

ОТ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РЕАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАШИНЫ К ЕЕ ДОПУСТИМОЙ НАГРУЗКЕ

Разработана математическая модель (ММ) реальной электрической машины (РЭМ), отличающейся от идеализированной отклонениями конструкционного, технологического и эксплуатационного происхождения. Показана последовательность создания ММ на примере реальной асинхронной машины. При этом учитывается третья гармоника магнитного поля в воздушном зазоре, изменения магнитных свойств стали под влиянием технологических факторов, нарушение симметрии магнитной и электрической цепей машины. Показано определение допустимой нагрузки асинхронного двигателя, имеющего дефекты эксплуатационного происхождения, при токе статора, равном номинальному значению.

К л ю ч е в ы е с л о в а: математическая модель, отклонения, реальная электрическая машина, асинхронная машина, допустимая нагрузка.

Реальной электрической машиной (РЭМ) будем называть машину, имеющую отклонения от номинальных значений размеров, геометрических форм и физических свойств материалов активных частей, вызванные технологическими и эксплуатационными факторами. В отличие от идеализированной электрической машины (ЭМ) магнитное поле в воздушном зазоре (ВЗ) РЭМ содержит бесконечный спектр гармоник, обусловленных зубчатостью статора и ротора, насыщением стальных участков магнитной цепи, а также названными выше технологическими и эксплуатационными отклонениями.

Отклонения размеров и физических свойств деталей и узлов принимают за входные, которые влияют на выходные отклонения параметров и характеристик РЭМ.

В сфере производства к наиболее существенным входным отклонениям относятся: отклонения магнитных свойств сердечников и их анизотропия, отклонения величины ВЗ и его неравномерность, отклонения активного сопротивления фазы обмотки статора и несимметрия фазных обмоток, отклонения удельного электрического сопротивления короткозамкнутой клетки ротора (в асинхронных двигателях) и ее несимметрия и прочие.

В сфере эксплуатации возникают: несимметрия фазных обмоток статора вследствие исключения неисправных секций; ухудшение магнитных характеристик стали из-за старения; дефекты короткозамкнутой клетки ротора, возникающие вследствие частых пусков и реверсов; неравномерность ВЗ вследствие подработки подшипников и другие. Таким образом, технологические и эксплуатационные отклонения часто могут иметь одинаковую природу. Недостаток финансовых средств вынуждает потребителей использовать ЭМ с указанными дефектами.

Математическая модель (ММ) РЭМ позволяет рассчитать эксплуатационные характеристики и допустимую нагрузку ЭМ при наличии отклонений от нормы.

Отклонения геометрических размеров и физических свойств материалов активных деталей и узлов подразделяем на две категории:

- 1) отклонения, которые не приводят к нарушению симметрии машины;
- 2) отклонения, которые вызывают нарушения симметрии.

Отклонения первой категории могут быть учтены с помощью ММ идеализированной ЭМ. Однако для учета отклонений второй категории необходима разработка специальных методов расчета. Последовательность учета различных факторов при разработке ММ РЭМ для случая асинхронной машины (АМ) и промежуточные этапы показаны на рис. 1. Ниже описаны результаты исследований, положенные в основу разработки ММ реальной асинхронной машины (РАМ) с короткозамкнутым ротором для широкого диапазона мощностей от сотен ватт до тысячи киловатт.

Традиционный метод расчета магнитной цепи [1, 2] дает для двигателей мощностью не более 3кВт невысокую точность определения намагничивающего тока. Поэтому с целью совершенствования ММ нами был принят новый способ расчета, заключающийся в том, что для магнитного контура, состоящего из двух соседних зубцов статора и двух соседних зубцов ротора, магнитное напряжение определяют не только для первой гармоники индукции, но и для третьей, вызванной насыщением магнитной цепи [3]. Это позволило уменьшить погрешность расчета намагничивающего тока относительно измеренного значения в среднем в 1,5 раза по сравнению с [1]. Более того, магнитное

напряжение магнитопроводов возрастает под влиянием технологических факторов: штамповка листов статора и ротора, сварка листов в сердечниках, прошивка расточки и наружная обточка сердечника статора, шлифовка или чистовая обточка поверхности ротора. Учет их производился нами путем введения коэффициента технологических факторов [4, 5]:

$$K_{тф} = \frac{\sum F_{стф}}{\sum F_c} \quad (1)$$

где $\sum F_{стф}$ – магнитное напряжение стальных участков магнитной цепи под влиянием технологических факторов;
 $\sum F_c$ – то же, но без учета влияния этих факторов.

Расчетным путем значение коэффициента $K_{тф}$ может быть определено по [6, 7].

Согласно [8] при номинальном магнитном потоке машины в зависимости от условий производства и марки стали $K_{тф} = 1,1+2,0$. Существенное влияние на магнитные свойства оказывает режим рекристаллизационного отжига холоднокатаной электротехнической стали марок 2011, 2012 и 2013. Достаточно высокая точность аппроксимации кривых намагничивания достигается посредством выражения вида [3]:

$$H = bV + a \operatorname{Sh} kV, \quad (2)$$

где H и V – соответственно магнитная напряженность и индукция в стали;
 a , b и k – коэффициенты аппроксимации напряженности.

Кривые удельных потерь в стали при этом аппроксимируются функцией вида

$$P_{уд} = a_1 \operatorname{Sh} k_1 V, \quad (3)$$

где a_1 и k_1 – коэффициенты аппроксимации потерь.

Изменение режима термообработки учитывается путем изменения коэффициентов аппроксимации.

Рассмотрим теперь АМ, обладающую электрической и магнитной несимметрией.

Асинхронная машина при несимметрии магнитной цепи

Магнитная несимметрия вызывается эксцентриситетом ротора. Различают статический и динамический эксцентриситет. Динамический эксцентриситет обычно устраняется путем проточки поверхности ротора при вращении в собственных подшипниках. Статический эксцентриситет – смещение оси вращения ротора относительно оси отверстия статора – может быть устранен только при капитальном ремонте.

В известных литературных источниках (например, [9]) магнитное поле неравномерного воздушного зазора определяется при допущениях: а) ось ротора параллельно смещена относительно оси отверстия статора, б) воздушный зазор образован гладкими поверхностями статора и ротора, в) отсутствует насыщение магнитной цепи.

На первом этапе – при параллельном смещении осей статора и ротора – нами произведен учет зубчатости статора, ротора и учет магнитного напряжения стальных участков магнитной цепи [10]. Относительный статический эксцентриситет

$$\varepsilon = \frac{e}{\delta_0} \quad (4)$$

где e – смещение оси вращения ротора относительно оси отверстия статора,

δ_0 – номинальный воздушный зазор при концентричном роторе.

Согласно статистическим данным в реальных АМ $\Delta = 0,1+0,9$, а иногда может доходить до 1 (задевание ротора о статор).

Магнитное поле в воздушном зазоре (ВЗ) при параллельном смещении осей ротора и статора, имеющих двухстороннюю зубчатость, и с учетом магнитного напряжения сердечников нами предлагается определять по формулам: при $p > 1$

$$B_p(\varphi, t) = -B_p \Lambda_{0\mu} \left\{ \cos(p\varphi - \omega t) + \frac{\Lambda_{1\mu}}{2\Lambda_{0\mu}} \times \right. \\ \left. \times D_{p+1} \cos[(p+1)\varphi - \omega t] + \right. \\ \left. + \frac{\Lambda_{1\mu}}{2\Lambda_{0\mu}} D_{p-1} \cos[(p-1)\varphi - \omega t] \right\}, \quad (5)$$

при $p=1$

$$B_1(\varphi, t) = -B_1 \Lambda_{0\mu} \left\{ \left[1 - \left(\frac{\Lambda_{1\mu}}{2\Lambda_{0\mu}} \right)^2 \right] \cdot \cos(\varphi - \omega t) - \right. \\ \left. - \left(\frac{\Lambda_{1\mu}}{2\Lambda_{0\mu}} \right)^2 D_1 \cos(\varphi + \omega t) + \frac{\Lambda_{1\mu}}{2\Lambda_{0\mu}} D_2 \cos(2\varphi - \omega t) \right\}, \quad (6)$$

где B_p и B_1 – амплитуды основной гармоники индукции в воздушном зазоре при отсутствии зубчатости и концентричном роторе;

$D_1, D_2, D_{p+1}, D_{p-1}$ – коэффициенты демпфирования гармоник поля статора клеткой ротора;

φ – угловая пространственная координата вдоль окружности ротора;

ω – круговая частота тока в статоре;

p – число пар полюсов.

Коэффициенты удельной магнитной проводимости определяются по формулам:

$$\Lambda_{0\mu} = \frac{1 - \frac{b_s}{t_s} - \frac{b_r}{t_r}}{\sqrt{1 - \epsilon_\mu^2}} + \frac{\frac{b_s}{t_s}}{\sqrt{k_s^2 - \epsilon_\mu^2}} + \frac{\frac{b_r}{t_r}}{\sqrt{k_r^2 - \epsilon_\mu^2}}, \quad (7)$$

$$\Lambda_{1\mu} = \frac{2}{\epsilon_\mu} \cdot \left[\frac{1 - \frac{b_s}{t_s} - \frac{b_r}{t_r}}{\sqrt{1 - \epsilon_\mu^2}} + \frac{\frac{b_s}{t_s}}{\sqrt{k_s^2 - \epsilon_\mu^2}} + \frac{\frac{b_r}{t_r}}{\sqrt{k_r^2 - \epsilon_\mu^2}} - 1 \right] \quad (8)$$

где $k_s = 1 + \frac{b_s}{5\delta_0 k_\mu(s)}$, $k_r = 1 + \frac{b_r}{5\delta_0 k_\mu(s)}$.

Здесь относительный магнитный эксцентриситет

$$\epsilon_\mu = \frac{e}{\delta_0 k_\mu(s)} \quad (9)$$

где b_s и b_r – открытия пазов соответственно статора и ротора,

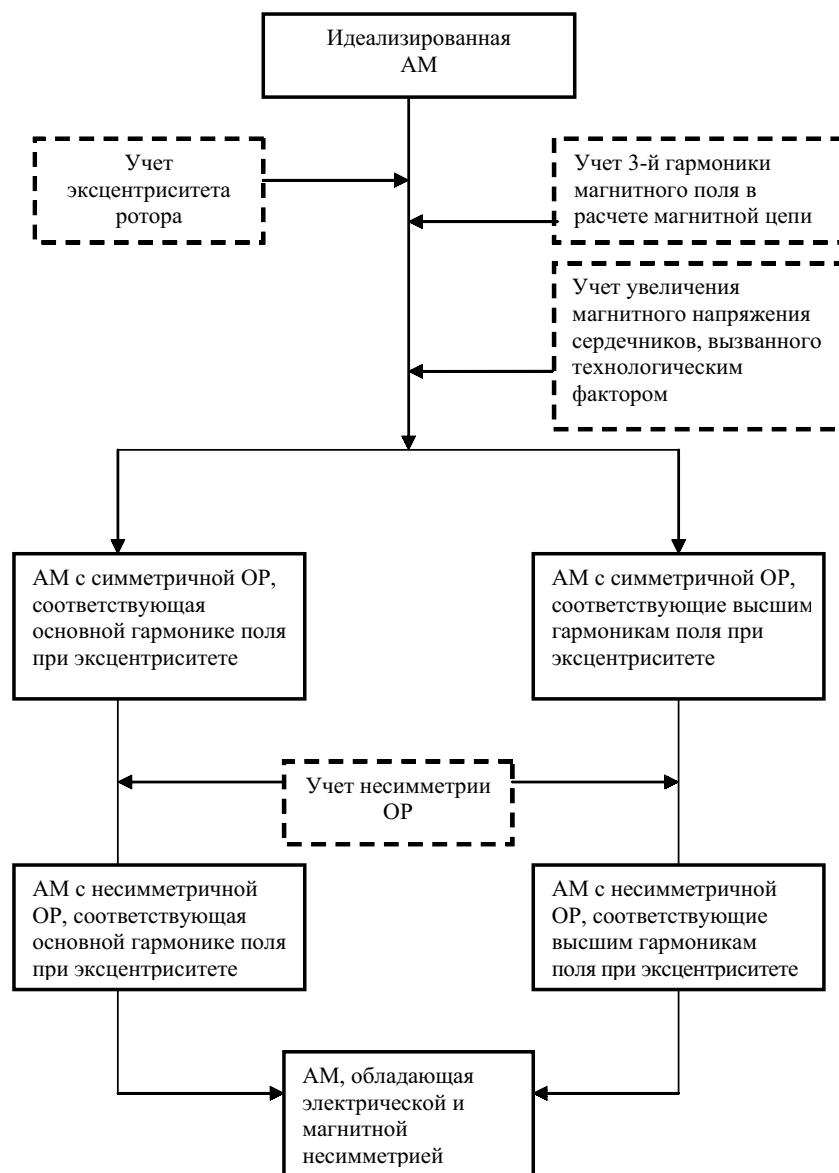


Рисунок 1. Структурная схема математической модели реальной асинхронной машины

t_s и t_r – шаги по пазам статора и ротора.

$k_\mu(s)$ – коэффициент насыщения магнитной цепи в функции скольжения s .

На втором этапе разработана методика определения магнитного поля в воздушном зазоре (ВЗ) при перекосе осей статора и ротора. Ротор представляем состоящим из отдельных дисков, смещенных относительно друг друга перпендикулярно оси статора, но при этом ось элементарного диска остается параллельной оси статора. Каждому диску будет соответствовать свое значение статического эксцентриситета ϵ_j и своя элементарная машина [11].

Магнитное поле в ВЗ j -ой элементарной машины при перекосе ротора определяется по формулам:

при $p > 1$

$$B_{pj}(\varphi, t) = -A_p R \frac{\mu_0}{\delta_0} \left\{ \Lambda_{0j} \cos(p\varphi - \omega t) + \frac{1}{2} \Lambda_{1j} D_{p+1} \cos[(p+1)\varphi - \omega t] + \frac{1}{2} \Lambda_{1j} D_{p-1} \cos[(p-1)\varphi - \omega t] + \dots \right\}; \quad (10)$$

при $p = 1$

$$B_{1j}(\varphi, t) = -A_1 R \frac{\mu_0}{\delta_0} \left\{ \Lambda_{0j} - \left(\frac{\Lambda_{1j}}{2} \right)^2 \cos(p\varphi - \omega t) - \left[\left(\frac{\Lambda_{1j}}{2} \right)^2 D_1 \cos[\varphi + \omega t] + \left(\frac{\Lambda_{1j}}{2} \right)^2 D_2 \cos[2\varphi - \omega t] + \dots \right] \right\}, \quad (11)$$

где A_p и A_1 – амплитуды линейной нагрузки соответственно при числе пар полюсов p и 1;

R – внутренний радиус статора;

В обозначениях Λ индекс μ для простоты опущен.

В каждой элементарной машине будет действовать сила одностороннего магнитного притяжения (ОМП) направленная в сторону минимального зазора и действующая на подшипники:

при $p > 1$

$$F_{pej} = \pi R l \frac{(B_{pj} \Lambda_{0j})^2}{2\mu_0} \cdot \frac{\Lambda_{1j}}{\Lambda_{0j}} \cdot \left(\frac{D_{p+1} + D_{p-1}}{2} \right); \quad (12)$$

при $p = 1$

$$F_{1ej} = \pi R l_j \frac{(B_{pj} \Lambda_{0j})^2}{2\mu_0} \cdot \left[1 - \left(\frac{\Lambda_{1j}}{\Lambda_{0j}} \right)^2 \right] \frac{\Lambda_{1j}}{2\Lambda_{0j}} \cdot D_2, \quad (13)$$

где B_{pj} и B_{1j} – амплитуды индукции в ВЗ при

концентричном роторе;

l_j – осевая длина j -го элементарного диска.

Если точка пересечения осей ротора и статора находится за пределами сердечников, то все силы, перпендикулярные оси статора, будут иметь одинаковые направления и результирующая сила ОМП будет равна

$$F = \sum_{j=1}^n F_{\epsilon j}. \quad (14)$$

Асинхронная машина при несимметрии электрических цепей

Несимметрия фазных обмоток статора обнаруживается достаточно просто и в большинстве случаев устраняется. При наличии внутренних коротких замыканий АМ не может эксплуатироваться продолжительное время. Поэтому в данной работе несимметрия фазных обмоток статора не рассматривается.

Несимметрию короткозамкнутой клетки ротора выявить значительно сложнее, поэтому более вероятной становится эксплуатация АМ с указанным дефектом. При несимметричной клетке ротора АМ должны быть описаны системой уравнений напряжения всех контуров статора и ротора.

Рассмотрим вначале АМ с симметричными обмотками статора и ротора.

Дифференциальные уравнения напряжений обмоток статора и ротора АМ в неподвижных осях [12] в матричной форме записи имеют следующий вид:

$$\|u_n\| = \|R_n\| \cdot \|i_n\| + \frac{d}{dt} \|\psi_n\|, \quad (15)$$

где матрицы напряжений и токов имеют форму столбцов, а матрица сопротивлений является диагональной. Матрица потокоцеплений

$$\|\psi_n\| = \|L_n\| \cdot \|i_n\|, \quad (16)$$

где матрица $\|L_n\|$ – квадратная, состоит из индуктивностей и взаимных индуктивностей. Общее число уравнений напряжения будет равно $m_s + m_r$, где $m_s = 3$ – число фаз статора, m_r – число фаз ротора. Фазные обмотки статора симметричны, поэтому вместо трех фаз можно рассматривать только одну с учетом полей взаимной индукции с другими фазами. При этом число уравнений становится равным $(1 + m_r)$.

Активные сопротивления фазы статора и контуров ротора, амплитуды взаимных индуктивностей и индуктивностей рассеяния в урав-

нениях (15) и (16), определяются по формулам [12]. Матричное уравнение (15) записываем в системе осей, вращающихся с синхронной скоростью. Это позволяет получить уравнения с постоянными коэффициентами [13]. Для установившегося режима работы машины из матричного уравнения (15) получаем уравнения в комплексной форме для статора и n -го контура ротора:

$$\dot{U}_s = Z_{ss}\dot{I}_s + Z_{s1}\dot{I}_1 + Z_{s2}\dot{I}_2 + \dots + Z_{sn}\dot{I}_n + \dots + Z_{sm_r}\dot{I}_{m_r} \quad (17)$$

$$0 = Z_{ns}\dot{I}_s + Z_{n1}\dot{I}_1 + \dots + Z_{n,n-1}\dot{I}_{n-1} + Z_{nn}\dot{I}_n + \\ + Z_{n,n+1}\dot{I}_{n+1} + \dots + Z_{nm_r}\dot{I}_{m_r}, \quad (18)$$

где I_s – ток фазы статора; I_1, I_n, I_{m_r} – токи 1-го, n -го и m_r -го контуров клетки ротора.

Полное сопротивление фазы статора Z_{ss} , сопротивления взаимной индукции между контурами ротора и фазой статора для 1-го контура ротора Z_{s1} и для n -го контура ротора Z_{sn} , а также сопротивления взаимной индукции между фазой статора и контурами ротора для 1-го контура Z_{1s} и для n -го контура ротора Z_{ns} определяются по формулам [14].

Рассмотрим теперь АМ с несимметричной клеткой на роторе. Принимаем, что дефект стержня обусловлен увеличением его активного сопротивления, а индуктивное сопротивление остается неизменным. Активное сопротивление n -го дефектного стержня представляем как сумму активного сопротивления R_{cn} стержня при отсутствии дефекта и добавочного сопротивления ΔR_{cn} .

Несимметричная многофазная система токов ротора разлагается на симметричные составляющие прямой, обратной и промежуточной последовательностей. Расчеты показывают, что токи статора, обусловленные токами промежуточных последовательностей ротора, пренебрежимо малы, поэтому можно допустить, что в статоре существуют токи основной частоты f и частоты $f_{o6} = (1-2s)f$, где s – скольжение. Принимаем, что токи частоты f_{o6} обусловлены токами обратной последовательности ротора и существуют в отдельном, независимом контуре статора, который не имеет электромагнитной и электрической связи с контуром тока частоты f , но связан электромагнитно с контурами ротора. Напряжение на зажимах контура частоты f_{o6} уравновешивается падением напряжения во внешней цепи. Оно обычно невелико и может быть принято равным нулю.

Уравнения напряжения контура частоты f_{o6} и n -го контура ротора с учетом их взаимной связи будут иметь следующий вид:

$$0 = Z_{o6o6}\dot{I}_{o6} + Z_{o61}\dot{I}_1 + Z_{o62}\dot{I}_2 + \dots + \\ + Z_{o6n}\dot{I}_n + \dots + Z_{o6m_r}\dot{I}_{m_r}, \quad (19)$$

$$0 = Z_{ns}\dot{I}_s + Z_{o6n}\dot{I}_{o6} + Z_{n1}\dot{I}_1 + \dots + Z_{n,n-1}\dot{I}_{n-1} + \\ + Z_{nn}\dot{I}_n + Z_{n,n+1}\dot{I}_{n+1} + \dots + Z_{nm_r}\dot{I}_{m_r}. \quad (20)$$

В уравнениях (19) и (20) обозначения сопротивлений имеют смысл, аналогичный сопротивлениям в уравнениях (17), (18), но применительно к контуру статора с током частоты f_{o6} . Формулы для определения этих сопротивлений приведены также в [14].

При несимметрии роторной цепи уравнение напряжения статора (17) для токов основной частоты остается без изменения. Записав, уравнение (17), (19) и (20) для всех контуров ротора, получим полную систему из $(2+m_r)$ уравнений. При этом в выражения для сопротивлений $Z_{n,n-1}$, $Z_{n,n}$ и $Z_{n,n+1}$, соответствующие дефектным стержням, должны быть введены добавочные активные сопротивления ΔR_{cn} , учитывающие перетекание токов по стали ротора.

Сопротивление ΔR_{cn} определялось путем решения задачи о перетекании токов по стали ротора между отрезками поврежденного стержня [15]. Для этого была составлена схема замещения клетки ротора с учетом токов перетекания. Переходное сопротивление контакта стержень-сердечник было определено методом [16]. Расчет входного сопротивления между отрезками стержня был выполнен по разработанной программе на ЭВМ и составил $\Delta R_{cn} = (5,5-7,5)Z_c$, где Z_c – полное сопротивление нормального стержня при частоте тока 50 Гц.

Вращающий электромагнитный момент

Электромагнитный момент удобно определить посредством понятия плотности поверхностного тока (ППТ) статора и ротора [12]. Предварительно получено выражение для вращающего момента АМ с симметричной клеткой ротора и равномерным воздушным зазором:

$$M = \frac{\pi D^3 l_s \mu_0}{4p \delta_p} \operatorname{Re} \left\{ j \tilde{A}_s \tilde{A}_r^* \right\}, \quad (21)$$

где D – диаметр отверстия статора,
 l_s и δ_p – расчетные длина и воздушный зазор,
 p – число пар полюсов,
 μ_0 – магнитная проницаемость вакуума,

\tilde{A}_s – комплексная функция ППТ статора,
 \tilde{A}_r^* – сопряженная комплексная функция ППТ ротора.

В АМ с несимметричной клеткой ротора несимметричная система токов создает прямую и обратную волны ППТ:

$$\tilde{A}_{r\text{нec}} = \dot{A}_{r\text{пр}} e^{j(\omega t - \varphi)} + \dot{A}_{r\text{об}} e^{j[(2s-1)\omega t + \varphi]}. \quad (22)$$

где $\dot{A}_{r\text{пр}}$ и $\dot{A}_{r\text{об}}$ – комплексные амплитуды прямой и обратной последовательности ППТ.

В статоре ток I_s основной частоты f и ток $I_{об}$ частоты $f_{об}$ создают каждый свою волну ППТ.

При несимметричной клетке ротора вращающий момент согласно (21) состоит из двух составляющих: статического и пульсирующего с частотой $2s \cdot \omega$.

Статический вращающий момент

$$M_{ст} = \frac{m_s D l \delta w_s k_{os} \mu_o}{\pi r \delta_p} \left(\sin \frac{\alpha}{2} \right) \operatorname{Re} \left[\dot{I}_{об} \sum_{n=1}^{m_r} I_n^* e^{jn\alpha} + \dot{I}_s \sum_{n=1}^{m_r} I_n^* e^{-jn\alpha} \right]. \quad (23)$$

где m_s и m_r – число фаз статора и ротора соответственно,

w_s и k_{os} – число витков и обмоточный коэффициент фазы обмотки статора,

α – «электрический» угол между пазами ротора.

Если АМ имеет несимметрию клетки ротора совместно с эксцентриситетом ротора, то на момент по формуле (23) накладываются асинхронные моменты, обусловленные взаимодействием гармоник поля v_e при эксцентриситете с индуцированными ими токами в роторе. Расчеты показывают, что электромагнитные моменты, возникшие при эксцентриситете значительно меньше, чем по формуле (23).

Проверка адекватности разработанной ММ реальной машине была выполнена для асинхронных двигателей типа АОЛ 22-2 (0,6 кВт, 2800 об/мин) и АОЛ 22-4 (0,4 кВт, 1400 об/мин). Двигатели имели роторы с литой алюминиевой клеткой и числом пазов, равным 18. Обрыв стержней осуществлялся высверливанием алюминия приблизительно по середине длины сердечника.

На рис. 2 и 3 показаны рассчитанные по формуле (23) и измеренные значения вращающего момента при симметричной клетке ротора, а также при различных числах оборванных соседних стержней. Вращающие моменты рассчитаны при добавочном сопротивлении в цепи стержней $\Delta R_{сн} = 6,5 Z_c$, их значения близки к измеренным.

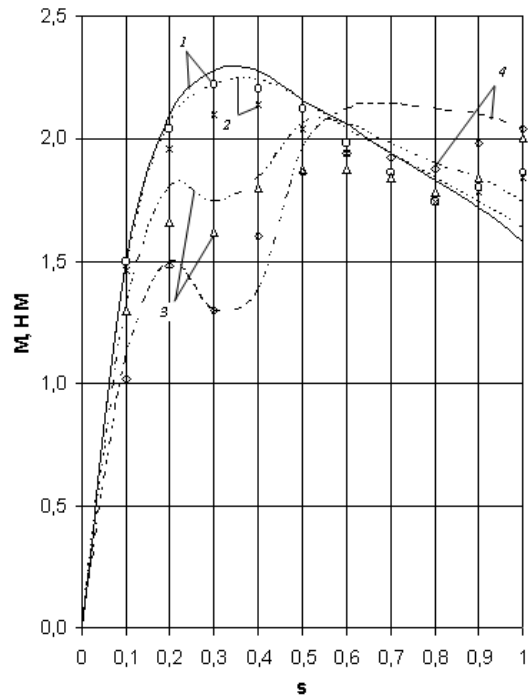


Рисунок 2. Зависимость статического момента от скольжения асинхронного двигателя АОЛ-22-2: 1 – симметричная клетка (— расчет, ○ – опыт); 2 – обрыв одного стержня (---- расчет, × – опыт); 3 – обрыв трех соседних стержней (- · - · - расчет, Δ – опыт); 4 – обрыв пяти соседних стержней (· · · · · расчет, ● – опыт)

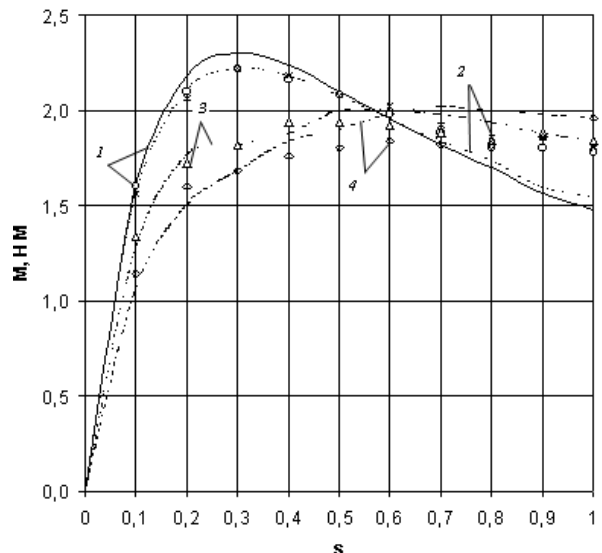


Рисунок 3. Зависимость статического момента скольжения асинхронного двигателя АОЛ-22-4: 1 – симметричная клетка (— расчет, ○ – опыт); 2 – обрыв одного стержня (---- расчет, × – опыт); 3 – обрыв трех соседних стержней (- · - · - расчет, Δ – опыт); 4 – обрыв пяти соседних стержней (· · · · · расчет, ● – опыт)

Таблица

Число оборванных стержней	5	9	13	17	22
В % к общему числу пазов ротора	5	10	15	20	25
Допустимая нагрузка, кВт	465	450	400	350	325
Снижение коэффициента мощности, %	6,7	10	17	22	25

Допустимая нагрузка асинхронного двигателя

С помощью разработанной ММ РАМ могут быть рассчитаны рабочие характеристики АД при различных, названных выше дефектах в разных сочетаниях. Расчеты показывают, что искажения кривой момента, вызванные эксцентриситетом ротора, невелики и практически не влияют на рабочие характеристики. При значительном эксцентриситете ротора, сопровождающимся перекосом осей ротора и статора, сила ОМП может достигать большой величины (формулы (12), (13), (14)).

В настоящее время на промышленных предприятиях скопилось значительное количество АМ с истекшим по стандарту сроком службы, которые имеют в разных сочетаниях названные выше дефекты, могущие ограничить полезную

нагрузку ЭМ. Допустимая нагрузка ограничивается: а) предельным нагревом обмотки, б) предельным частотой вращения по условиям технологического процесса и вентиляции, в) максимальным значением пульсирующего момента, г) предельной силой ОМП.

Имея рабочие характеристики двигателя при наличии дефектов, нетрудно определить его допустимую нагрузку по току статора, равному номинальному значению. В таблице представлены результаты расчетов крупного АД типа А 13-52-8 (500 кВт, 6кВ, 705 об/мин, число пазов ротора $Z_2=86$) при обрыве соседних стержней ротора /17/.

При обрыве 5% расположенных рядом стержней допустимая нагрузка уменьшается на 7%, снижение коэффициента мощности составляет при этом 6,7%.

В данной работе на примере АМ показана разработка ММ при нарушении электромагнитной симметрии многофазной машины. Подход к решению аналогичной задачи для других типов ЭМ в принципе будет таким же, но с учетом специфики типа машины.

Список использованной литературы:

1. Методика электромагнитного расчета трехфазных короткозамкнутых асинхронных двигателей. РТМ ОАБ 689.501. ВНИИ-ЭМ. – 1977.
2. Проектирование электрических машин / И.П. Копылов, Ф.А. Горяинов, Б.К. Клоков и др.; под ред. И.П. Копылова. – М.: Энергия, 2002. – 757 с.
3. Дадиванян Ф.П. Исследование магнитной цепи трехфазных асинхронных машин малой мощности. Автореферат диссертации... канд. техн. наук. – Ленинград, 1978.
4. Никиян Н.Г. Влияние технологии обработки сердечников асинхронных двигателей на их магнитные свойства // Изв. ВУЗ-ов. Электромеханика. – 1987. – № 8, с.27-30.
5. Никиян Н.Г., Йондем М.Е. Влияние технологических факторов на магнитное напряжение сердечников асинхронных машин // Электротехника. – 1988. – №6, – с. 19-21.
6. Казаков В.Н. Никиян Н.Г. Способ расчета магнитного напряжения сердечников электрических машин с учетом последствий их механической обработки // Сб. научных работ XVII науч. конф. студентов. – Оренбургский гос. университет. – Оренбург. – 1995. – С. 108-114.
7. Быковская Л.В. Учет влияния технологии изготовления асинхронных двигателей в расчете магнитной цепи // Тезисы докладов регион. научно-практич. конференции молодых ученых и специалистов Оренбуржья (ч.1). – Оренбург: Изд-во ОГУ, 1999. – с.166-167.
8. Никиян Н.Г. Йондем М.Е., Маилян А.Л. Устройство для определения магнитных характеристик статора асинхронного двигателя // Электротехническая промышленность, сер. Электрические машины. – 1979. Вып. 10 (104). с. 8-9.
9. Геллер Б., Гамата В. Высшие гармоники в асинхронных машинах. – М.: Энергия. – 1981. – 352 с.
10. Йондем М.Е., Никиян Н.Г., Аюпян Г.С. Магнитная проводимость воздушного зазора асинхронной машины при эксцентриситете ротора // Изв. ВУЗ-ов. Электромеханика. – 1985. – №5. – с. 32-35.
11. Никиян Н.Г., Падеев А.С. Магнитное поле и сила одностороннего притяжения при нарушении равномерности воздушного зазора асинхронной машины // Электротехника, 2001. №8, с. 46-50.
12. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины. – М.: Энергия, 1980. – 928 с.
13. Никиян Н.Г. Уравнения напряжений трехфазной асинхронной машины с несимметричной короткозамкнутой клеткой ротора // Изв. АН Армении, сер. техн. наук. 1991. – т XLIV. – №1. – с. 25-30.
14. Никиян Н.Г. Многофазная реальная асинхронная машина: математическое моделирование, методы и средства диагностики: Монография: – Оренбург: ГОУ ВПО ОГУ, 2003. – 334 с.
15. Никиян Н.Г., Митрофанов С.В. Уравнения напряжений и вращающие моменты асинхронной машины с несимметричной короткозамкнутой клеткой ротора // Электричество. – 2000. – № 9, с.45-50.
16. Odok A. Zusatzverluste und Zusatzmomente in Kurzschlussankermotoren mit unisolierten Stdben. – Zyrich: Promotionsarbeit. 1975.
17. Митрофанов С.В. Математическая модель трехфазной асинхронной машины с несимметричной короткозамкнутой клеткой ротора. Автореферат диссертации... канд. техн. наук. – Екатеринбург. УГТУ – УПИ. – 1999. – 18 с.