

**ПОДВИЖНОЙ СОСТАВ**

УДК 681.5

В. Н. ГАЛУШКО, кандидат технических наук, Д. В. МИРОШ, И. Л. ГРОМЫКО, И. Е. МОНАРХОВИЧ, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

### СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ПОМОЩЬЮ 3D-МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ И ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ

Представлена разработка 3D-проекта электромагнитных полей для асинхронного двигателя электровоза, предварительно рассчитанная по методике Гольдберга. Получена картина распределения температурного поля в номинальном режиме работы и на холостом ходу. Предложенные 3D-модели электромагнитных и тепловых процессов асинхронного двигателя позволяют оценить эффективность электрической машины, усовершенствовать конструкцию по критериям пропускной способности электротехнической стали и температуры обмоток, создают предпосылки для более точных прогнозов по остаточному ресурсу изоляции на основе температурных полей.

**Ц**ель данной работы – разработка и применение 3D-модели электромагнитных процессов вспомогательного асинхронного двигателя АЭ-92-402 при помощи программы *Ansys Maxwell*, в основе которой лежит метод конечных элементов.

Асинхронный двигатель (АД) АЭ-92-402 был выбран для исследования ввиду своей распространенности на Белорусской железной дороге на электровозах ВЛ80<sup>С</sup>. 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. Каждый год из строя выходят в среднем 28 двигателей, из них по причине межвиткового замыкания обмотки статора – 27 %; пробой обмотки статора – 5 %; перегрев обмотки статора – 2 %.

С целью разработки более энергоэффективного и надежного отечественного АД были поставлены и решены следующие задачи исследования.

1 Создана модель вспомогательного асинхронного двигателя АЭ-92-402 (АД) электровоза. Разработаны конструкции с различными параметрами (число пазов, ширина зубца и т. д.) двигателя по методике Гольдберга и выбран вариант с наилучшими электромагнитными 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 *ANSYS Multiphysics*, *Maxwell*, *COMSOL Multiphysics*, *ELCUT*, *Elmer* и *CodeAster (Salome)* [1, 2].

Весь расчет с помощью таких 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, пря-

моугольники, 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, а также проведения междисциплинарных расчетов [4]. Одним из элементов, входящих в *Ansys*, является *Ansys Emag*. Этот пакет ориентирован на решение задач низкочастотных электромагнитных приложений, электродвигателей, реле и соленоидов. Обеспечивает всесторонний анализ различных электромагнитных явлений на всех этапах проектирования.

Для создания 3D-модели были выполнены предварительные вычисления параметров асинхронного двигателя АЭ92-402 по методике Гольдберга, причем рассматривались сразу несколько вариантов, отличающиеся различными числами пазов обмотки статора, числом проводников и пр.

Приведем наиболее важные пункты расчетов асинхронных двигателей (АД), а затем моделирования.

Проектирование асинхронных двигателей начинают с определения главных размеров: внутреннего диаметра  $D_1$  и длины сердечника статора  $l_1$  и т. д. (таблицы 1–3 и рисунок 1) [5, 6].

При создании 3D-модели двигателя в *Ansys Electronics* использовались результаты предварительного расчета. Многие операции создания модели АД автоматизированы. Например, визуализация параметров пазов статора и ротора (рисунок 2, а), укладка трехфазной обмотки статора (рисунок 2, б), причем имеется аналитический инструментариий редактирования их характеристик. Проверка (*Validate*) и предварительный расчёт (*Analyze All*) ускоряют выполнение проекта. Результаты представляются в виде таблиц данных, набора характеристик и изображений.

Анимированную модель электромагнитных процессов (рисунок 3) можно получить как в виде непо- средством поля с цветовой дифференциацией раз- личных физических величин или в виде векторов.

Таблица 1 – Результаты расчета АД

Номер пункта	Условные обозначения	Двигатель № 1	Двигатель № 2
1	Изоляция класса нагревостойкости	$F$	$F$
2	$h$ , 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	$B'_\delta$ , Тл	0,77	0,765
7	$l_1$ , мм	190	194
8	$q_1$	3	3
9	$z_1$	36	38
<i>Сердечник ротора</i>			
10	$z_2$	38	48
<i>Обмотка статора</i>			
11	$w_1$	108	104
12	$\Phi$ , Вб	0,017	0,0175
13	$B_\delta$ , 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 <sup>2</sup>	5,63	6,98
17	$A_1 J_1$ , А <sup>2</sup> /(см· мм <sup>2</sup> )	2524,21	2751,58
18	$(A_1 J_1)_{доп}$ , А <sup>2</sup> /(см· мм <sup>2</sup> )	2730	2892,5
19	$I_1$ , А	42,97	42,99
20	$\cos\varphi_0$	0,884	0,886
21	$A_1$ , А/см	370,79	424,308
22	$J_1$ , А/мм <sup>2</sup>	4,65	10,02
23	$A_2$ , А/см	309,87	353,86
24	$I_{ст}$ , А	612,36	466,08
25	$J_{ст}$ , А/мм <sup>2</sup>	2,28	1,96
26	$\eta$ , %	92,39	91,94
27	Проверка $P_1$ , Вт $P_2$ , Вт	43308 40008	43465 39921

Таблица 2 – Рабочие характеристики первого варианта двигателя

Характеристика	Отдаваемая мощность в долях от номинальной $P_2$					
	0	0,25 $P_2$	0,5 $P_2$	0,75 $P_2$	$P_2$	1,25 $P_2$
$P_2$ , Вт	0	10000	20000	30000	40000	50000
$s$	0,00012	0,0035	0,0071	0,011	0,0153	0,0204
$I_{a1}$ , А	1,118	10,032	19,12	28,46	37,95	47,79
$I_{p1}$ , А	11,346	11,76	13,24	15,95	20,073	26,083
$I_1$ , А	11,401	15,46	23,26	32,63	42,93	54,45
$\cos\varphi$	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
$\eta$	0	86,05	91,18	92,36	92,3984	91,806
$M$ , Н·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 3 – Рабочие характеристики второго варианта двигателя

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
$\cos\varphi$	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
$\eta$	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

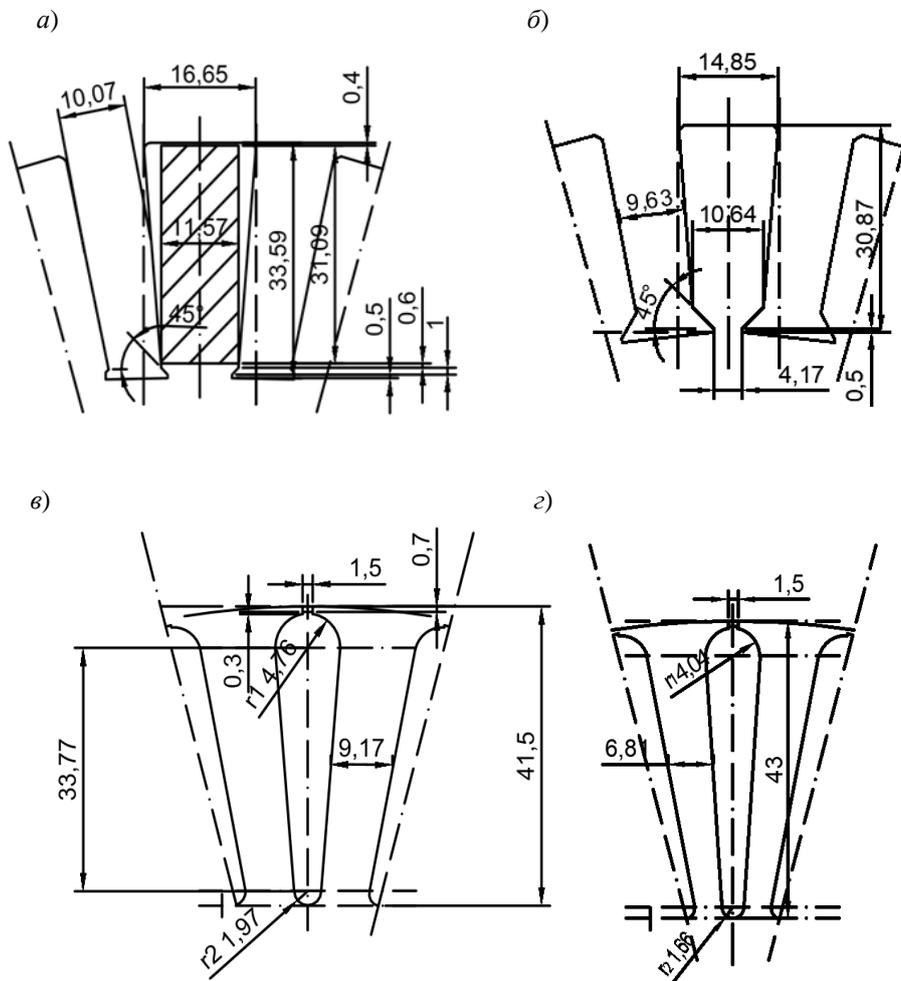
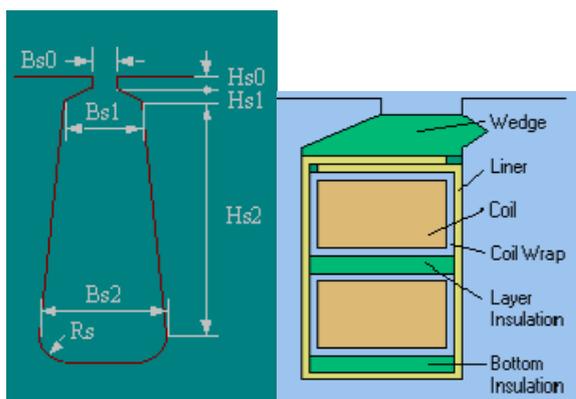


Рисунок 1 – Трапецидальные полузакрытые пазы статора (а, б) и овальные закрытые короткозамкнутого ротора (в, г) соответственно первого и второго вариантов АД

a)



б)

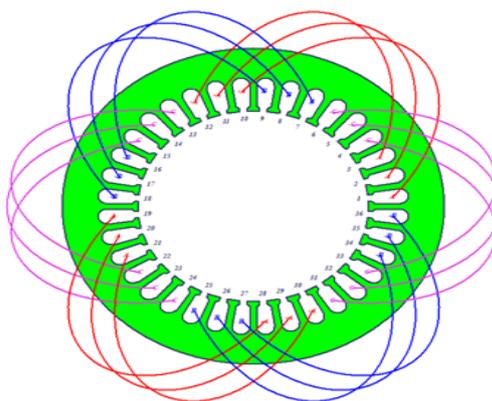


Рисунок 2 – Пример редактирования пазов (а) и обмотки статора (б)

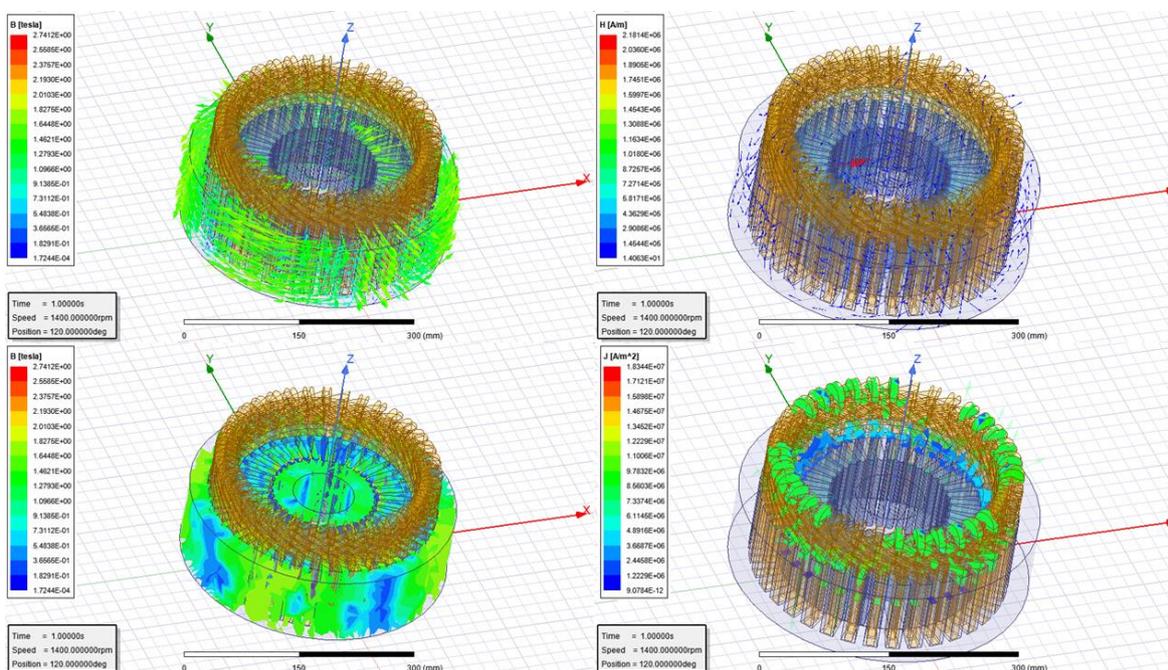


Рисунок 3 – Анализ 3D-модели различных полей *Ansys Electronics*

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 расчёта скорости старения и на этой основе – срока службы изоляции.

Первые работы в этом направлении имели, главным образом, опытный характер и 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:

$$T = T_0 e^{-0,0866\theta}$$

где  $T$  – срок службы изоляции при этой температуре, лет;  
 $T_0$  – срок службы изоляции при так называемых «нуле-

вых» условиях (при 105 °С составляет  $6,225 \cdot 10^4$  лет);  
 $\theta$  – температура нагрева изоляции, °С;

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

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

В работе [7] описана закономерность старения изоляции. 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 услови-

ями и свойствами применяемых материалов, а на образование местных дефектов оказывают влияние условия 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, её расслоению и взаимному смещению отдельных слоев.

Важным фактором старения изоляции является воздействие химически активных сред и влаги. Совокупное влияние на срок службы изоляции температуры, влажности и агрессивных сред можно оценить по следующему уравнению:

$$T = Ae^{-B/\theta} C^{-m} \eta^{-n},$$

где  $C$  – концентрация агрессивного агента;  $\eta$  – относительная влажность.

Для проведения температурного анализа 3D-модель была импортирована в программную среду *Icepak* (рисунок 4).

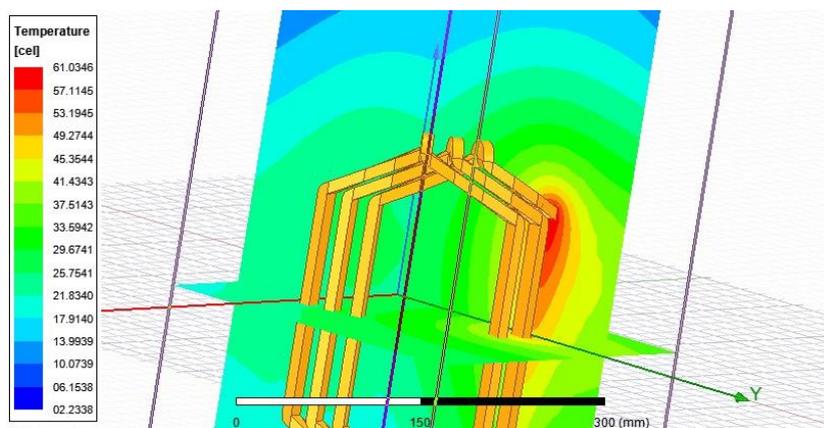


Рисунок 4 – Температурное поле для одной из точек обмотки

Результаты моделирования были верифицированы с помощью поверенного пирометра и тепловизора. Сравнение характеристик реального, модельного и рассчитанного по стандартной методике АД позволили рассчитать ошибку расчетов и моделирования. Разница в максимальных температурах между моделью и натурными экспериментами составила менее 3 °С.

Предложенные 3D-модели электромагнитных и тепловых процессов асинхронного двигателя позволяют оценить эффективность электрической машины, усовершенствовать конструкцию по критериям пропускной способности электротехнической стали и температуры обмоток, создают предпосылки для более точных прогнозов по остаточному ресурсу изоляции на основе температурных полей.

#### Список литературы

1 Буль, О. Б. Методы расчета систем электрических аппаратов. Программа ANSYS : учеб. пособие / О. Б. Буль. – М. : Академия, 2006. – 288 с.

Получено 15.09.2023

**V. N. Galushko, D. V. Miroch, I. L. Gromyko, I. E. Monarchovich.** Improving the design an induction motor using 3D modeling of electromagnetic and thermal processes.

Present the development of a 3D project of electromagnetic fields for an asynchronous electric locomotive engine, previously calculated using the Goldberg method. A picture of the distribution of the temperature field in the nominal operating mode and at idle was obtained. The proposed 3D models of electromagnetic and thermal processes of an asynchronous motor make it possible to evaluate the efficiency of an electric machine, improve the design according to the criteria of electrical steel throughput and winding temperature, and create the prerequisites for more accurate forecasts of the residual insulation life based on temperature fields.

2 Беззубцева, М. М. Расчет электромагнитного механоактиватора с применением программного комплекса Ansys / М. М. Беззубцева, В. С. Волков, П. С. Прибытков // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. – 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. – 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.

