

УДК 621.313

Моделирование электромеханических процессов в однофазном асинхронном двигателе с магнитопроводом из порошкового материала «Somalloy»

Ю.Б. Казаков, И.А. Палилов
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
г. Иваново, Российская Федерация
E-mail: elmash@em.ispu.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса: На сегодняшний день разработка энергоэффективных электрических машин вкпе с упрощением технологии их производства определяет значительный практический и научный интерес к новым материалам в электромашиностроении, в частности к магнитопроводам из порошковых материалов. В связи с этим требуется моделирование и исследование эффективности применения новых порошковых материалов в электрических машинах.

Материалы и методы: В исследованиях эффективности применения новых порошковых материалов при разработке асинхронных двигателей используется модель, основанная на конечно-элементном моделировании электромагнитных полей.

Результаты: С помощью математической модели, основанной на конечно-элементном моделировании электромагнитных полей, исследована эффективность применения порошковых материалов при разработке асинхронных двигателей.

Выводы: Установлено, что применение материала «Somalloy» для однофазных асинхронных двигателей неэффективно и требует существенной переработки конструкции сердечника двигателя.

Ключевые слова: полевая модель, асинхронный двигатель, порошковые материалы.

Simulation of Electromechanical Processes in Single-Phase Asynchronous Motor with Magnetic Conductor of «Somalloy» Powder Material

Yu.B. Kazakov, I.A. Palilov
Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation
E-mail: elmash@em.ispu.ru

Abstract

Background: Nowadays, the development of energy-efficient electric machines along with the simplification of their production technology define the significant practical and scientific interest towards the new powder materials in electrical engineering, in particular to the cores of powder materials. In connection with this the simulation and efficiency research of new powder materials in electrical machines are required.

Materials and methods: In the effectiveness researches of new powder materials while the development of asynchronous motors the model based on finite-element modeling of electromagnetic fields is used.

Results: Due to the mathematical model based on finite-element modeling of electromagnetic fields the effectiveness of powder materials application in the asynchronous motors is researched.

Conclusions: It is proved that the application of «Somalloy» materials for single-phase asynchronous motors is inefficient and it requires serious construction processing of engine core.

Key words: field model, asynchronous motor, powder materials.

В настоящее время, учитывая тенденцию к разработке энергоэффективных электрических машин вкпе с упрощением технологии их производства, имеется значительный практический и научный интерес к новым материалам в электромашиностроении, в частности к магнитопроводам из порошковых материалов.

Изготовление магнитопроводов методом порошковой металлургии имеет ряд преимуществ:

– снижение трудоемкости и себестоимости изготовления за счет исключения операций механической обработки;

– высокая точность изделий в пределах 8-го качества;

– высокие значения индукции и магнитной проницаемости в средних магнитных полях переменного и постоянного тока;

– минимальный расход материалов на изготовление (безотходная технология).

Для исследования эффективности применения нового электротехнического материала «Somalloy» в однофазных асинхронных двигателях с короткозамкнутым ротором для привода деревообрабатывающего станка применено конечно-элементное моделирование как наиболее эффективный и наименее затратный метод исследования электромеханических процессов в электрических машинах. В силу того что магнитное поле в сечении асинхронного двигателя можно считать неизменным, использовалась двухмерная конечно-элементная модель (рис. 1),

так как расчет процессов в электрической машине с использованием трехмерной модели электромагнитного поля требует немалых вычислительных мощностей.

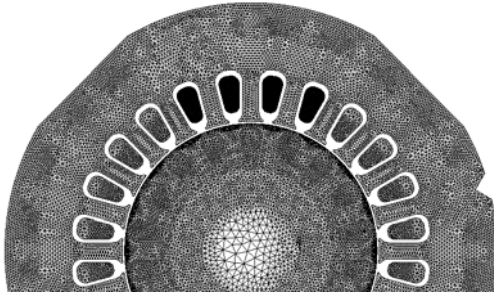


Рис. 1. Конечно-элементная модель машины

Описание математической модели.

Электромагнитное поле описывается системой уравнений Максвелла, которую применительно к теории электрических машин можно записать в следующем виде:

$$\begin{cases} \operatorname{rot} \vec{H} = \vec{j}, \\ \operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, \\ \operatorname{div} \vec{B} = 0, \\ \vec{B} = \mu \vec{H}, \\ \vec{j} = \vec{j}_{\text{стор}} + \gamma \vec{E}. \end{cases} \quad (1)$$

Поскольку поле плоскопараллельное, то при ориентации оси z системы координат параллельно оси вала машины у векторов индукции и напряженности магнитного поля \vec{B} и \vec{H} будет отсутствовать z -компонента и они будут лежать в плоскости поперечного сечения машины. Тогда, согласно первому и третьему уравнениям системы (1) и уравнению (3), вектор плотности тока проводимости \vec{j} и векторный магнитный потенциал \vec{A} будут параллельны оси z . Это позволяет перейти от системы уравнений (1) в векторной форме к скалярному уравнению

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial y} \right] = \vec{j}_{\text{стор}} + \gamma \frac{\partial A}{\partial t} + \gamma (\vec{v} \times \operatorname{rot} A), \quad (2)$$

где \vec{A} – магнитный векторный потенциал; $\vec{j}_{\text{стор}}$ – вектор сторонней плотности тока; γ – удельная электропроводность; \vec{v} – вектор скорости проводящих частей, движущихся в электромагнитном поле; μ – магнитная проницаемость (переменная величина, функция напряженности).

Уравнение (2) является следствием системы уравнений (1) и записывается относительно векторного магнитного потенциала поля, ротор которого равен индукции магнитного поля в данной точке:

$$\vec{B} = \operatorname{rot} \vec{A}. \quad (3)$$

Значения индукции и плотности тока в пределах каждого отдельного конечного элемента

расчетной области представляются неизменными. Внутри каждого конечного элемента электромагнитное поле можно описать уравнением (3). Для того чтобы описать полную картину поля, необходимо решить систему, состоящую из уравнений вида (2), размерность которой равна числу конечных элементов. Задача усложняется тем, что каждый раз при изменении угла поворота ротора меняется геометрия расчетной области и это приводит к необходимости перестраивать сетку конечных элементов. Для упрощения решения уравнения (2) частная производная по времени от векторного магнитного потенциала представляется в виде конечной разности [4]:

$$\frac{\partial A}{\partial t} = \frac{A_i - A_j}{\Delta t}.$$

Вращение ротора в составе модели учитывается на каждой итерации соответствующим углом поворота ротора, что позволяет одновременно учесть изменение геометрии расчетной области. Для этого уравнение (2) дополняется уравнением движения ротора

$$M = M_c - J \frac{d\omega}{dt},$$

в котором производная от угловой скорости по времени также выражена в конечно-разностном виде.

Значение электромагнитного момента M можно получить через интегрирование выражения поверхностной плотности электромагнитной силы [2]. Опуская математические выкладки, приведем конечный вид формулы:

$$M = I_s \cdot \oint \left[\vec{r} \times \left[\vec{j} \times \vec{B} - \frac{H^2}{2} \operatorname{grad} \mu \right] \right] dS,$$

где \vec{r} – радиус-вектор до текущей точки ротора. Интегрирование ведется по поверхности, окружающей ротор и проходящей через центр воздушного зазора.

Решение уравнения поля в частных производных методом конечных элементов на постоянной сетке сводится к циклическому алгоритму, на каждой итерации которого осуществляется решение уравнения (2) на постоянной в пределах каждой итерации сетке.

Стоит заметить, что для определения токов переходного процесса и учета лобовых сопротивлений обмоток статора и ротора необходимо совместное с полем решение уравнений баланса напряжений фаз, записанных в соответствии со схемами замещения [5], представленными на рис. 2, 3:

$$U(t) = -E(t) + i(t)r_n + L_n \frac{di}{dt}, \quad (4)$$

$$U(t) = -E_n(t) + i(t)r_{nn} + L_{nn} \frac{di}{dt} + \frac{1}{C_n} \int i(t) dt, \quad (5)$$

где r_n и L_n – сопротивление и индуктивность лобовой части рабочей обмотки статора соответственно; r_{nn} и L_{nn} – сопротивление и индуктивность ло-

бовой части пусковой обмотки статора соответ-
ственно; C_n – емкость пускового конденсатора.

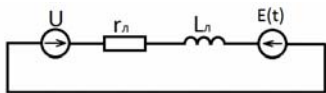


Рис. 2. Схема замещения рабочей обмотки статора

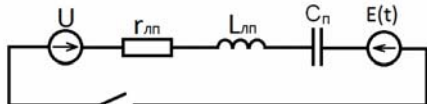


Рис. 3. Схема замещения пусковой обмотки статора

Модель разработана с помощью современных программ моделирования электромеханических процессов в преобразователях энергии.

При разработке модели было использовано следующее допущение: магнитопроводы статора и ротора асинхронного двигателя из порошкового материала «Somalloy» обладают бесконечным сопротивлением, т. е. вихревые токи в них отсутствуют.

Для анализа работы машины с сердечником из порошкового материала произведен расчет переходного процесса пуска с выходом в установившийся режим.

Данные исследуемого двигателя (рис. 4):

- тип – асинхронный однофазный с рабочей и пусковой обмотками;
- напряжение рабочей обмотки – 220 В;
- потребляемая мощность – 1200 Вт;
- синхронная скорость – 3000 об/мин;
- отношение числа пазов рабочей обмотки и пусковой – 2/1;
- число пазов рабочей обмотки – 16;
- число пазов пусковой обмотки – 8;
- число витков обмоток:
пусковой $w_n = 144$,
рабочей $w_p = 288$;
- диаметр обмоточного провода
пусковой $d_n = 0,4$ мм,
рабочей $d_p = 0,46$ мм.

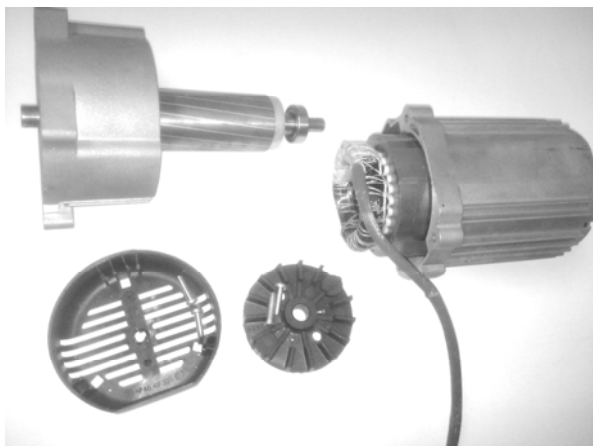


Рис. 4. Исследуемый двигатель

Работа двигателя с сердечником из Somalloy. Для исследования работы двигателя

из справочника материалов «NON-ORIENTED ELECTRICAL STEELS» [3] в качестве материала сердечника машины был принят Somalloy500+0,5%Kenolube_600MPa, производимый HognasAB. На рис. 5, 6 приведены основная кривая намагничивания и зависимости для потерь в стали для Somalloy.

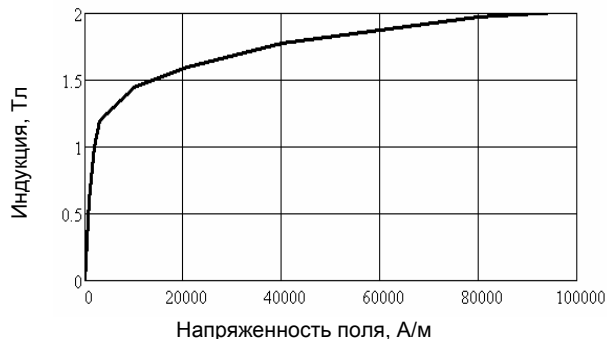


Рис. 5. Кривая намагничивания Somalloy

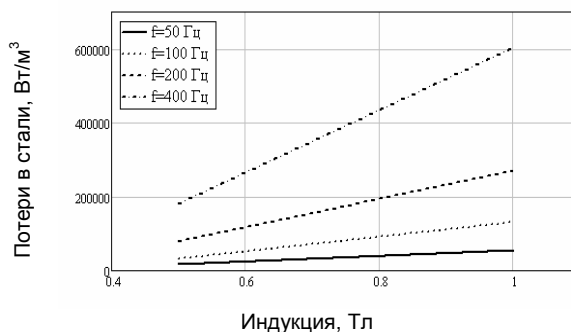


Рис. 6. Зависимость потерь в стали от индукции для Somalloy

Сравнение кривых намагничивания электротехнической стали и Somalloy говорит о худших магнитных свойствах последнего. Например, для достижения значения индукции 1,5 Тл в типичной электротехнической стали требуется напряженность поля порядка 900А/м, тогда как у «Somalloy» это значение превышает 10000 А/м, что говорит о его пониженной магнитной проницаемости. Однако «Somalloy» имеет в несколько раз меньшие удельные потери в стали по сравнению с электротехнической сталью и линейные зависимости потерь в стали от индукции, что говорит о возможных перспективах его применения в средних по величине и высокочастотных полях.

Учитывая специфику технологии производства сердечников из «Somalloy», была использована иная конструкция статора машины. При этом приняты следующие положения:

- 1) сердечник статора явнополюсный;
- 2) диаметр сердечника неизменен (равен диаметру машины с сердечником из электротехнической стали);
- 3) размеры дуг полюсов соотносятся так же, как и числа пазов рабочей и пусковой обмотки.

ток, а именно 2:1 (машина имеет рабочие и пусковые полюсы);

4) число витков на полюсах такое же, как и в рабочей и пусковой обмотках машины с прежним статором.

Новая конструкция сердечника представлена на рис. 7.

Для оценки свойств и показателей исследуемой машины с сердечником из Somalloy был смоделирован пуск исследуемого двигателя.

На рис. 7 показано распределение магнитного поля по поперечному сечению машины в один из моментов времени пуска (индукция и линии магнитного потока).

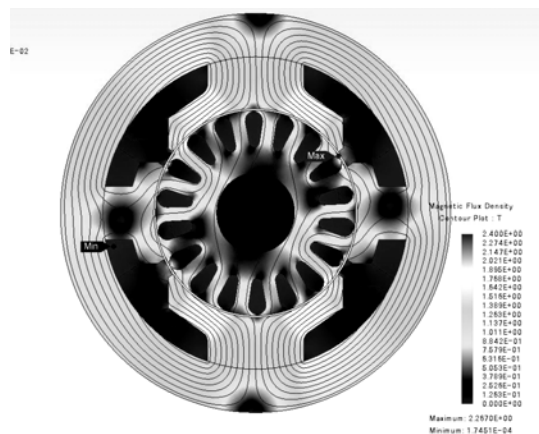


Рис. 7. Распределение магнитного поля по сечению машины в установившемся режиме

При такой картине поля характерно распределение индукции по зазору, явно несинусоидальное, к тому же, с меньшей средней индукцией, а значит, меньшим электромагнитным моментом (рис. 8).

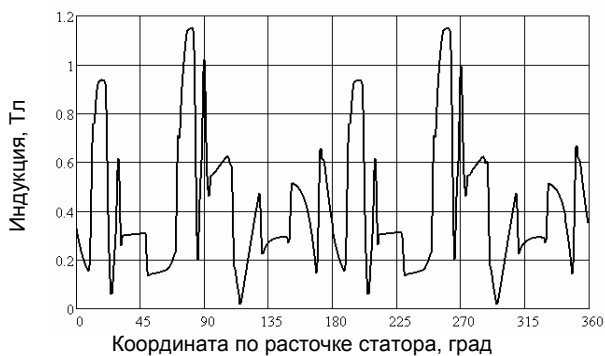


Рис. 8. Распределение индукции по окружности зазора

На рис. 9 показаны токи рабочей и пусковой обмоток в процессе пуска.

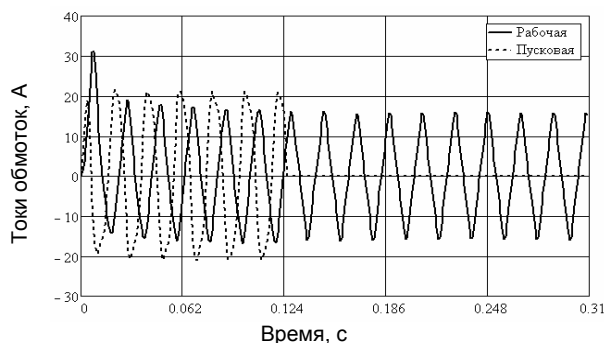


Рис. 9. Токи рабочей и пусковой обмоток

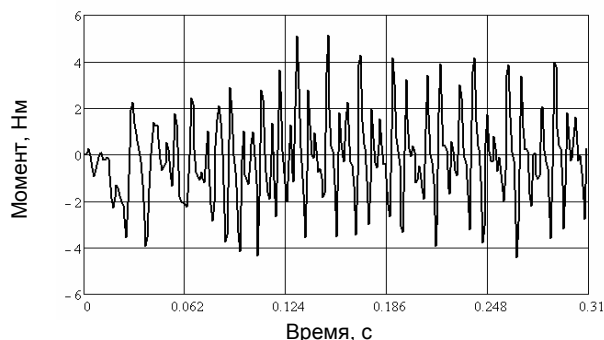


Рис. 10. Электромагнитный момент машины в процессе пуска

Электромагнитный момент двигателя (рис. 10) имеет большее количество колебаний в своем составе, а главное, меньшую среднюю составляющую – сказывается уменьшение магнитного потока из-за меньшей магнитной проницаемости Somalloy, а также резкая несинусоидальность поля в зазоре, вызванная явнополюсностью конструкции.

Процесс разгона асинхронного двигателя показан на рис. 11.

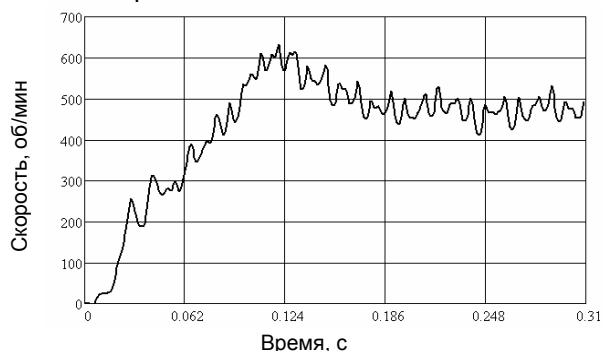


Рис. 11. Кривая разгона двигателя

Итак, двигатель с сердечником из Somalloy имеет худшие энергетические показатели. Это вызвано меньшим магнитным потоком (сказывается меньшая магнитная проницаемость сплава), а также резкой несинусоидальностью поля в зазоре.

Общие выводы. Применение материала Somalloy для данного типа двигателей неэффективно по причине его малой магнитной проницаемости, т. е. худших, по сравнению с обычной электротехнической сталью, магнитных свойств.

Меньшие потери в стали в Somalloy, по сравнению с электротехнической сталью, не оказывают должного влияния на свойства машины, так как потери в стали в асинхронных машинах обычно невелики.

Применение Somalloy требует существенных изменений в конструкции сердечника статора подобной машины, а именно, введения явнополюсной конструкции, которая, по сравнению с пазовой, не эффективна.

Перспективы применения Somalloy стоит искать в высокочастотных полях, где на первый план выходит необходимость снижения потерь в стали.

Список литературы

1. **Проектирование** электрических машин: учеб. для вузов. В 2-х кн.: кн. 2 / И.П. Копылов, Б.К. Клоков, В.П. Морозкин, Б.Ф. Токарев; под ред. И.П. Копылова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1993. – 384 с.
2. **Демирчян К.С., Чечурин В.Л.** Машинные расчеты электромагнитных полей. – М.: Высш. шк., 1986. – 240 с.
3. **Non-oriented** electrical steels // Layout Delta Graphica, Print Prima Tryck. – Sweden, May 2008.
4. **Страдомский Ю.И., Казаков Ю.Б.** Расчет электромагнитных полей в электромеханических преобразователях

Казаков Юрий Борисович,
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И.Ленина»,
доктор технических наук, заведующий кафедрой электромеханики,
телефон (4932) 26-97-06,
e-mail: elmash@em.ispu.ru

Палилов Илья Аркадьевич,
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И.Ленина»,
аспирант, инженер кафедры электромеханики,
e-mail: i.palilov@yandex.ru

энергии: учеб. пособие / ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И.Ленина». – Иваново, 2010. – 148 с.

5. **Караулов В.Н., Палилов И.А.** Параметрическая модель асинхронного двигателя с массивным ротором в установившихся и переходных режимах // Вестник ИГЭУ. – 2012. – Вып. 4. – С. 39–42.

References

1. Kopylov, I.P., Klokov, B.K., Morozkin, V.P., Tokarev, B.F. *Proektirovanie elektricheskikh mashin: uchebnik dlya vuzov v 2 knigakh, kniga 2* [Designing Electrical Machines: Textbook for Universities]. Moscow, Energoatomizdat, 1993. 384 p.
2. Demirchyan, K.S., Chechurin, V.L. *Mashinnye rascheti elektromagnitnykh poley* [Computer Calculations of Electromagnetic Fields]. Moscow, Vysshaya shkola, 1986. 240 p.
3. Non-oriented electrical steels. Layout Delta Graphica. Sweden, May 2008.
4. Stradomskiy, Yu.I., Kazakov, Yu.B. *Raschet elektromagnitnykh poley v elektromekhanicheskikh preobrazovatelyakh energii: uchebnoe posobie* [Calculations of Electromagnetic Fields in Electromechanical Energy Transformers]. Ivanovo, 2010. 148 p.
5. Karaulov, V.N., Palilov, I.A. *Parametricheskaya model' asinkhronnogo dvigatelya s massivnym rotorom v ustanovivshikh i perekhodnykh rezhimakh* [Parametric Model of Asynchronous Motor with Massive Rotor in Steady and Transient Modes]. *Vestnik IGEU*, 2012, issue 4, pp. 39–42.