

УДК 681.5

В. Н. ГАЛУШКО, кандидат технических наук, Д. В. ЕРМОЛЕНКО, кандидат технических наук, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ВОЗНИКНОВЕНИИ МЕЖВИТКОВЫХ ЗАМЫКАНИЙ В ТРЕХФАЗНОМ АСИНХРОННОМ ДВИГАТЕЛЕ

Материал данной статьи связан с математическим описанием электромагнитных процессов, происходящих при межвитковых замыканиях в трехфазных асинхронных двигателях с короткозамкнутым ротором. На основании экспериментальных исследований рассчитываются параметры Т-образной схемы замещения. Предложена технология определения межвитковых замыканий, основанная на графическом отношении токов холостого хода. Данная разработка достаточно просто адаптируется под диагностику трехфазных асинхронных двигателей различных мощностей и исполнения.

Асинхронные двигатели (АД) обладают неоспоримыми достоинствами: надежность в эксплуатации; относительно высокий КПД при номинальной нагрузке; способность выдерживать механические перегрузки и относительно невысокая стоимость обслуживания и ремонта. В железнодорожной отрасли АД массово используются в качестве тяговых (БКГ1, БКГ2, ВЛ80С, Stadler) и вспомогательных приводов электровозов, стрелочных переводов, приводов множества станков в локомотивных и вагонных депо, системах водоснабжения, вентиляции и электроснабжения.

Многие из АД могли бы эксплуатироваться еще длительное время при диагностировании неисправностей на ранней стадии. При комплексном подходе некоторые факторы и параметры следует рассматривать при их взаимном влиянии на работоспособность АД. В этом случае повышается достоверность диагностирования и уменьшается численное значение аварийных отказов.

Применительно к АД отказы можно подразделить на электрические и механические. К электрическим относятся те, которые происходят по причине пробоя изоляции на корпус или между фазами, обрыва проводников в обмотке, замыкания между витками обмоток, нарушение или ослабление контактов в клеммной коробке, снижения сопротивления изоляции ниже допустимого вследствие ее старения или увлажнения. К механическим можно отнести разрушения различного рода в подшипниковых узлах, деформацию вала ротора, ослабление или обрыв бандажей, снижение качества охлаждения из-за загрязнения охлаждающих каналов или корпуса.

В связи с массовым применением АД актуальной задачей видится создание системы диагностики, позволяющей выявить дефекты на ранней стадии обнару-

жения. Это позволит обеспечить сохранность оборудования, избежать внеплановых ремонтов, а также временных задержек в производственном и транспортно-технологическом процессе.

Методы диагностики АД (в том числе и по межвитковым замыканиям) достаточно подробно освещены в [1], где, однако, указывается необходимость использования Фурье-анализа для распределения видов повреждений. Также исчерпывающий подбор по вопросам диагностики в АД приведен в [2].

Полученные статистические результаты на Белорусской железной дороге [3] указывают на значимость анализа таких отказов, как межвитковые замыкания (МВЗ) (27 %) и работу подшипникового узла. Исследование процессов, происходящих при возникновении МВЗ, предпринимались многими отечественными и зарубежными авторами. Например, в [4] на модели, построенной с помощью программного обеспечения MatLab/Si-mulink с помощью библиотеки блоков SimPowerSystem. В источнике [5] указано, что количество неисправностей, приходящихся на МВЗ, достигает 78 % от всех неисправностей АД, а в работе [6] – на долю МВЗ приходится 93 %.

Математическое описание процессов, происходящих при МВЗ в АД с короткозамкнутым ротором (КЗР), основанное на экспериментальных исследованиях и построении адекватной аналитической модели, позволит в дальнейшем с большей вероятностью на основе разработанных приборов распознать негативные процессы на ранних стадиях возникновения МВЗ. За основу для расчета рабочих характеристик АД с КЗР в установившемся режиме холостого хода удобно взять его упрощенную математическую модель, которая основана на Т-образной схеме замещения (рисунк 1).

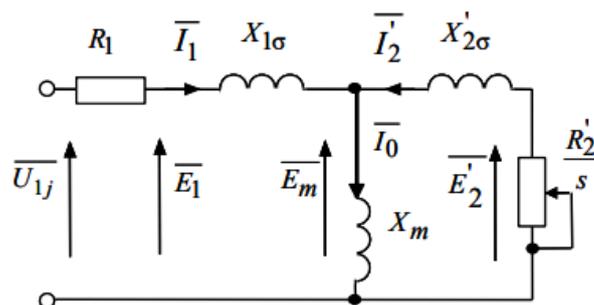


Рисунок 1 – Т-образная схема замещения фазы АД

На рисунке 1 приняты следующие обозначения:  $U_{1j}$  – фазное напряжение обмотки статора;  $R_1$  и  $R'_2$  – активные сопротивления обмотки статора и ротора, приведенные к обмотке статора;  $X_{1\sigma}$  и  $X'_{2\sigma}$  – индуктивные сопротивления рассеяния обмотки статора и ротора, приведенной к обмотке статора;  $I_1$  – ток обмотки статора;  $\underline{E}_1$  и  $\underline{E}'_2$  – ЭДС обмотки статора и ротора, приведенная к обмотке статора;  $s$  – скольжение;  $E_m$  – ЭДС от главного магнитного потока машины.

Основные уравнения АД для Т-образной схемы замещения имеют следующий вид:

$$\underline{U}_{12j} = \underline{E}_m - jX_{1\sigma}I_1 - R_1I_1;$$

$$\underline{E}_m + jI'_2X'_{2\sigma} + I'_2 \frac{R'_2}{s} = 0;$$

$$I_1 + I'_2 - I_0 = 0.$$

Ток ротора  $I'_2$ , приведенный к обмотке статора АД, из схемы замещения определяется по формуле

$$I'_2 = \frac{U_{1j}}{\pm \sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + X_{\text{кн}}^2}},$$

где  $X_{\text{кн}} = X_1 + X'_2$  – индуктивное сопротивление короткого замыкания.

Ток статора  $I_1$  определяется путем сложения вектора тока намагничивания  $I_0$  и вектора тока ротора  $I_2$ :

$$I_1 = I_0 + I_2.$$

Принимая во внимание, что ток намагничивания является реактивным, получим

$$I'_2 = \sqrt{I_0^2 + I_2^2 + 2I_0I_2 \sin \psi_2};$$

$$\sin \psi_2 = \frac{x_{\text{кн}}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + X_{\text{кн}}^2}}.$$

Электромагнитный момент рассчитываем по формуле

$$M_j = \frac{m_1 U_{1j}^2 R'_2}{\omega_0 s \left[ \left( R_1 + \frac{R'_2}{s} \right)^2 + (X_{1\sigma} + X'_{2\sigma})^2 \right]},$$

где  $\omega_0$  – синхронная угловая скорость;  $m_1$  – число фаз статора (в нашем случае  $m_1 = 3$ ).

В результате расчетов, получаем зависимости  $n_2$ ,  $s$ ,  $M_2$ ,  $I_1$ ,  $\cos \phi_1$ ,  $\eta$  и  $P_1$  от  $P_2$  при  $U_1 = \text{const}$  и  $f_1 = \text{const}$ .

Аналитическую модель дополняет расчет токов для различных способов подключения АД с КЗР к трехфазной сети: звездой с нейтральным проводом, звездой с изолированной нейтралью; треугольником. Расчетные формулы широко известны и приведены ниже.

1 Схема подключения обмоток – «звезда с нейтральным проводом».

Так как в схеме есть нейтральный провод, то напряжение на фазах нагрузки равно соответствующему фазному напряжению источника питания:

$$\underline{U}_a = \underline{U}_A = U_\phi, \underline{U}_b = \underline{U}_B = U_\phi e^{-j120^\circ}, \underline{U}_c = \underline{U}_C = U_\phi e^{j120^\circ}.$$

Токи в линейных проводах (фазные токи) определяем с помощью закона Ома через эквивалентное полное сопротивление фаз АД:

$$\underline{I}_A = \underline{I}_a = \underline{U}_a / \underline{z}_a, \underline{I}_B = \underline{I}_b = \underline{U}_b / \underline{z}_b, \underline{I}_C = \underline{I}_c = \underline{U}_c / \underline{z}_c.$$

Ток в нейтральном проводе находим по первому закону Кирхгофа

$$\underline{I}_N = \underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C.$$

2 Схема подключения обмоток – «звезда с изолированной нейтралью».

Для определения фазных напряжений при несимметричной нагрузке, соединенной звездой без нейтрального провода, используют метод двух узлов. В соответствии с этим методом расчет начинают с определения напряжения  $U_N$  между нейтральными точками источника питания и нагрузки, называемого напряжением смещения нейтрали:

$$\underline{U}_N = \frac{\underline{U}_A y_a + \underline{U}_B y_b + \underline{U}_C y_c}{y_a + y_b + y_c},$$

где  $y_a$ ,  $y_b$ ,  $y_c$  – полные проводимости соответствующих фаз нагрузки в комплексной форме,  $y_a = 1/\underline{z}_a$ ,  $y_b = 1/\underline{z}_b$ ,  $y_c = 1/\underline{z}_c$ .

Напряжения на фазах несимметричной нагрузки находят из выражений

$$\underline{U}_a = \underline{U}_A - \underline{U}_N; \underline{U}_b = \underline{U}_B - \underline{U}_N; \underline{U}_c = \underline{U}_C - \underline{U}_N.$$

Фазные токи в нагрузке, они же токи линейных проводов при любом характере нагрузки,

$$\underline{I}_A = \underline{I}_a = \underline{U}_a / \underline{z}_a; \underline{I}_B = \underline{I}_b = \underline{U}_b / \underline{z}_b; \underline{I}_C = \underline{I}_c = \underline{U}_c / \underline{z}_c.$$

3 Схема подключения обмоток – «треугольник».

Фазные токи в нагрузке определяют с помощью закона Ома для участка цепи  $\underline{I}_\phi = \underline{U}_\phi / \underline{z}_\phi$ , где  $U_\phi$  – соответствующее линейное напряжение источника питания;  $z_\phi$  – полное сопротивление соответствующей фазы нагрузки. Токи в линейных проводах определяют через фазные на основании первого закона Кирхгофа для каждого узла:

$$\underline{I}_A = \underline{I}_{ab} - \underline{I}_{ca}; \underline{I}_B = \underline{I}_{bc} - \underline{I}_{ab}; \underline{I}_C = \underline{I}_{ca} - \underline{I}_{bc}.$$

Основные положения при аналитическом расчете сопротивлений обмоток при МКЗ.

Определение активных и индуктивных сопротивлений статора и ротора. Активные сопротивления рассчитывают для температуры 200 °С, а при определении потерь их приводят к стандартной рабочей температуре по ГОСТ 183, как указано в [7], путем умножения их на коэффициент.

При расчете индуктивных сопротивлений полей рассеяния ( $X_{1\sigma}$ ) условно разбивают на три составляющие: пазовое, дифференциальное и лобовых частей обмоток. Без МКЗ для каждой составляющей определяем магнитную проводимость ( $\lambda_{\text{п}}$ ;  $\lambda_{\text{д}}$ ;  $\lambda_{\text{л}}$ ); суммируем эти проводимости и по ним рассчитываем индуктивное сопротивление.

Проводимость пазового рассеяния зависит от формы и размеров паза. Проводимость дифференциального рассеяния обусловлена высшими гармониками. Высшие гармоники поля статора наводят токи в обмотке ротора. Скоп пазов уменьшает демпфирующую реакцию токов. Этот параметр при МКЗ можно учитывать косвенно на основании эмпирических связей путем выполнения гармонического анализа с помощью цифрового осциллографа.

Проводимость рассеяния лобовых частей обмотки зависит от количества пазов на полюс и фазу, длины лобовой части катушки и от укорочения шага обмотки.

Кроме того, при пуске, а также в двигательном режиме работы от  $s = 1$  до  $s_{\max}$  (соответствующем  $M_{\max}$ ), следует учитывать явление насыщения путем потоков рассеяния, которое зависит от величины токов, протекающих в пазах, и уменьшает индуктивные сопротивления статора и ротора. Таким образом, разным режимам работы двигателя: номинальному, пусковому и максимальному – соответствуют различные значения сопротивлений в схеме замещения. Поэтому в нашем исследовании выполняем расчеты для режима холостого хода.

При МВЗ уменьшается число витков, увеличивает-ся рассеяние магнитных потоков, растет температура в месте неисправности. Ниже приведены формулы для определения активных и индуктивных сопротивлений обмоток при температуре 20 °С и без учета влияния явлений вытеснения тока в обмотке короткозамкнутого ротора и насыщения путей потоков рассеяния статора и ротора. При МКЗ насыщение происходит, что также требует учета этого фактора.

Активное сопротивление обмотки статора

$$R_1 = w_1 l_{\text{ср1}} / (\rho_{\text{м20}} a_1 c S \cdot 10^3),$$

где  $w_1$  – количество витков в обмотке фазы;  $l_{\text{ср1}}$  – средняя длина витка обмотки;  $b_{\text{ср1}}$  – средняя ширина катушки обмотки статора;  $\rho_{\text{м20}} = 57$  См/мкм – удельная электрическая проводимость меди при 20 °С;  $a_1$  – количество параллельных ветвей обмотки статора;  $c$  – количество элементарных проводов в эффективном;  $S$  – площадь поперечного сечения.

Индуктивное сопротивление обмотки фазы статора

$$X_{1\sigma} = 1,58 f_1 l_1 \omega_1^2 \lambda_1 / (p q_1 \cdot 10^8),$$

где  $l_1$  – длина сердечника статора;  $\lambda_1$  – коэффициент проводимости рассеяния поля статора;  $q_1$  – количество пазов на полюс и фазу.

Сопротивление обмотки короткозамкнутого ротора, например, с овальными полузакрытыми и закрытыми пазами.

Активное сопротивление стержня клетки при 20 °С

$$R'_2 = l_2 / (\rho_{\text{а20}} s_{\text{ст}} \cdot 10^3),$$

где  $\rho_{\text{а20}}$  – удельная электрическая проводимость алюминия при 20 °С,  $\rho_{\text{а20}} = 27$  См / мкм;  $l_2$  – длина сердечника ротора.

Индуктивное сопротивление обмотки ротора, Ом,

$$X'_{2\sigma} = 7,9 f_1 l_2 \lambda_2 \cdot 10^{-9},$$

$\lambda_2$  – коэффициент проводимости рассеяния обмотки ротора.

Реактивное сопротивления намагничивающего контура ( $X_m$ ) при МКЗ определяем на основе эмпирически полученных зависимостей  $\Psi(I_0)$  для режима холостого хода АД.

Для получения исходных данных при МВЗ в качестве испытуемых электродвигателей были использованы несколько трехфазных АД мощностью от 0,12 до 1,7 кВт с однослойной всыпной обмоткой, класс изоляции – В. В расчетах использовались паспортные данные АД, измеряемые линейные токи, потребление

активной мощности  $P, \cos\phi$ , температура окружающей среды и в зоне МВЗ, данные RLC-метров. Искусственно были созданы повреждения изоляции для различного числа витков. Выполнялось контролируемое управление режимами МКЗ (включение, отключение, переключение на различное число витков) осуществлялось с помощью реле, закрепленного на подшипниковой крышке.

Авторами было предложено для определения МВЗ при непрерывном контроле токов на холостом ходу АД использовать отношения токов  $I_A/I_B, I_A/I_C, I_C/I_B$  при контроле сетевого напряжения. Программное обеспечение на компьютере импортирует полученные исходные данные в графическом виде для дальнейшей обработки в сверточные нейронные сети. Обучающая выборка должна включать достаточно большой массив данных. В нашем случае из всех результатов 80 % используется для обучения. Использование графических изображений позволяет унифицировать исследования для АД различных мощностей и легко адаптировать под различное исполнение. В данном исследовании разработанная авторами сверточная ИНС реализована в библиотеке Tensor Flow для языка Python 3.10 и частично рассмотрена в статье [8].

По результатам экспериментов при МВЗ определялись изменения активных и индуктивных сопротивлений. Затем с помощью аналитической модели рассчитывались действующие значения токов, которые сравнивались с результатами экспериментальных измерений. Полученное среднее отклонение результатов модели и экспериментов составило менее 5 %.

На основании экспериментов и результатов моделирования был составлен обобщенный алгоритм контроля токов определения МВЗ при различных схемах подключения обмоток.

1 Схема подключения обмоток – «звезда с нейтральным проводом»: увеличивалось отношение фазного тока по отношению к двум оставшимся фазным токам.

2 Схема подключения обмоток – «звезда с изолированной нейтралью»: увеличение двух фазных токов (для однослойной всыпной обмотки), одним из которых является ток в поврежденной обмотке, и снижение оставшегося, при неизменном линейном напряжении во время измерений.

Например, для АД 1,5 кВт (50 проводников в фазе) при закороченном 21 витке увеличение тока составляло более 2 % номинального (рисунок 2).

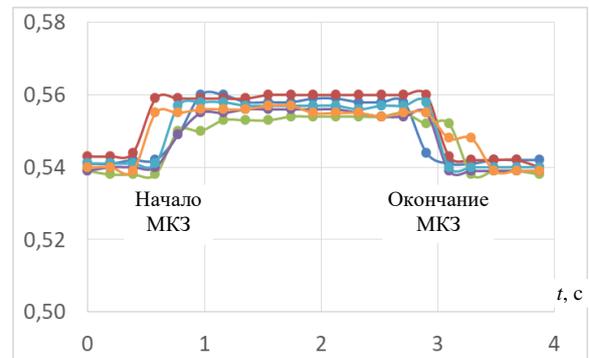


Рисунок 2 – Пример увеличения тока в поврежденной обмотке АД при МВЗ

3 Схема подключения обмоток – «треугольник»: увеличение отношений линейного тока по отношению к двум оставшимся линейным токам.

С ростом числа короткозамкнутых витков отношение линейных токов увеличивается.

Также авторами был применен способ исследования механических, электрических и тепловых 3D-параметров АД с КЗР с помощью программы Ansys и библиоте-

ки к ней. Исходными данными являлись помимо паспортных параметров еще и результаты расчета описанной аналитической модели в программе Mathcad.

Пример полученной анимации электромагнитных процессов АД представлен на рисунке 3 в виде характеристик электромагнитного поля с цветовой дифференциацией различных физических величин или в виде векторов.

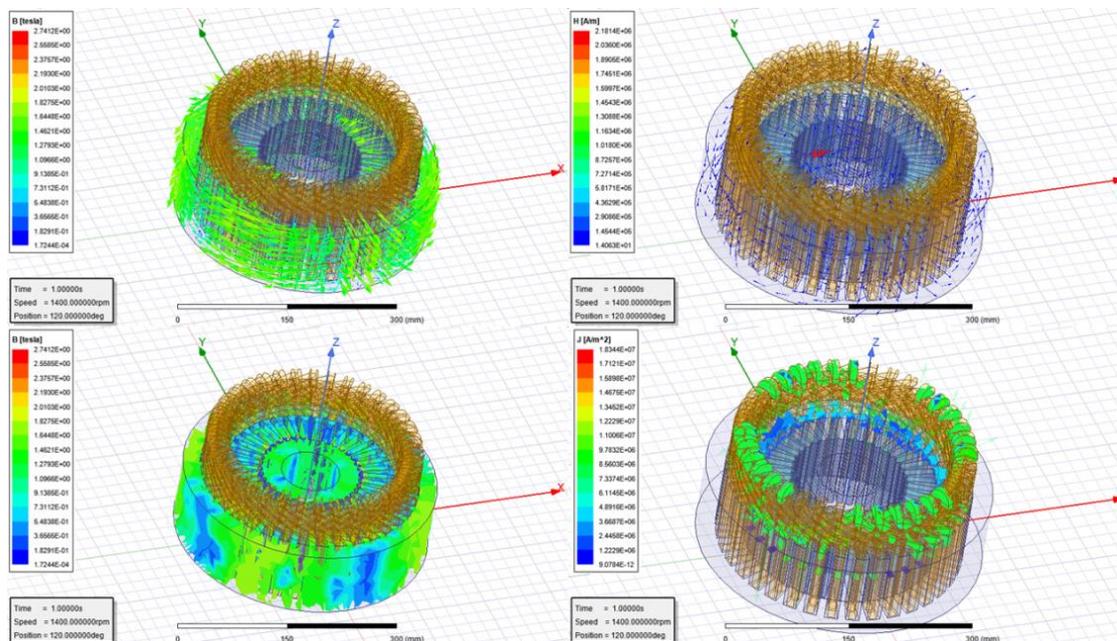


Рисунок 3 – Анализ 3D-модели различных полей Ansys Electronics

Понимание процессов, происходящих при межвитковых замыканиях в трехфазных асинхронных двигателях с короткозамкнутым ротором, с помощью аналитической модели, основанной на экспериментальных исследованиях позволит с большей вероятностью распознавать МВЗ электромагнитные процессы на ранних стадиях возникновения. Технология, основанная на непрерывном контроле отношений токов для холостого хода, позволяет унифицировать исследования для АД с КЗР различных мощностей и легко адаптировать под различное исполнение.

#### Список литературы

- 1 Дайнеко, В. А. Методы диагностики асинхронных электродвигателей в рабочих режимах и перспективы их применения / В. А. Дайнеко, Ж. Г. Юрковец // Агропанорама. – 2021. – № 4 (146). – С. 22–25.
- 2 Condition of induction motor: A review / R. N. Dash [et al.] // International conference on Signal Processing, Communication, Power and Embedded System. – Odisha, 2016. – P. 2006–2011.
- 3 Мирош, Д. В. Анализ неисправностей асинхронных двигателей железнодорожной отрасли и их диагностика на

базе искусственного интеллекта / Д. В. Мирош, В. Н. Галушко, И. Л. Громыко // Энергоэффективность. – 2023. – № 4 (306). – С. 30–32.

4 Солодкий, Е. М. Диагностика межвиткового замыкания обмотки статора асинхронного двигателя на основе анализа траектории вращения вектора тока статора / Е. М. Солодкий, С. В. Сальников, Д. А. Даденков // Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2020. – № 34. – С. 114–127.

5 Bonnett, A. H. Cause and analysis of stator and rotor failures in three-phase squirrel-cage induction motors / A. H. Bonnett, J. C. Soukup // IEEE Trans. Industry Applications. – 1992. – Vol. 28, no. 4. – P. 921–937.

6 Воробьев, В. Е. Прогнозирование срока службы электрических машин: письменные лекции / В. Е. Воробьев, В. Я. Кучер. – СПб.: СЗТУ. – 2004. – 56 с.

7 Гольдберг, О. Д. Проектирование электрических машин: учеб. для вузов / О. Д. Гольдберг; под ред. О. Д. Гольдберга. – М.: Высш. шк., 1984. – 431 с.

8 Громыко, И. Л. Диагностический комплекс трансформаторов и его применение с помощью сверточных нейронных сетей / И. Л. Громыко, В. О. Белькин, В. Н. Галушко // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2022. – № 2 (45). – С. 92–96.

Получено 27.02.2024

**V. N. Galushko, D. V. Ermolenko.** Modeling of electromagnetic processes when operation of interturn failures in a three-phase induction motor.

The material in this article is related to the mathematical description of electromagnetic processes occurring during interturn short circuits in three-phase asynchronous motors with a squirrel-cage rotor. Based on experimental studies, the parameters of the T-shaped equivalent circuit are calculated. A technology for determining interturn short circuits is proposed, based on the graphical relationship of no-load currents. This development is quite easily adapted to the diagnosis of three-phase asynchronous motors of various powers and designs.