

ТРАКТОВКА ПРИЧИН ИЗМЕНЕНИЯ ИНДУКТИВНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ
ВЗАИМОИНДУКЦИИ И ТОКА НАМАГНИЧИВАНИЯ В АСИНХРОННЫХ
ДВИГАТЕЛЯХ

Вербовой А. П., к.т.н.

Институт электродинамики НАН Украины
Украина, 03680, Киев, проспект Победы, 56
тел.(044) 454-25-75, E-mail: podol@ied.org.ua

Стаття присвячена аналізу назв, позначенням і визначенню індуктивного опору взаєміндукції. Показано, що зі збільшенням навантаження і зменшенням частоти обертання індуктивний опір взаєміндукції зменшується а струм намагнічування збільшується.

Стаття посвящена аналізу названий, обозначений и определению индуктивного сопротивления взаимоиндукции. Показано, что с увеличением нагрузки и уменьшением частоты вращения индуктивное сопротивление взаимоиндукции уменьшается а ток намагничивания увеличивается.

ВВЕДЕНИЕ

Настоящая статья написана на базе результатов экспериментальных и теоретических исследований, выполненных в Институте электродинамики НАН Украины при разработке асинхронных двигателей с улучшенными пусковыми, регулировочными и динамическими свойствами в соответствии с естественными и научно-техническими темами.

В начальный период развития теории, разработки методик расчета характеристик и проектирования асинхронных двигателей было принято допущение о том, что индуктивное сопротивление взаимоиндукции не зависит от частоты вращения ротора. А поскольку оно на два порядка больше сопротивлений обмоток в Т-образной схеме замещения, то его можно вынести на зажимы схемы замещения. Таким образом получена Г-образная схема замещения, которая принята за основную и на базе которой разработаны и используются методики расчета электромагнитных параметров.

В результате экспериментальных исследований двигателей с различными конструкциями роторов установлено, что с увеличением скольжения от $s = 0$ до $s = 1$ индуктивное сопротивление взаимоиндукции уменьшается в несколько раз, а ток намагничивания увеличивается [1-3]. Поскольку принятое ранее допущение приемлемо для небольшого диапазона скольжений ($s = 0 \div 1,5 \cdot s_H$), то для регулируемых по скорости и управляемых по режимам работы двигателей необходимо разработать уточненные методики. Поэтому целью настоящей статьи является выяснение причин изменения индуктивного сопротивления взаимоиндукции и нахождение его зависимости от электромагнитных нагрузок, которые изменяются с изменением частоты вращения двигателя.

ТРАКТОВКА НАЗВАНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ

Асинхронная электрическая машина состоит из реальной обмотки статора и одновитковых обмоток, эквивалентирующих короткозамкнутую обмотку ротора, пакеты стали статора и ротора. Эквивалентные одновитковые обмотки с числом фаз, равным числу фаз обмотки статора ($m_{o2} = m_{c1} = m_{c2} = m_{o1}$), обла-

дают сосредоточенными активными сопротивлениями, собственными индуктивностями фаз и взаимными индуктивностями между фазами. Поэтому название "индуктивное сопротивление взаимоиндукции" является наиболее корректным. Оно связано с взаимной индуктивностью выражением $x_\mu = \omega_1 \cdot M' \cdot 3/2$, где M' – взаимная индуктивность между всеми фазами всех обмоток, приведенных к одному числу витков (к числу витков обмотки статора w_{o1}). Индекс μ наиболее полно отвечает названию сопротивления, характеризующему магнитное поле машины.

В некоторых учебниках используется название "главное или основное индуктивное сопротивление" и тогда присваивают ему индексы "r1" и "r2", которые относятся соответственно к обмоткам статора и ротора, то есть x_{r1} и x_{r2} .

В электрических схемах замещения, построенных на базе систем электромагнитно связанных контуров с токами (фаз обмоток), при объединении параллельных ветвей с одинаковыми значениями и направлениями ЭДС взаимоиндукции образуется одна ветвь намагничивания с сопротивлением x_μ , по которой протекает чисто реактивный ток намагничивания I_μ . В векторной диаграмме ток намагничивания сдвинут по фазе относительно ЭДС взаимоиндукции на угол $\pi/2$ и именно он создает магнитный поток взаимной индукции (основной магнитный поток). Направления векторов тока намагничивания и магнитного потока взаимной индукции совпадают. При этом x_μ называют еще индуктивным сопротивлением ветви намагничивания схемы замещения. Взаимосвязь между ЭДС, током намагничивания и индуктивным сопротивлением взаимоиндукции устанавливается выражением $I_\mu = E/x_\mu$.

Необходимо подчеркнуть следующий факт. В реальной машине нет самостоятельной ветви, по которой протекал бы ток намагничивания, а в схеме замещения, векторной диаграмме и при расчетах он имеет определенный смысл, значение и направление. В то же время в обмотках машины протекают реаль-

ные токи. Существуют формулы для определения полных потокосцеплений фаз, входящих в дифференциальные уравнения электромагнитного равновесия. Но как таковых в машине нет этих потокосцеплений. Есть потокосцепление, созданное магнитным потоком взаимной индукции, обусловленным током намагничивания. Другими словами, в машине существует реальное результирующее движущееся (вращающееся) магнитное поле, образованное реальными токами во всех обмотках, то есть наложением МДС, созданных этими токами.

АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ ПОЛОЖЕНИЙ И ОПРЕДЕЛЕНИЙ

Начнем обзор мнений с трактовки В.П.Шуйского [4]. "У трансформаторов, асинхронных машин и машин переменного тока зазор весьма мал, следовательно, основное индуктивное сопротивление значительно больше, чем реактивное сопротивление рассеяния статора ($x_{1h}/x_{1\sigma} > 10$). Поэтому в схеме замещения основное индуктивное сопротивление можно включить непосредственно под напряжение первичной цепи, **переноса** его из точки разветвления. В практических расчетах это не приводит к большой ошибке. Тогда общее реактивное сопротивление машины можно легко выразить через реактивное сопротивление первичной и вторичной обмоток: $x_{\sigma} = x_{1\sigma} + x_{2\sigma}$ ". Такое толкование дает возможность многим авторам получать множество "новых" схем замещения.

Далее в [4] на стр. 54 утверждается, что "ток намагничивания от скольжения не зависит", а на стр. 491 – "намагничивающий ток при коротком замыкании $I_{\mu k}$ составляет примерно половину нормального намагничивающего тока; он очень мал по сравнению с токами короткого замыкания I_{o1k} и I'_{o2k} ". Поэтому им можно пренебречь и принять $I_{o1k} = I'_{o2k} = I_k \dots$ ".

Некоторые авторы считают, что индуктивное сопротивление взаимной индукции при коротком замыкании не остается постоянным, а увеличивается. Так, в [5] на стр. 465 приводится следующая трактовка: "...индуктивное сопротивление взаимной индукции при коротком замыкании, которое можно определить по соотношению $x_{12k} = x_{12} \cdot F_{\mu} / F_{\delta} \approx x_{12}(1,3 \div 1,7)$, так как в этом случае машина работает на прямолинейной части магнитной характеристики, т.е. без насыщения стальных участков магнитной цепи. В пределах изменения скольжения от 1 до 0,1 можно считать $x_{12} = \text{const}$ ".

У А.И.Вольдека [6] на стр. 459 приводятся следующие выражения для определения "... главного собственного индуктивного сопротивления обмоток статора и ротора

$$x_{r1} = m_1 \cdot w_1^2 \cdot k_{oд1}^2 \cdot x_1, \quad x_{r2} = m_2 \cdot w_2^2 \cdot k_{oд2}^2 \cdot x_1,$$

$$\text{где } \delta_1 = \frac{4 \cdot f_1 \cdot \mu_0 \cdot \tau \cdot l_{\delta}}{\pi \cdot p \cdot k_{\mu} \cdot k_{\delta} \cdot \delta}$$

и для главных взаимных индуктивных сопротивлений

$$x_{r12} = m_1 \cdot w_1 \cdot k_{oд1} \cdot w_2 \cdot k_{oд2} \cdot k_c \cdot x_1, \quad (23.17)$$

$$x_{r21} = m_2 \cdot w_1 \cdot k_{oд1} \cdot w_2 \cdot k_{oд2} \cdot k_c \cdot x_1, \quad (23.18)$$

где k_c – коэффициент скоса пазов.

По выражениям (23.17) и (23.18) $x_{r12} \neq x_{r21}$, что объясняется тем, что сопротивления являются эквивалентными и **учитывают действие поля всех фаз одной обмотки на другую**".

Аналогичное суждение приводится и в [7]: "Так как $m_1 \neq m_2$, то вообще говоря, и $x_{12} \neq x_{21}$ ". Это утверждение достаточно понятное и убедительное. Но в нем кроются ошибочные представления числа фаз короткозамкнутой обмотки ротора $m_{o2} = Z_2$ и числа витков в фазе $w_{o2} = 0,5$, а также построенные на такой трактовке методики определения электромагнитных параметров, расчета характеристик и проектирования асинхронных двигателей.

Объяснение сущности неравенства $x_{12} \neq x_{21}$ в [6] непонятно, как и утверждение про "**действие поля всех фаз одной обмотки на другую**". Такой подход затрудняет понимание работы асинхронного двигателя в режиме идеального холостого хода, когда токи в обмотке ротора не протекают и нет никакого "действия" обмотки ротора на обмотку статора и наоборот. В действительности при любом режиме работы в машине существует результирующее магнитное поле и единственные x_{μ} и I_{μ} , поскольку существует единственный магнитный поток взаимной индукции. Поэтому использование индексов 12 и 21 у индуктивного сопротивления взаимной индукции является неудачным, а утверждения о неравенстве в [6, 7] являются некорректными, поскольку $m_{o2} = m_{o1}$.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Уже упоминался факт, что с увеличением нагрузки и снижением частоты вращения двигателя индуктивное сопротивление взаимной индукции уменьшается, а ток намагничивания увеличивается [1-3]. Последующие экспериментальные исследования проводились с образцами, выполненными на базе двигателя 4A160M4 с массивным ферромагнитным ротором и его модификациями [8, 9].

На рис.1 приведены зависимости $x_{\mu}(U_{o1})$ и $I_{\mu}(U_{o1})$ при идеальном холостом ходе для первого и шестого образцов двигателей. В шестом образце находился сплошной массивный ферромагнитный ротор с проточенной цилиндрической поверхностью таким образом, что воздушный зазор увеличен с $\delta = 0,5$ (для двигателя серийного изготовления) до $\delta = 1,05$ мм. В первом образце размещался ротор с короткозамкнутой обмоткой из меди ($Z_2 = 38, b_2 = 0,4, h_2 = 7,5$ мм) с воздушным зазором $\delta = 0,5$ мм. Из рисунка видно, что увеличение воздушного зазора в шестом образце привело к уменьшению индуктивного сопротивления взаимной индукции и к соответствующему увеличению тока намагничивания, вызванного необходимостью увеличения МДС для проведения магнитного потока взаимной индукции через увеличенный воздушный зазор.

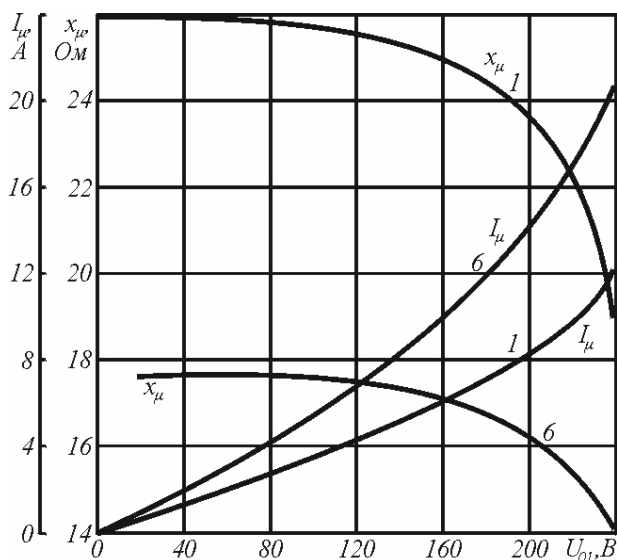


Рис. 1

При малых значениях напряжения, примерно до $U_{01} = 100$ В, зависимости $x_{\mu}(U_{01})$ и $I_{\mu}(U_{01})$ имеют прямолинейный вид. Дальнейший рост напряжения приводит к появлению насыщения участков магнитной цепи и отклонению зависимостей индуктивного сопротивления взаимоиндукции и тока намагничивания от прямолинейных. Ток намагничивания увеличивается, а x_{μ} уменьшается.

При переменной частоте вращения зависимость $x_{\mu}(s)$ тоже имеет нелинейный вид, а значение индуктивного сопротивления взаимоиндукции для шестого образца двигателя уменьшается с 17,6 Ом при идеальном холостом ходе до 8,4 Ом при $U_{\text{л}} = 180$ В и до 8,8 Ом при $U_{\text{л}} = 130$ В при коротком замыкании. То есть при коротком замыкании наблюдается та же тенденция уменьшения x_{μ} при увеличении подводимого к обмотке статора напряжения.

Для двигателя с короткозамкнутым ротором такой же мощности пределы изменения x_{μ} и I_{μ} значительно шире. Так, ток намагничивания при идеальном холостом ходе составляет около $I_{\mu\text{их}} = 8,5$ А, а при коротком замыкании он достигает порядка $I_{\mu\text{к}} = 40$ А при пусковом токе в обмотке статора $I_{01\text{н}} = 100$ А, то есть составляющим около 40% номинального тока короткого замыкания. При этом индуктивное сопротивление взаимоиндукции уменьшилось с $x_{\mu\text{их}} \cong 26$ Ом до $x_{\mu\text{к}} = 2$ Ом, то есть примерно на порядок.

Поэтому принятое положение о постоянстве или увеличении индуктивного сопротивления взаимоиндукции, как и об уменьшении тока намагничивания при коротком замыкании по сравнению с такими же показателями при холостом ходе является необоснованным.

СОВРЕМЕННАЯ ТРАКТОВКА

Мы исходим из того, что каждая из трех фаз обмотки статора размещена в пространстве со сдвигом на угол $2\pi/3$ и к ним подключается переменное

трехфазное напряжение со сдвигом во времени на угол $2\pi/3$ радиан. Если последовательно подключать к сети только одну фазу обмотки статора, то пульсирующий ток в ней будет создавать магнитный поток, который, в свою очередь, будет наводить в определенном месте ротора ЭДС взаимоиндукции. Эта ЭДС вызывает протекание тока в роторе, аналогичного току в обмотке статора. Не может эта ЭДС вызвать протекание токов в одном, двух или во всех стержнях короткозамкнутой обмотки ротора. Поэтому ошибочной есть трактовка, что $m_{02} = Z_2$ и $w_{02} = 0,5$. Токи в каждой из фаз обмотки статора вызывают свой "отклик" в виде токов в роторе, которые будут сдвинуты в пространстве и времени на те же углы. Поэтому необходимо считать естественным, что число фаз обмотки ротора равно числу фаз обмотки статора $m_{02} = m_{01}$, а число витков равно единице $w_{02} = 1$. Для короткозамкнутой обмотки ротора число пазов на полюс и фазу q_{02} может быть как целым, так и дробным, а полувитки размещаются на расстоянии полюсного деления $\tau_{02} = Z_2 / 2p$ и соединяются короткозамкнутым кольцом (его частями длиной τ_{02}).

Аналогичным образом можно рассматривать процессы и задание фаз в массивном ферромагнитном роторе, а также в шихтованных пакетах стали статора и ротора с некоторым отличием определения электромагнитных параметров последних.

Все токи в фазах всех обмоток создают результирующее вращающееся магнитное поле. По величине токи в эквивалентных обмотках шихтованных пакетов стали статора и ротора будут значительно меньше токов в реальных обмотках. Соответственно эти обмотки обладают повышенными в столько же раз активным и индуктивным сопротивлениями.

Электромагнитные процессы и нагрузки асинхронного двигателя зависят от режима работы, начиная от холостого хода, когда токи в фазах обмотки статора составляют около 30% номинального тока, до короткого замыкания, когда токи достигают 5-7-кратных значений. При питании двигателя от сети большой мощности напряжение, подводимое к обмотке статора, не меняется. С величиной напряжения связан процесс насыщения магнитной цепи, характеризующийся такой последовательностью связи электромагнитных величин: от напряжения к ЭДС взаимоиндукции, потом к магнитному потоку взаимоиндукции, а затем к магнитной индукции. Схематически это выглядит так: $U_{01} \rightarrow E \rightarrow \Phi \rightarrow B$.

При работе двигателя в режиме холостого хода его магнитная цепь насыщена, поскольку рабочая точка находится на изгибе кривой намагничивания. С увеличением нагрузки ЭДС взаимоиндукции уменьшается в связи с увеличением падения напряжения на активном и индуктивном сопротивлениях обмотки статора. Уменьшение ЭДС взаимоиндукции вызвано уменьшением потока взаимоиндукции. В свою очередь это приводит к уменьшению магнитной индукции на участках магнитной цепи и, следовательно, к уменьшению насыщения. Процесс снижения насыщения зубцов и спинки статора будет продолжаться до

режима короткого замыкания.

Совсем по иному протекают электромагнитные процессы в роторе. С увеличением частоты переменных величин в роторе происходит перераспределение протекания магнитного потока взаимоиндукции по высоте спинки и зубцов. Он сосредотачивается в поверхностном слое, то есть происходит как бы вытеснение потока к воздушному зазору. Поэтому плотность его в спинке уменьшается, а большая его часть проходит поперек зубцов и пазов, встречая на своем пути увеличенное магнитное сопротивление. Поэтому при коротком замыкании проведение хотя и меньше, чем при холостом ходе, магнитного потока взаимоиндукции через большое сопротивление пазов, равносильно проведению магнитного потока через значительно увеличенный воздушный зазор и требует существенного увеличения МДС и соответствующего увеличения тока намагничивания.

Поскольку $x_{\mu} = E / I_{\mu}$, то при уменьшении числителя E и увеличении знаменателя I_{μ} , значение частного x_{μ} будет уменьшаться.

Определение индуктивного сопротивления взаимоиндукции по известной формуле

$$x_{\mu} = 2m_{01} \cdot f_1 \cdot \frac{\mu_0 \cdot D_1 \cdot l_1}{\delta \cdot k_{\delta} \cdot k_{\mu}} \cdot \left(\frac{w_{01} \cdot k_{w01}}{p} \right)^2$$

не позволяет учесть его изменение от скольжения. В формулу входит только коэффициент насыщения магнитной цепи k_{μ} , который определяется для холостого хода. А поскольку, как отмечено выше, с увеличением нагрузки примерно до $1,3 \cdot P_n$ он уменьшается, то и x_{μ} должно увеличиваться, то есть эта формула как бы подтверждает принятую ранее трактовку. Но этот коэффициент никаким образом не учитывает процессы перераспределения магнитного потока в роторе. Кроме того, в числителе формулы содержится магнитная постоянная μ_0 , что справедливо только для воздушного зазора. В то же время наличие в знаменателе δ показывает его влияние на изменение индуктивного сопротивления взаимоиндукции.

Если за исходную принять формулу $x_{\mu} = E / I_{\mu}$ и выразить в ней ЭДС взаимоиндукции через магнитный поток или магнитную индукцию, а ток намагничивания – через МДС, то получим формулу:

$$x_{\mu} = 2m_{01} \cdot f_1 \cdot l_1 \cdot D_1 \cdot \frac{B_{\delta}}{F} \cdot \left(\frac{w_{01} \cdot k_{w01}}{p} \right)^2.$$

Она наглядно показывает зависимость индуктивного сопротивления взаимоиндукции от электромагнитных нагрузок, уменьшение его при переходе от холостого хода до короткого замыкания и возможность определения его значений от скольжения.

ВЫВОДЫ

Принятая трактовка о постоянстве индуктивного сопротивления взаимоиндукции и уменьшении тока намагничивания асинхронного двигателя при изменении нагрузки приемлема для расчета характеристик двигателей общего назначения, работающих в номинальном режиме.

Традиционная формула определения индуктивного сопротивления взаимоиндукции учитывает геометрические параметры двигателя, частоту, обмоточные данные и предполагает независимость его значений от электромагнитных нагрузок, что ограничивает возможности ее использования.

Приведена новая трактовка процессов насыщения магнитной цепи, перераспределение магнитного потока взаимоиндукции в роторе и объяснены причины уменьшения индуктивного сопротивления взаимоиндукции и увеличения тока намагничивания, которые объясняют суть и полностью соответствуют реальным электромагнитным процессам.

Выведена новая формула определения индуктивного сопротивления взаимоиндукции, дополнительно учитывающая изменение электромагнитных нагрузок при изменении скольжения от нуля до единицы, что позволяет повысить точность расчетов электромагнитных параметров, характеристик, проектирования и исследования асинхронных двигателей.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Вербовой П.Ф. Экспериментальное определение параметров асинхронных короткозамкнутых двигателей // Техн. электродинамика. – 1983. – № 1. – С. 79-85.
- [2] Вейц В.Л., Вербовой П.Ф., Кочура А.Е., Куценко Б.Н. Динамика управляемого электромеханического привода с асинхронными двигателями. – Киев: Наук. думка, 1988. – 272 с.
- [3] Вербовой П.Ф. Асинхронные двигатели для параметрического регулирования частоты вращения и интенсивных динамических режимов работы: Автореф. дис. д-ра техн. наук. – Киев, 1989. – 40 с.
- [4] Шуйский В.П. Расчет электрических машин. Перевод с немецкого. – Л.: Энергия, 1968. – 732 с.
- [5] Сергеев П.С., Виноградов Н.В., Горяинов Ф.А. Проектирование электрических машин. – М.: Энергия, 1969. – 632 с.
- [6] Вольдек А.И. Электрические машины. – Л.: Энергия, 1974. – 840 с.
- [7] Костенко М.П., Пиотровский Л.М. Электрические машины. Ч.2. – М.-Л.: Энергия, 1965. – 704 с.
- [8] Вербовой А.П., Вербовой П.Ф., Сьянов А.М. Экспериментальные исследования асинхронных двигателей с массивными ферромагнитными роторами. – Киев, 1996. – 42 с. – (Препр. / НАН Украины. Ин-т электродинамики; № 793).
- [9] Вербовой А.П., Вербовой П.Ф., Сьянов А.М. Исследования электромагнитных параметров массивных ферромагнитных роторов и их модификаций // Техн. электродинамика. – 1996. – № 4. – С. 35-39.

Поступила 13.07.2004