

УДК 621.313.17:519.876.5

DOI: 10.25206/2310-4597-2023-1-10-14

МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ МАЛОЙ МОЩНОСТИ С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММНОГО ПАКЕТА ELCUT

MODELING AND CALCULATION OF A LOW-POWER HIGH-SPEED SYNCHRONOUS MOTOR USING THE ELCUT SOFTWARE

Е. Г. Андреева, А. С. Татевосян, Н. А. Терещенко

Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

E. G. Andreeva, A. S. Tatevosyan, N. A. Tereschenko

Omsk State Technical University, Omsk, Russia

Аннотация. В статье рассматриваются вопросы моделирования конструкции и расчета характеристик высокоскоростного синхронного двигателя с постоянными магнитами малой мощности на этапе первоначальной стадии его проектирования согласно техническому заданию. Приведены результаты вычислительных экспериментов. Расчеты проводились в программном пакете Elcut (профессиональный). Проведена оценка структуры геометрической модели и материалов, заданных при имитационном моделировании, и использованных при физическом моделировании конструкции высокоскоростного синхронного двигателя малой мощности с постоянными магнитами (ВСДММПМ). Получены рекомендации для уточнения имитационной модели следующего этапа проектирования двигателя.

Ключевые слова: синхронный двигатель малой мощности, имитационное моделирование, программный пакет Elcut, геометрическая модель.

Abstract. The article discusses the issues of modeling the design and calculating the characteristics of a high-speed synchronous motor with low-power permanent magnets at the initial stage of its design in accordance with the terms of reference. The results of computational experiments are given. Calculations were carried out in the Elcut software package (professional). The structure of the geometric model and materials specified in the simulation modeling and used in the physical modeling of the design of the high-speed synchronous low-power motor with permanent magnets (VDMMPM) were assessed. Recommendations have been obtained to refine the simulation model of the next stage of engine design.

Keywords: low power synchronous motor, simulation simulation, Elcut software package, geometric model.

I. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время область применения синхронных электродвигателей весьма обширна [1]. Их используют для поддержания стабильного уровня напряжения (источники реактивной мощности) [2], для вращения установок (станки, компрессоры, вентиляторы) [3–4], в качестве привода для летательных аппаратов [5], а также для других целей. Преимущество данного вида двигателя обусловлено возможностью сохранять постоянную частоту вращения, они обладают более высоким КПД (коэффициент полезного действия), высоким вращающим моментом, имеют большую мощность (до 20000 кВт), сохраняя при этом компактную форму. Для снижения стоимости и улучшения характеристик синхронного двигателя в конструкции используются постоянные магниты [6]. Такие синхронные двигатели часто можно встретить в высокоскоростных конструкциях, благодаря их высокой производительности и удельной мощности [7]. Для достижения наилучших показателей проведен сравнительный анализ конструкций двигателей по их электромагнитным, механическим и тепловым характеристикам [8]. Авторы статьи [9] исследуют вращающий момент синхронных машин с постоянными магнитами из магнитомягких композитов на полимерной основе, которые позволяют снизить затраты на производство машины, уменьшают магнитную проницаемость стали и уровень ее насыщения. При решении задач,

связанных с расчетом оптимизации конструкции, для моделирования используют программные пакеты, например, ANSYS Maxwell [10], Elcut [11]. Таким образом, актуальность данного исследования подтверждается высоким спросом на производство синхронных двигателей малой мощности с постоянными магнитами, а также заинтересованностью научных коллективов в решении задач повышения надежности, упрощения конструкции и пуска двигателя.

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Основные размеры геометрической модели по техническому заданию для проектирования высокоскоростного синхронного двигателя малой мощности с постоянными магнитами (ВСДММПМ): внешний диаметр корпуса $d = 53$ мм, толщина $l = 20$ мм. Электрические характеристики: потребляемая мощность $P_1 = 20$ Вт, напряжение питания 24 В от источника постоянного тока, потребляемый ток $I_1 = 1$ А, пусковой ток $I_n = 3$ А. Конструкция моделируемого синхронного двигателя – обращенная. Ротор двигателя внешний и вращается вместе с рабочим механизмом с частотой вращения 6000 об/мин, статор неподвижен и находится внутри ротора. Ротор является индуктором, т.е. создает основной магнитный поток, и представляет собой корпус в виде стального проводящего стакана вместе с гибким магнитопластом. Статор имеет явнополюсную конструкцию из шихтованной стали с четырьмя полюсами и является якорем. На обмотку якоря через частотный преобразователь подаются синусоидальное напряжение и ток частотой 200 Гц (амплитудное значение напряжения – 24 В) от источника постоянного тока.

III. ТЕОРИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

На предварительном этапе – проектирование геометрии конструкции синхронного двигателя (ВСДММПМ) и исследование силовых характеристик магнитного поля проводилось на плоской упрощенной геометрической распределенной модели двигателя в декартовой и полярной системах координат с помощью программного пакета инженерного анализа и двумерного моделирования методом конечных элементов (МКЭ) – Elcut (профессиональный). На этом этапе моделирования и расчета использовался решатель – «Магнитостатическое поле» для некоторого фиксированного момента времени, когда потребляемый ток равен $I_1 = 1$ А. Приняты следующие условия при решении магнитостатической задачи: плотность тока медной обмотки статора, которая равномерно распределена по сечению обмотки, $J = 10$ А/мм²; относительная магнитная проницаемость стали $\mu_{ст} = 1000 = \text{const}$; относительные магнитные проницаемости меди μ_m и воздуха μ_v равны 1; коэрцитивная сила магнитопласта 955 кА/м. На рис. 1, а представлена геометрическая модель синхронного двигателя, число узлов триангуляционной сети 100788. На рис. 1, б приведена картина распределения силовых линий вектора магнитной индукции.

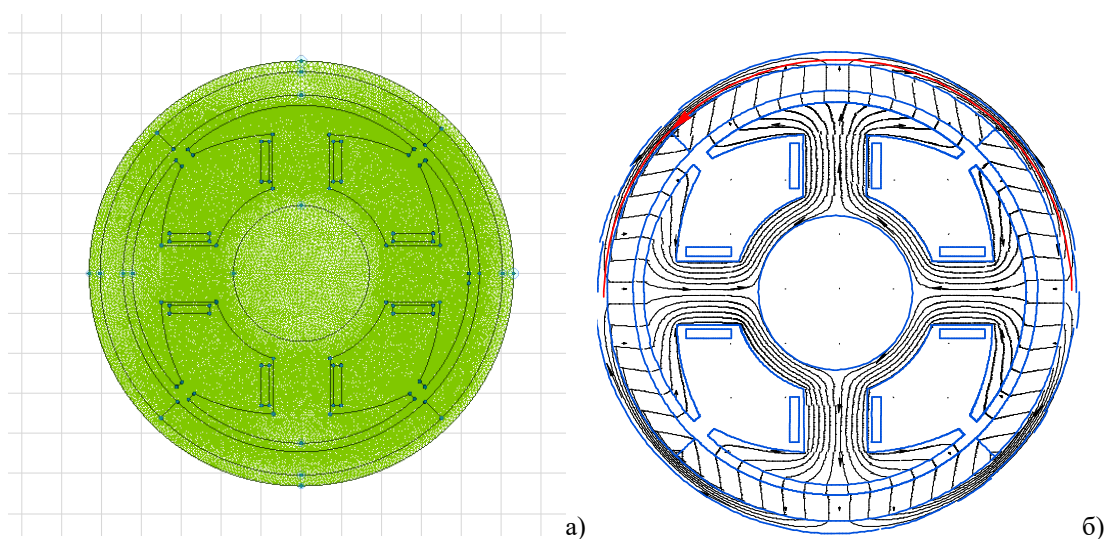


Рис. 1. Геометрическая модель (а) и картина распределения силовых линий вектора магнитной индукции В (б) на предварительном этапе моделирования синхронного двигателя (ВСДММПМ)

Распределение вектора магнитной индукции (Тл) вдоль линий, указанных красным цветом, например, на рис. 1, б (значение результирующего вектора магнитной индукции и составляющих по осям r , Θ) показано на рис. 2, а, б.

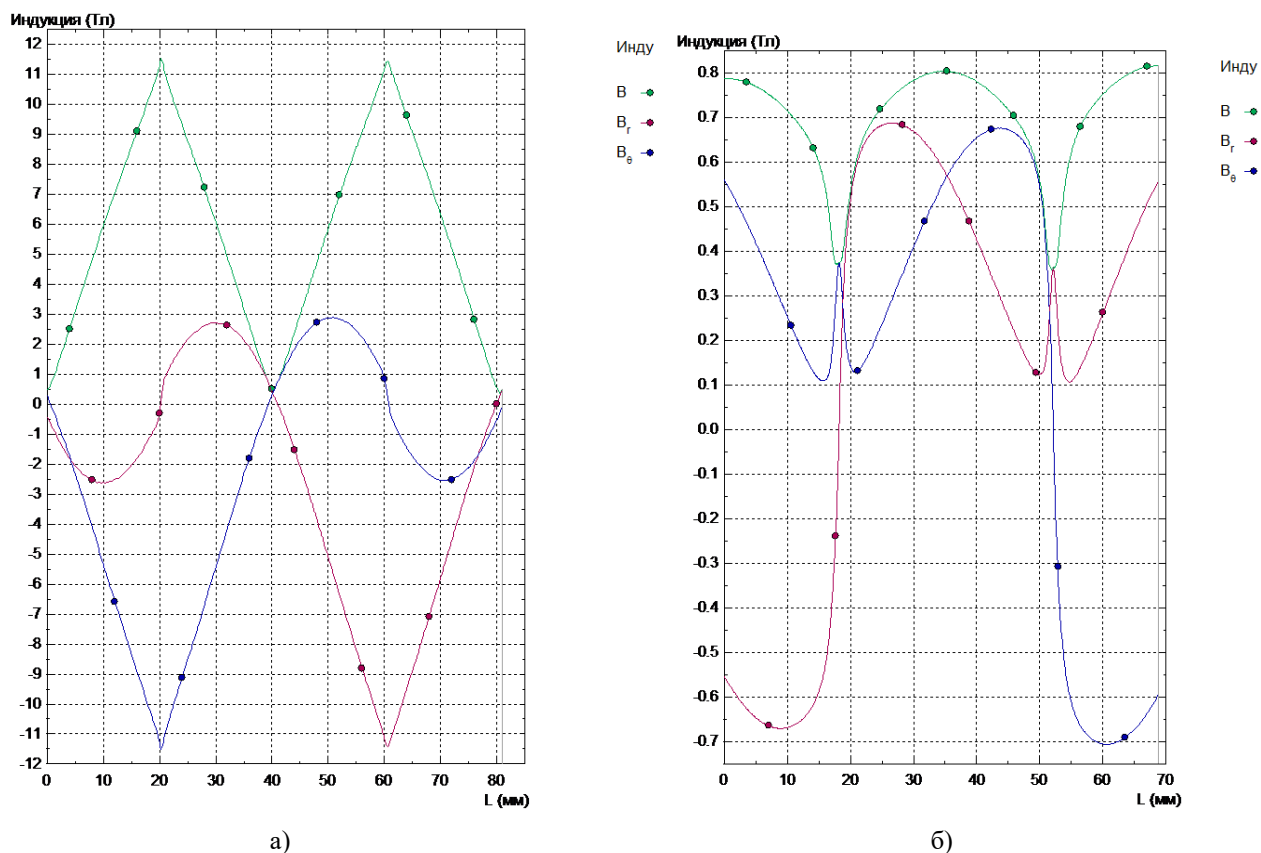


Рис. 2. Распределение вектора магнитной индукции (Тл) вдоль линий указанных красным цветом в корпусе-стакане (а), в воздушном зазоре (б) на предварительном этапе моделирования синхронного двигателя (ВСДММПМ)

Итоговая таблица максимальных значений результирующего вектора магнитной индукции магнитного поля обмотки статора и магнита ротора для магнитостатической задачи приведены в Табл. I.

ТАБЛИЦА I
МАКСИМАЛЬНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ РЕЗУЛЬТИРУЮЩЕГО ВЕКТОРА МАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ

Моделируемая среда	$B_{\max}$, Тл
В корпусе-стакане	11,5
В воздушном зазоре	0,8
В продольном сечении полюса	3,18
В поперечном сечении полюса	3,6

На следующем этапе моделирования конструкции синхронного двигателя (ВСДММПМ) и исследования силовых характеристик магнитного поля уточнялись геометрия и условия имитационного моделирования и расчета двигателя. На этом этапе исследовалась нелинейная магнитостатическая задача, т.е. учитывалась кривая намагничивания стали, а именно электротехнической стали 2412. На рисунке 3,а представлена геометрическая модель синхронного двигателя, число узлов триангуляционной сети 68898. На рисунке 3, б приведена картина распределения силовых линий вектора магнитной индукции.

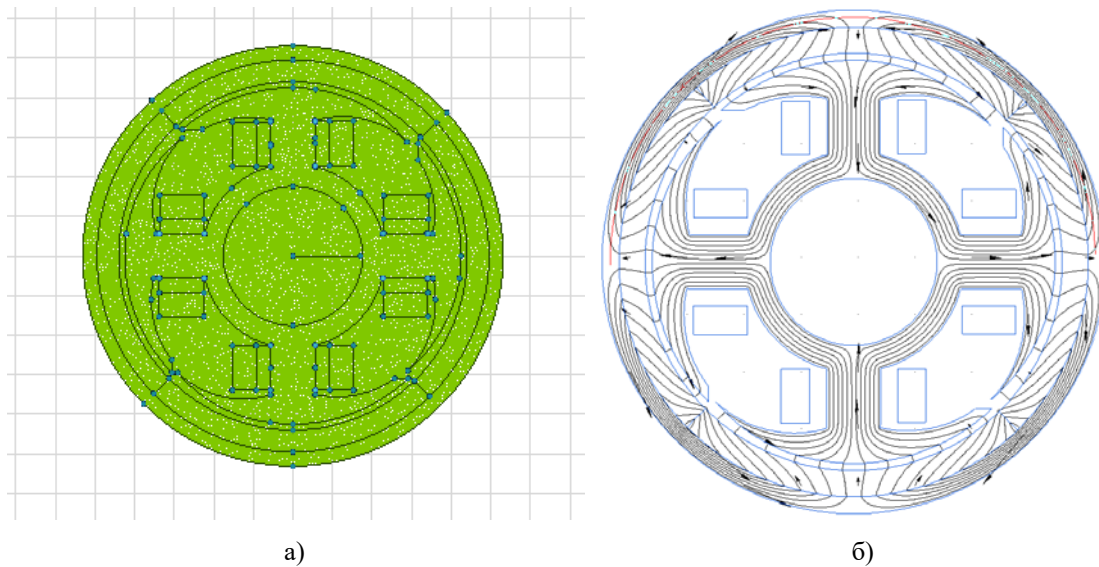


Рис. 3. Геометрическая модель синхронного двигателя (а) и картина распределения силовых линий вектора магнитной индукции B (б) на этапе уточнения модели синхронного двигателя (ВСДММПИМ)

Распределение вектора магнитной индукции (Тл) на этапе уточнения модели синхронного двигателя показано на рис. 4, а, б.

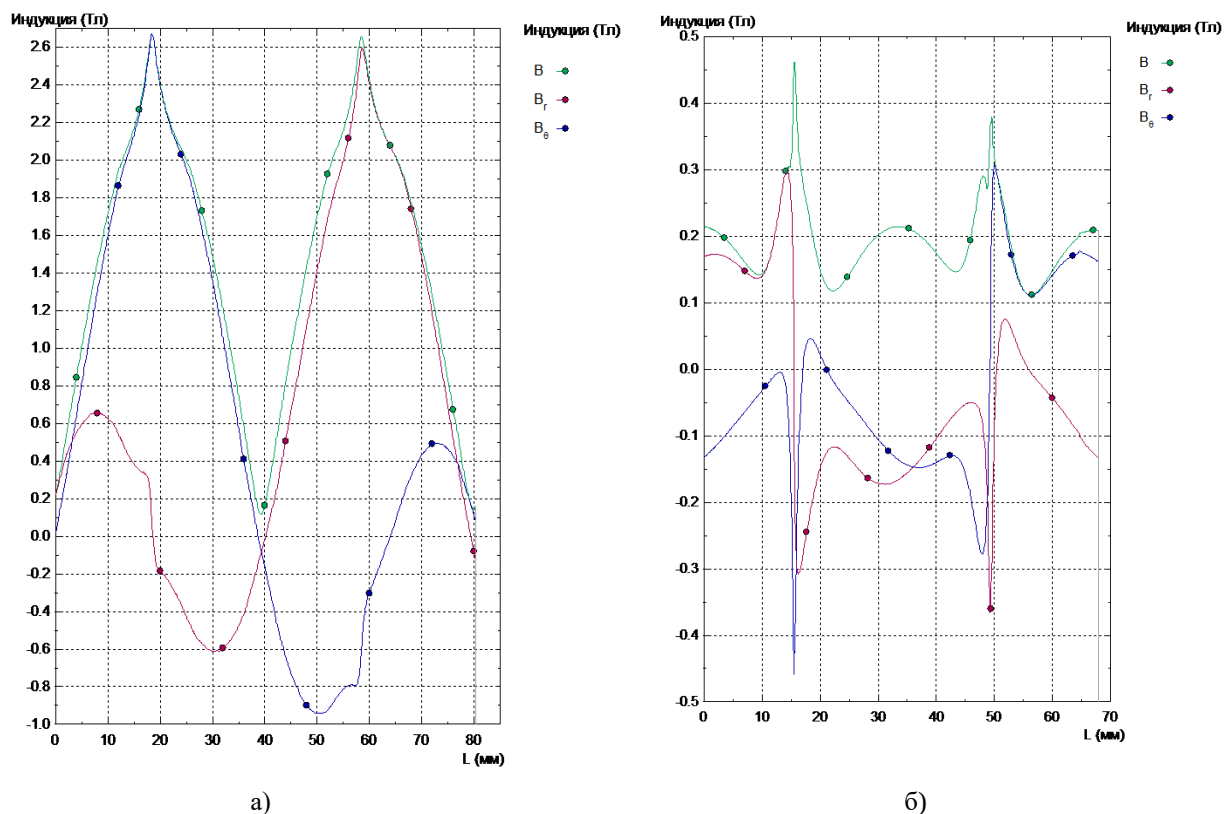


Рис. 4. Распределение вектора магнитной индукции (Тл) вдоль линий указанных красным цветом в корпусе-статоре (а), в воздушном зазоре (б) на этапе уточнения модели синхронного двигателя

Итоговая таблица максимальных значений результирующего вектора магнитной индукции магнитного поля обмотки статора и магнита ротора для магнитоэстатической задачи приведены в Табл. II .

ТАБЛИЦА II
МАКСИМАЛЬНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ РЕЗУЛЬТИРУЮЩЕГО ВЕКТОРА МАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ

Моделируемая среда	B max, Тл
В корпусе-стакане	2,65
В воздушном зазоре	0,46
В магнитоласте	1,02
В поперечном сечении полюса	1,05

IV. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На рис. 3,а приведена уточненная по сравнению с рис. 1,а геометрическая модель высокоскоростного синхронного двигателя малой мощности с постоянными магнитами (ВСДММПМ). Кроме того, во второй модели малоомощного высокоскоростного синхронного двигателя были учтены магнитные свойства стали марки 2412, т.е. кривая намагничивания, и использовался решатель пакета Elcut «Нелинейная задача магнитостатики». Сравнение результатов, полученных с помощью решателя «Магнитостатическое поле» и приведенные в Табл. I, с результатами Табл. II (решатель «Нелинейная задача магнитостатики») показало, что уточнение геометрии модели и учет нелинейных магнитных характеристик электротехнической стали повышает точность расчетов силовых характеристик магнитного поля синхронного двигателя (ВСДММПМ) более, чем на 100 %. Точность имеется ввиду в сравнении с данными паспортов и прайс-листов, приведенных на сайтах производителей схожих типов двигателей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бутырин П. А., Макаров Л. Н. Электромашиностроение в России // Электричество. 2022. № 11. С. 4–12.
2. Загуменов, С. К. Способы компенсации реактивной мощности // Наука молодых – будущее России : сборник научных статей 7-й Междунар. науч. конф. перспективных разработок молодых ученых, Курск, 12–13 декабря 2022 года / Р. Том 5. Курск: Юго-Западный государственный университет. 2022. С. 309–312.
3. Alberti L., Berardi G. Design of a low power synchronous motor for high efficiency applications // 2018 XIII International Conference on Electrical Machines (ICEM). IEEE. 2018. P. 677–682.
4. Башков А. А., Колдаев А. И., Любичский М. В. К вопросу о применении синхронных машин на постоянных магнитах для собственных нужд ГЭС // Повышение эффективности процессов производства, распределения и потребления электроэнергии для устойчивого развития мировой энергетики. 2018. С. 23–26.
5. Аганов В. В. Электрические приводы на летательных аппаратах // Инновационный потенциал развития общества: взгляд молодых ученых. 2022. С. 168–172.
6. Таначев Г. П., Корнилов В. Ю. Синхронные электродвигатели с постоянными магнитами // XXV Всероссийский аспирантско-магистерский научный семинар, посвященный Дню энергетика. 2022. С. 575–578.
7. Tenconi A., Vaschetto S., Vigliani A. Electrical machines for high-speed applications: Design considerations and tradeoffs // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2013. Vol. 61, no. 6. Pp. 3022–3029.
8. Neethu S., Nikam S. P., Fernandes B. G., Pal S. and Wankhede A. K. Radial-and Axial-Flux Synchronous Motors for High-Speed Low-Power Applications // 2018 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES). IEEE. 2018. P. 1–4.
9. Hieke S., Leidhold R. Torque Capabilities of Permanent Magnet Synchronous Machines Made Up of Polymer-Bonded Soft Magnetic Composites // 2018 21st International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). IEEE. 2018. P. 297–301.
10. He C., Wu T. Analysis and design of surface permanent magnet synchronous motor and generator // CES Transactions on Electrical Machines and Systems. 2019. Vol. 3, no. 1. P. 94–100.
11. Татевосян А. А., Андреева Е. Г. Разработка, моделирование и экспериментальное исследование синхронного генератора с постоянными магнитами // Промышленная энергетика. 2019. № 4. С. 20–28.