

Е.Е. ЗИНЧЕНКО

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВЕНТИЛЬНЫХ ИНДУКТОРНО- РЕАКТИВНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Наведені результати експериментальних досліджень власних та взаємних індуктивностей обмоток, а також залежностей, які обумовлюють енергетичні характеристики вентильних індукторно-реактивних двигунів.

Приведены результаты экспериментальных исследований собственных и взаимных индуктивностей обмоток, а также зависимости, определяющие энергетические характеристики вентильных индукторно-реактивных двигателей.

Новая элементная база силовой электроники позволила резко увеличить мощность транзисторных преобразователей, а их модульное исполнение уменьшить габариты и цены.

Огромное число публикаций в зарубежной и отечественной технической литературе посвящено вентильным индукторно-реактивным электрическим машинам. Простота конструкции и электрических схем коммутаторов вентильных индукторно-реактивных двигателей, высокая надежность и относительно низкая стоимость, возможность использования в сложных условиях окружающей среды способствуют расширяющемуся применению вентильных индукторно-реактивных двигателей в различных областях техники – от прецизионных систем управления до мощных транспортных средств, что в свою очередь стимулирует углубленные экспериментальные и расчетно-теоретические исследования этих машин.

Существенным вопросом, о котором не редко упоминается в различных источниках [1, 2, 3], является вопрос учета взаимной индукции между фазными обмотками при парной коммутации. Для каждой фазы вентильного индукторно-реактивного двигателя уравнение электрического равновесия может быть представлено в виде:

$$U = ri_N + \frac{d\Psi_N}{dt}, \quad (1)$$

где U – напряжение на зажимах обмотки; r – активное сопротивление обмотки; i_N – ток в N -ой фазе; Ψ_N – потокосцепление N -ой фазы.

Потокасцепления выражаются через собственные L_N и взаимные M_{NK} индуктивности обмоток (2).

Так как при вращении ротора постоянно меняется взаимное расположение зубцов ротора относительно зубцов статора, то и собственные и взаимные индуктивности являются функциями от угла поворота ротора ζ .

$$\begin{aligned} \Psi_1 &= L_1(\zeta) \cdot i_1 + M_{12}(\zeta) \cdot i_2 + \dots + M_{1N}(\zeta) i_N, \\ \Psi_2 &= M_{21}(\zeta) \cdot i_1 + L_2(\zeta) \cdot i_2 + \dots + M_{2N}(\zeta) i_N, \\ &\dots\dots\dots \\ \Psi_N &= M_{N1}(\zeta) \cdot i_1 + M_{N2}(\zeta) \cdot i_2 + \dots + L_N(\zeta) i_N. \end{aligned} \quad (2)$$

При насыщении магнитной цепи они также зависят от токов фаз.

Определение собственных и взаимных индуктивностей. Характер зависимостей собственной индуктивности фаз и взаимных индуктивностей обмоток от угла поворота и степени насыщения магнитопровода был исследован экспериментально.

К одной фазе $C_1 - C_5$ (рис. 2) четырехфазного двигателя было подведено переменное синусоидальное напряжение частотой 50 Гц. Свободный конец вала был зажат в патроне делительной головки (рис. 1).

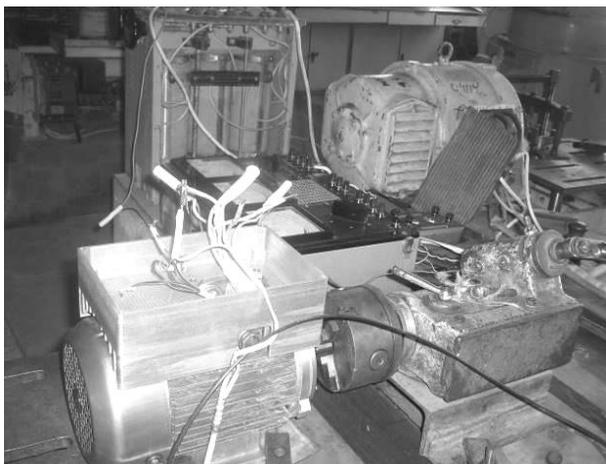


Рис. 1. Вентильный индукторно-реактивный двигатель, спаренный с делительной головкой

При нескольких фиксированных напряжениях измерялись ток и мощность при различных углах поворота ротора относительно рассогласованного положения. Угол плавно изменялся поворотом патрона делительной головки. Кроме того, измерялись ЭДС, наведенные в обмотках неподключенной фазы.

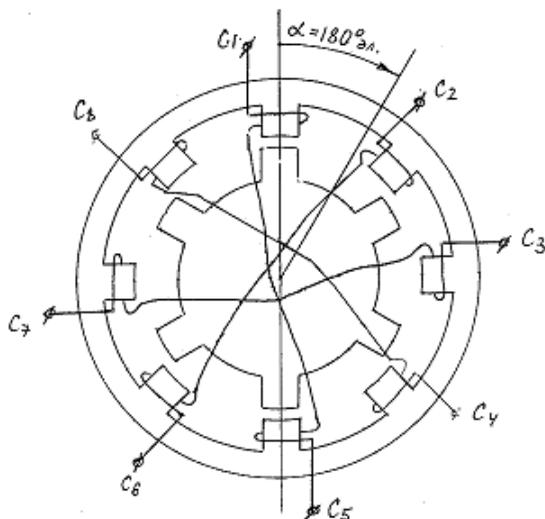


Рис. 2. Расположение и нумерация фаз обмоток статора

Зависимость собственной индуктивности фазы обмотки от угла поворота при различной степени насыщения приведена на рис. 3.

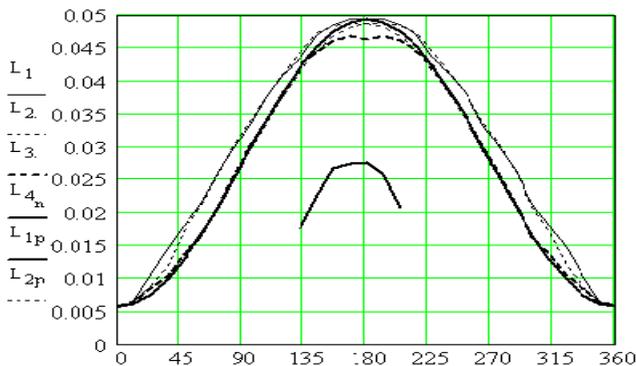


Рис. 3. L_1, L_2, L_3, L_4 – экспериментальные кривые зависимости собственной индуктивности фазы обмотки от угла поворота ротора в электрических градусах при различной степени насыщения магнитопровода; L_{1p}, L_{2p} – соответствующие расчетные кривые

Как видно из рис. 3 характер кривых при малом насыщении стали незначительно меняется от величины нагрузки и для практических расчетов

может быть в качестве обобщенной принята средняя расчетная кривая. Она хорошо аппроксимируется известной функцией:

$$L(\zeta) = \frac{L_{max} + L_{min}}{2} - \frac{L_{max} - L_{min}}{2} \cdot \cos(\zeta). \quad (3)$$

Экспериментальные зависимости взаимной индуктивности от угла поворота ротора представлены на рис. 4.

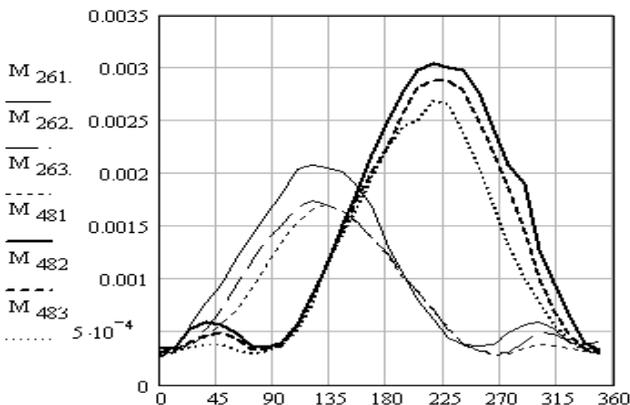


Рис. 4. M_{261} , M_{262} , M_{263} – экспериментальные кривые зависимости взаимной индуктивности между включенной фазой и соседней с ней, расположенной против направления вращения (кривые с малым максимумом) при различной степени насыщения магнитопровода; M_{481} , M_{482} , M_{483} – аналогичные зависимости для фазы, расположенной по направлению вращения (кривые с большим максимумом).

Первая группа кривых (M_{261} , M_{262} , M_{263}) в диапазоне от 0 до 260 электрических градусов описывается (4) при $\alpha = 0$ и $M = M_{min}$ в интервале углов от 260 до 360 электрических градусов.

$$M(\zeta) = \frac{M_{max} + M_{min}}{2} - \frac{M_{max} - M_{min}}{2} \cdot \cos(1.44 \cdot \zeta + \alpha). \quad (4)$$

Для второй группы кривых (M_{481} , M_{482} , M_{483}) – $M = M_{min}$ в интервале углов от 0 до 90 электрических градусов, для них также справедливо выражение (4) при $\alpha = 225$ в интервале от 90 до 360 электрических градусов (рис. 5). Третья цифра в индексе взаимных индуктивностей указывает на степень насыщения магнитопровода. Взаимная индуктивность между фазами, оси которых взаимно перпендикулярны, составляет менее 1 % от собственной индуктивности, поэтому ею можно пренебречь.

Сравнение кривых, полученных по (4) с экспериментальными приведено на рис. 5. Аппроксимирующие кривые, в зоне ощутимой взаимной индукции, практически, совпадают с экспериментальными, что позволяет

их использовать в математической модели.

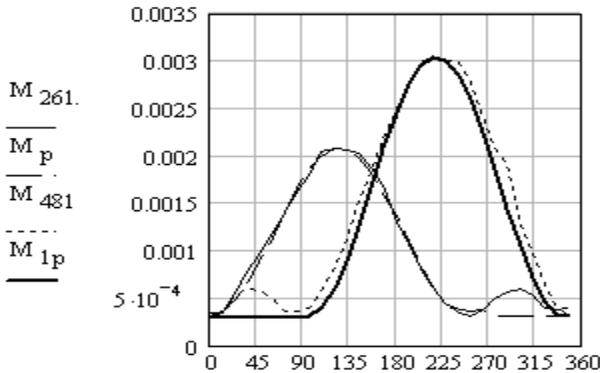


Рис. 5. Аппроксимирующие M_p , M_{1p} и экспериментальные M_{261} , M_{481} зависимости взаимной индуктивности между включенной фазой и соседними фазами

По экспериментальным кривым (рис. 4) можно констатировать, что зависимости взаимных индуктивностей от угла поворота ротора для различных фаз имеют одинаковый характер, но численные значения их различны. Отличие относительно среднего значения доходит до 28 %. Это обусловлено анизотропией стали магнитопровода, эксцентриситетом ротора относительно статора и различием, в пределах допуска, геометрических размеров листов статора и ротора на различных участках. Следует также отметить, что соотношение между максимальным значением собственной индуктивности, какой-либо фазы и максимальными значениями взаимных индуктивностей этой фазы с соседними остается неизменным при различной степени насыщения магнитопровода. Это соотношение колеблется в пределах 0,05-0,07. Минимальное значение взаимной индуктивности M_{min} при умеренном насыщении представляет собой константу, составляющую 0,015 от собственной индуктивности фазы.

Вышеприведенные экспериментальные данные были получены при использовании источника питания ограниченной мощности. Поэтому при малых углах приходилось несколько снижать напряжение, чтобы не превысить допустимый ток.

Впоследствии представилась возможность провести эксперимент при питании от источника (индукционного регулятора) большой мощности при напряжениях 25 и 110 В, что соответствует изменению тока $0,3 \div 1,44$ А в первом случае и $1,34 \div 10,4$ – во втором рис. 6.

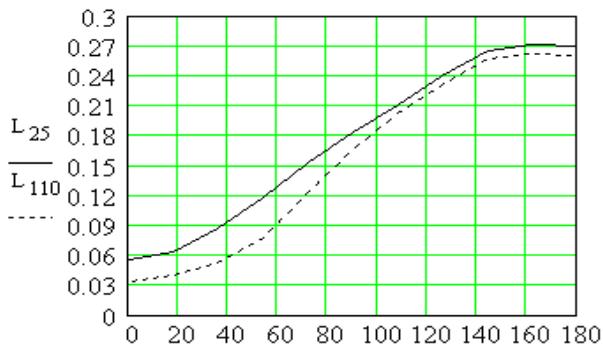


Рис. 6. Зависимости индуктивности фазы от угла поворота ротора при напряжении 25 В – L_{25} и при напряжении 110 В – L_{110} .

По экспериментальным данным был вычислен коэффициент отношения магнитных проводимостей. При напряжении 25 В он равен 4,898, а при напряжении 110 В – 7,758. Как видно из рис. 6, это обусловлено тем, что при насыщении магнитопровода магнитная проводимость фазы в согласованном положении снижается в меньшей степени, чем магнитная проводимость в рассогласованном положении.

Определение зависимости максимального момента от тока обмотки. При значении угла поворота ротора, соответствующем максимальному моменту, и питании двигателя от источника постоянного тока была получена зависимость максимального момента от тока обмотки $M_{max} = f(I)$ рис. 7.

Полученная зависимость была аппроксимирована функцией (5):

$$M_{max} = \begin{cases} 5.333 \cdot 10^{-3} \cdot I^2, & \text{если } I \leq 3.75; \\ 0.08I - 0.296, & \text{если } I \geq 3.75. \end{cases} \quad (5)$$

Из (5) видно, что при малых токах, когда магнитопровод ненасыщен, зависимость максимального момента от тока носит квадратичный характер, а при насыщенном магнитопроводе – линейный.

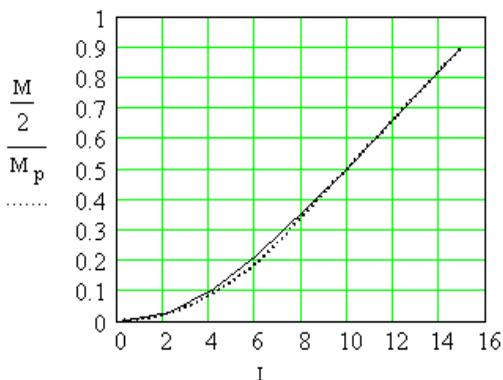


Рис. 7. Зависимость максимального момента от тока обмотки, сплошная кривая – экспериментальная, пунктирная – аппроксимированная

По данным эксперимента получена зависимость величины момента, приходящегося на единицу тока рис. 8.



Рис.8. Зависимость удельного максимального момента от тока обмотки

Удельный максимальный момент в пределах до номинальной мощности линейно возрастает, затем скорость роста снижается и при больших токах он остается практически неизменным

Определение коэффициента рассеяния. Для определения коэффициента рассеяния на зубце статора и на зубце ротора были закреплены измерительные одновитковые обмотки. При подключении фазы статора, на зубце которой закреплена измерительная обмотка, к сети переменного тока при различных напряжениях измерялись ЭДС на дополнительных обмотках. Затем вычислялся коэффициент рассеяния:

$$\sigma = \frac{E_p}{E_c}, \quad (6)$$

где E_p, E_c – ЭДС измерительных обмоток ротора и статора соответственно.

На рис.9 представлена зависимость коэффициента рассеяния от угла поворота ротора при двух величинах напряжения питания – 25 и 110В.

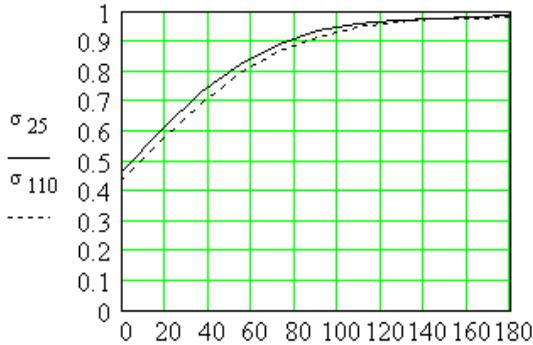


Рис.9. Зависимость коэффициента рассеяния от угла поворота ротора при напряжении 25 В – σ_{25} и 110 В – σ_{110}

Из приведенных кривых следует, что коэффициент рассеяния, практически, не зависит от степени насыщения стали магнитопровода.

Определение механических потерь. Механические потери вентильного индукторно-реактивного двигателя представляется возможным определить с помощью оттарированного двигателя постоянного тока. Для этого вентильный индукторно-реактивный двигатель спаривается с двигателем постоянного тока и в отключенном состоянии вращается последним. По соответствующей тарировочной кривой двигателя постоянного тока определяются механические потери вентильного индукторно-реактивного двигателя. Зависимость механических потерь вентильного индукторно-реактивного двигателя, определенных таким образом, от скорости вращения представлена на рис. 10.

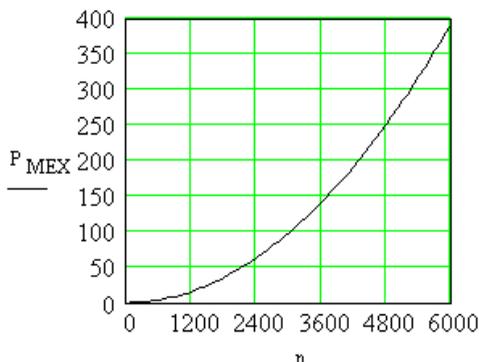


Рис. 10. Зависимость механических потерь вентильного индукторно-реактивного двигателя от скорости вращения

Выводы. Проведенные экспериментальные исследования показали:

1. Характер зависимости собственной индуктивности фазы от угла поворота ротора при малых насыщениях магнитопровода практически не меняется. При значительных насыщениях кривая распределения ощутимо сужается.

2. В зависимости от степени насыщения стали, характер кривых представляющих собой функцию изменения взаимной индуктивности подключенной фазы с близлежащими фазами не меняется, но амплитудные значения взаимоиндуктивности снижаются.

3. Взаимная индуктивность подключенной фазы с фазами, повернутыми на 90 электрических градусов практически равна нулю.

4. Кривая распределения собственной индуктивности фазы в зависимости от угла поворота ротора ощутимо меняется от насыщения. Причем в определенном интервале изменения насыщения коэффициент отношения магнитных проводимостей с ростом насыщения увеличивается, что следует учитывать при определении его оптимальной величины.

5. Коэффициент рассеяния практически не зависит от насыщения.

Список литературы: 1. *Голландцев Ю.А.* Вентильные индукторно-реактивные двигатели. – С.-Петербург, 2003. – 149 с. 2. *Овчинников И.Е.* Вентильные электрические двигатели и привод на их основе. – С.-Петербург: КОРОНА-Век, 2006. – 336 с. 3. *Ткачук В.І.* Електромеханотроніка. – Львів: Видавництво Національного університету "Львівська політехніка", 2006. – 440 с.

Поступила в редколлегию 25.09.08