

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ВЫХОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МОМЕНТНОГО АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ С ШАРОВЫМ РОТОРОМ**Ю.И. Лютахин**Самарский государственный технический университет,
443100, Самара, ул. Молодогвардейская, 244.

E-mail: es@samgtu.ru

Предложен метод идентификации вращающего момента, удельной отдачи и коэффициента использования моментного асинхронного электродвигателя с массивным шаровым ферромагнитным ротором на основе теории электрических и магнитных цепей с учетом волнового сопротивления ротора.

Ключевые слова: *вращающий момент, удельная отдача, коэффициент использования, асинхронный, моментный, шаровой ферромагнитный ротор.*

Моментный асинхронный электродвигатель с полым шаровым ферромагнитным ротором (ШАД) представляет собой высокочастотный управляемый двухфазный электродвигатель, работающий в пусковом или близком к нему режиме (с большим скольжением). Назначением ШАД является преобразование электрического сигнала, поступающего на входы обмоток управления, в электромеханический момент для разворота ротора с объектом управления.

Основное отличие двигателя со сплошным ферромагнитным ротором от двигателя обычного исполнения состоит в том, что он имеет распределенную обмотку ротора, параметры которой зависят от частоты и магнитной проницаемости материала ротора. При пуске, когда частота токов в роторе велика, токи и поле ротора образуются в поверхностном слое незначительной глубины, сопротивление вторичной цепи велико. Благодаря этому свойству ферромагнитных тел двигатель имеет хорошие пусковые характеристики и особую форму механической характеристики. Преимуществом двигателей со сплошным ферромагнитным ротором является то, что при регулировании скорости вращения коэффициент мощности мало зависит от скорости, а это позволяет предельно увеличить допустимый момент в области малых скоростей и повышает устойчивость регулирования за счет саморегулирования.

Использование ШАД в качестве быстродействующего управляемого электропривода в устройствах ориентации, разворота, сканирования с одной или несколькими степенями свободы предъявляет к нему особые требования: высокая частота (f) питающего напряжения, которая должна быть больше максимальной частоты следования управляющих импульсов; двигатель с целью обеспечения высокого механического быстродействия должен развивать как можно больший вращающий момент, а также обладать ротором, имеющим как можно меньший момент инерции; особое требование к моментной характеристике: машина должна эффективно и устойчиво работать при резком переходе из двигательного режима в режим самоторможения, обеспечивая быстрое гашение кинетической энергии ротора; момент, развиваемый электрической машиной, не должен зависеть от угловой ориентации ротора; с целью достижения большего диапазона углового разворота машина должна

обладать статорной системой, имеющей небольшие по сравнению с ротором угловые размеры рабочей зоны.

Перечисленным требованиям соответствует ШАД, разработанный в СамГТУ [1]. В силу перечисленных особенностей ШАД обладает специфическими электромагнитными и электромеханическими свойствами, недостаточно полно учитываемыми традиционными математическими моделями и методиками расчета.

При выполнении исследований принимаются следующие допущения: глубина Δ проникновения поля в материал ферромагнитного ротора определяется так же, как и для плоскопараллельной электромагнитной волны, падающей на поверхность ротора при магнитной проницаемости $\mu_r = \text{const}$; глубина проникновения поля мала по сравнению с полюсным делением (τ); величина воздушного зазора (δ) мала и сравнима с глубиной проникновения поля; магнитная проницаемость (μ_c) магнитопровода статора – бесконечная величина, а электропроводность $\rho_c = 0$; ротор относительно статора неподвижен; токовая нагрузка вдоль расточки электромагнитной системы распределена по синусоидальному закону; длина и ширина ротора превышают активную длину (l_a) и ширину (l_c) статора; активная поверхность статора гладкая, то есть лишена зубчатой структуры, а его обмотка условно вынесена в зазор и является бесконечно тонким слоем; ток питания машины – гармоническая функция временной координаты.

Основными выходными характеристиками моментных двигателей являются величина пускового момента при заданной мощности управления и отношение пускового момента к потребляемой из сети активной мощности.

Выходные характеристики моментных электродвигателей зависят от внешних факторов: соотношения мощностей управления и возбуждения; сдвига по фазе напряжений, подаваемых на обмотки двигателя; частоты сети; температуры активных поверхностей магнитопровода и обмоток, а также от внутренних факторов: числа пар полюсов (p) двигателя, его параметров и соотношений между параметрами.

Разработаем модель и рассмотрим влияние перечисленных факторов на величину пускового момента, который можно получить от данного двигателя при заданных частоте и суммарной мощности, потребляемой из сети [2].

Для двухфазного асинхронного двигателя при данной суммарной потребляемой мощности самым выгодным является режим кругового поля, когда активные мощности возбуждения и управления равны по величине, а относительный сдвиг токов управления и возбуждения во времени равен 90° . Пусковой момент в этом случае максимальный. Отмеченное справедливо для конструкции двигателя, у которого все пазы магнитопровода статора имеют одинаковую форму и площадь, шаги обмоток по пазам одинаковы, а вес меди в обмотке управления равен весу меди в обмотке возбуждения. В пространстве оси обмоток управления и возбуждения сдвинуты относительно друг друга на 90 эл. град.

Если от кругового поля необходимо перейти к несимметричному с сохранением неизменной потребляемой активной мощности, то можно воспользоваться коэффициентом K_c симметрии электромагнитного поля, который показывает, какая часть этой активной мощности будет использоваться в новом режиме для создания вращающего момента.

Представляет интерес оценка зависимости коэффициента K_c от соотношения активных мощностей управления (P_U) и возбуждения (P_B) при условии постоянства их суммы.

Как известно, пусковой момент двухфазного асинхронного управляемого двигателя определяется соотношением

$$M = K_1 I_Y I_B \sin \psi \sin \beta, \quad (1)$$

где K_1 – постоянный коэффициент, зависящий от конструкции двигателя и выбранной системы единиц; I_Y – ток управления; I_B – ток возбуждения; ψ – угол сдвига фазы тока возбуждения относительно фазы тока управления; β – угол пространственного сдвига оси обмотки управления относительно оси обмотки возбуждения, эл. град.

Магнитная система управляемых асинхронных двигателей при работе на повышенных частотах (более 400 Гц) практически всегда ненасыщена, и полное сопротивление цепи обмотки управления при заторможенном роторе и установившемся тепловом режиме не зависит от величины напряжения сигнала и практически постоянно. Постоянными величинами при данных условиях являются также активные сопротивления цепей обмоток управления и возбуждения.

У асинхронных шаровых электродвигателей подшипниковый узел может отсутствовать, и ограничивающим фактором при выборе максимальной мощности является предельно допустимая температура нагрева магнитопровода статора и ротора в активной зоне и вызванные ей механические деформации.

Учитывая, что обычно $\sin \beta = 1$, уравнение (1) можно переписать в виде

$$M = \frac{K_1}{\sqrt{R_Y R_B}} I_Y \sqrt{R_Y} I_B \sqrt{R_B} \sin \psi, \quad (2)$$

где R_Y – активное сопротивление цепи обмотки управления, включающее приведенное активное сопротивление ротора; R_B – активное сопротивление цепи обмотки возбуждения, включающее приведенное активное сопротивление ротора.

Так как $\sqrt{P_Y} = I_Y \sqrt{R_Y}$ и $\sqrt{P_B} = I_B \sqrt{R_B}$, то соотношение (2) можно упростить:

$$M = 2\gamma_0 \sqrt{P_Y P_B} \sin \psi. \quad (3)$$

Здесь γ_0 – удельная отдача по моменту, постоянный для данного двигателя коэффициент, как будет показано ниже, характеризующий удельный момент, приходящийся на единицу потребляемой мощности при круговом поле.

Суммарная активная мощность, потребляемая двигателем:

$$P = P_Y + P_B. \quad (4)$$

Коэффициент сигнала по мощности:

$$\alpha_P = \frac{P_Y}{P_B} \quad (5)$$

Из выражений (4) и (5) следует, что

$$P_Y = \frac{P \alpha_P}{\alpha_P + 1} \quad \text{и} \quad P_B = \frac{P}{\alpha_P + 1}. \quad (6)$$

После подстановки выражений для P_Y и P_B в (3) получим

$$M = \gamma_0 K_C P, \quad \text{где} \quad K_C = \frac{2\sqrt{\alpha_P}}{\alpha_P + 1} \sin \psi. \quad (7)$$

Произведение

$$\gamma_0 K_C = \gamma \quad (8)$$

– удельная отдача двигателя по моменту для несимметричного режима. Для кругового поля $K_C = 1$ и

$$M_0 = \gamma_0 P. \quad (9)$$

Из (9) следует, что

$$\gamma_0 = \frac{M_0}{P}, \quad (10)$$

где γ_0 – величина пускового момента, приходящаяся на единицу потребляемой мощности в режиме кругового поля, или удельная отдача двигателя по моменту для кругового поля. Найдем далее модель для удельной отдачи двигателя через его параметры.

Вращающий момент асинхронного двигателя с разомкнутым магнитопроводом статора определяется выражением

$$M_0 = \frac{P_{\Sigma}}{\omega_c} = \frac{P_{\Sigma} P}{\gamma_{\Sigma} f}, \quad (11)$$

где P_{Σ} – электромагнитная мощность; ω_c – угловая скорость вращения электромагнитного поля, создаваемого статорной системой; γ_{Σ} – центральный угол дуги статора.

В заторможенном режиме вся электромагнитная мощность, передаваемая в ротор, затрачивается на тепловые потери в роторе, поэтому

$$P_{\Sigma} \cong P_R, \quad (12)$$

где P_R – активные потери в роторе.

В свою очередь, можно записать:

$$P_R = \eta P. \quad (13)$$

Здесь η – коэффициент использования, показывающий, какая часть активной мощности, потребляемой двигателем, передается в ротор. Из сравнения соотношений (9) и (11) с учетом (12) и (13) найдем

$$\gamma_0 = \frac{P \eta}{\gamma_{\Sigma} f}. \quad (14)$$

Если пренебречь потерями в стали, можно показать, что

$$\eta = 1 - \frac{r_{sy}}{R_y}, \quad (15)$$

где r_{sy} – активное сопротивление обмотки управления статора.

Из соотношения (15) следует, что коэффициент использования не зависит от соотношения мощностей управления и возбуждения.

Подставляя в (3) соотношение для γ_0 из (14), получим

$$M = \frac{2\eta P}{\gamma_{\Sigma} f} \sqrt{P_y P_B} \sin \psi. \quad (16)$$

Для кругового поля

$$M_0 = \frac{P \eta P}{\gamma_{\Sigma} f}. \quad (17)$$

Выразим коэффициент сигнала по мощности α_P через параметры двигателя. Пусть коэффициент сигнала по напряжению

$$\alpha_U = \frac{U_y}{U_B}, \quad (18)$$

где U_y – напряжение управления (сигнал); U_B – напряжение возбуждения.

Коэффициент трансформации

$$k = \frac{w_{SB}}{w_{SY}}. \quad (19)$$

Здесь w_{SB} , w_{SY} – число эффективных витков обмотки возбуждения и обмотки управления.

Для активной мощности, потребляемой обмоткой управления, справедливо соотношение

$$P_Y = I_Y^2 R_Y = \frac{U_Y^2}{z_Y} R_Y, \quad (20)$$

где z_Y – полное сопротивление обмотки управления.

Для активной мощности, потребляемой обмоткой возбуждения, имеем аналогичное соотношение:

$$P_B = I_B^2 R_B = \frac{U_B^2}{z_B} R_B. \quad (21)$$

Здесь z_B – полное сопротивление обмотки возбуждения. Так как

$$\frac{z_B}{z_Y} = \frac{w_{SB}^2}{w_{SY}^2} = k, \text{ то } \alpha_P = \frac{P_Y}{P_B} = k^2 \alpha_U^2. \quad (22)$$

Выражение для K_C с учетом (22) примет вид

$$K_C = \frac{2k\alpha_U}{k^2\alpha_U^2 + 1} \sin \psi, \text{ или } K_C = \frac{2}{k\alpha_U + \frac{1}{k\alpha_U}} \sin \psi. \quad (23)$$

Используя (7), (14), (15) и (23) для пускового момента, найдем

$$M = \frac{Pp}{\gamma_{Дf}} \left(1 - \frac{r_{SY}}{R_Y} \right) \frac{2k\alpha_U}{k^2\alpha_U^2 + 1} \sin \psi. \quad (24)$$

Уравнение для момента через токи обмоток легко получить из соотношений (3), (14), (20) и (21):

$$M = \frac{2\pi p I_Y I_B}{\gamma_{Дf}} \sqrt{R_Y R_B} \sin \psi. \quad (25)$$

В основу идентификации характеристик и параметров ШАД положена Т-образная эквивалентная схема замещения заторможенного двигателя, в которую входит определяемое отношением комплексных амплитуд касательных к поверхности ротора составляющих напряженностей электрического и магнитного полей комплексное сопротивление массивного ротора. Для упрощения сопротивление r_m принимается равным нулю. Так как синхронная скорость и величина полюсного деления жестко связаны между собой согласно выражениям $\omega_C = 2\tau f$, $p = \frac{l_a}{2\tau}$, целесообразно определить пусковой момент с учетом допустимых тепловых нагрузок для кругового поля из выражения

$$M_{\Pi} = \frac{2p I_{K0}^2}{\gamma_{Дf}} r_{RK} = \frac{2I_{K0}^2}{\omega_C} r_{RK}, \quad (26)$$

где $I_{ко}$ – ток в обмотке управления при пуске; r_{RK} – сопротивление цепи параллельного разветвления: ветвь ротора – ветвь намагничивания Т-образной схемы замещения двигателя при пуске.

Ток $I_{ко}$, определяющий пусковой момент, косвенно отражает тепловую нагрузку двигателя. Поэтому целесообразно в выражение (26) для пускового момента ввести допустимую плотность тока $j_{доп}$, величину которой можно заранее выбирать по результатам теплового расчета [4] с учетом ПВ-режима:

$$I_{ко} = j_{доп} K_3 K_n h_n \frac{l_a}{2m\omega}, \quad (27)$$

где ω – число витков в обмотке фазы одного статора; K_n – коэффициент паза, h_n – высота паза; K_3 – коэффициента заполнения.

Сопротивление цепи разветвления при пуске определяется по формуле

$$r_{RK} = \frac{r_R x_m^2}{r_R^2 + c_1^2 x_m^2}, \quad (28)$$

где $c_1 = \frac{x_m + x_2}{x_m}$.

Приведенные активное сопротивление r_R ротора с учетом влияния гистерезиса и вихревых токов, индуктивное сопротивление x_R ротора и главное индуктивное сопротивление x_m определяются из выражений

$$r_R = 5,6m\rho_R l_C K_r \frac{K_2^2 K_O^2 \omega^2}{\Delta l_a}; \quad (29)$$

$$x_m = 4mfl_C 2\sigma\mu_0 \frac{K_2^2 K_O^2 \omega^2}{\pi K_\mu K_\delta p\delta}; \quad (30)$$

$$x_R = 0,6r_R, \quad (31)$$

где ρ_R – удельное сопротивление материала ротора; K_μ – коэффициент насыщения; K_δ – коэффициент Картера; δ – немагнитный зазор; K_O – обмоточный коэффициент; $K_2 = 1$ – для одноставторного, двухставторного двигателя с параллельным соединением фазных обмоток; m – число фаз.

Глубина проникновения электромагнитной волны в ротор

$$\Delta = \sqrt{\frac{2\rho_R}{\mu_R \omega_C}}. \quad (32)$$

Так как соотношение $\frac{l_C}{\tau} \leq 2,5$ то коэффициент K_r увеличения сопротивления ротора из-за краевого эффекта определяется из выражения [3]:

$$K_r = 1 + \sigma_R \frac{\tau}{l_C}. \quad (33)$$

Обозначим

$$R_2 = 5,6\rho_R K_r \frac{1}{\Delta}; X_m = 2\mu_0 \frac{1}{\pi K_\mu K_\delta p\delta}. \quad (34)$$

Тогда после подстановки (34) в выражение (28) получим:

$$r_{RK} = R_2 m l_C \frac{K_2^2 K_O^2 \omega^2 X_m^2 \omega_C^4}{l_a (R_2^2 + (c_1 X_m)^2 \omega_C^4)}. \quad (35)$$

Окончательно после подстановки (27) и (35) в выражение (26) в результате несложных преобразований получим для прямоугольных пазов статора:

$$M_n = 0,25 j_{\text{дон}}^2 R_2 l_c (K_o K_1 K_2 K_3 K_n h_n)^2 l_a \frac{c_1^2 X_m^2 \omega_c^3}{(R_2^2 + c_1^2 X_m^2 \omega_c^4)}. \quad (36)$$

Выражение (36) определяет вращающий момент при пуске и круговом поле ШАД в функции плотности тока, геометрии, коэффициента заполнения паза медью, типа и соединения обмоток. Выражение оперирует более обобщенными конструктивными параметрами и легко поддается анализу.

Число витков в обмотках управления и возбуждения двигателя определяется выражением

$$w = \frac{2U}{K_1 K_3 K_n h_n l_a j_{\text{дон}} \sqrt{R_k^2 + X_k^2}}, \quad (37)$$

где

$$R_k = R_s \frac{K_2}{K_1} + \frac{K_m^2 R_R}{R_R^2 + (K_m + X_R)^2}; \quad X_k = K_s \frac{K_2}{K_1} + \frac{K_m R_R^2 + K_m X_R (K_m + X_R)}{R_R^2 + (K_m + X_R)^2};$$

$$R_s = \frac{4 \rho_M l_M}{K_3 K_n h_n l_a};$$

$$R_R = \frac{8 \rho_M l_c K_r K_o^2}{\Delta l_a}; \quad K_m = \frac{4 \mu_0 l_c K_o^2 \omega_c^2}{\pi f K_\mu K_8 \delta l_a}; \quad K_s = \frac{4 \pi \mu_0 l_c \omega_c}{q l_a} \sum \lambda.$$

Здесь обозначено: U – величина напряжения источника питания; l_M – средняя длина витка; ρ_M – удельное сопротивление меди; $\sum \lambda$ – суммарный коэффициент магнитной проводимости потоков рассеяния для обмотки одного статора.

Зависимость пускового электромагнитного момента от частоты питающей сети для двухфазного ШАД, у которого число пар полюсов, обмоточные данные и все конструктивные размеры остаются неизменными, имеет вид [3]:

$$M_{\text{п}} = \frac{2 K_1 p I_y^2 x_m^2 \sqrt{f} r_R}{\gamma_{\text{д}} (1,36 r_R^2 + f x_m^2 + 1,2 \sqrt{f} x_m r_R)}. \quad (38)$$

Полагая в приведенном выражении переменной только частоту, взяв по ней производную и приравняв ее нулю, найдем максимум пускового момента. Частота, при которой пусковой момент для кругового поля имеет максимальное значение, определяется из выражения

$$\frac{h^2}{f^2} + \frac{1}{f \sqrt{f}} \left(6h + \frac{2}{h} \right) + \frac{3}{f} + \frac{0,36}{h^2} + 4 = 0, \quad h = \frac{r_R}{x_m}. \quad (39)$$

Зависимость удельной отдачи от частоты сети для тех же условий имеет вид

$$\gamma = \frac{p x_m^2 \sqrt{f} r_R}{\gamma_{\text{д}} (r_s x_m^2 f + r_R f \sqrt{f} + 1,36 r_R^2 r_s + 1,2 r_s r_R x_m \sqrt{f})}. \quad (40)$$

Заключение

Из соотношения (7) следует, что величина пускового момента двигателя пропорциональна удельной отдаче при круговом поле, суммарной активной мощности, поступающей в двигатель, и величине коэффициента симметрии поля.

Максимальное значение удельной отдачи в данном габарите двигателя при заданной частоте напряжения питания обеспечивается выбором рациональной конструкции с оптимальными соотношениями параметров двигателя.

Наибольшая величина активной мощности, которую можно подать в двигатель с данными габаритами, ограничена допустимым нагревом активных материалов.

Максимальная величина коэффициента симметрии ноля равна единице и зависит от схемы питания и соотношения мощностей управления и возбуждения. Если схемой питания задан угол сдвига фазы напряжения управления относительно фазы напряжения возбуждения, то величина K_c полностью определяется соотношением мощностей P_U и P_B . Исследование показывает, что величина коэффициента K_c , а следовательно, и пускового момента снизится не более чем на 9%, если $0,4 < \alpha_p < 2,1$. Указанное обстоятельство следует иметь в виду при выборе мощности управления, которая может быть ограничена.

Рассмотренная методика позволяет рассчитывать электромагнитный момент и мощность ШАД по допустимой плотности тока на предельный режим кругового поля.

Разработана математическая модель вращающего момента, удельной отдачи и коэффициента использования, предложен алгоритм расчета и определены параметры эквивалентной схемы замещения высокочастотного ШАД с учетом волнового сопротивления массивного ферромагнитного ротора, которые позволяют синтезировать ШАД с оптимальными выходными характеристиками

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Лютахин Ю.И.* Идентификация и оптимизация электромагнитной системы асинхронных моментных двигателей с шаровым полым ферромагнитным ротором // Вестник СамГТУ. Серия Технические науки. – 2008. – №2. – С. 164-171.
2. *Костырев М.Л., Лютахин Ю.И.* Электромагнитный момент и мощность моментного асинхронного электродвигателя с шаровым ротором // Вопросы теории и проектирования электрических машин: Межвузовский сборник научных трудов. – Ульяновск: УлГТУ, 2008. – С.116 - 124.
3. *Лютахин Ю.И.* Зависимость выходных характеристик моментного асинхронного двигателя с шаровым ротором от частоты питающей сети // Проблемы электротехники, электроэнергетики и электротехнологии: Труды Международной науч.-техн. конф. Ч.1. – Тольятти: ТГУ, 2009. – С. 305-307.
4. *Лютахин Ю.И.* Краевая задача стационарной теплопроводности ротора шарового асинхронного электродвигателя // Математическое моделирование и краевые задачи: Труды пятой Всероссийской науч. конф. Ч.2. Моделирование и оптимизация динамических систем и систем с распределенными параметрами. – Самара: СамГТУ, 2008. – С. 75-79.

Статья поступила в редакцию 21 мая 2009 г.

UDC 621.313.333

IDENTIFICATION OF OUTPUT CHARACTERISTICS OF TORQUE ANISOCHRONOUS ELECTRIC MOTOR WITH SPHERICAL ROTOR

Y.I. Lyutakhin

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya str., Samara. 443100

The method of torque moment identification, specific recoil and coefficient of the moment anisochronous electric motor with massive spherical ferromagnetic rotor usage on base of electric and magnetic circuits theory with taking into account the wave resistance of rotor is suggested.

Key words: *torque moment, specific recoil, coefficient of usage, anisochronous, moment, spherical ferromagnetic rotor.*