

М. В. Баранов, О. А. Корчагин

**ВЫСОКОМОМЕНТНЫЙ МЕХАТРОННЫЙ
МОДУЛЬ ПРИВОДА ТЕЛЕСКОПА**

Рассмотрен мехатронный модуль привода телескопа, к которому предъявлены повышенные требования в отношении плавности управления при требуемом большом моменте, развиваемом двигателем, и ограничениях по его массе и объему конструкции. Особенность предлагаемого модуля — использование двигателя большого момента (собственной разработки) и специальных алгоритмов управления двигателем, обеспечивающих требования к плавности.

E-mail: info@npf-polytech.ru; koroleg@inbox.ru

Ключевые слова: синхронный двигатель с трапецеидальной формой ЭДС, повышенный удельный момент, высокая плавность управляемых движений.

При создании прецизионных систем управления движением телескопов, антенн и других подобных объектов возникает необходимость построения высокоточных безредукторных приводных модулей, обеспечивающих высокую плавность движений объекта управления, на который действуют значительные внешние возмущающие моменты. Одновременно с этим остро стоит проблема минимизации массы и объема привода, встраиваемого в ту или иную конструкцию. Поэтому актуальна задача существенного увеличения удельного момента двигателя, представляющего собой отношение момента двигателя к его массе.

Традиционно для решения такой задачи применялись синхронные двигатели с синусоидальной формой ЭДС. Однако по удельному моменту они проигрывают двигателям с трапецеидальной формой ЭДС. Исследованию и обсуждению результатов разработки приводов на основе синхронных двигателей посвящены работы [1–3]. Предложения по созданию мехатронных модулей содержатся в работе [4]. Вместе с тем вопросы построения приводных модулей прецизионных систем управления на основе высокомоментных синхронных двигателей с трапецеидальной формой ЭДС до сих пор не рассматривались. Таким образом, актуальна задача исследования свойств синхронных двигателей с трапецеидальной формой ЭДС и разработка на этой основе мехатронных приводных модулей, имеющих повышенный удельный момент и высокую плавность управляемых движений.

Концепция построения и конструктивные особенности мехатронного модуля. Мехатронный модуль состоит из высокомоментного синхронного двигателя, усилителя мощности, датчиков тока, датчика углового положения ротора двигателя и управляющего ми-

кроконтроллера для реализации регуляторов токовых контуров управления двигателем. Выбор в качестве исполнительного двигателя синхронного двигателя с постоянными магнитами на роторе обусловлен тем, что по сравнению с электродвигателями других типов он имеет наибольший удельный момент [1, 3].

Как правило, для обеспечения высокой плавности движения объекта управления применяют двигатели с синусоидальной формой ЭДС. Однако по сравнению с двигателями, имеющими трапецеидальную форму ЭДС, они проигрывают по развиваемому моменту при тех же объемах и массах. Это обстоятельство является решающим, так как по условиям компоновки привода требуется, чтобы при заданном ограниченном объеме, который выделен для размещения двигателя, и при ограничении по массе обеспечивался наибольший момент, развиваемый исполнительным двигателем.

Поэтому при создании приводов указанных объектов предлагается формировать мехатронный модуль, в котором используется высокомоментный синхронный двигатель с трапецеидальной формой ЭДС. Вместе с тем двигатели с трапецеидальной формой ЭДС имеют недостаток — непостоянство развиваемого момента на электрическом периоде двигателя. Для достижения высокой плавности движений разработан алгоритм формирования токов в фазных обмотках двигателя, компенсирующий этот недостаток.

Кроме того, существенная особенность предлагаемого мехатронного модуля состоит в том, что в нем использован синхронный двигатель (собственной разработки), форма ЭДС которого также трапецеидальна, однако момент, развиваемый двигателем, существенно больше, чем в серийно выпускаемом двигателе такого же типа при одинаковом внешнем объеме, занимаемом конструкцией двигателя, или при одинаковой массе. Более подробное сопоставление характеристик разработанного двигателя с характеристиками серийно выпускаемого двигателя будет приведено далее. Значительный выигрыш удалось получить благодаря оптимизации конструкции и конструктивных параметров электромеханической части двигателя с учетом того факта, что максимальная скорость вращения телескопа почти в 30 раз меньше, чем максимальная скорость вращения серийно выпускаемого двигателя.

Функциональная схема мехатронного модуля показана на рис. 1. Основой усилителя мощности является интегральный силовой модуль, объединяющий в себе шесть силовых транзисторов, драйверы управления стойками транзисторов и выпрямитель, преобразующий переменное напряжение в постоянное. На входе модуля имеется шесть сигналов, управляющих состоянием транзисторов. Обмотки трехфазного двигателя соединены по схеме “звезда”. Токи, протекающие в трех обмотках двигателя, измеряются с помощью трех датчиков тока:

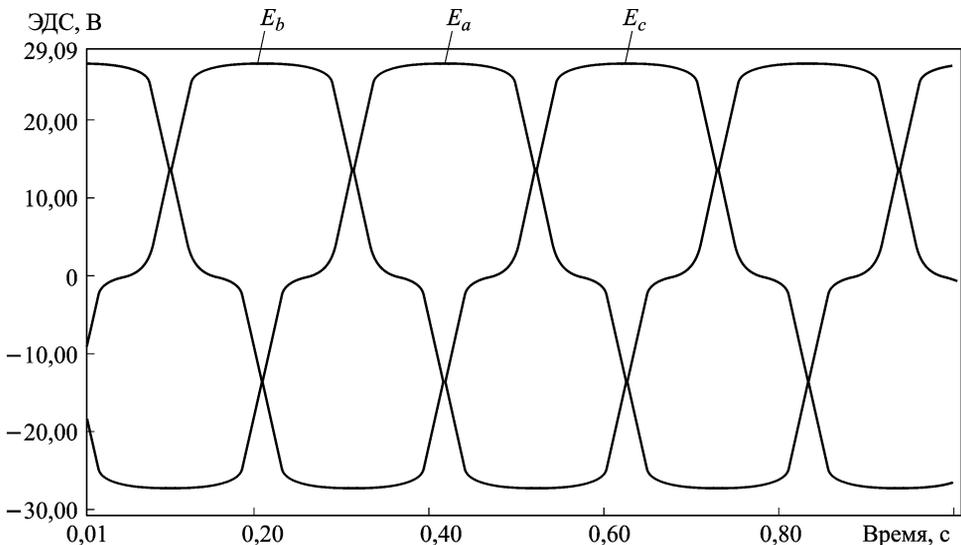


Рис. 2. Форма ЭДС при постоянной скорости вращения

ДТ_А, ДТ_В и ДТ_С. Каждая фазная обмотка состоит из двух обмоток, имеющих одинаковое число витков. При штатной работе двигателя эти обмотки соединены последовательно. Сигналы управления токовыми контурами вычисляются в управляющем контроллере и подаются на их входы через три цифроаналоговых преобразователя ЦАП_А, ЦАП_В и ЦАП_С.

Алгоритм формирования управляющих токов двигателя. Отличительной особенностью мехатронного модуля является алгоритм формирования управляющих токов, реализованный в контроллере в блоках 1 и 2 (см. рис. 1). Закон изменения управляющих токов вырабатывается на основе обработки экспериментально полученной зависимости ЭДС в фазных обмотках двигателя от времени при постоянной скорости вращения ротора. Формы ЭДС трех фаз $E_a(t)$, $E_b(t)$ и $E_c(t)$ при постоянной скорости Ω вращения ротора двигателя представлены на рис. 2. Разложение этих периодических функций в ряд Фурье показало, что кроме первой гармоники заметными являются пятая и седьмая гармоники, амплитуды которых по отношению к первой гармонике составляют для разработанного двигателя приблизительно 11,6 и 6,1%, соответственно. Если пренебречь более высокими гармониками, то фазные ЭДС описываются следующими зависимостями:

$$\begin{aligned}
 E_a(t) &= E_1 \sin(p\alpha(t)) - E_5 \sin(5p\alpha(t)) - E_7 \sin(7p\alpha(t)); \\
 E_b(t) &= E_1 \sin(p\alpha(t) - 2\pi/3) - E_5 \sin(5p\alpha(t) - 10\pi/3) - \\
 &\quad - E_7 \sin(7p\alpha(t) - 14\pi/3); \\
 E_c(t) &= E_1 \sin(p\alpha(t) - 4\pi/3) - E_5 \sin(5p\alpha(t) - 20\pi/3) - \\
 &\quad - E_7 \sin(7p\alpha(t) - 28\pi/3),
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

где E_1, E_5, E_7 — амплитуды первой, пятой и седьмой гармоник соответственно; $\alpha(t)$ — угол поворота ротора двигателя относительно статора; p — коэффициент электрической редукции двигателя (число пар постоянных магнитов на роторе).

Для формирования управляющих токов, обеспечивающих постоянство момента при наличии в фазных ЭДС пятой и седьмой гармоник, выразим момент, развиваемый двигателем при постоянной скорости вращения, через фазные ЭДС и токи:

$$M_D(t) = (E_a(t)I_a(t) + E_b(t)I_b(t) + E_c(t)I_c(t))/\Omega. \quad (2)$$

Это выражение следует из равенства полезной мощности, развиваемой двигателем и выраженной через электрические параметры,

$$N_{\Sigma}(t) = E_a(t)I_a(t) + E_b(t)I_b(t) + E_c(t)I_c(t),$$

и полезной мощности, выраженной через механические переменные,

$$N_M(t) = M_D(t)\Omega.$$

Если бы в ЭДС, определяемых в соответствии с выражениями (1), отсутствовала бы седьмая гармоника, то при задании токов в соответствии с зависимостями

$$\begin{aligned} I_a(t) &= I_1 \sin(p\alpha(t)) + I_5 \sin(5p\alpha(t)), \\ I_b(t) &= I_1 \sin(p\alpha(t) - 2\pi/3) + I_5 \sin(5p\alpha(t) - 10\pi/3), \\ I_c(t) &= I_1 \sin(p\alpha(t) - 4\pi/3) + I_5 \sin(5p\alpha(t) - 20\pi/3), \end{aligned} \quad (3)$$

и при соблюдении условия $E_1/E_5 = I_1/I_5$, из выражения (1) при $E_7 = 0$ и зависимостей (2) и (3) следует строгое равенство

$$M_D(t) = M_0 = \text{const.}$$

Но поскольку в ЭДС имеется седьмая гармоника, то при использовании зависимостей (3) в моменте $M_D(t)$ в этом случае будет присутствовать шестая гармоника с амплитудой, равной 6,5 % постоянной составляющей.

Учтем седьмую гармонику, причем, как и в случае с пятой гармоникой, знак соответствующих слагаемых зададим положительным в отличие от отрицательного в формулах для определения ЭДС:

$$\begin{aligned} I_a(t) &= I_1 \sin(p\alpha(t)) + I_5 \sin(5p\alpha(t)) + I_7 \sin(7p\alpha(t)), \\ I_b(t) &= I_1 \sin(p\alpha(t) - 2\pi/3) + I_5 \sin(5p\alpha(t) - 10\pi/3) + \\ &+ I_7 \sin(7p\alpha(t) - 14\pi/3), \\ I_c(t) &= I_1 \sin(p\alpha(t) - 4\pi/3) + I_5 \sin(5p\alpha(t) - 20\pi/3) + \\ &+ I_7 \sin(7p\alpha(t) - 28\pi/3). \end{aligned} \quad (4)$$

При соблюдении условий $E_1/E_5 = I_1/I_5$ и $E_1/E_7 = I_1/I_7$ из выражений (1), (2) и (4) следует

$$M_D(t) = M_0 + \Delta M \sin(12p\alpha(t)), \quad (5)$$

причем амплитуда 12-й гармоники будет равна всего 1,5 % M_0 .

В связи с повышенными требованиями к плавности управления угловое положение ротора двигателя $\alpha(t)$, используемое при вычислении управляющих токов, определяется с помощью цифрового преобразователя угла (ЦПУ) (см. рис. 1), младший разряд которого соответствует единицам угловых секунд. Этот ЦПУ в приводе также является датчиком главной обратной связи.

Сумма токов, вычисляемых по выражению (4), равна нулю, поэтому обмотки могут быть соединены по схеме “звезда”. Высокочастотные составляющие тока, связанные с переключением транзисторов, не синхронны в трех фазах и вследствие этого высокочастотная составляющая суммы токов фаз ненулевая. Для компенсации указанной составляющей средняя точка схемы “звезда” соединена через конденсаторы с положительной и отрицательной шинами источника питания (см. рис. 1). Поскольку на практике электрические параметры не строго равны номинальным значениям (в частности сопротивления резисторов) и существует малая ненулевая низкочастотная составляющая суммы трех токов, то для ее компенсации параллельно с указанными конденсаторами включены резисторы большого номинала.

Зависимость (2) не учитывает момента магнитного залипания в двигателе, поскольку та часть магнитного потока, создаваемая постоянными магнитами на роторе, которая замыкается непосредственно через концентраторы зубцов и не проходит через фазные обмотки двигателя (следовательно, не сказывается на ЭДС в фазных обмотках), участвует в формировании момента залипания. Момент залипания определяется либо экспериментально, либо на основе математического моделирования двигателя при использовании метода конечных элементов.

В разработанном двигателе по сравнению с серийно выпускаемым двигателем увеличен момент залипания, поскольку при оптимизации конструктивных параметров двигателя в качестве основного критерия был принят максимальный момент, развиваемый двигателем. Для компенсации влияния момента залипания в алгоритме формирования фазных токов предусмотрена компенсирующая добавка $I_Z(\alpha)$ (блок 2, см. рис. 1).

Зависимость момента залипания от угла поворота ротора, полученная моделированием при использовании метода конечных элементов, показана на рис. 3. Если разложить эту периодическую функцию в ряд Фурье, то зависимость момента магнитного залипания от угла пово-

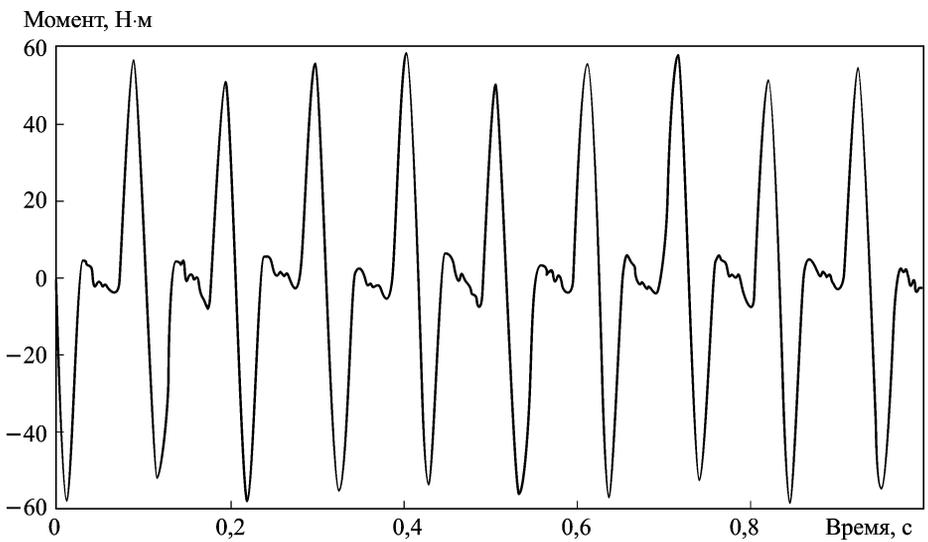


Рис. 3. Момент магнитного “залипания” при постоянной скорости вращения

рота ротора с достаточной точностью можно представить в виде

$$M_Z(\alpha) = M_6(6p\alpha(t)) - M_{12}\sin(12p\alpha(t)), \quad (6)$$

где M_6 , M_{12} — амплитуды шестой и 12-й гармоник. В разработанном двигателе амплитуды шестой и 12-й гармоник соотносятся как единица к 1,2.

Добавка в сигнале управления токового контура, компенсирующая момент залипания, вычисляется в соответствии с зависимостью

$$I_Z(\alpha) = I_{12}(12p\alpha(t)) - I_6\sin(6p\alpha(t)), \quad (7)$$

Соотношение между амплитудами гармоник должно быть такое же, как в выражении (6), т.е. $I_{12}/I_6 = M_{12}/M_6$.

Таким образом, на вход токового контура поступает суммарный управляющий сигнал

$$I_{YZ} = I_Y + I_Z(\alpha). \quad (8)$$

В этом сигнале первая составляющая формируется в результате замыкания внешних по отношению к токовому контуру контуров управления (контура обратной связи по скорости и контура главной обратной связи по углу), а вторая составляющая зависит только от угла поворота двигателя.

Управляющий сигнал I_{YZ} должен быть подвергнут корректировке, прежде чем он поступит на вход блока I (см. рис. 1), в котором осуществляются преобразования в соответствии с выражениями (4). Необходимость этой корректировки вызвана нелинейной зависимостью между моментом, развиваемым двигателем, и заданным током. Эта нелинейная зависимость возникает в разработанном низкоскоростном

двигателе из-за того, что обмотки управления создают такой магнитный поток управления, при котором в случае токов приблизительно более 6 А заметно начинают проявляться эффекты насыщения магнитопровода статора двигателя.

Учет нелинейной зависимости момента двигателя от тока. Для разработанного двигателя экспериментально была определена зависимость между током I , протекающим по двум последовательно соединенным фазным обмоткам (в третьей фазе ток нулевой), и моментом, развиваемым двигателем. Эту зависимость можно охарактеризовать моментным коэффициентом $k_m(I)$, зависящим от тока:

$$M_D = k_m(I)I.$$

С погрешностью около 1 % экспериментальные данные аппроксимируются гиперболической зависимостью

$$k_m(I) = \frac{1}{a_0 + a_1 I}, \quad (9)$$

где $a_0 = 4,34210^{-3} \text{ А}/(\text{Н} \cdot \text{м})$, $a_1 = 1,4610^{-4}(\text{Н} \cdot \text{м})^{-1}$.

Для компенсации нелинейной зависимости момента от управляющего тока суммарный управляющий ток, (8) перед тем как использовать его в блоке 1 (см. рис. 1), преобразуют функцией $\varphi(I_{YZ})$:

$$\varphi(I_{YZ}) = \frac{I_{YZ} a_0}{a_0 - a_1 I_{YZ}}. \quad (10)$$

Рассмотрим особенности экспериментального определения законов изменения ЭДС при постоянной скорости вращения. Обмотки каждой фазы состоят из двух равных частей. При определении ЭДС одна часть обмотки двигателя активна, в нее задается управляющий ток, а вторая часть, в которой наводится ЭДС, является измерительной. Для обеспечения постоянной скорости вращения используется цифровой преобразователь скорости (ЦПС) (см. рис. 1), погрешность которого не превышает 1 %. Скоростной контур, на вход которого подается заданная скорость Ω_0 , охвачен обратной связью по выходному сигналу ЦПС. Поскольку при измерении ЭДС вращается только ротор двигателя и резонансные свойства конструкции телескопа не ограничивают полосу пропускания скоростного контура, то в скоростном контуре реализуется коэффициент усиления по скоростному рассогласованию k_Ω такого значения, чтобы погрешность от момента магнитного залипания также не превышала 1 %.

Таким образом, разработанные алгоритмы управления двигателем позволяют применить в составе мехатронного модуля высокоэффективный двигатель с высоким удельным моментом, трапецеидальной формой ЭДС, с заметным моментом залипания и нелинейной зависимостью развиваемого момента от управляющего тока. Однако при

этом двигатель позволяет обеспечить высокую плавность движения объекта управления в силу:

- учета в управляющих фазных токах высших гармоник, при котором обеспечивается постоянство развиваемого момента в любом положении ротора;

- компенсации основных составляющих момента магнитного залипания;

- компенсации нелинейной зависимости момента, развиваемого двигателем, от силы тока, протекающего в его фазных обмотках.

Представляются интересными результаты сопоставления характеристик разработанного двигателя, который используется в предлагаемом мехатронном модуле, с двигателем RSM-P-36-550*0, серийно выпускаемым фирмой “Рухсервомотор” (г. Минск). Оба двигателя имеют одинаковые внешний диаметр статора (657 мм) и длину по осевому направлению (105 мм).

В двигателе фирмы “Рухсервомотор” толщина магнитопровода статора и соответственно размер магнита по осевому направлению 50 мм. В спроектированном двигателе толщина магнитопровода статора 50 мм, концентраторы зубцов удлинены по осевому направлению до 72 мм и соответственно размер магнита по осевому направлению 72 мм. Масса ротора и статора серийного двигателя составляет 122 кг, масса ротора и статора разработанного двигателя — 140 кг. В серийно выпускаемом двигателе сопротивление двух фаз $2R_{\phi} = 5,22 \text{ Ом}$ при температуре 100°C , в спроектированном двигателе $2R_{\phi} = 11,43 \text{ Ом}$.

Сопоставим двигатели по развиваемому моменту. Для серийного двигателя при водяном охлаждении длительный ток 23 А обеспечивает стояночный момент 1053 Н·м. При этом выделяемая мощность на активном сопротивлении будет $23^2 \cdot 5,22 = 2761 \text{ Вт}$. Для того чтобы обеспечить такой момент с помощью спроектированного двигателя, необходимо задать ток $\sim 6 \text{ А}$. В этом случае выделяемая мощность на активном сопротивлении примерно в 6 раз меньше и равна $6^2 \times 11,43 = 411 \text{ Вт}$. С учетом большой площади статора и возможности отвода теплоты от статора в конструкцию изделия, в котором установлен двигатель, специальной системы охлаждения двигателя при такой выделяемой мощности вообще не требуется.

В серийном двигателе длительный момент при воздушном охлаждении (температура обмоток 120°C) равен 691 Н·м. Для его достижения при стандартном алгоритме управления двигателем, когда обмотки двух из трех фаз соединены последовательно, требуется задать ток 14 А. Выделяемая мощность на активном сопротивлении обмоток 1023 Вт. При токе 14 А разработанный двигатель развивает максимальный момент 2192 Н·м, однако из-за того, что мощность, выделяемая на активном сопротивлении обмоток, будет 2240 Вт, при длительно действующем моменте потребуется система охлаждения.

В разработанном двигателе длительный момент, при котором выделяется такая же мощность, как на активном сопротивлении 1023 Вт, равен 1645 Н·м. Он достигается при токе 9,4 А. Серийный двигатель при токе 33,7 А обеспечивает кратковременный (2...3 с) момент 1679 Н·м. Разработанный двигатель при том же токе обеспечивает кратковременный момент 3638 Н·м.

Выводы. Таким образом, в результате проведенных исследований и разработок создан мехатронный модуль, в котором применен спроектированный двигатель с высоким удельным моментом, и алгоритмы формирования фазных токов двигателя (4), (7), (8) и (10), параметры которых определяются на основе обработки экспериментальных данных. Эти алгоритмы обеспечивают при ЭДС трапецеидальной формы и нелинейной зависимости момента двигателя от тока высокую точность управления моментом двигателя и плавность движения объекта управления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. В е н т и л ь н ы е электрические двигатели и привод на их основе (малая и средняя мощность) / И.Е. Овчинников: Курс лекций. – СПб.: КОРОНА-Век, 2006. – 336 с.
2. П а н к р а т о в В. В. Вентильный электропривод: от стиральной машины до металлорежущего станка и электровоза // Электронные компоненты. – 2007. – № 2. – С. 68–77.
3. Э л е к т р и ч е с к и е следящие приводы с моментным управлением исполнительными двигателями: Монография / М.В. Баранов и др. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – 240 с.
4. П о д у р а е в Ю. В. Мехатроника: основы, методы, применение. – М.: Машиностроение, 2006. – 256 с.

Статья поступила в редакцию 23.03.2012