

УДК 621.313.333

СИНТЕЗ ПАРАМЕТРОВ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ИСПЫТАНИЙ

Сивокобыленко В.Ф., д.т.н., проф., Павлюков В.А., к.т.н., доц.

Донецкий национальный технический университет

83000, г. Донецк, ул. Артема, 58

E-mail: svf@elf.dgtu.donetsk.ua

Наведено методику синтезу нелінійних, залежних від струму, параметрів схеми заміщення асинхронних двигунів за даними дослідів неробочого ходу і короткого замикання. Розроблено математичну модель двигуна для аналізу динамічних режимів з урахуванням втрат в сталі. Приведені результати експериментів і моделювання для двигуна з литою мідною короткозамкнутою обмоткою ротора.

Ключові слова: асинхронний двигун, схема заміщення, математична модель, насичення магнітних ланцюгів, динамічні характеристики.

The paper presents a method of synthesis of current-dependent nonlinear parameters of asynchronous motors equivalent circuit due to the data of experiments of idling and short circuit. The mathematical model of the motor for the analysis of the dynamic modes taking into account the iron losses is developed. The results of experiments and design for the motor with the poured copper short-circuited rotor are resulted.

Key words: asynchronous motor, equivalent circuit, mathematical model, saturation of magnetic circuits, dynamic characteristics.

Введение. В последнее время в электроэнергетическом машиностроении внедряются новые эффективные технологии производства электрических машин, к числу которых относятся изготовление медных литых короткозамкнутых обмоток роторов, использование высококачественных магнитных сталей и др. В связи с этим актуальным является разработка методов синтеза параметров и математических моделей вновь разрабатываемых асинхронных двигателей (АД).

Анализ предыдущих исследований. В последние годы рядом авторов опубликованы работы, посвященные совершенствованию методов синтеза параметров и математических моделей АД. Так, для учета эффекта вытеснения тока в роторе в [1] предложено использовать многоконтурную схему замещения ротора, что повышает точность моделирования режимов пуска и самозапуска двигателей. Однако, применительно к таким схемам замещения требуется разработка способов учета явлений насыщения главного магнитного потока и потоков рассеяния. В работах [2, 3] рассматриваются методы учета явления насыщения магнитных цепей по пути главного магнитного потока, а учету потоков рассеяния не уделяется внимания.

Цель работы – разработка методики синтеза параметров схемы замещения и математической модели АД с учетом явлений насыщения магнитных цепей и потерь в стали с использованием полученных из опытов характеристик короткого замыкания (КЗ) и холостого хода (ХХ).

Материал и результаты исследований. Предложенная в работе методика реализована на примере нового типа АД с литой медной короткозамкну-

той обмоткой ротора, разработанного в УкрНИИВЭ [4]. Для опытного образца АД (ПЭД45-117МВ5) с литой короткозамкнутой обмоткой ротора с номинальными: активной мощностью - 45 кВт, напряжением статора - 1400 В, током статора - 25,4 А, частотой вращения ротора - 2831 об/мин, скольжением - 5,63 % , коэффициентом мощности - 0,865, КПД - 84,2 % были проведены испытания по ГОСТ 7217-87. В объем испытаний входили замеры сопротивлений статора и снятие характеристик рабочих, холостого хода, короткого замыкания. Значение кратности пускового тока статора по данным испытаний составило - 6,7; вращающих моментов: пускового - 2,13; максимального - 2,53; минимального - 1,4; критического скольжения - 0,03. Характеристики холостого хода и короткого замыкания приведены на рис. 1.

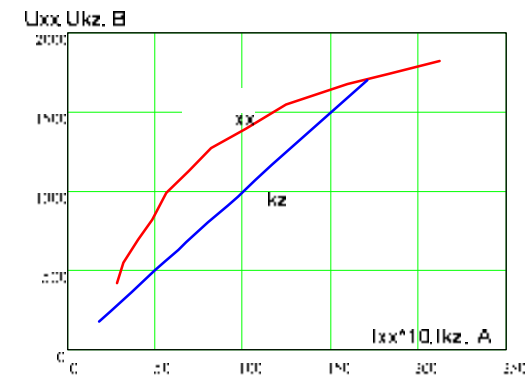


Рисунок 1 – Характеристики холостого хода и короткого замыкания АД

Расчет входных сопротивлений статора проводился с использованием следующих соотношений:

$$Z_{\text{вх}} = \frac{U}{\sqrt{3} \cdot I}, R_{\text{вх}} = \frac{P}{3 \cdot I^2}, X_{\text{вх}} = \sqrt{Z_{\text{вх}}^2 - R_{\text{вх}}^2} \quad (1)$$

Активное сопротивление статора по данным замеров составило 1,75 Ом или 0,055 относительных единиц (о. е.). Как следует из характеристики КЗ, входное активное сопротивление АД мало зависит от величины тока статора, что свидетельствует об отсутствии влияния эффекта вытеснения тока на сопротивления ротора. Поэтому при заторможенном двигателе активное сопротивление ротора найдем из характеристики КЗ как:

$$3,2 - 1,75 = 1,45 \text{ Ом (0,045 о. е.)}$$

В то же время анализ входных сопротивлений АД, найденных из опыта КЗ, показал, что имеет место зависимость индуктивностей рассеяния статора и ротора от тока.

Характер зависимости входного индуктивного сопротивления АД от тока статора в опыте КЗ показан на рис. 2, из которого следует, что имеет место существенное насыщение магнитных потоков рассеяния обмоток статора и ротора при токах, не превышающих номинальные, принимаем одинаковыми и равными 3,8 Ом (0,119 о.е.). При токах, больших номинальных, экспериментальные зависимости этих сопротивлений аппроксимируем с помощью нелинейных функций, выражения для которых приведены ниже. Все используемые в них величины выражены в относительных единицах.

$$\begin{aligned} X_s(I_s) &= 0,085 \cdot I_s^{-0,8} + 0,037; \\ X_r(I_r) &= 0,085 \cdot I_r^{-0,8} + 0,037. \end{aligned} \quad (2)$$

Исходная экспериментальная и рассчитанная по (2) характеристики для индуктивного сопротивления статора показаны на рис. 2 Аналогичная функциональная зависимость получена и для цепи ротора.

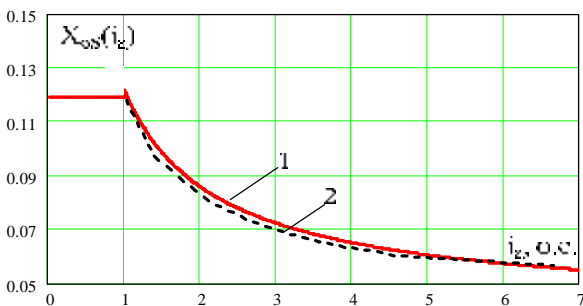


Рисунок 2 – Зависимость индуктивного сопротивления рассеяния статора АД от тока (1 - аппроксимация, 2 - эксперимент)

С учетом найденных из опыта холостого хода активного и индуктивного входных сопротивлений АД представляется возможным найти теперь последовательно включенные активное и индуктивное сопротивления ветви намагничивания, так как сопротивления цепи статора известны.

$$R_{\mu}(I_{\mu}) = R_{\text{вх}}(I_{\mu}) - R_s; X_{\mu}(I_{\mu}) = X_{\text{вх}}(I_{\mu}) - X_s(I_{\mu}) \quad (3)$$

Характер изменения зависимостей (3) приведен на рис. 3.

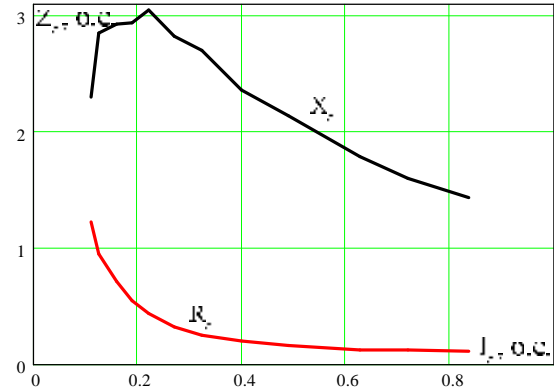


Рисунок 3 – Зависимости сопротивлений ветви намагничивания от тока, найденные из характеристики холостого хода

Для АД с литой КЗ обмоткой ротора была выбрана эквивалентная Т-образная схема замещения. В отличие от общепринятой схемы предложено, кроме R, L контуров статора и ротора, учитывать также потери в стали статора с помощью дополнительного R_{fe}, L_{fe} контура. При этом все указанные выше контуры связаны общей взаимной индуктивностью L_m. В некоторых работах, например [3], потери в стали учитывают двумя составляющими, одна из которых отражает влияние вихревых токов, а другая - влияние гистерезиса. Однако, в данном случае, как будет показано далее, более целесообразно учет потерь в стали осуществлять с помощью одной дополнительной R_{fe}, L_{fe} – ветви, в которой нелинейную зависимость от тока имеет только активное сопротивление. Принятая схема замещения показана на рис. 4.

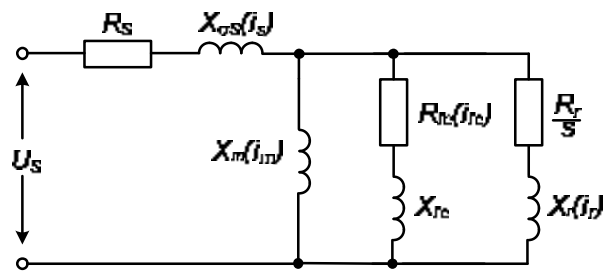


Рисунок 4 – Эквивалентная Т-образная схема замещения АД с контуром потерь в стали и нелинейными зависимостями параметров от токов

Укажем способ определения параметров принятой схемы замещения, исходя из данных испытаний.

Как отмечено выше, для повышения точности математической модели при анализе динамических режимов целесообразно учитывать потери в стали с помощью отдельно выделенного контура. Нелинейные зависимости (3) заменим теперь двумя парал-

лельно включеними ветвями $R_{fe}(I_{fe})$, X_{fe} і $X_m(I_m)$, як це показано на схемі заміщення (рис. 4). При цьому друга ветвь отражает общую взаимную индуктивность цепей статора и ротора. Замена (3) производится путем решения нелинейной системы уравнений, полученной из условия равенства проводимостей ветвей и сохранения таких же, как исходные, значений потребляемой активной мощности на намагничивание. В результате решения полученные характеристики аппроксимированы аналитическими зависимостями:

$$R_{fe}(I_{fe}) = \begin{cases} 8 + 21 \times I_{fe} & \text{при } I_{fe} \leq 0,14 \\ -170 \times I_{fe}^2 + 163 \times I_{fe} - 8 & \text{при } 0,14 < I_{fe} < 0,75 \\ 16 \times I_{fe}^2 - 50 \times I_{fe} + 47 & \text{при } I_{fe} \geq 0,75 \end{cases}$$

$$X_{fe} = 0,1; \quad X_m(I_m) = 1,25 \times I_m^{-0,75}$$

На рис. 5 показаны исходные и аппроксимированные характеристики активного сопротивления в цепи ветви, отражающей потерь в стали.

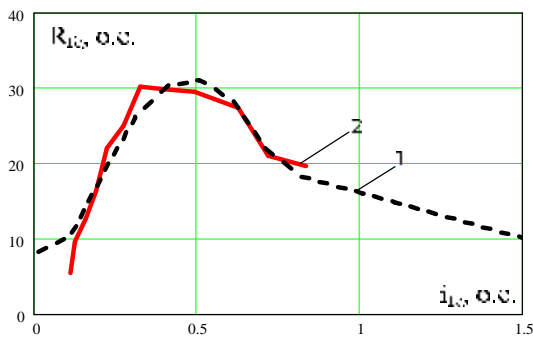


Рисунок 5 – Зависимость от тока активного сопротивления в цепи учета потерь в стали АД
1 – аппроксимация; 2 – эксперимент

Математическая модель АД для анализа динамических и статических режимов работы составлена с использованием результатов синтеза параметров, показанных на схеме заміщення (рис. 4). Она состоит из системы семи дифференциальных уравнений, в которых в качестве неизвестных приняты токи статора, ротора, контура потерь в стали, а также частота вращения ротора. Параметры схемы заміщення существенно нелинейны, так как зависят от соответствующих токов, в связи с чем при решении дифференциальных уравнений требуется на каждом шаге расчета производить обращение матрицы коэффициентов при производных. Ниже указанные уравнения (4) записаны в векторной форме и для решения на ЭВМ необходимо их представить в проекциях, например, на неподвижные относительно статора координатные оси α, β или на вращающиеся с синхронной скоростью оси X, Y или др. Переход к переменным в фазных координатах производится с использованием известных формул.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{u} \\ p \mathbf{i}_s \\ p \mathbf{i}_r \\ p \mathbf{i}_{fe} \end{bmatrix} = L^{-1} \begin{bmatrix} \mathbf{u}_s - R_s \mathbf{i}_s \\ 0 - R_r \mathbf{i}_r - j\omega(L_{\sigma r}(i_r) \mathbf{i}_r + L_m(i_m) \mathbf{i}_m) \\ 0 - R_{fe} \mathbf{i}_{fe} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$$p\omega = \frac{1}{J} [(L_{\sigma s}(i_s) \cdot \mathbf{i}_s + L_m(i_m) \cdot \mathbf{i}_m) \cdot \mathbf{i}_s - m_c(\omega)],$$

$$L = \begin{bmatrix} L_{\sigma s}(i_s) + L_m(i_m) & L_m(i_m) & L_m(i_m) \\ L_m(i_m) & L_{\sigma r}(i_r) + L_m(i_m) & L_m(i_m) \\ L_m(i_m) & L_m(i_m) & L_{fe}(i_{fe}) + L_m(i_m) \end{bmatrix}$$

где L – матрица индуктивностей, $\mathbf{i}_m = \mathbf{i}_s + \mathbf{i}_r + \mathbf{i}_{fe}$ – ток в цепи взаимной индуктивности, $m_c(\omega)$ – момент сопротивления механизма, J – механическая постоянная времени агрегата, ω – частота вращения ротора агрегата, p – оператор дифференцирования, \mathbf{U}_s – напряжение, приложенное к обмотке статора. В матричной части системы уравнений (4) первое уравнение соответствует цепи статора, второе – цепи ротора и третье – цепи потерь в стали.

Система дифференциальных уравнений (4) для различных электромагнитных и электромеханических переходных режимов работы АД была решена стандартным методом Рунге-Кутты четвертого порядка с фиксированным шагом расчета, равным 0,0001 с. Программа расчета на ПЭВМ реализована в пакете автоматизации математических расчетов MathCad.

Для подтверждения адекватности полученной математической модели исследуемому АД по ней были рассчитаны характеристики КЗ и ХХ, которые практически совпали с исходными.

С помощью программы были рассчитаны режимы пуска, наброса и сброса нагрузки, а также режим КЗ на выводах работающего двигателя. Ниже на рис. 6 - 10 показаны некоторые результаты расчетов основных режимных параметров АД: токов статора, ротора, вращающего момента, частоты вращения, а также потерь мощности в обмотках и магнитопроводе при пуске АД.

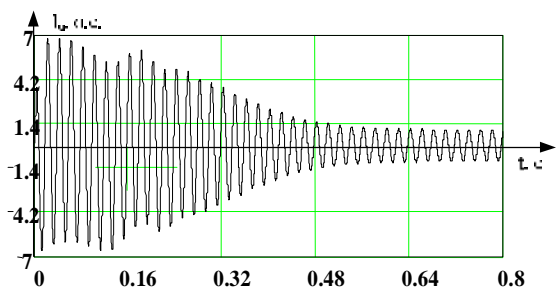


Рисунок 6 – Расчетная зависимость от времени тока статора в фазе А при пуске АД

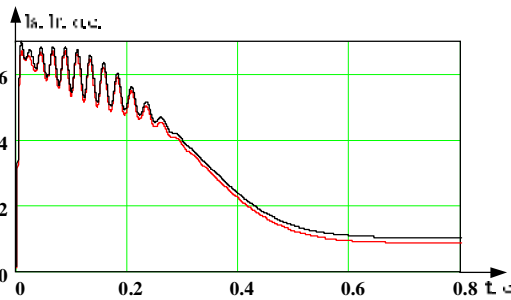


Рисунок 7 – Характер изменения во времени модулей токов статора и ротора при пуске АД

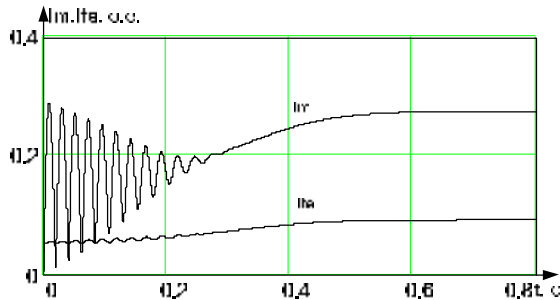


Рисунок 8 – Характер изменения модулей токов в ветвях потерь в стали и взаимоиנדукции при пуске АД

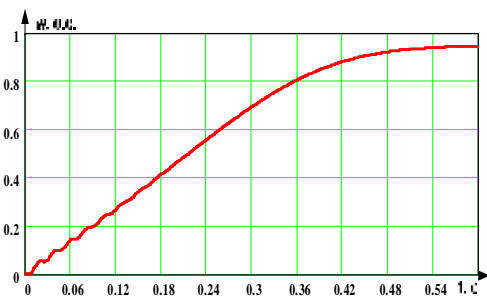


Рисунок 9 – Расчетная зависимость во времени частоты вращения ротора при пуске АД

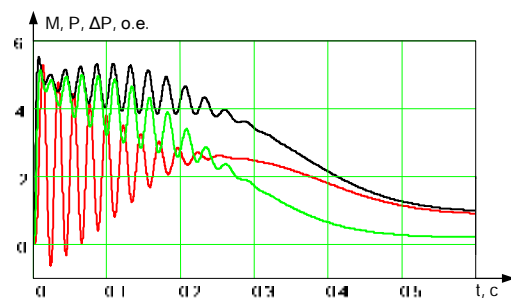


Рисунок 10 – Характер зависимостей во времени потребляемой мощности, вращающего момента и потерь мощности в АД при его пуске

Как видно из приведенных данных, в режимах пуска максимальное значение динамического момента превышает номинальный в 5,3 раза, а время его затухания составляет порядка 0,2 с. Ток намагничивания в начале пуска, так же как и момент, имеет колебательный характер, тогда как в ветви

учета потерь в стали в токе не наблюдается колебаний из-за большого активного сопротивления в этой цепи. Время пуска АД под нагрузкой при номинальном напряжении составляет около 0,5 с. Полученные данные представляются возможным использовать для выбора оптимальных параметров при разработке нового типа двигателей.

Выводы.

1. С использованием экспериментальных характеристик ХХ и КЗ для АД с литой обмоткой ротора разработана методика синтеза параметров схемы замещения с учетом зависимостей от тока индуктивных сопротивлений рассеяния статора, ротора и ветви намагничивания.

2. Для более точного учета потерь в стали при математическом моделировании динамических режимов АД предложен метод разделения ветви намагничивания на параллельно включенные контур взаимоиנדукции и активно-индуктивный контур для учета потерь в стали.

3. Приведены результаты математического моделирования статических и динамических режимов работы опытного образца АД с номинальными данными: мощностью - 45 кВт, напряжением - 1400 В, частотой вращения - 2831 об/мин с литой короткозамкнутой обмоткой ротора, предназначенного для привода погружных насосов.

4. Приведенная в работе методика математического моделирования АД может быть рекомендована для оптимизации параметров и характеристик новых разработок асинхронных двигателей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сивокобыленко В.Ф., Павлюков В.А. Расчет параметров схем замещения и пусковых характеристик глубокопазных асинхронных машин // Электротехника. - 1979, №10, - С. 35-39.

2. Родькин Д.И., Мартыненко В.А., Барвинок Д.В., Гераскин А.С. Энергопроцессы в асинхронном двигателе с насыщенной сталью Вісник КДПУ: Зб. наук. пр. КДПУ. – 1/2002. –С. 174 – 180.

3. Вейтц В.Л., Вербовой П.Ф., Кочура А.Е., Куценко Б.Н. Динамика управляемого электромеханического привода с асинхронными двигателями – Киев: Наук. думка. 1988. – 272 с.

4. Сивокобыленко В.Ф. Моделирование режимов работы асинхронных машин с учетом насыщения магнитных цепей и вытеснения токов в роторе // Наукові праці ДонНТУ, Серія «Електротехніка і енергетика», Вип. 112. С. 10 – 16.

5. Огарь В.А., Родькин Д.И., Калинов А.П. Обоснование аналитической оценки потерь в насыщаемой стали асинхронного двигателя // Вісник КДПУ. Зб. наукових праць КДПУ Вип. 4/2007 (45), Част. 1.- С. 98 – 103.

Стаття надійшла 8.04.2008 р.