

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИНДУКТИВНОСТИ КОНТУРА НАМАГНИЧИВАНИЯ ЦЕПИ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Лашко Ю.В.

Кременчугский государственный политехнический университет

Решение задач эффективной эксплуатации, управления и защиты асинхронных двигателей невозможно без знания распределения потерь в его активных элементах. Только в последнее время в публикациях начинает рассматриваться вопрос влияния прироста потерь в стали как дополнительного теплового источника внутри машины. Такой дополнительный прирост обусловлен процессами физического старения стали двигателя и существующими технологиями ремонта [2]. При этом последнее является превалирующим показателем. Исследованиями установлено [3], что наибольшим изменениям в ходе ремонта подвергается именно электротехническая сталь, что приводит к изменению ее свойств – увеличение нелинейности кривой намагничивания и росту удельных потерь. У двигателей прошедших ремонт потери в стали могут возрасти в 2-4 раза [3]. Это в свою очередь приводит к повышению нагрева активных элементов машины: в пакетах стали и потерь в меди.

Увеличение потерь в стали обусловлено качественным изменением кривой намагничивания машины – изменением зависимости  $L_{\mu}(i_{\mu})$  в рабочем режиме. Так как увеличение степени кривизны характеристики  $L_{\mu}(i_{\mu})$  приводит к несинусоидальности тока статора симметричного в конструктивном отношении двигателя при синусоидальном напряжении питания.

Традиционно при исследованиях статических и динамических режимов работы АД пользуются упрощенными представлениями о физических процессах протекающих в машине, принимая допущения о неизменности индуктивности контура намагничивания [4] или принимают кривую  $L_{\mu}(i_{\mu})$  как статическую не учитывая направление перемагничивания стали, явление гистерезиса и вихревых токов.

В основу всех исследований асинхронных двигателей положены уравнения электрического равновесия его контуров. Уравнения, записанные с такими допущениями, во многих случаях имеют вполне достаточную для практических целей точность. С их помощью описывают протекающие процессы в машине в номинальных режимах работы при симметричном питании и симметрии электрических и магнитных цепей, что не всегда приемлемо для отремонтированных двигателей, параметры которых отличаются от номинальных.

Для практического определения нелинейной зависимости  $L_{\mu}(i_{\mu})$  АД, при насыщенном

магнитопроводе, невозможно использовать методы теории анализа магнитных цепей [6], так как именно параметры магнитной цепи нам неизвестны.

В данной работе рассматривается метод определения динамической характеристики  $L_{\mu}(i_{\mu})$ , на основе экспериментальных данных мгновенных значений токов и напряжений.

В основу метода положено представление о нелинейности зависимости  $L_{\mu} = f(i_{\mu})$ , которая учитывает реальные характеристики стали машины, потери на перемагничивание и гистерезис.

Уравнение электрического равновесия для контура фазы статора АД запишем в виде:

$$\frac{d\Psi(t)}{dt} = u(t) - i(t)R. \quad (1)$$

С учетом  $\Psi(t) = i(t)L_{\mu}(i(t))$ , дифференцируя  $\Psi(t)$  как сложную функцию [7], уравнение (1), если пренебречь потоками рассеяния и вихревыми токами, будет иметь вид:

$$i(t) \frac{dL_{\mu}(i(t))}{di(t)} \cdot \frac{di(t)}{dt} + L_{\mu}(i(t)) \frac{di(t)}{dt} = u(t) - i(t)R \quad (2)$$

или обозначив  $\frac{di(t)}{dt} = i'(t)$

$$i(t) \cdot i'(t) \cdot \frac{dL_{\mu}(i(t))}{di(t)} + L_{\mu}(i(t)) \cdot i'(t) = u(t) - i(t)R \quad (3)$$

Для наглядности, учитывая, что ток и напряжение являются функциями времени перепишем (3) в виде:

$$i \cdot i' \cdot \frac{dL_{\mu}(i)}{di} + L_{\mu}(i) \cdot i' = u - i \cdot R. \quad (4)$$

Решение полученного уравнения относительно  $L_{\mu}(i)$  связано с трудностями вычислительного характера и, кроме того, при указанных допущениях, не отображает реальной зависимости  $L_{\mu}(i_{\mu})$ .

Определение реальной зависимости  $L_{\mu}(i_{\mu})$  при периодических процессах усложняет тот факт, что этой зависимости характерно изменение ее формы в течение периода изменения токов и напряжений, что исключает возможность использования методов наложения и всех методов расчета сложных цепей, основанных на принципе наложения.

В этом случае можно воспользоваться методом эквивалентных синусоид, основанным на замене действительных несинусоидальных кривых тока и (или) напряжения эквивалентными им синусоидами. Суть этого метода заключается [5] в возможности

записи уравнений в комплексной форме. Однако запись уравнений в комплексной форме для решения данной задачи является недостатком метода эквивалентных синусоид.

Предлагаемый метод ближе всего к методу отыскания неизвестных величин при периодических процессах в нелинейных цепях, который называется метод гармонического баланса. Метод основывается на том, что в общем случае токи и напряжения в нелинейной цепи несинусоидальны и ожидаемое решение представляется в виде суммы основной и ряда высших гармоник, после чего все члены, входящие в искомое уравнение представляются в виде сумм гармоник [5].

Основываясь на классическом подходе и методе гармонического баланса, разделив первую и высшие гармоники тока, можно записать систему из двух линейных уравнений (5) относительно неизвестных  $L_{\mu}(I)$  и  $dL_{\mu}(I)$ . Параметрами первого уравнения являются первая гармоника тока и его производная; в качестве свободного члена сумма первой гармоники напряжения и произведение первой гармоники тока на активное сопротивление статора. А во втором уравнении – сумма высших гармоник соответственно тока и его производной; в качестве свободного члена – произведение суммы высших гармоник тока на активное сопротивление статора.

$$\left. \begin{aligned} L_{\mu} \frac{di_1}{dt} + \frac{dL_{\mu}}{di_1} i_1 &= u_1 + i_1 R, \\ L_{\mu} \sum_k \frac{di_k}{dt} + \frac{dL_{\mu}}{d \sum_k i_k} \sum_k i_k &= R \sum_k i_k, \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

где  $k$  – номер гармоники.

Решение системы (5) позволит учесть переменное насыщение стали по главному пути магнитного потока, влияние высших гармоник тока на степень нелинейности зависимости  $L_{\mu}(i_{\mu})$ , а так же представить ее в виде:

$$L_{\mu}(i_{\mu}) = L_{\mu 0} + \Delta L(i_{\mu}) = L_{\mu 0} + f(\Psi_{\mu}), \quad (6)$$

где  $L_{\mu 0}$  – неизменная и не зависящая от насыщения часть реактивного сопротивления взаимоиндукции;  $\Delta L(i_{\mu})$  – изменяющаяся и зависящая от насыщения часть реактивного сопротивления взаимоиндукции, являющаяся однозначной функцией намагничивающего тока при меняющемся насыщении машины по главному пути магнитного потока.

Проверка теоретических положений выполнена при помощи экспериментальных исследований со статором асинхронного двигателя МТ-212 номинальной мощности 2.2 кВт, паспортные данные которого приведены в таблице 1. Схема экспериментальной установки приведена на рис.1. Во время проведения эксперимента ротор двигателя находился в разомкнутом состоянии с целью

исключения влияния токов ротора. Мгновенные значения тока и напряжения регистрировались при помощи компьютеризированного лабораторного измерительно-диагностического комплекса (ИДК) с дискретностью 100 мкс.

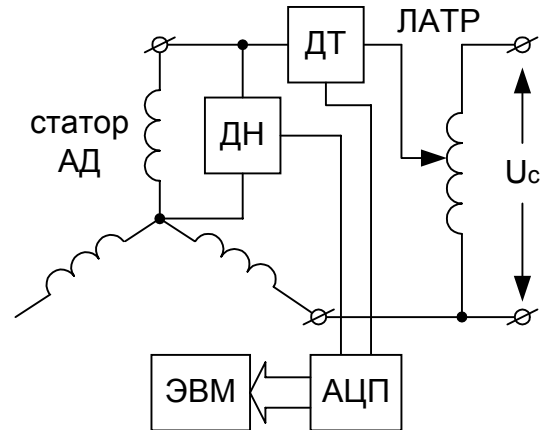


Рисунок 1 Схема лабораторной установки

На рис.2 показаны временные диаграммы измеренных токов и напряжений (значение тока статора дано в масштабе 1:20).

Таблица 1  
Паспортные данные испытуемого АД

Номинальная мощность, кВт	2.2
Номинальное напряжение, В	380
Номинальный ток, А	7.5
Номинальная скорость, об/мин	770
Номинальный КПД	0.75
Номинальный коэффициент мощности	0.67
Активное сопротивление фазы статора, Ом	3.6
Активное сопротивление фазы ротора, Ом	0.67
Индуктивное сопротивление фазы статора, Ом	2.58
Индуктивное сопротивление фазы ротора, Ом	0.57
Индуктивное сопротивление контура намагничивания, Ом	40.5

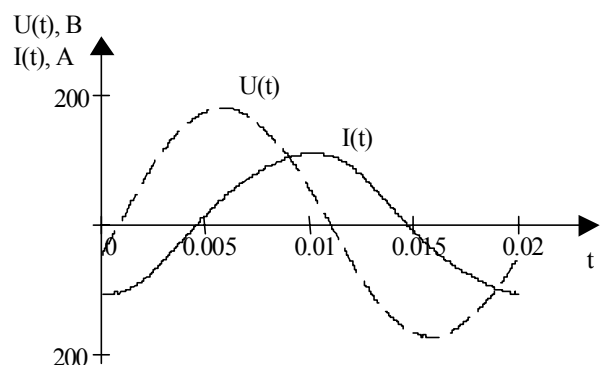


Рисунок 2 Экспериментальные кривые напряжения и тока.

Из полученных временных зависимостей видно, что при синусоидальном питающем напряжении фазный ток содержит высшие гармоники. В таблице 2 приведены данные гармонического состава тока. Для

повышения точности ДПФ и снижения ошибки дискретизации дискретные сигналы тока и напряжения были подвергнуты сплайн-интерполяции.

Разложение питающего напряжения показывает наличие только основной гармоники.

На рис.3 показана полученная при решении системы уравнений (5) зависимость  $L_{\mu}(i_{\mu})$ .

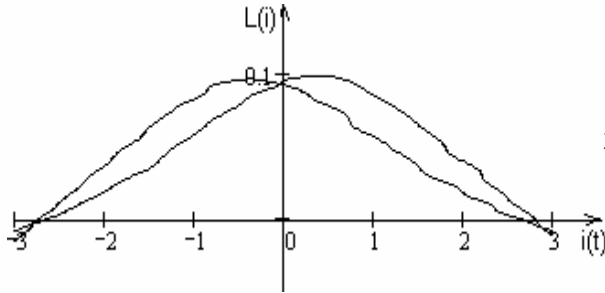


Рисунок 3 Нелинейная зависимость  $L_{\mu}(i)$

Полученный результат (рис.3) совпадает с теоретическими положениями [5,6].

В настоящее время проводятся исследования по уточнению характера поведения и свойств полученной зависимости  $L_{\mu}(i_{\mu})$ , уточнению количественных параметров. Кроме того, адаптировав данный метод для случая вращающегося ротора, позволит определить реальную нелинейную динамическую характеристику  $L_{\mu}(i_{\mu})$ , которая в свою очередь даст возможность определения электромагнитных и тепловых режимов АД

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Жерве Г.К. Промышленные испытания электрических машин. – 4-е изд., сокр. и перера. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1984.
2. Луговой А.В., Максимов М.Н., Родькин Д.И., Черный А.П., Сисюк Г.Ю., Эксплуатационная надежность электрических двигателей переменного тока и пути ее повышения, труды КГПИ "Проблемы создания новых машин и технологии", 2000г., выпуск 1.
3. Родькин Д.И., Черный А.П., Здор И.Е. Задачи и технические средства для диагностики параметров асинхронных двигателей. Вісник Харківського державного політехнічного університету. Збірка наукових праць. Вип. 61. - Харків, ХДПУ, 1999. - 400 с.
4. Петров Л.П., Управление пуском и торможением асинхронных двигателей. – М.: Энергоиздат, 1981.
5. Нейман Л.Р., Демирчян К.С., Теоретические основы электротехники: В 2-х т. Учебник для вузов. Том 2. – 3-е изд., перераб. и доп.-Л.: Энергоиздат. Ленингр. отд-ние, 1981
6. Шевченко І.С. Цифрове моделювання елементів електропривода / електромагнітні та вентильні перетворювачі/ : Навч. посібник/ за заг. Ред. О.Б.Зеленова. – К.: ІСДО, 1996.
7. Банах С. Дифференциальное и интегральное исчисление. - М.:Наука. - 1966, 436 с.