малых перемещений. Амплитуда импульса приложенного напряжения, поданного от системы питания, определится электрическими параметрами тонкопленочного диэлектрика (напряжением пробоя) на поверхности статора, время импульса без учета сил инерции – требуемой точностью перемещения. Таким образом, с помощью полученных характеристик установлены основные особенности системы питания рассматриваемого двигателя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Li C.L., Chen Z.H., Zhou Y.L., Cui D.F. Effect of oxygen content on the dielectric and ferroelectric properties of laser-deposited Ba-TiO₃ thin films // J. Phys. Condens. Matter. – 2001. – № 13. – P. 5261–5268.
- Prakash D., Sharma B.P., Rama Mohan T.R., Gopalan P. Flux addition in Barium Titanate: overview and prospects // J. Solid State Chemistry. – 2000. – № 155. – P. 86–95.
- Дятлов В.Л., Коняшкин В.В., Потапов Б.С., Фадеев С.И. Пленочная электромеханика. – Новосибирск: Наука, 1991. – 247 с.
- Бекишев Р.Ф., Ляпунов Д.Ю., Семенова Л.Н. Применение емкостных устройств для контроля и измерения параметров тон-

Разработанная математическая модель позволяет получить динамические характеристики системы с учетом всех геометрических параметров двигателя и свойств материалов, применяемых при изготовлении. Это дает возможность использовать данную модель при проектировании как силовой части системы, так и системы управления, оптимизировать геометрические параметры двигателя по критерию максимума движущей силы.

копленочных структур в микроэлектронике и медицине // Измерение, контроль, информатизация: Матер. VI Междунар. научно-техн. конф. – Барнаул, 2005. – С. 69–74.

- Бекишев Р.Ф., Ляпунов Д.Ю. Перспективы и проблемы создания емкостных устройств // Оборудование. Регион. 2005. № 2(10). С. 12–14.
- Baginsky I.L., Kostsov E.G. High-energy capacitance electrostatic micromotors // J. of Micromechanics and Microengineering. – 2003. – № 13. – P. 190–200.
- Коняшкин В.В. Релаксация сил в пленочных емкостных структурах // Вычислительные системы. Моделирование в пленочной электромеханике. – 1982. – № 95. – С. 54–61.

УДК 621.313.333:62-83:519.87

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ СО ВСТРОЕННЫМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ПРИВОДОМ ТОРМОЗНОГО УСТРОЙСТВА

П.Р. Баранов, Ю.Н. Дементьев, И.Г. Однокопылов

Томский политехнический университет E-mail: odivan@yandex.ru

Представлена математическая модель асинхронного двигателя с электромагнитным тормозным устройством, включенным в рассечку фазы статора. Модель двигателя описана уравнениями в трехфазной заторможенной системе координат, позволяющая учесть влияние электромагнита, встроенного в одну из фаз статора. Математическая модель, реализованная на языке программирования Delphi в виде программы, позволяет произвести расчет основных динамических режимов асинхронного двигателя с электромагнитным тормозным устройством, а также расчет аварийных режимов работы.

Все серийно выпускаемые асинхронные двигатели с электромагнитными тормозными устройствами (АД с ЭМТУ) оснащены нормально замкнутым дисковым механическим тормозом [1]. При пуске, под действием электромагнитного привода, фрикционные поверхности тормоза размыкаются, двигатель работает в обычном рабочем режиме. При отключении фрикционные поверхности тормоза под действием пружин замыкаются, осуществляя торможение и фиксацию вала АД. Эффективное механическое торможение и последующее надежное удержание вала привода обеспечивает безопасную эксплуатацию подъемно-транспортных машин и механизмов. Такая нормально закрытая конструкция тормоза соответствует требованиям Госгортехнадзора.

В настоящее время серийно выпускаются две модификации АД с ЭМТУ [1], которые различаются способом торможения электромагнитного привода тормозного устройства. К первой модификации относятся двигатели с независимым питанием растормаживающего электромагнита от сети через выпрямитель. Достоинством данной модификации является возможность управления тормозным устройством независимо от режима работы АД. Поэтому основная область применения таких АД с ЭМТУ – частотно-регулируемый электропривод. Но тормозные устройства данной модификации имеют относительно большие габариты и массу, а также без дополнительных схем форсировки такие АД с ЭМТУ будут иметь невысокое быстродействие при пусках и торможениях.

Ко второй модификации относятся асинхронные двигатели и электромагнитные приводы тормозов, имеющие общее питание: выпрямитель с электромагнитом включаются в рассечку одной из фаз двигателя (рис. 1, 2). Достоинством таких АД с ЭМТУ является форсированный пуск электромагнитного привода, что достигается за счет пусковых токов АД. Поэтому такие двигатели находят широкое применение в нерегулируемом электроприводе за счет относительно малых габаритов, высокого быстродействия при минимуме комплектующих изделий. По данным ОАО «СКБ Сибэлектромотор», г. Томск, производство тормозных двигателей с форсировкой от пусковых токов составляет порядка 80 % от общего количества АД с ЭМТУ.

На рис. 1 представлена одна из схем общего питания АД с ЭМТУ, предложенная фирмой «Siemens» [2]. В ней растормаживающий электромагнит, обмотка которого содержит две секции, с двухполупериодным выпрямителем устанавливается в рассечку одной из фаз АД. Такое схемное решение тормозного устройства было использовано при разработке двигателей серии 4А (4А80Е, 4А90Е, 4А100Е). При исследовании эксплутационных показателей этой серии были выявлены следующие недостатки: а) искажение формы тока двигателя, что приводит к снижению энергетических и пусковых показателей; б) увеличение габаритов электромагнита, что уменьшает эффективность охлаждения двигателя серийным вентилятором. Применение двухполупериодной схемы выпрямления с общей точкой оправдывалось уменьшением количества силовых диодов.

В настоящее время при разработке АД с ЭМТУ новой серии было предложено в качестве выпрямителя, питающий электромагнит, использовать традиционный мостовой выпрямитель, выполненный в одном корпусе в виде диодной сборки. Схема включения тормозного устройства приведена на рис. 2. Такое техническое решение позволяет по сравнению со схемой (рис. 1): а) вдвое сократить расход меди в обмотке электромагнита, б) повысить теплоотдачу электромагнита за счет более полного заполнения медью обмоточного пространства, в) снизить искажения тока двигателя [3].



Рис. 1. Схема подключения встроенного электромагнитного тормоза с двухсекционной обмоткой

При создании новой серии АД с ЭМТУ такое схемное решение является наиболее перспективным и оптимальным для нерегулируемого электропривода. В процессе разработки такой серии необходимо провести исследования работы АД с ЭМТУ с целью выявления параметров тормозного устройства, влияющих на энергетические и эксплутационные показатели серийного АД. С точки зрения материальных затрат и сроков проектирования наиболее эффективным способом является математическое моделирование.



Рис. 2. Схема подключения встроенного электромагнитного тормоза с общим питанием

Так как схемное решение встроенного ЭМТУ (рис. 2) вносит несимметрию в напряжения, питающие АД, то при создании математического модели необходимо учесть данный вид несимметрии.

В технической литературе, как правило, для исследования работы АД приводятся математические модели, уравнения которых записаны в двухфазной системе координат. Приведенные в литературе модели, позволяющие исследовать несимметричные режимы [4–6] громоздки и с практической точки зрения трудно реализуются. В связи с этим предложена универсальная математическая модель асинхронного двигателя, позволяющая рассчитывать динамические и статические режимы при различных видах несимметрии.

При составлении уравнений математической модели асинхронной трехфазной машины примем следующие допущения: магнитная цепь АД ненасыщена; энергия магнитного поля сосредоточена в воздушном зазоре; потери в стали и механические потери пренебрежимо малы; воздушный зазор равномерен; напряжения фаз синусоидальны; питающая сеть — идеальная. Диоды мостового выпрямителя идеальны.

Если при моделировании АД уравнения записать в естественной трехфазной системе координат, то взаимные индуктивности между обмотками статора и ротора являются периодическими коэффициентами и изменяются по гармоническому закону при вращении ротора машины. Поэтому чтобы перейти от периодических коэффициентов к постоянным необходимо уравнения АД описать в заторможенной системе координат (α, β, γ), которая неподвижна относительно статорных осей. Система дифференциальных уравнений в этом случае имеет вид [4]:

$$\begin{split} U_A &= R_s \cdot i_A + \frac{d\Psi_A}{dt}, \\ U_B &= R_s \cdot i_B + \frac{d\Psi_B}{dt}, \\ U_C &= R_s \cdot i_C + \frac{d\Psi_C}{dt}, \end{split}$$

$$0 = R_r \cdot i_a + \frac{d\Psi_a}{dt} + (\Psi_b - \Psi_c)\omega/\sqrt{3},$$

$$0 = R_r \cdot i_b + \frac{d\Psi_b}{dt} + (\Psi_c - \Psi_a)\omega/\sqrt{3},$$

$$0 = R_r \cdot i_c + \frac{d\Psi_c}{dt} + (\Psi_a - \Psi_b)\omega/\sqrt{3},$$
 (1)

где R_s , R_r – сопротивления фазы статора и ротора соответственно, U_A , U_B , U_C – фазные питающие напряжения, i_A , i_B , i_C , i_a , i_b , i_c – токи в фазах статора и ротора, ω – угловая скорость вращения вала АД, Ψ_A – потокосцепление фазы:

$$\Psi_{A} = L_{SA}i_{A} - \frac{1}{2}L_{m}i_{B} - \frac{1}{2}L_{m}i_{C} + L_{m}i_{a} - \frac{1}{2}L_{m}i_{b} - \frac{1}{2}L_{m}i_{c} .$$

Потокосцепления Ψ_{B} , Ψ_{C} , Ψ_{a} , Ψ_{b} , Ψ_{c} записываются аналогично. Подставляя потокосцепления в систему уравнений (1), получим 6 уравнений и 6 неизвестных: i_{A} , i_{B} , i_{C} , i_{a} , i_{b} , i_{c} . Для решения полученной системы численными методами необходимо привести ее к нормальной форме Коши. Алгебраическими преобразованиями систему (1) к нормальной форме Коши привести затруднительно, поэтому воспользуемся матричной формой записи уравнений. Матричное уравнение в нормальной форме Коши будет выглядеть следующим образом:

$$\frac{d[i]}{dt} = [L_1]^{-1} \cdot \{[U] - ([R] + [L_2] \cdot \frac{\omega}{\sqrt{3}}) \cdot [i]\}, \qquad (2)$$

где [i] — матрица неизвестных (токи статора и ротора); [U] — матрица напряжений; [R] — матрица сопротивлений; $[L_1]$, $[L_2]$ — матрицы индуктивностей:

$$\begin{split} \left[I_{2} \right] = \begin{bmatrix} i_{s} \\ i_{g} \\ i_{c} \\ i_{s} \\ i_{b} \\ i_{c} \end{bmatrix}; & \left[U \right] = \begin{bmatrix} U_{s} \\ U_{g} \\ U_{c} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; & \left[R \right] = \begin{bmatrix} R_{s} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_{s} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_{s} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_{r} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_{r} \end{bmatrix}; \\ \left[I_{1} \right] = \begin{bmatrix} L_{s} & -L_{m}/2 & -L_{m}/2 & -L_{m}/2 & -L_{m}/2 & -L_{m}/2 \\ -L_{m}/2 & L_{s} & -L_{m}/2 & -L_{m}/2 & -L_{m}/2 & L_{m} \\ -L_{m}/2 & -L_{m}/2 & -L_{m}/2 & -L_{m}/2 & -L_{m}/2 & L_{m} \\ -L_{m}/2 & -L_{m}/2 & -L_{m}/2 & -L_{m}/2 & -L_{m}/2 & L_{m} \\ -L_{m}/2 & -L_{m}/2 & -L_{m}/2 & -L_{m}/2 & -L_{m}/2 \\ -L_{m}/2 & -L_{m}/2 & -L_{m}/2 & -L_{m}/2 & -L_{m}/2 \\ -L_{m}/2 & -L_{m}/2 & -L_{m}/2 & -L_{m}/2 & -L_{m}/2 \\ -L_{m}/2 & -L_{m}/2 & -L_{m}/2 & -L_{m}/2 & -L_{m}/2 \\ -L_{m}/2 & -L_{m}/2 & -L_{m}/2 & -L_{m}/2 & -L_{m}/2 \\ -L_{m}/2 & -L_{m}/2 & -L_{m}/2 & -L_{m}/2 & -L_{m}/2 \\ -L_{m}/2 & -L_{m}/2 & -L_{m}/2 & -L_{m}/2 & -L_{m}/2 \\ -L_{m}/2 & -L_{m}/2 & -L_{m}/2 & -L_{m}/2 & -L_{m}/2 \\ -L_{m}/2 & -L_{m}/2 & -L_{m}/2 & -L_{m}/2 & -L_{m}/2 \\ -L_{m}/2 & -L_{m}/2 & -L_{m}/2 & -L_{m}/2 & -L_{m}/2 \\ -L_{m}/2 & -L_{m}/2 & -L_{m}/2 & -L_{m}/2 & -L_{m}/2 \\ -L_{m}/2 & -L_{m$$

Решением системы матричного уравнения (2) являются токи во всех фазах статора и ротора. По

токам можно определить электромагнитный момент двигателя *M*:

$$M = p_n \frac{\sqrt{3}}{2} L_m [(i_A i_c + i_B i_a + i_C i_b) - (i_A i_b + i_B i_c + i_C i_a)].$$

Уравнение движения электропривода для АД с ЭМТУ можно представить в следующем виде [7]:

$$\frac{J_{\Sigma}}{p_n} \cdot \frac{d\omega}{dt} = M - M_c - l_{Q_T} M_T \operatorname{sign}(\omega),$$

где M_T – тормозной момент; J_{Σ} – суммарный момент инерции вращающихся масс, приведенных к валу двигателя; p_n – число пар полюсов; 1_{Q_T} – единичная функция: 1_{Q_T} =1 при $Q_{T\Pi P} < Q$, 1_{Q_T} =0 при $Q_{T\Pi P} > Q$; Q_T – тяговое усилие электромагнита, $Q_{\Pi P}$ – противодействующее усилие возвратных пружин; sign(ω) – функция, учитывающая реактивность тормозного момента: sign(ω)=1 при $\omega \ge 0$, sign(ω)=–1 при $\omega < 0$.

Для учета влияния несимметрии, вносимой тормозным устройством в работу асинхронного двигателя, рассмотрим работу схемы включения ЭМТУ, например, в фазу «*A*» двигателя, рис. 3.

На рисунке: L_s , R_s – индуктивность и активное сопротивление обмотки статора АД; i_A – ток в обмотке статора в фазе «*A*»; L_3 , R_3 – индуктивность и активное сопротивление электромагнита; i_d – выпрямленный ток электромагнита.



Рис. 3. Электрическая схема фазы «А» асинхронного двигателя с подключенным электромагнитом

Работа такой схемы происходит в два этапа и описывается следующими уравнениями.

Этап 1. Ток в схеме нарастает, выпрямленный ток i_d равен току статора i_A по модулю:

$$U_{A} = (R_{S} + R_{9}) \cdot i_{A} + \frac{di_{A}}{dt} (L_{S} + L_{9}), \quad i_{d} = |i_{A}|.$$

Этап 2. Ток i_d за счет энергии, накопленной в L_{∂} , спадает по замкнутому контуру:

$$U_A = R_S \cdot i_A + \frac{di_A}{dt} L_S, \quad i_d = R_{\mathcal{P}} \cdot i_d + \frac{di_d}{dt} L_{\mathcal{P}}.$$

Тогда матрица уравнения (2) на 1-ом этапе будет содержать индуктивность и активное сопротивление электромагнита L_3 , R_3 :

$$\begin{split} [L_1] = \begin{bmatrix} L_s + L_9 & -L_m/2 & -L_m/2 & L_m & -L_m/2 & -L_m/2 \\ -L_m/2 & L_s & -L_m/2 & -L_m/2 & L_m & -L_m/2 \\ -L_m/2 & -L_m/2 & L_s & -L_m/2 & -L_m/2 & L_m \\ L_m & -L_m/2 & -L_m/2 & L_R & -L_m/2 & -L_m/2 \\ -L_m/2 & L_m & -L_m/2 & -L_m/2 & L_R & -L_m/2 \\ -L_m/2 & -L_m/2 & L_m & -L_m/2 & -L_m/2 & L_R \end{bmatrix} ; \\ \begin{bmatrix} R_1 \\ R_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + R_9 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_r & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \end{split}$$

Система дифференциальных уравнений (2) решена численным методом Рунге-Кутта 4-ого порядка и реализована на языке программирования Delphi. В полученной программе для АД АИР112М4 были рассчитаны графики переходных процессов пуска двигателя со встроенным ЭМТУ под нагрузкой.





Рис. 5. Графики переходных процессов M(t), $M_{\rm T}(t)$, $\omega(t)$ при пуске АД с ЭМТУ

На рис. 4, 5 представлены графики переходных процессов $i_A(t)$, $i_d(t)$, M(t), $M_T(t)$, $\omega(t)$ при пуске АД с ЭМТУ, полученные на предложенной математической модели. Выпрямленный ток электромагнита i_d при пуске двигателя – форсированный и равен пусковому току двигателя i_A . После срабатывания электромагнита тормозной момент M_T падает до нуля, и происходит разгон двигателя. Ток электромагнита i_d плавно снижается вместе с током статора.



Рис. 6. Экспериментальные графики переходных процессов $i_{A}(t)$, $i_{d}(t)$, $\omega(t)$ при пуске АД с ЭМТУ (1 о.е. соответствует номинальному режиму)

В электромашинной лаборатории ОАО «СКБ Сибэлектромотор» (г. Томск), были проведены экспериментальные исследования. В качестве опытного образца использовался серийный асинхронный двигатель АИР112М4Е, оснащенный дисковым тормозным устройством. Питание электромагнитного привода осуществлялось через мостовой выпрямитель, включенный в рассечку фазы обмотки статора (рис. 2).

При помощи шлейфового осциллографа H-115 фиксировались значения тока статора, электромагнита и угловая скорость вращения ротора АД в относительных единицах (рис. 6). В эксперименте использовался источник питания большой мощности, поэтому просадка напряжения при пуске АД не превышала 6 % от номинального значения.

Результаты сравнения экспериментальных данных и теоретических расчетов показали следующее. Кратность пускового тока при экспериментальных исследованиях (k_r =13) и на математической модели $(k_{T}=15)$ находятся в пределах заданной погрешности. Кривые изменения тока статора и выпрямленного тока в динамическом режиме на модели и в реальном двигателе подобны. Однако следует отметить, что выпрямленный ток электромагнита i_d в эксперименте имеет более высокие пульсации, что объясняется насыщением магнитопровода при больших значениях тока при пуске двигателя. В математической же модели двигателя с тормозным устройством использовалось допущение о ненасыщенной магнитной системе, поэтому индуктивность электромагнита при пуске выше, чем у опытного образца, а значит, и пульсации выпрямленного тока меньше. Темп нарастания скорости вращения ротора также практически совпал с моделью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Технический каталог ОАО «СКБ Сибэлектромотор». Томск, 2005.
- Siemens Aktiengesellschaft. Hebezeug Motorer. Katalog H2, 1987. –78 S.
- Электротехнический справочник: В 3-х т. Т. 2. Электротехнические изделия и устройства / Под общ. ред. профессоров МЭИ (гл. ред. И.Н. Орлова и др.). – 7-е изд., испр. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 712 с.: ил.
- Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 2001. – 327 с.

Выводы

Предложена математическая модель, позволяющая корректно анализировать динамические электромеханические процессы в асинхронных двигателях со встроенным электромагнитным тормозом, включенным в рассечку фазы статора.

Разработанная математическая модель позволяет выявить параметры тормозного устройства, влияющие на энергетические и эксплутационные показатели серийного асинхронного двигателя, что дает возможность оптимизировать пусковые и рабочие характеристики двигателя при проектировании.

Модель позволяет проводить анализ динамических и энергетических показателей при существенной несимметрии трехфазных обмоток статора, а также для моделирования аварийных режимов работы.

- Мощинский Ю.А., Петров А.П. Математическая модель несимметричного асинхронного двигателя на основе схем замещения для переходных режимов // Электротехника. – 2003. – № 2. – С. 24–30.
- Казовский Е.Я. Переходные процессы в электрических машинах переменного тока. – М.: Изд-во АН СССР, 1968. – 526 с.
- Однокопылов И.Г. Математическая модель асинхронного двигателя с электромагнитным тормозным устройством // Наука. Технологии. Инновации: Матер. Всеросс. научной конф. молодых ученых в 6-ти частях. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. – Ч. 1. – С. 52–54.

УДК 621.311.6

МАССОГАБАРИТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ В ФУНКЦИИ ОТ РАБОЧЕЙ ГЛУБИНЫ ТЕЛЕУПРАВЛЯЕМОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА

В.М. Рулевский, Ю.Н. Дементьев, О.В. Бубнов*

Томский политехнический университет *ГНУ НИИ Автоматики и электромеханики при ТУСУР E-mail: rulevsky@mail.ru

Приведены теоретические и экспериментальные результаты исследований влияния структуры и элементов системы электропитания телеуправляемого подводного аппарата, а также способа передачи энергии по кабель-тросу на массогабаритные характеристики системы в функции от рабочей глубины.

Геологические, спасательные и технические работы под водой на довольно больших глубинах (от 100 до 6000 м) обусловили необходимость развития класса многофункциональных телеуправляемых подводных аппаратов (ТПА). Проблема создания эффективных и высоконадежных глубоководных ТПА в значительной степени связана [1, 2] с оптимизацией сопряжения информационного и энергетического каналов передачи энергии по единому кабель-тросу и с надежностью обеспечения стабилизации напряжений на потребляющих нагрузках и т.д. Данная работа решает задачу выбора структуры и элементов системы электропитания (СЭП) ТПА, а также обосновывает её массогабаритные характеристики в функции от рабочей глубины аппарата с учетом требований по выбору СЭП ТПА: высокой надежности, времени непрерывной работы; малых размеров и массы; величины передаваемой мощности; легкости замены модулей СЭП.

Все СЭП условно делятся на две группы, в зависимости от места расположения первичного источника электроэнергии: с автономным источником