

УДК 621.3:621.313.017

Н.М. Шайтор, доцент, канд. техн. наук

Севастопольский военно-морской институт им. П.С. Нахимова

Ул. Дыбенко 1-А, г. Севастополь, Украина, 99035

НАВЕДЁННАЯ ТЕМПЕРАТУРНАЯ МАГНИТНАЯ АНИЗОТРОПИЯ В ДВУХСЛОЙНЫХ РОТОРАХ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Рассмотрено явление магнитной анизотропии, наведённой в изотропном ферромагнетике неравномерным полем температур, и предложен механизм её представления. Исследованы температурные и магнитные поля асинхронных двигателей и показаны направления повышения эффективности двухслойных роторов при наведённой температурной магнитной анизотропии.

1. Введение. К общим проблемам асинхронных двигателей относится проблема повышения добротности пуска, решение которой приводит к улучшению использования двигателей в динамических режимах работы. В ходе решения данной проблемы созданы и исследованы [1] асинхронные двигатели с двухслойным ротором (АДДР), имеющие улучшенные пусковые свойства. Особенности конструкции и физических процессов в АДДР по сравнению с короткозамкнутым (АДКР) приводят к повышенным тепловыделениям в активном цилиндре, а увеличение воздушного зазора – к повышению термического сопротивления между статором и ротором, ухудшению отвода тепла и нагреву ротора. Нерешённой частью общей проблемы является пробел в исследованиях влияния тепловыделений и тепловых полей на характеристики двигателей. Цель данной работы – разработка механизма наведённой температурной магнитной анизотропии в активном слое ротора, исследование влияния температурного поля на характеристики двигателей и определение направлений повышения эффективности двухслойных роторов.

2. Механизм наведённой температурной магнитной анизотропии в изотропном материале. Наведённая температурная магнитная анизотропия – явление, связанное с приобретением ферромагнетиком различной магнитной проницаемости в неравномерном поле температур, вследствие чего вектор магнитной индукции совпадает с вектором магнитной напряжённости только в частных случаях, определяемых температурным полем [2]. В отличие от естественной кристаллографической анизотропии, наведённой анизотропии прокатки и других известных видов анизотропии, являющихся относительно устойчивой характеристикой материала, данный вид анизотропии проявляется только при значительных перепадах температур, приближающихся к точке Кюри, и носит неустойчивый (блуждающий) характер, поскольку в равномерном поле температур материал возвращается к изотропным свойствам.

Известно, что в изотропном ферромагнетике вектор магнитной индукции совпадает с вектором напряжённости

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mu \mathbf{H},$$

где μ_0 – магнитная постоянная; μ – относительная магнитная проницаемость; $\mathbf{H}$ – вектор напряжённости магнитного поля.

Анизотропные магнитные свойства ферромагнетика в равномерном поле температур характеризуют тензором магнитной проницаемости $\vec{\mu}$. Здесь вектор индукции

$$\mathbf{B} = \mu_0 \vec{\mu} \mathbf{H} \quad (1)$$

не совпадает по направлению с вектором $\mathbf{H}$. Тензору магнитной проницаемости $\vec{\mu}$ (тензору второго ранга) соответствует тензорная поверхность второго порядка – эллипсоид магнитной проницаемости и соответствующий ему характеристический эллипсоид [3].

Рассмотрим решение задачи по определению вектора магнитной индукции (1), если заданы неравномерное температурное поле ферромагнетика (известны температура в каждой точке ферромагнетика и температурная зависимость магнитной проницаемости) и вектор напряжённости внешнего магнитного поля $\mathbf{H}$. Поскольку температурное поле определено, то в каждой рассматриваемой точке известны изотермические поверхности $T = \text{const}$, градиент температур $\text{grad}T = \partial T / \partial n$ по направлению нормали $\mathbf{n}$ к изотермической поверхности.

Если коллинеарный полю вектор единичной напряжённости $\mathbf{H}$ в рассматриваемой точке, находящейся на изотермической поверхности $T = \text{const}$, направлен в сторону горячей изотермической поверхности $T + \Delta T = \text{const}$, то в системе главных осей получаем тензор магнитной проницаемости

$$\vec{\mu}(\text{grad}T) = \begin{pmatrix} \mu_{11}(\text{grad}T) & 0 & 0 \\ 0 & \mu_2(T) & 0 \\ 0 & 0 & \mu_3(T) \end{pmatrix}, \quad (2)$$

а если он направлен в сторону холодной изотермической поверхности $T - \Delta T = \text{const}$, то получаем другой тензор

$$\vec{\mu}(-\text{grad}T) = \begin{pmatrix} \mu_{12}(-\text{grad}T) & 0 & 0 \\ 0 & \mu_2(T) & 0 \\ 0 & 0 & \mu_3(T) \end{pmatrix}, \quad (3)$$

где $\mu_{11}(\text{grad}T)$ – главная магнитная проницаемость в направлении градиента температур по "трудной" оси; $\mu_{12}(-\text{grad}T)$ – главная магнитная проницаемость в противоположном градиенту направлении по "лёгкой" оси;

$$\mu_2(T) = \mu_3(T) = \mu(T) \quad (4)$$

– главная магнитная проницаемость по изотерме или средней оси.

Проницаемости по "трудной" и "лёгкой" осям определяются средним значением проницаемостей на рядом лежащих изотермах:

$$\mu_{11} = [\mu(T) + \mu(T + \Delta T)] / 2; \quad (5)$$

$$\mu_{12} = [\mu(T) + \mu(T - \Delta T)] / 2, \quad (6)$$

причём проницаемости (4)–(6) на изотермах определяются расчётным и (или) экспериментальным путём по температурной зависимости самопроизвольной намагниченности и по кривым намагничивания материала $B_T = f(H)$ соответственно при температурах T , $T + \Delta T$ и $T - \Delta T$.

Таким образом, математическое решение задачи (1) включает определение (2)–(6), а механизм наведённой температурной магнитной анизотропии может быть представлен двойным тензором (2), (3). Каждому из этих тензоров соответствует поверхность второго порядка, а общая поверхность двойного тензора образована двумя составными тензорными эллипсоидами вращения. Для расчёта магнитного поля в каждой точке ферромагнетика удобно использовать метод наложения соответствующих сеток магнитного и температурного полей при совпадении их узлов. На рисунке 1 показан механизм температурной магнитной анизотропии на плоскости (геометрическое решение задачи) для векторов напряжённости $\mathbf{H}$ и магнитной индукции $\mathbf{B}$ в узле 0, расположенном на изотерме $T = \text{const}$. В плоском случае рассматривают главные сечения составных эллипсоидов, которые вырождаются в кривые второго порядка и изображаются составными эллипсами большой и малой магнитной проницаемости. Высокой температуре соответствует малая, а низкой температуре – большая магнитная проницаемость. Поэтому в направлении градиента температур $\text{grad} T$ имеет место "трудная" ось с эллипсом 1 с осью малой магнитной проницаемости μ_{11} и соответствующим характеристическим эллипсом 3 с осью $1/\sqrt{\mu_{11}}$, тензор (2). В противоположном направлении имеет место "лёгкая" ось с эллипсом 2 с осью большой магнитной проницаемости $\mu_{12} \geq \mu_{11}$, ему соответствует характеристический эллипс 4 с осью $1/\sqrt{\mu_{12}}$, тензор (3).

ей ось – "лёгкой", так как $\mu_{12} > \mu_{11}$. Перпендикулярная им ось, совпадающая с изотермой, является "средней" осью, так как $\mu_{11} \leq \mu \leq \mu_{12}$. При совпадении вектора **Н** с указанными осями вектор **В** тоже совпадает с этими осями и с вектором **Н**, а в промежуточных положениях между осями векторы расходятся, причём вектор **В** всегда тяготеет в сторону «более лёгкой» оси. По этой причине в направлении низких температур при приближении вектора **Н** к лёгкой оси вектор **В** является опережающим, а при удалении от этой оси – отстающим относительно вектора **Н**. В направлении высоких температур при приближении вектора **Н** к средней оси вектор **В** является опережающим, а при приближении к трудной оси – отстающим относительно вектора **Н**.

Обратный переход ферромагнетика к изотропным свойствам происходит следующим образом. С уменьшением градиента температур до нуля температура во всех точках поля выравнивается до величины $T = \text{const}$, магнитные проницаемости в этих точках – до значения μ , эллипсы большой и малой проницаемостей вырождаются в окружности радиуса μ , а характеристические эллипсы – в окружности радиуса $1/\sqrt{\mu}$, при этом вектор индукции начнёт совпадать с вектором напряжённости. Таким образом, двойной тензор второго ранга однозначно и полно описывает магнитное поле ферромагнетика в поле температур.

3. Температурное и магнитное поле в роторе асинхронного двигателя. Поле температур двухслойного ротора можно определить аналитиче-

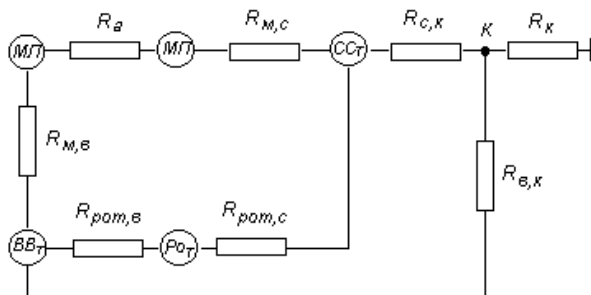


Рисунок 2 – Приведённая эквивалентная тепловая схема асинхронного двигателя

ским методом по средним температурам основных элементов, рассчитанным по методу эквивалентных тепловых схем (ЭТС), рисунок 2.

В приведённую ЭТС включены медь лобовая МЛ и медь пазовая МП обмотки статора асинхронного двигателя, сердечник статора ССт, зона зубцов ротора Рот, внутренний воздух ВВТ и корпус К – станина и щиты. В узлы ЭТС введены соответствующие потери (для обмоток – при ожидаемой температуре, в узлы ССт и Рот – основные и добавочные, в узел ВВТ – ме-

ханические и внутренние вентиляционные).

Приведённая ЭТС содержит следующие термические сопротивления: R_a – аксиальное меди статора, $R_{м,с}$ – между медью и сердечником статора, $R_{с,к}$ – между сердечником и корпусом, R_k – корпуса, $R_{м,в}$ – между медью статора и внутренним воздухом, $R_{рот,в}$ – между ротором и внутренним воздухом, $R_{рот,с}$ – между ротором и сердечником статора, $R_{в,к}$ – между внутренним воздухом и корпусом. Значения этих сопротивлений получают из сопротивлений развёрнутой ЭТС. Методика расчёта тепловых сопротивлений изложена в работе [4].

В таблице 1 приведены результаты расчёта термических сопротивлений самообдуваемых двигателей 21ДМШ112 с короткозамкнутым и двухслойным роторами по приведённой ЭТС.

Таблица 1 – Термические сопротивления двигателей 21ДМШ112

Расчётные термические сопротивления приведённой эквивалентной тепловой схемы двигателя	Обозначение	Сопротивление, К/Вт	
		АДКР	АДДР
Аксиальное – меди статора	R_a	0,0236	0,0236
Медь статора – сердечник статора	$R_{м,с}$	0,1950	0,1950
Сердечник статора – корпус	$R_{с,к}$	0,0245	0,0245
Радиальное – корпуса двигателя	R_k	0,0472	0,0472
Внутренний воздух – медь статора	$R_{м,в}$	0,4685	0,4685
Внутренний воздух – ротор	$R_{рот,в}$	0,3860	0,3975
Ротор – зазор – сердечник статора	$R_{рот,с}$	0,1554	0,3404
Внутренний воздух – корпус	$R_{в,к}$	0,1260	0,1260

В таблице 2 приведены результаты расчёта превышения средних температур основных элементов двигателей над окружающей средой при нагрузке 3 кВт, равной номинальной нагрузке базового двигателя с короткозамкнутым ротором.

Таблица 2 – Превышение средних температур элементов двигателей

Элементы тепловой схемы двигателя	Обозначения	Превышение температуры, °С	
		АДКР	АДДР
Лобовая часть обмотки статора	$\Delta T_{м,л}$	75,93	86,22
Пазовая часть обмотки статора	$\Delta T_{м,п}$	74,53	84,65
Ротор асинхронного двигателя	$\Delta T_{рот}$	207,9	352,41
Сердечник статора двигателя	$\Delta T_{с,ст}$	36,37	45,32
Внутренний воздух двигателя	$\Delta T_{в,вт}$	62,56	75,85
Корпус асинхронного двигателя	ΔT_k	44,98	50,37
В среднем по обмотке статора	ΔT_m	80,87	92,44

По средним температурам основных элементов, рассчитанным по ме-

тоту ЭТС, можно определить распределение температуры в активных частях двигателя аналитическим методом, используя как граничные условия полученные ранее данные [4]. Распределение температуры в активных частях двигателя определяется путём решения одномерной задачи теплопроводности для рассматриваемого элемента, причём его связь с другими элементами и охлаждающей средой учитывается осреднённо.

В применении к двухслойному ротору двигателя одномерная задача включает дифференциальное уравнение теплопроводности для активного цилиндра

$$d^2T / dx^2 = m_1^2(T - k_1) + n_1, \quad (7)$$

где T – распределение температуры активного цилиндра по аксиальной координате x ; k_1 – параметр, учитывающий граничные условия; m_1 – параметр, учитывающий термические сопротивления элементов; n_1 – параметр, учитывающий тепловыделение в роторе.

При применении соответствующих граничных условий решение уравнения (7) можно представить в виде:

$$T = (C_1 e^{m_1 x} + C_2 e^{-m_1 x} - n_1) / m_1^2 + k_1 x, \quad (8)$$

где C_1, C_2 – постоянные, определяемые геометрией элементов.

Результаты исследования аксиального распределения температуры (8) при различных нагрузках P самообдуваемого двигателя 21 ДМШ 112 S2 с двухслойным ротором показано на рисунке 3,а (x – аксиальная координата, противоположная направлению обдува; l – аксиальный размер ротора). За номинальную нагрузку принята номинальная нагрузка $P_n = 3$ кВт базового двигателя с короткозамкнутым ротором. Температура Кюри активного материала ротора CM20 [1] составляет $\theta_K = 725^\circ \text{C}$. Подогрев охлаждающего воздуха по длине двигателя смещает пиковые температуры в направлении его обдува.

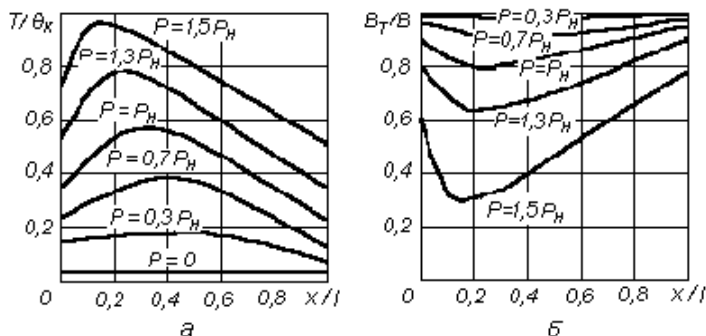


Рисунок 3 – Влияние температуры на магнитные характеристики ротора:
 а – распределение температуры при различных нагрузках двигателя;
 б – влияние нагрузки и температуры на индукцию насыщения

Вследствие температурной зависимости самопроизвольной намагниченности неравномерное поле температур с приближением к точке Кюри снижает индукцию в цилиндре двухслойного ротора на теплонпряжённых участках. На рисунке 3,б показано влияние аксиального распределения температуры при различных нагрузках двигателя на индукцию насыщения активного слоя (B_t – индукция насыщения при рассматриваемой температуре; B – индукция насыщения при температуре 20°C).

При мощностях до 70% от номинальной мощности базового двигателя с короткозамкнутым ротором поле температур оказывает слабое влияние на индукцию насыщения АДПР, однако с повышением мощности и увеличением температуры ротора индукция значительно снижается. Вместе с тем эта картина магнитной индукции ещё не даёт полного представления о реальной картине поля в роторе АДПР, поскольку не учитывается наведённая температурная магнитная анизотропия активного слоя.

4. Температурная анизотропия и повышение эффективности двухслойных роторов. Качественная картина аксиального распределения магнитного поля в роторе АДПР с учётом наведённой температурной магнитной анизотропии показана на рисунке 4. Анализ тепловых потоков, проведённый в результате теплового расчёта двигателя, показал, что высокая температура имеет место на поверхности ротора, а низкая – в районе охлаждающих лопаток, причём градиент температур направлен от лопаток к поверхности под углом к оси ротора. Направление и модуль вектора индукции определены в соответствии с механизмом анизотропии, рассмотренном на рисунке 1. На входе в ротор вектор индукции $\mathbf{B}$ тяготеет в сторону "лёгкой", а при выходе – в сторону средней оси, поэтому не совпадает с вектором напряжённости поля $\mathbf{H}$. Вследствие этого магнитный поток Φ , линии которого касательны к вектору индукции $\mathbf{B}$, вытесняется на периферию в область короткозамкнутых колец ротора. При вращении ротора аксиальное изменение плотности магнитного потока с частотой скольжения индуцирует тангенциальные ЭДС и круговые токи.

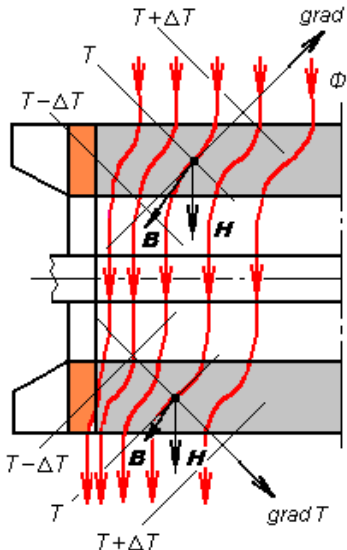


Рисунок 4 – Искажение магнитного поля при нагревании двухслойного ротора

Наложение аксиальных и круговых токов на рабочий ток приводит к краевым эффектам, добавочным потерям и нагреву ротора, причём при повышенных нагрузках лавинообразный процесс наведённой температурной магнитной анизотропии и ухудшение рабочих характеристик завершаются самопроизвольной остановкой двигателя. Приведенные данные подтверждают, что после охлаждения изотропные магнитные свойства ротора и рабочие характеристики двигателей самопроизвольно восстанавливаются без каких

либо последствий.

Выводы из данного исследования и перспективы исследований в данном направлении. Механизм наведённой температурной анизотропии ферромагнетика, представленный с помощью двойного тензора второго ранга, однозначно и полно описывает магнитные свойства материала в температурном поле. Он позволяет произвести качественный анализ магнитного поля и оценить последствия наведённой температурной магнитной анизотропии в электротехнических устройствах, содержащих элементы магнитных цепей, обладающие изотропными свойствами в равномерном поле пониженных температур.

Следствием температурных перегрузок АДДР является лавинообразный процесс наведённой температурной магнитной анизотропии, которая искажает магнитное поле и вытесняет его на периферию, усиливает краевые эффекты, увеличивает добавочные потери и нагрев ротора, а при значительных перегрузках приводит к остановке двигателей с восстановлением их магнитных и рабочих свойств после охлаждения. Повышение эффективности двухслойных роторов связано с устранением наведённой температурной магнитной анизотропии и может быть достигнуто повышением точки Кюри активных сплавов, совершенствованием системы охлаждения с целью снижения и выравнивания поля температур, а также уменьшением контактных и других тепловых сопротивлений и тепловыделений в элементах двигателей.

Библиографический список

1. Могильников В.С. Асинхронные двигатели с двухслойным ротором и их применение / В.С. Могильников, А.М. Олейников, А.Н. Стрельников. — М.: Энергоатомиздат, 1983. — 119 с.
2. Шайтор М.М. Основи термодинамічної теорії електромеханічного

перетворення енергії / М.М. Шайтор // Напрямки та шляхи реалізації програми реформування та розвитку військово-морських сил України: Зб. наук. праць. — Севастополь, 2000. — Вип. 2. — С. 534–538.

3. Най Дж. Физические свойства кристаллов и их описание при помощи тензоров и матриц / Дж. Най. — 2-е изд. — М.: Мир, 1967. — 386 с.

4. Борисенко А. И. Охлаждение промышленных электрических машин / А. И. Борисенко, О. Н. Костиков, А. И. Яковлев. — М.: Энергоатомиздат, 1983. — 296 с.

Поступила в редакцию 01.11.2002 г.