

Сравнение методов расчета потерь в стали вентильно-индукторных двигателей

АНТИПОВ В.Н., ГРОЗОВ А.Д., ИВАНОВА А.В.

Выполнен анализ методов расчета потерь в стали вентильно-индукторных двигателей (ВИД) при несинусоидальной форме магнитного потока с частотой перемагничивания в диапазоне от 100 до 3000 Гц. Установлена область применения различных методов. Разделение потерь перемагничивания на составляющие от гистерезиса и вихревых токов при высоких частотах дает неверные результаты. Показаны преимущества расчета с использованием обобщенного уравнения Стейнметца. Дана оценка распределения потерь в магнитопроводе по результатам расчета электромагнитного поля методом конечных элементов. Показано, что около 75% общих потерь перемагничивания выделяется в спинке статора. Выбором толщины листа и марки сплава потери перемагничивания могут быть уменьшены на 35–45%. Результаты исследований могут быть использованы при проектировании ВИД с высокой частотой перемагничивания.

Ключевые слова: вентильно-индукторный двигатель, вихревые токи, гистерезис, магнитные потери в стали, обобщенные уравнения Стейнметца, частота перемагничивания

Доля вентильно-индукторных двигателей (ВИД) на рынке электромашиностроительной продукции увеличивается благодаря их простоте и прочности конструкции, надежности и высокому КПД. Определение потерь в этих машинах, особенно потерь в стали, является трудной задачей, так как магнитный поток ВИД не является синусоидальным и в участках магнитопровода изменяется по-разному и с различной интенсивностью. Исследованию потерь в стали электрических машин, в том числе и вентильно-индукторных двигателей, посвящено множество работ [1–8]. Однако различие в методологии расчета и введении поправочных коэффициентов не позволяет отдать предпочтение какому-либо методу без предварительного анализа.

Для электрических машин переменного тока потери в стали сердечников вычисляются по уравнению Стейнметца, справедливому только для синусоидального изменения потока:

$$DP_{Fe} = C_m f^a B^b, \quad (1)$$

где DP_{Fe} – удельные потери единичной массы; B – максимальное значение индукции; f – частота перемагничивания; C_m , a , b – постоянные коэффициенты, зависящие от марки применяемого материала.

При несинусоидальном потоке либо рассчитывают потери от всех гармонических, либо разделяют потери от гистерезиса и от вихревых токов, либо используют преобразованные уравнения Стейнметца. При разделении основных магнитных потерь в стали сердечников, подверженных перемагничиванию, выделяют потери от гистерезиса

$$DP_h = \frac{Sf}{\gamma_{Fe}} \quad (2)$$

и потери от вихревых токов $P_e = K_e \frac{\oint \frac{\partial B(t)}{\partial t} \oint^2}{\delta} [2-4]$.

Здесь S – площадь петли гистерезиса в координатах «индукция – намагничивающая сила»; f – частота перемагничивания; γ_{Fe} – плотность ферромагнитного материала; K_e – коэффициент потерь от вихревых токов, который равен:

$$K_e = \frac{D^2}{4k_{cir} \gamma_{Fe} r_{Fe}}, \quad (3)$$

где D – толщина листа электротехнической стали; r_{Fe} – удельное сопротивление стали; k_{cir} – коэффициент, учитывающий неравномерность потока в листе (1 £ k_{cir} £ 3).

Классическое уравнение потерь в стали:

$$DP_{Fe} = K_h f B^a + K_e f^2 B^2. \quad (4)$$

В этом уравнении третьим слагаемым учитываются также дополнительные аномальные потери, вызванные сложными явлениями, такими как микроструктурное взаимодействие, магнитная анизотропия, неоднородные локально индуцированные

вихревые токи $P_a = K_a \frac{\oint \frac{\partial B(t)}{\partial t} \oint^{1,5}}{\delta} [4]$. Расчетное оп-

ределение этой составляющей затруднено отсутствием значения коэффициента K_a , который должен быть определен экспериментально. Результаты экспериментальных исследований зависимостей коэффициентов K_h , K_e , K_a и a от значений индукции и частоты перемагничивания можно найти в [1] для

трех марок стали и значений частоты перемагничивания 25–400 Гц.

Среди предложенных преобразований уравнения Стейнметца для несинусоидальных токов следует отметить «модифицированное уравнение Стейнметца» (MSE) [5] и «обобщенное уравнение Стейнметца» (GSE) [6]. Первое базируется на представлении, что потери в стали зависят от производной индукции и записывается в виде:

$$DP_{Fe} = C_m f_{eqv}^{a-1} B^b f_r, \quad (5)$$

где f_r – частота перемагничивания; f_{eqv} – эквивалентная частота; B – максимальное значение индукции.

Эквивалентная частота рассчитывается как

$$f_{eqv} = \frac{C_m}{DB^2 \rho^2} \frac{\int_0^t dB(t) \dot{\phi}^2 dt}{\int_0^t \dot{\phi}^2 dt}, \quad (6)$$

где DB – двойная амплитуда индукции.

Обобщенное уравнение Стейнметца базируется на представлении о том, что потери в стали зависят как от производной индукции, так и от ее значения и записывается в виде:

$$DP_{Fe} = \frac{1}{T} \int_0^t \dot{\phi} k_1 \left| \frac{dB}{dt} \right|^a |B(t)|^{b-a} dt. \quad (7)$$

Это уравнение в [7] получено при интегрировании линейных сигналов, дано также эмпирическое выражение для коэффициента

$$C_{ml} = \frac{C_m}{2^{b+1} \rho^{a-1} \int_0^t \dot{\phi}^{0,2761 + \frac{1,7061}{a+1,354\dot{\phi}}}} \quad (8)$$

Различие методов оценки потерь при несинусоидальных магнитных потоках требует сравнительного анализа. В статье такой анализ потерь в стали проведен изложенными методами на примере двух проектов вентиляльно-индукторных двигателей, выполненных в Институте химии силикатов РАН: ВИД 3,5-1130 (3,5 кВт, 550 В, 1130 мин⁻¹), предназначенного для привода компрессора городского транспорта, и ВИД 10-25000 (10 кВт, 400 В, 25000 мин⁻¹) для электровоздушного авиационного двигателя. Двигатели отличаются по частоте перемагничивания на порядок. Основные данные двигателей представлены в табл. 1.

Таблица 1

| Параметры | ВИД 3,5-1130 | ВИД 10-25000 |
|--|--------------|--------------|
| Мощность P , кВт | 3,5 | 10 |
| Напряжение U , В | 550 | 440 |
| Частота вращения n , мин ⁻¹ | 1130 | 25000 |

| | | |
|--|------|------|
| Номинальный вращающий момент M , Нж | 29,6 | 3,8 |
| Число фаз обмотки статора m | 3 | 4 |
| Число полюсов статора N_s | 6 | 8 |
| Число зубцов ротора N_r | 4 | 6 |
| Длина пакета статора L_{stk} , мм | 100 | 55 |
| Внешний диаметр статора D_s , мм | 191 | 116 |
| Диаметр расточки статора $D_{свн}$, мм | 111 | 65 |
| Ширина полюса статора t_s , мм | 28,7 | 25,9 |
| Высота спинки статора y_s , мм | 19,2 | 7,7 |
| Воздушный зазор d , мм | 1,0 | 0,4 |
| Диаметр ротора D_r , мм | 109 | 64,2 |
| Диаметр ротора внутренний D_{shr} , мм | 46 | 36 |
| Ширина полюса ротора t_r , мм | 30 | 27,0 |
| Высота спинки ротора y_r , мм | 20,1 | 8,8 |
| Число витков катушки N_p | 156 | 20 |
| Номинальный ток I , А | 8,1 | 30,8 |

Для ВИД характерно различие форм изменения потоков в отдельных частях магнитопровода [2–6]. В зубцах статора поток близок к однонаправленным треугольным импульсам с частотой повторения $f_{rzs} = f_r N_r$, где f_r – частота вращения двигателя; N_r – число полюсов ротора. В зубцах ротора частота повторения импульсов равна $f_{rzs} = f_r N_s$, где N_s – число полюсов статора. Для симметричного одноимпульсного режима время нарастания и спада потока определяется как

$$t_{и} = t_d = \frac{1}{f_r} \frac{1}{N_r} - \frac{1}{N_s} \frac{1}{\dot{\phi}} \quad (9)$$

Форма потоков в зубцах статора и ротора показана на рис. 1.

В спинке статора частота повторяемости потока та же, что и в зубцах, однако импульсы разнополярные, причем для конфигурации 6/4 на одном из шести участков магнитопровода спинки статора поток не изменяется, для конфигурации 8/6 на двух участках из восьми поток постоянный, на четырех и двух участках имеет различную форму, но с одинаковым изменением индукции на участках ее нарастания и спада.

В спинке ротора частота повторяемости потока f_r , импульсы разнополярные, для конфигурации 6/4 можно выделить три участка нарастания и три участка спада индукции. Для конфигурации 8/6 таких участков пять. Форма потоков в спинках статора и ротора показана на рис. 2.

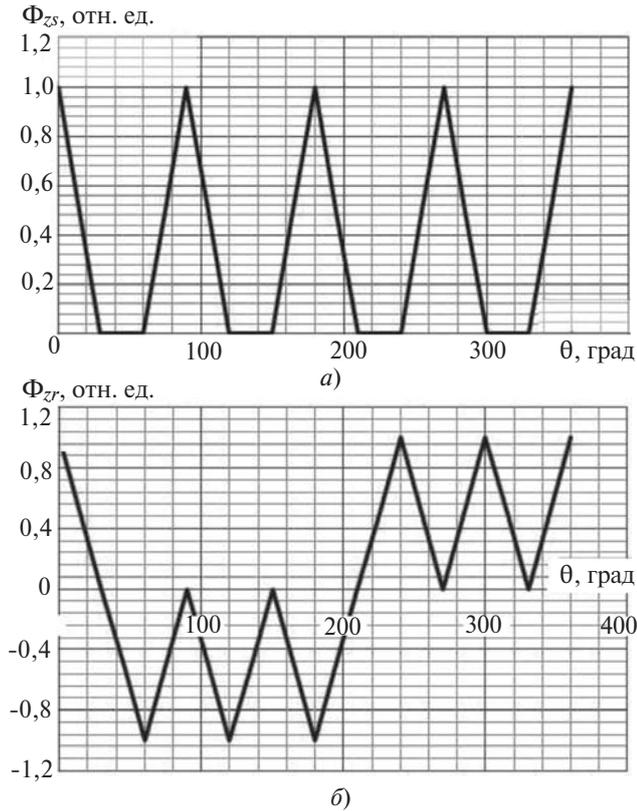


Рис. 1. Форма потока в зубцах статора (а) и ротора (б) для вентильного двигателя с соотношением $M_s / N_r = 6/4$

В случае одноимпульсного режима при регулировании с помощью угла открытия и закрытия им-

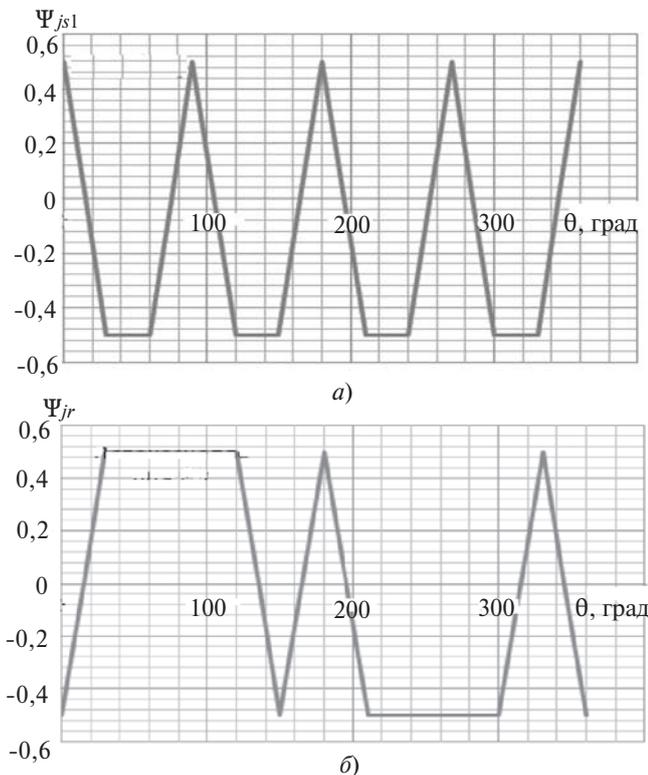


Рис. 2. Форма потока в спинке статора (а) и ротора (б) для вентильного двигателя с соотношением $N_s / N_r = 6/4$

пульса на участки с постоянным значением индукции добавляются импульсы, вызванные разницей в изменении индукции при нарастании и спаде потока. Эта разница обычно не очень велика.

Для двух вышеупомянутых вентильно-индукторных двигателей результаты расчета потерь в стали по различным методикам представлены в табл. 2.

Таблица 2

| Участки магнитопровода | Значения потерь, рассчитанных по уравнениям и методикам | | | | |
|------------------------|---|-------|-------|-------|-------|
| | SE | EdC+H | MSE | GSE | МКЭ |
| ВИД 3,5–1130 | | | | | |
| Зубцы статора | 6,6 | 3,9 | 6,9 | 2,5 | 2,8 |
| Спинка статора | 23,7 | 39,3 | 25,1 | 35,8 | 34,5 |
| Зубцы ротора | 4,9 | 2,0 | 6,1 | 1,6 | 1,0 |
| Спинка ротора | 1,2 | 1,6 | 8,4 | 8,0 | 12,8 |
| Суммарные | 36,3 | 46,8 | 46,5 | 47,9 | 51,0 |
| ВИД 10–25000 | | | | | |
| Зубцы статора | 65,6 | 42,4 | 75,8 | 27,1 | 34,1 |
| Спинка статора | 233,6 | 294,3 | 270,1 | 385,3 | 425,9 |
| Зубцы ротора | 26,6 | 4,1 | 28,2 | 10,1 | 14,1 |
| Спинка ротора | 8,0 | 4,9 | 25,7 | 176,1 | 144,8 |
| Суммарные | 333,9 | 345,7 | 399,8 | 598,6 | 618,9 |

Примечание: SE – классическое уравнение Стейнметца; MSE – модифицированное уравнение Стейнметца [5]; GSE – обобщенное уравнение Стейнметца [6]; EdC+H – разделение потерь от гистерезиса и вихревых токов [2]; МКЭ – метод конечных элементов [6].

Анализ данных табл. 2 позволяет сделать вывод о том, что при частоте перемагничивания примерно 100 Гц несинусоидальность сигнала меняет уровень потерь в стали в пределах 6%, при частоте перемагничивания 2500–3000 Гц – на 9–17% при расчете по методам MSE и GSE и почти в два раза – при расчете потерь по методу разделения их на потери от гистерезиса и вихревых токов. Существует мнение [5], что метод разделения потерь не имеет физической основы и поэтому нерационален.

В результате расчета по методу MSE при частоте перемагничивания 2500–3300 Гц потери оказались на 20% выше, чем при расчете по классическому уравнению Стейнметца, в то время как при частоте перемагничивания 100 Гц эти потери на 28% выше. В [6] содержится обоснованная критика метода MSE, для которого не всегда соблюдается необходимое условие непрерывности функции,

описывающей потери в зависимости от параметров входящего сигнала, поэтому при расчетах потерь в стали ВИД следует отдать предпочтение методу GSE как наиболее физически обоснованному.

Пользуясь методом GSE, оценим влияние стали магнитопровода на потери вентильно-индукторного двигателя. Рассматриваем электротехнические холоднокатаные изотропные тонколистовые стали марок 2412 толщиной 0,5 и 0,35 мм и 2421 толщиной 0,27 (ГОСТ 21427.2–83), а также прецизионный магнитно-мягкий кобальтовый сплав 49К2ФА (ГОСТ 10160–75). Результаты расчета потерь для двух двигателей сведены в табл. 3. Данные таблицы показывают, что изменением марки и толщины электротехнической стали можно добиться снижения потерь в стали на 35% по сравнению с применением традиционной марки стали 2412 толщиной 0,5 мм. Переход на магнитно-мягкий кобальтовый сплав по сравнению с лучшим вариантом электротехнической стали уменьшает потери еще на 10%.

Таблица 3

| Участки магнитопровода | Значения потерь для различных марок стали | | | |
|------------------------|---|-----------|-----------|--------|
| | 2412-0,5 | 2412-0,35 | 2421-0,27 | 49К2ФА |
| ВИД 3,5-1130 | | | | |
| Зубцы статора | 2,5 | 2,2 | 1,6 | 1,4 |
| Спинка статора | 35,8 | 21,1 | 15,4 | 13,8 |
| Зубцы ротора | 1,6 | 1,4 | 1,1 | 0,9 |
| Спинка ротора | 8,0 | 7,1 | 5,2 | 4,6 |
| Суммарные | 47,9 | 31,9 | 23,2 | 20,9 |
| Суммарные, % | 100 | 66,4 | 48,4 | 43,5 |
| ВИД 10-25000 | | | | |
| Зубцы статора | 27,1 | 23,9 | 17,4 | 15,7 |
| Спинка статора | 385,3 | 255,7 | 186,2 | 167,5 |
| Зубцы ротора | 10,1 | 8,9 | 6,5 | 5,8 |
| Спинка ротора | 176,1 | 100,1 | 72,9 | 65,6 |
| Суммарные | 598,6 | 388,6 | 282,9 | 254,6 |
| Суммарные, % | 100 | 64,9 | 47,3 | 42,5 |

Численный расчет электромагнитного поля вентильно-индукторного двигателя указывает на неравномерность распределения индукции по магнитопроводу, что требует оценки влияния распределения магнитных потерь в стали статора и принятых при расчете их средних значений. На рис. 3 показана геометрия конечно-элементной модели двигателя ВИД-10-25000.

Расчет выполнен по элементам расчетной сетки модели на основе соответствующих этим элемен-

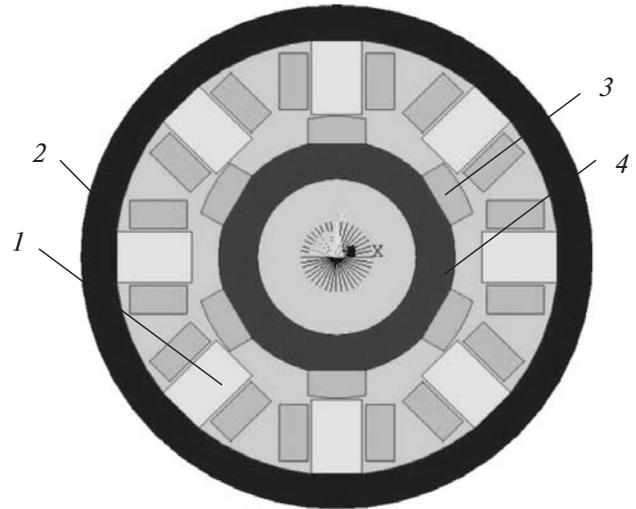


Рис. 3. Конечно-элементная модель двигателя ВИД-10-25000: 1 – зубец статора; 2 – спинка статора; 3 – зубец ротора; 4 – спинка ротора

там значений электромагнитной индукции с помощью разработанного алгоритма пересчета распределенных значений индукции в распределение магнитных потерь. Результаты расчета индукции сводились в таблицу элементов, с помощью которой выполнялись необходимые операции в соответствии с приведенными ниже формулами.

Потери на единицу массы k -го элемента расчетной сетки:

для зубцов статора

$$DP_{Fezs}^k = C_{ml} f_{rzs} (B_{zs}^k)^b (t_u^{1-a} + t_d^{1-a});$$

для зубцов ротора

$$DP_{Fezr}^k = C_{ml} f_{rzs} (B_{zr}^k)^b (t_u^{1-a} + t_d^{1-a});$$

для спинки статора

$$DP_{Fejs}^k = C_{ml} f_{ijs} (B_{js}^k)^b 2^b (t_u^{1-a} + t_d^{1-a});$$

для спинки ротора

$$DP_{Fezr}^k = C_{ml} f_{rzs} (B_{zr}^k)^b 2^b (t_u^{1-a} + t_d^{1-a});$$

$n=3$ — для конфигурации 6/4, $n=5$ — для конфигурации 8/6.

Расчет необходимо выполнять как для радиальной, так и для тангенциальной составляющих индукции, тогда общие потери в k -м элементе сетки составят, например, для k -го элемента зубца статора $DP_{Fezs}^k = V^k r_{Fe} (DP_{Fezsx}^k + DP_{Fezsy}^k)$, где V^k — объем k -го сегмента. Общие потери каждого участка определяются суммированием по всему объему, например, для зубцов статора $DP_{Fezs} = \sum_k DP_{Fezsx}^k$.

Результаты расчета показаны на рис. 4–5 для двигателя ВИД-10-25000. Суммарные потери по участкам магнитной цепи представлены в табл. 2 (МКЭ).

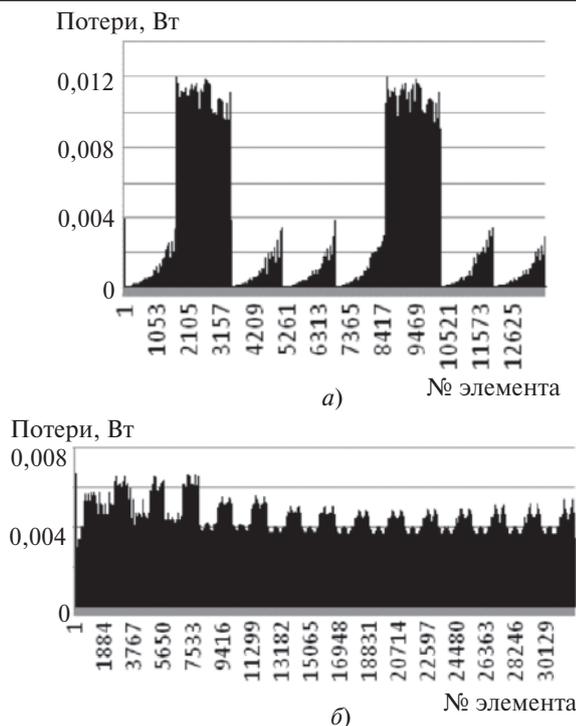


Рис. 4. Потери в зубцах (а) и в спинке (б) статора для ВИД-10-25000

Расчет потерь методом конечных элементов показал: общие потери от перемагничивания меньше рассчитанных по GSE (обобщенному уравнению Стейнметца) на 7,5–9,5%; относительное распределение потерь по отдельным участкам магнитопровода практически одинаково (рис. б); наиболее расходятся результаты расчета при определении потерь в спинке ротора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Dan M. Ionel, Mircea Popescu, Stephen J. Dellinger. On the Variation with Flux and Frequency of the Core Loss Coefficients in Electrical Machines. — IEEE Trans. on Industry Applications, 2006, vol. 42, No. 3, pp. 658–667.
2. Moallem M., Zangiabadi M. Accurate Prediction of Switched Reluctance Motor Losses. — ICEM 2000 Proc., vol. III, pp.1609–1613.
3. Кудряшов С.В. Способ расчета потерь в стали индукторного двигателя. — Электротехника, 2008, No. 4, с. 29–33.
4. Torrent M., Andrada P., Blanque B., Martinez E., Perat J.I., Sanchez J.A. Method for estimating core losses in switched reluctance motors. — Euro. Trans. Electr. Power, 2010, vol. 21, Iss. 1, pp. 757–771, DOI: 10.1002/etep.475.
5. Reinert J., Brockmeyer A., De Doncker R.W. Calculation of losses in ferro and ferrimagnetic materials based on the modified Steinmetz equation. — IEEE Trans. on Industry Applications, 2001, vol. 37(4), pp.1055–1061.
6. Li J., Abdallah T. and Sullivan C.R. Improved calculation of core loss with nonsinusoidal waveforms. — Proc. Ind. Appl. Conf., 36th IEEE IAS Annu. Meeting, 2001 (4), pp. 2203–2210.
7. Venkatachalam K., Sullivan C. R., Abdallah T., Taccia H. Accurate prediction of ferrite core loss with nonsinusoidal waveforms

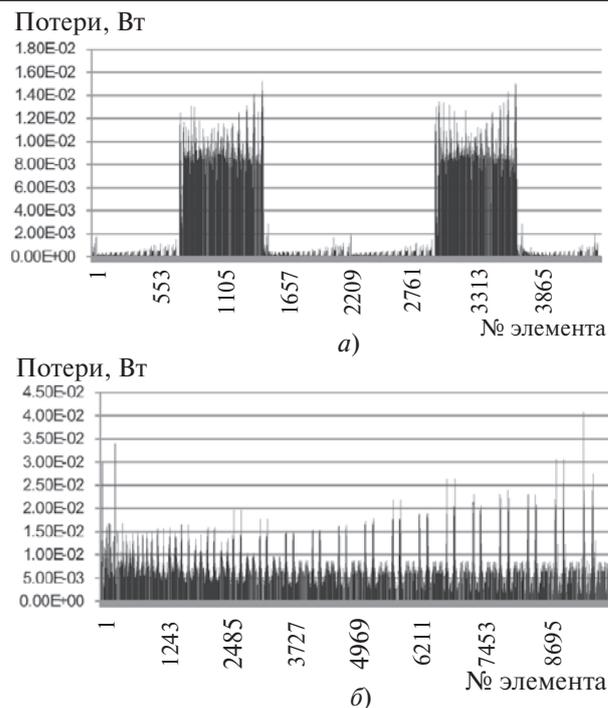


Рис. 5. Потери в зубцах (а) и в спинке (б) ротора для ВИД-10-25000

using only Steinmetz parameters. — Proc. IEEE Workshop Comput. Power Electron., 2002, pp. 36–41.

8. Ganji J., Faiz K., Kasper C.E., Carstensen R.W., De Doncker R.W. Core loss model based on finite-element method for switched reluctance motors. — IET Electr. Power Appl., 2010, vol. 4 (7), pp. 569–577.

[17.12.15]

Авторы: Антипов Виктор Николаевич окончил электромеханический факультет Ленинградского политехнического института – ЛПИ (ныне Санкт-Петербургский государственный политехнический университет) в 1963 г. Защитил докторскую диссертацию «Обеспечение заданных коммутационных качеств при проектировании машин постоянного тока промышленного назначения» в 1989 г. в ЛПИ. Ведущий научный сотрудник Института химии силикатов имени И.В. Гребенщикова РАН.

Грозов Андрей Дмитриевич окончил электромеханический факультет ЛПИ в 1979 г. Научный сотрудник Института химии силикатов имени И.В. Гребенщикова РАН.

Иванова Анна Владимировна окончила математико-механический факультет Ленинградского государственного университета (ЛГУ) в 1979 г. Защитила кандидатскую диссертацию «Колебания модели упругого летательного аппарата в виде системы тонкостенных стержней в турбулентной атмосфере» в 1989 г. в ЛГУ. Старший научный сотрудник Института химии силикатов имени И.В. Гребенщикова РАН.

Comparison of Methods for Calculating Iron Losses in Converted-Fed Inductor Motors

ANTIPOV Viktor Nikolayevich (*Russian Academy of Sciences (RAS), Institute of Silicate Chemistry (ISCh), St. Petersburg, Russia*) – *Leading scientist, Dr. Sci. (Eng.)*

GROZOV Andrei Dmitriyevich (*RAS, ISCh, St. Petersburg, Russia*) – *Scientist*

IVANOVA Anna Vladimirovna (*RAS, ISCh, St. Petersburg, Russia*) – *Senior scientist, Cand. Sci. (Eng.)*

The article presents an analysis of methods used to calculate iron losses in converted-fed inductor motors (CFIMs) operating under the conditions of a non-sine-wave magnetic flux with the remagnetization frequency varying in the range from 100 to 3000 Hz. The application fields of different methods are determined. An attempt to separate remagnetization losses into the components due to hysteresis and eddy currents yields incorrect results at high frequencies. Advantages of using the generalized Steinmetz equation for calculation are demonstrated. The distribution of losses in the magnetic core estimated from the results of magnetic field calculation using the finite element method is given. It is shown that around 75% of the total remagnetization losses release in the stator back. The remagnetization loss can be reduced by 35–45% through properly selecting the core plate thickness and alloy grade. The obtained study results can be used in designing CFIMs intended to operate at high remagnetization frequency.

Key words: *converter-fed inductor motor (CFIM), eddy currents, hysteresis, magnetic losses in iron, generalized Steinmetz equations, remagnetization frequency*

REFERENCES

1. **Dan M. Ionel, Mircea Popescu, Stephen J. Dellinger.** On the Variation with Flux and Frequency of the Core Loss Coefficients in Electrical Machines. — *IEEE Trans. on Industry Applications*, 2006, vol. 42, No. 3, pp. 658–667.

2. **Moallem M., Zangiabadi M.** Accurate Prediction of Switched Reluctance Motor Losses. — *ICEM 2000 Proc.*, vol. III, pp. 1609–1613.

3. **Kudryashov S.V.** *Elektrotehnika – in Russ. (Electrical Engineering)*, 2008, No. 4, pp. 29–33.

4. **Torrent M., Andrada P., Blanque B., Martinez E., Perat J.I., Sanchez J.A.** Method for estimating core losses in switched reluctance motors. — *Euro. Trans. Electr. Power*, 2010, vol. 21, Iss. 1, pp. 757–771, DOI: 10.1002/etep. 475.

5. **Reinert J., Brockmeyer A., De Doncker R.W.** Calculation of losses in ferro and ferrimagnetic materials based on the modified Steinmetz equation. — *IEEE Trans. on Industry Applications*, 2001, vol. 37(4), pp. 1055–1061.

6. **Li J., Abdallah T. and Sullivan C.R.** Improved calculation of core loss with nonsinusoidal waveforms. — *Proc. Ind. Appl. Conf.*, 36th IEEE IAS Annu. Meeting, 2001 (4), pp. 2203–2210.

7. **Venkatachalam K., Sullivan C. R., Abdallah T., Tacca H.** Accurate prediction of ferrite core loss with nonsinusoidal waveforms using only Steinmetz parameters. — *Proc. IEEE Workshop Comput. Power Electron.*, 2002, pp. 36–41.

8. **Ganji J., Faiz K., Kasper C.E., Carstensen R.W., De Doncker R.W.** Core loss model based on finite-element method for switched reluctance motors. — *IET Electr. Power Appl.*, 2010, vol. 4 (7), pp. 569–577.

ЧИТАТЕЛЯМ, ПОДПИСЧИКАМ, РЕКЛАМОДАТЕЛЯМ ЖУРНАЛА «ЭЛЕКТРИЧЕСТВО»

Полные тексты статей в формате .pdf размещены на сайте Российской универсальной научной электронной библиотеки (РУНЭБ): www.elibrary.ru
Для желающих представить в журнал статью сообщаем, что правила подготовки рукописей публикуются в №№ 6 и 12 каждого года и на сайте журнала.

Реклама в черно-белом изображении может быть размещена на страницах журнала и на его обложке, а также в виде вкладки.

Возможно размещение рекламы в цветном изображении.

Стоимость оплаты рекламных статей – по договоренности.

При повторении той же рекламы в следующем номере – скидка 10%. При публикации той же рекламы в третьем и последующих номерах – скидка 20%. Последний срок представления рекламного материала – за 1,5 месяца до выхода номера из печати (обычно номер выходит в середине каждого месяца).

Адрес для переписки: E-mail: etr1880@mail.ru

тел./факс: (495)362-7485