УДК 621.31

СРАВНЕНИЕ ФОРМУЛ ДЛЯ РАСЧЕТА МАГНИТНЫХ ПОТЕРЬ ПРИ ОЦЕНКЕ ПОТЕРЬ В СИНХРОННОМ РЕАКТИВНОМ ДВИГАТЕЛЕ

Казакбаев Вадим Маратович,
ассистент, ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», Екатеринбург, e-mail: kazakbaiev@inbox.ru
Соколов Игорь Владимирович,
студент, ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», Екатеринбург, e-mail: igorsokolovf@gmail.com

A COMPARISON OF FORMULAS FOR CALCULATION OF IRON LOSSES IN CASE OF LOSSES ESTIMATION IN SYNCHRONOUS RELUCTANCE MOTOR

Kazakbaev Vadim Maratovich,
Assistant lecturer, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin», Ekaterinburg, e-mail: kazakbaiev@inbox.ru
Sokolov Igor Vladimirovich,
Student, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin», Ekaterinburg, e-mail: igorsokolovf@gmail.com

Аннотация. В работе представлены результаты расчета магнитных потерь для синхронного реактивного двигателя без пусковой обмотки при использовании различных формул для оценки потерь в стали. Расчет осуществляется с помощью решения ряда двухмерных краевых магнитостатических задач методом конечных элементов. Приводится сравнение результатов расчета и эксперимента. Обсуждается корректность применения рассматриваемых моделей магнитных потерь для синхронного реактивного двигателя.
Abstract. The paper presents the results of calculation of iron losses for a synchronous reluctance motor without a starting winding using different formulas for iron losses estimation. The calculation is carried out by solving a number of two-dimensional boundary magnetostatic problems by the finite element method. The results of the calculations and the experiment are compared. The validity of the application of the considered models of iron losses for a synchronous reluctance motor is discussed.
Ключевые слова. Метод конечных элементов, потери в стали, синхронный реактивный двигатель.
Key words. Finite element method, iron losses, synchronous reluctance motor.

Магнитные потери составляют значительную часть потерь в электрических машинах (ЭМ) переменного тока. Величина магнитных потерь существенно влияет на КПД и класс энергоэффективности ЭМ. Для синхронного реактивного двигателя (СРД), у которого отсутствуют электрические потери в роторе, магнитные потери составляют еще более значительную часть потерь, чем для традиционного асинхронного двигателя (АД).

В литературе описано большое количество моделей для определения магнитных потерь в ЭМ [1,2,3]. Эти модели обладают существенными отличиями и применяются для различных проектных задач. Модели, основывающиеся на уравнении Штейнмеца и уравнениях с разделением потерь на составляющие (Джордан, Бертотти) предпочтительны для быстрой приблизительной оценки потерь, а также для сравнения различных материалов применяемых в конструкции ЭМ [3]. Рассмотрим

в качестве основного подхода традиционное выражение для оценки потерь (Вт/м^3) в частотной области при синусоидальной индукции [2,3]:

$$p_{Fe} = p_h + p_c = k_h \cdot f \cdot B_m^{\beta} + k_c \cdot f^2 \cdot B_m^2 \quad (1)$$

где p_h – составляющая гистерезисных потерь; p_c – составляющая потерь на вихревые токи; k_h, β – коэффициенты гистерезисных потерь; k_c –коэффициент потерь на вихревые токи; f –электрическая частота; B_m – амплитуда синусоидальной индукции.

Применение более сложных моделей, помимо использования паспортных данных электротехнической стали, требует предварительных измерений на образцах стали и более значительных вычислительных ресурсов [3]. В рамках выделенного подхода (1), расчет ведется либо с помощью аналитических зависимостей, что не позволяет учитывать все особенности конструкции ЭМ, либо с помощью метода конечных элементов (МКЭ). В силу плоско-параллельной симметрии конструкции магнитопровода и отсутствия тока в пусковой обмотке в синхронном режиме (либо, отсутствия этой обмотки для рассматриваемого СРД) оказывается возможным использовать ряд двухмерных магнитостатических расчетов.

Основная составляющая индукции в СРД изменяется во времени по синусоидальному закону. Однако присутствуют также значительные искажения формы, вызываемые взаимодействием зубцов статора и ротора и насыщением стали. Распространенным в литературе подходом к учету влияния высших гармоник индукции на величину потерь в стали является применение принципа суперпозиции: влияние каждой гармонической составляющей индукции рассматривается независимо [2]. Однако результаты исследований магнитных потерь в однородных образцах, показывающие, что гистерезисные потери зависят скорее от величины частичных циклов перемагничивания, чем от гармонического состава индукции [2,3], ставят под сомнение корректность допущений этого подхода. При этом достаточно четкого обоснования или последовательной критики применения принципа суперпозиции гармоник к расчету потерь в СРД или в подобных ЭМ в доступной литературе найдено не было. В то же время имеется ряд альтернативных подходов для расчета потерь на гистерезис, однако их использование требует дополнительных сведений о материале для корректного учета влияния частичных циклов перемагничивания [3]:

$$p_h = k_h \cdot K_{ml} \cdot f \cdot \Delta B^{\beta} \quad (2)$$

где K_{ml} – поправочный коэффициент, учитывающий влияние частичных циклов перемагничивания [2,3]; $\Delta B = (B_{max}-B_{min})/2$ – половина диапазона изменения временной зависимости индукции.

Также имеются альтернативные методы для расчета потерь на вихревые токи. Согласно классическому подходу, величина p_c во временной области определяется [3]:

$$p_c = 2 \cdot k_c \cdot \frac{1}{T} \cdot \int_T \left(\frac{dB(t)}{dt} \right)^2 dt \quad (3)$$

где T – период изменения индукции; B(t) – временная зависимость изменения индукции на периоде.

В случае синусоидального изменения индукции, выражение (3) ведет к зависимости для pc, согласно (1). Выделение и учет добавочных потерь на вихревые токи (англ. «excess losses») также требует дополнительных данных о материале [3] и в рамках данной работы не рассматривается.

Сравним результаты расчета магнитных потерь с использованием описанных выше зависимостей. Расчет ведется для конструкции энрегоэффективного 3-х фазного 4-х полюсного СРД общепромышленного исполнения с номинальными величи-

нами 1,1 кВт, 100 Гц, 3000 об/мин (Рисунок 1а). СРД предназначен для работы с преобразователем частоты (ПЧ) при векторном управлении током. Коэффициенты потерь для материала магнитопровода (Ст 2212) были рассчитаны по данным ГОСТ 21427.3-83. С помощью последовательности магнитостатических расчетов в программе FEMM определяется функция изменения вектора индукции от времени в пределах каждого выделенного конечного элемента [1].

Рассмотрим два режима работы СРД с номинальной величиной потокосцепления λ = 0,4 Вб, с различными величинами угла γ между осью d ротора вектором тока статора (γ = 0 и γ = 60° электрических, соответственно). Отметим, что гармонический состав индукции для этих двух режимов значительно отличается. В первом случае поток проходит через ротор практически беспрепятственно, СРД не создает момента, и форма индукции в элементах магнитопровода близка к синусоидальной. Во втором случае ротор оказывает значительное магнитное сопротивление потоку, СРД создает момент номинальной величины, и форма индукции существенно искажается (Рисунок 1б,в).

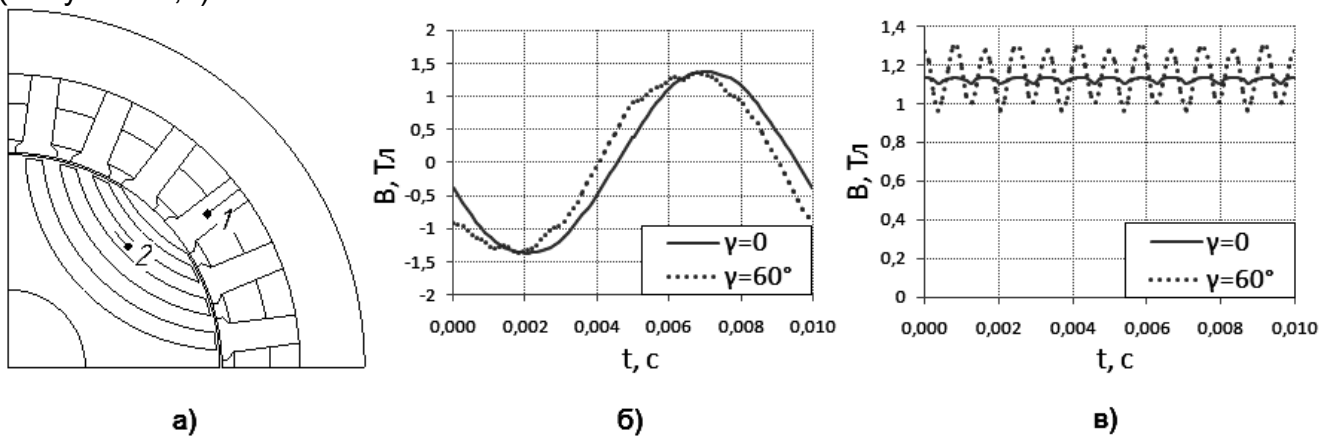

Рисунок 1 – а) Конструкция СРД и точки, где показаны результаты расчета индукции б) Расчет индукции в зубце статора (точка 1) в) Расчет индукции в роторе (точка 2)

Рисунок 2 и Рисунок 3 показывают результаты расчета величин отдельных типов магнитных потерь в элементах магнитопровода при γ = 0 и γ = 60° с использованием различных формул. «Метод 1» означает расчет потерь в частотной области, согласно (1), с учетом влияния высших гармоник с помощью суперпозиции. «Метод 2» отличается от «Метода 1» тем, что в расчет принимается действие только 1-й гармоники индукции. «Метод 3» предполагает расчет потерь на гистерезис при допущении отсутствия частичных циклов, согласно (2), и расчет потерь на вихревые токи во временной области, согласно (3).

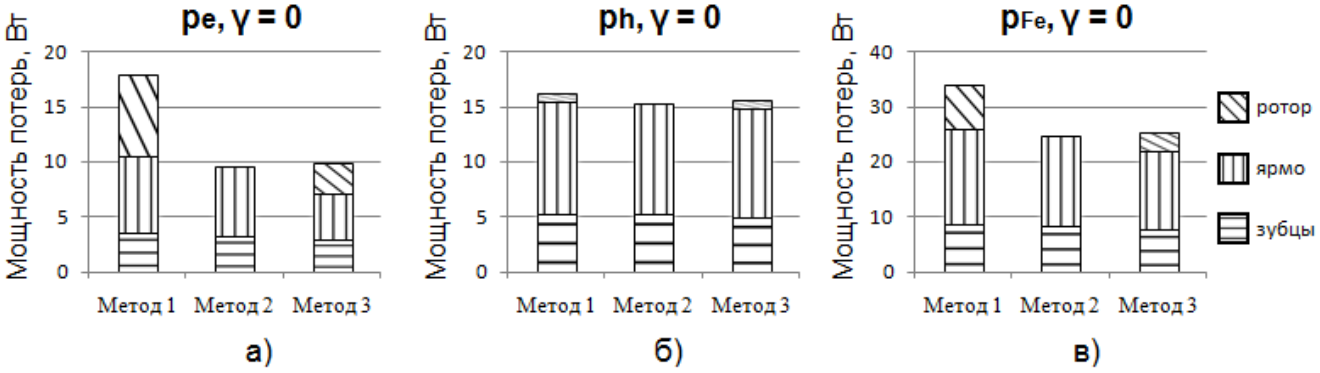

Рисунок 2 – Результаты расчета магнитных потерь в СРД при γ = 0

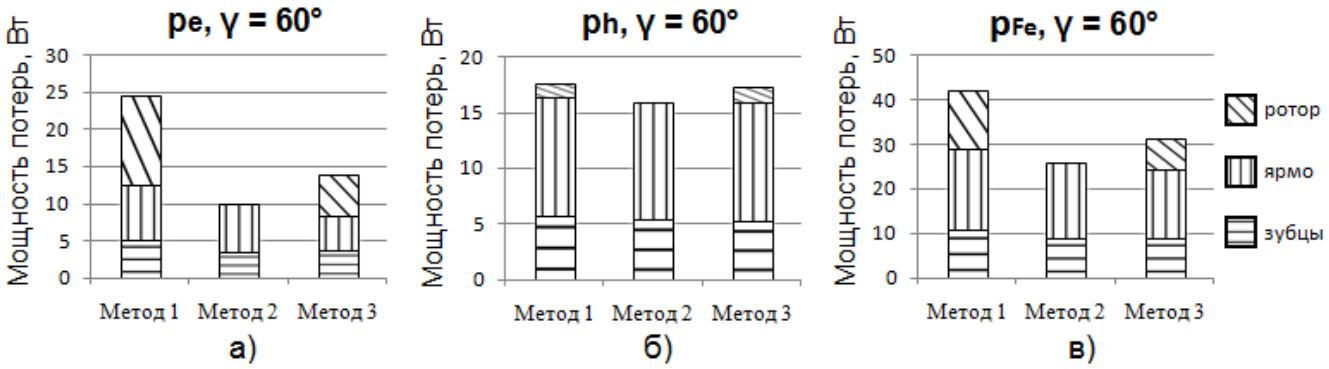

Рисунок 3 – Результаты расчета магнитных потерь в СРД при γ = 60°

Экспериментально измеренная сумма магнитных потерь в СРД для случая соответствующего расчету (Рисунок 3) составила 41,1 Вт, что ближе всего к результатам расчета методом 1.

При анализе результатов работы можно сделать следующие выводы:

- величины гистерезисных потерь, рассчитанные с помощью двух рассмотренных подходов с большой точностью совпадают;
- величины потерь на вихревые токи, полученные в частотной области с помощью принципа суперпозиции гармоник и во временной области, значительно отличаются, так как эти методы дают различную оценку потерь от высших гармоник, в частности в роторе СРД;
- расчет потерь на вихревые токи в СРД во временной области по классической зависимости (2) при сопоставлении с опытом дает значительно заниженные результаты;
- лучшее соответствие данным эксперимента для суммы магнитных потерь в СРД в рассматриваемом случае обеспечивает расчет в частотной области; однако, поскольку допущения этого метода во многих случаях не выполняются, применение такого похода требует дополнительного обоснования;
- можно заключить, что оба рассмотренных метода оценки магнитных потерь не могут гарантировать точных результатов в широком диапазоне режимов работы при расчете энергетических характеристик СРД, поэтому требуется дальнейшая доработка модели, учитывающая частичные циклы перемагничивания и добавочные потери на вихревые токи.

Список использованных источников

1. Казакбаев, В.М. Расчет магнитных потерь в синхронном реактивном двигателе / В.М. Казакбаев, В.А. Прахт, С.Х. Ошурбеков // Сборник трудов XLVI международной научно-практической конференции, «Фёдоровские чтения 2016». – М: Изд. дом МЭИ. - 16–18 ноября 2016 - С. 140-142.

2. F. Leonardi, T. Matsuo, T. Lipo, “Iron loss calculation for synchronous reluctance machines”, in Proceedings of International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems for Industrial Growth, Vol.1, pp. 307-312 , 8-11 January 1996.

3. A. Krings, J. Soulard, “Overview and Comparison of Iron Loss Models for Electrical Machines”, in Proceedings Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER 2010), pp. 1-10, Monaco, 25-28 March 2010.