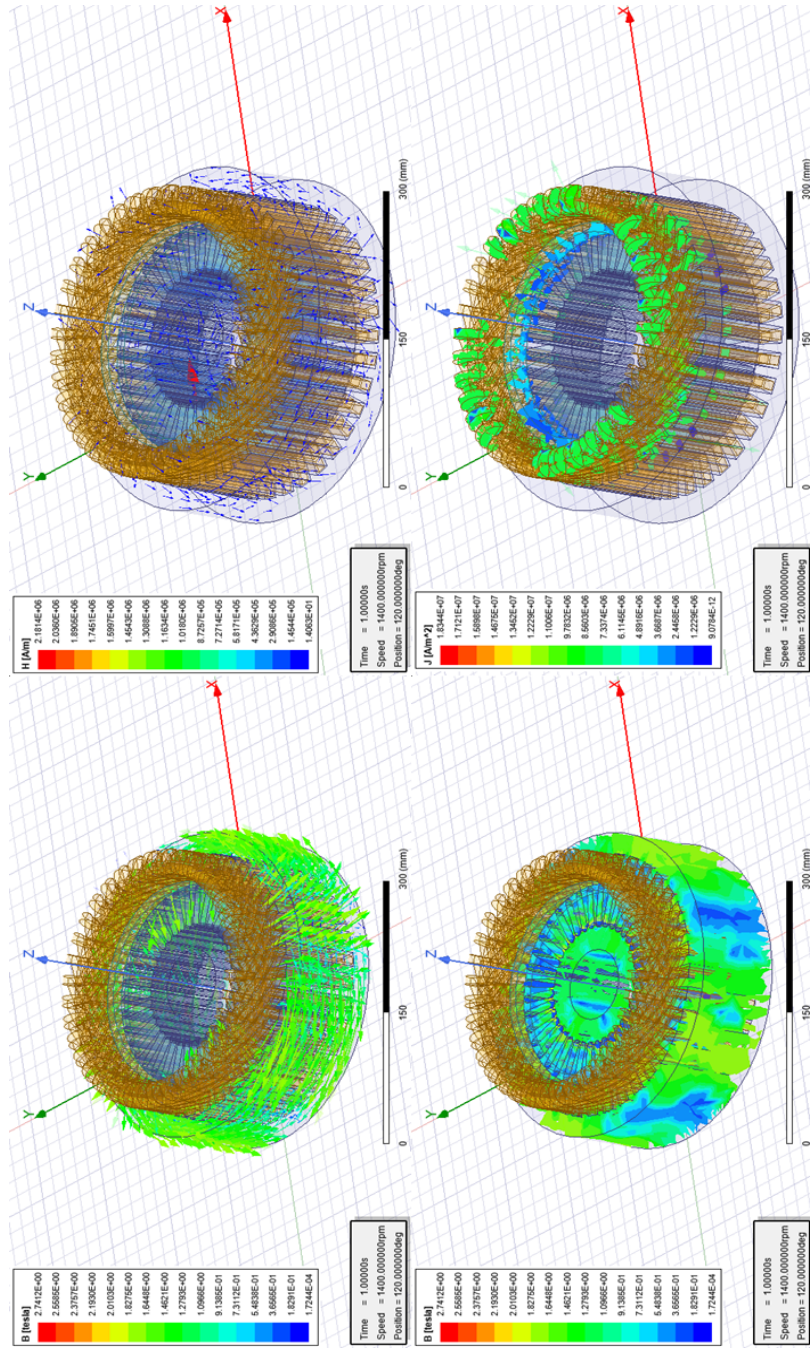


Рис. 4. Анализ 3D-модели различных полей *Ansys Electronics*
 Fig. 4. Analysis of 3D model of various *Ansys Electronics* fields

Среди факторов, определяющих срок службы изоляции трансформаторов, одним из основных является старение изоляции под действием температуры. Это явление хорошо поддается количественному учету и поэтому сравнительно подробно исследовано. Особое значение приобретают методы расчета скорости старения и на этой основе – срока службы изоляции.

Первые работы в этом направлении имели, главным образом опытный характер, относились к изоляции класса «А». В результате было сформулировано правило «восьми градусов» (правило Монтзингера), в соответствии с которым повышение температуры на каждые 8 °С сверх предельно допустимой сокращает срок службы изоляции вдвое:

$$T = T_0 e^{-0,0866v}, \quad (5)$$

где v – температура нагрева изоляции, °С; T – срок службы изоляции при этой температуре (в годах); T_0 – то же при так называемых «нулевых» условиях (при 105 °С составляет $6,225 \cdot 10^4$ лет).

Установлено, что 8 °С соответствует только классу «А», а для других классов изоляции она повышается до (10–12) °С, а именно, чем выше класс нагревостойкости, тем медленнее происходит старение.

Несмотря на эмпирический характер, правило Монтзингера позволяет производить ориентировочные расчеты в тех случаях, когда они относятся к сравнительно небольшим отрезкам времени и небольшим диапазонам изменения температуры.

Основная цель исследования в дальнейшем связана с оценкой остаточного ресурса используемых приводов электровоза. Для достижения этой цели, с учетом имеющихся знаний по нагрузке, необходимо определить температурный режим двигателя, что было достигнуто получением картины температурных полей и локализации «узких мест». Также было рассмотрено старение изоляции под действием температуры, электрического поля, механических нагрузок, влаги и химически активных веществ. Отмечается, что скорость старения изоляции определяется в основном эксплуатационными условиями и свойствами применяемых материалов, а на образование местных дефектов оказывают значительное влияние уровень технологии и общей культуры производства, условия хранения трансформатора, его транспортировка и монтаж.

Старение изоляции низковольтных машин, работающих при умеренных температурах обмоток, вообще не может быть объяснено с помощью тепловых или электрических явлений [7]. В этом случае наиболее вероятными причинами, вызывающими постепенное разрушение изоляции, являются механические нагрузки и химическое воздействие окружающей среды.

Определенную роль в процессах разрушения изоляции играют термомеханические явления, связанные с различием коэффициентов теплового расширения изоляции и проводников. Это приводит к образованию трещин, разбуханию изоляции, расслоению ее и взаимному смещению отдельных слоев.

Картина полученных температурных полей, а также сопротивление изоляции $R_{из}$, тангенс угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$, емкость изоляционного промежутка $C_{из}$, коэффициент диэлектрической абсорбции DAR , индекс поляризации PI , коэффициент диэлектрической абсорбции DD и ток сквозной проводимости $I_{ут}$ позволят перейти к расчету остаточного ресурса изоляции.

Для проведения температурного анализа 3D модель была импортирована в программную среду Iserac (рис. 5).

Результаты моделирования верифицированы с помощью поверенных пирометра и тепловизора. Разница в максимальных температурах, полученных в ходе эксперимента между моделью и выполненными натурными исследованиями, составила менее 3 °С. Полученные данные исследования позволили рассчитать ошибку с учетом поправочного коэффициента относительно данных, применяемых в расчетных методах оценки при диагностировании асинхронных двигателей. Работы по моделированию с использованием сверточных нейросетей ведутся и с обмотками трансформаторов различной мощности и назначения, применяемых в энергетике [8–13]. Результаты, полученные в ходе исследования электромагнитных и тепловых процессов, проходящих в асинхронных электродвигателях и трансформаторах, позволили разработать и применить 3D-модели с использованием специальных программ в интерактивном режиме без описания сложных векторных уравнений теории поля, используя при этом происходящие тепловые процессы. Применение комплексного анализа позволило выявить совокупное влияние на срок службы изоляции таких факторов, как температура, влажность при различных воздействиях агрессивных сред, в том числе в условиях их эксплуатации во взрывоопасных зонах.

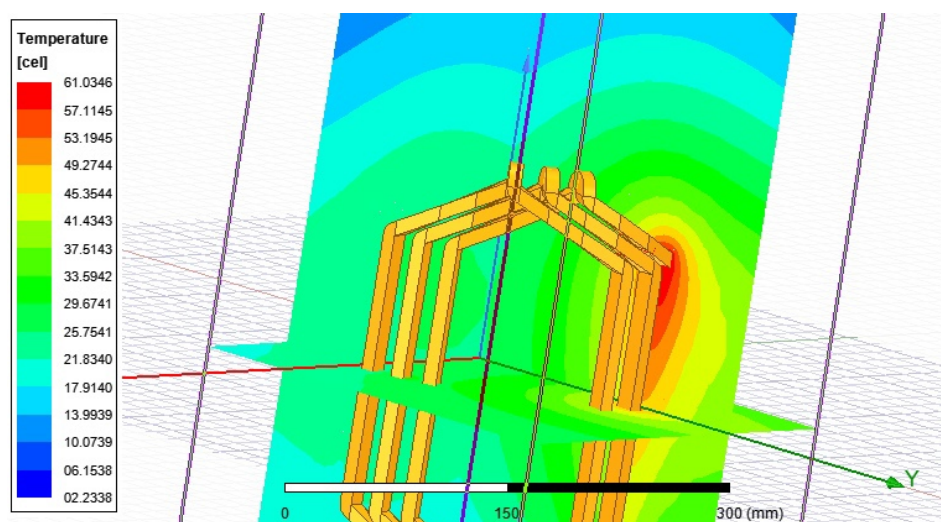


Рис. 5. Температурное поле для одной из точек обмотки

Fig. 5. Temperature field for one of the winding points

ВЫВОДЫ

1. Сравнение характеристик реального, модельного и рассчитанного по стандартной методике АД позволило рассчитать ошибку с учетом поправочного коэффициента относительно данных, применяемых в расчетных методах оценки, использовать полученное значение в новых методиках расчета и моделирования.

2. Предложенные 3D-модели электромагнитных и тепловых процессов, протекающих в асинхронных двигателях, позволяют:

- оценить эффективность электрической машины;
- усовершенствовать конструкцию с учетом критериев пропускной способности электротехнической стали и температуры обмоток;
- создавать предпосылки для более точных прогнозов при оценке остаточного ресурса изоляции на основе температурных полей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Буль, О. Б. Методы расчета систем электрических аппаратов. Программа ANSYS: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / О. Б. Буль. М.: Изд. центр «Академия», 2006. 288 с.
2. Беззубцева, М. М. Расчет электромагнитного механоактиватора с применением программного комплекса Ansys / М. М. Беззубцева, В. С. Волков, П. С. Прибытков // Известия СПб. государственного аграрного ун-та. 2009. № 15. С. 150–154.
3. Мансурова, А. Р. Применение программного комплекса ANSYS в компьютерном моделировании / А. Р. Мансурова // Молодой ученый. 2018. № 39 (225). С. 31–33.
4. Оконечников, А. С. Прочностные и динамические расчеты в программном комплексе Ansys Workbench: учеб. пособие / А. С. Оконечников, Д. О. Сердюк, Г. В. Федотенков. М.: Изд-во МАИ, 2021. 104 с.
5. Гольдберг, О. Д. Проектирование электрических машин: учеб. для втузов / О. Д. Гольдберг, Я. С. Гурин, И. С. Свириденко. М.: Высш. шк., 1984. 431 с.
6. Галушко, В. Н. Расчет асинхронных двигателей: пособие для выполнения курсовой работы / В. Н. Галушко, И. С. Евдасев, В. А. Пацкевич; М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. Гомель: БелГУТ, 2016. 158 с.
7. Воробьев, В. Е. Прогнозирование срока службы электрических машин: письменные лекции / В. Е. Воробьев, В. Я. Кучер. СПб.: СЗТУ, 2004. 56 с.
8. Пехота, А. Н. Технология использования сверхточных нейронных сетей при диагностике состояния трансформаторов / А. Н. Пехота, В. Н. Галушко, И. Л. Громыко. // Вестник Полоцкого государственного университета. Сер. С. Фундаментальные науки. 2021. № 12. С. 63–69.
9. Пехота, А. Н. Диагностирование межвитковых коротких замыканий трансформаторов с помощью комплексного анализа данных приборного учета / А. Н. Пехота, В. Н. Галушко, И. Л. Громыко // Энергоэффективность. 2021. № 2. С. 24–28.
10. Галушко, В. Н. Применение интеллектуальных нейросетей для диагностики межвитковых замыканий трансформаторов / В. Н. Галушко, А. Н. Пехота, И. Л. Громыко // Материалы X Междунар. науч.-практ. конф. «Проблемы безопасности на транспорте», Гомель, 26–27 нояб. 2020 г. Гомель: БелГУТ, 2020. С. 88–89.
11. Пехота, А. Н. Технология применения диагностического комплекса трансформаторов / А. Н. Пехота, В. Н. Галушко, И. Л. Громыко // Энергоэффективность. 2022. № 3. С. 22–26.
12. Пехота, А. Н. Результаты диагностирования различных неисправностей трансформаторов с воздушным охлаждением / А. Н. Пехота, И. Л. Громыко, В. Н. Галушко // Энергоэффективность. 2022. № 8. С. 24–29.

13. Опейко, О. Ф. Синтез на основе линеаризации векторного управления скоростью асинхронного электродвигателя без датчика скорости / О. Ф. Опейко // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2022. Т. 65, № 2. С. 103–114. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-2-103-114>.

Поступила 17.10.2023 Подписана в печать 19.12.2023 Опубликована онлайн 29.03.2024

REFERENCES

1. Bul' O. B. (2006) *Methods of Electrical Apparatus Systems Computaion. The ANSYS Software*. Moscow, Akademiya Publ. 288 (in Russian).
2. Bezzubtseva M. M., Volkov V. S., Pribytkov P. S. (2009) Computation of an Electromagnetic Mechanical Activator Using the ANSYS Software Package. *Sankt-Peterburgskii Gosudarstvennyi Agrarnyi Universitet. Izvestiya*, (15), 150–154 (in Russian).
3. Mansurova A. R. (2018) Application of the ANSYS Software Package in Computer Modeling. *Molodoi Uchenyi* [Young Scientist], (39), 31–33 (in Russian).
4. Okonechnikov A. S., Serdyuk D. O., Fedotenkov G. V. (2021) *Strength and Dynamic Calculations in the ANSYS Workbench Software Package*. Moscow, MAI Publ. 104 (in Russian).
5. Goldberg O. D., Gurin Ya. S., Sviridenko I. S. (1984) *Designing Electric Machines*. Moscow, Vysshaya shkola Publ. 431 (in Russian).
6. Galushko V. N., Evdasev I. S., Patskevich V. A. (2016) *Calculation of Asynchronous Motors*. Gomel, Belarusian State University of Transport. 158 (in Russian).
7. Vorobyov V. E., Kucher V. Ya. (2004) *Forecasting the Service Life of Electrical Machines*. St. Petersburg, North-West State Technical University. 56 (in Russian).
8. Pehota A., Galushko V., Gromyko I. (2021) Technology of Using Convolutional Neural Networks in Diagnosing the State of Transformers. *Vestnik Polotskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Seriya C. Fundamental'nye Nauki = Vestnik of Polotsk State University. Part C. Fundamental Sciences*, (12), 63–69 (in Russian).
9. Pekhota A. N., Galushko V. N., Gromyko I. L. (2021) Diagnostics of Inter-Turn Short Circuits of Transformers Using Comprehensive Analysis of Instrument Data. *Energoeffektivnost' [Energy Efficiency]*, (2), 24–28 (in Russian).
10. Galushko V. N., Pekhota A. N., Gromyko I. L. (2020) The Use of Intelligent Neural Networks for the Diagnosis of Inter-Turn Circuits of Transformers. *Materialy X Mezhdunar. Nauch.-Prakt. Konf. «Problemy Bezopasnosti na Transporte», Gomel', 26–27 Noyab. 2020 g.* [Materials of the Xth International Scientific and Practical Conference “Problems of Transport Safety”, Gomel, November 26–27, 2020]. Gomel, Belarusian State University of Transport, 88–89 (in Russian).
11. Pekhota A. N., Galushko V. N., Gromyko I. L. (2022) Technology of Application of Diagnostic Complex of Transformers. *Energoeffektivnost' [Energy Efficiency]*, (3), 22–26 (in Russian).
12. Pekhota A. N., Galushko V. N., Gromyko I. L. (2022) The Results of Diagnosing Various Malfunctions of Air-Cooled Transformers. *Energoeffektivnost' [Energy Efficiency]*, (8), 24–29 (in Russian).
13. Opeiko O. F. (2022) Synthesis Based on Linearization of Vector Speed Control of an Induction Motor without a Speed Sensor. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 65 (2), 103–114. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-2-103-114> (in Russian).

Received: 17 October 2023 Accepted: 19 December 2023 Published online: 29 March 2024