Магнитоэлектрический привод с трансформаторными токоподводами для поплавковых гиросприборов

10, октябрь 2012

DOI: 1012.0466325

Шерстняков Ю. Г., Назаров В. В.

УДК 621.313

Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана

Sher38@mail.runazarov@bmstu.ru

Тактико-технические характеристики летательных аппаратов во многом зависят от качества инерциальных чувствительных элементов (ЧЭ) датчиков первичной информации (ДПИ) бортовых систем управления [1, 2]. В нашей стране и за рубежом усилился интерес разработчиков к использованию в системе чувствительных элементов прецизионных датчиков первичной информации управляемых магнитоэлектрических двигателей (МЭД) [3]. Управляемый магнитоэлектрический двигатель представляет собой электромеханическую систему, состоящую из синхронной электрической машины и силового электронного преобразователя (инвертора) – усилителя мощности, связанных между собой датчиком положения ротора. Датчик осуществляет позиционную обратную связь от ротора к инвертору. Такую систему еще называют бесконтактным двигателем постоянного тока (БДПТ) [4].

Для чувствительных элементов синхронная электрическая машина, которую в дальнейшем будем называть магнитоэлектрический двигатель, состоит из ротора с постоянными магнитами из редкоземельных материалов (для возбуждения) и безжелезного (диэлектрического) статора с обмоткой якоря. Интерес к магнитоэлектрическому двигателю для чувствительных элементов вызван его высоким (до 95 %), по сравнению с синхронным гистерезисным двигателем, КПД, а также возможностью устранения синхронных “качаний” ротора методами замкнутого регулирования и уменьшения пульсаций электромагнитных сил между ротором и статором за

Высокая стабильность потребляемой мощности при стабилизированной скорости вращения ротора МЭД делает целесообразным использование для передачи энергии на чувствительный элемент бесконтактных трансформаторных токоподводов (ТТП) с ферромагнитными магнитопроводами. При этом стабильность мощности магнитоэлектрического двигателя обуславливает в свою очередь стабильность возмущающего момента тяжения, создаваемого ТТП. К тому же, основным и достаточно серьезным достоинством применения трансформаторных токоподводов является конструктивная законченность чувствительных элементов, позволяющая применить роботизированную сборку датчиков первичной информации в чистой камере без участия сборщика, исключив причины загрязнения внутренней среды прибора. Очевидно, что применение трансформаторных токоподводов создает определенную техническую проблему разгона МЭД частотным методом до полосы пропускания ТТП. Эта проблема нами успешно решена благодаря использованию специальных фазочувствительных выпрямителей, включенных во вторичный контур трансформаторных токоподводов, в номинальном режиме, шунтированных балластными сопротивлениями. На обмотки трансформаторных токоподводов питание подается с электронного преобразователя (ЭП) (рис. 1), в состав которого входят усилители мощности (УМ).

1012.0466325

Выше приведённые доводы являются обоснованием выбора магнитоэлектрического двигателя с трансформаторными токоподводами в системе чувствительных элементов.

В состав рассматриваемого привода входит также система управления (СУ), предназначенная для организации функционирования привода в режимах номинальной частоты вращения и разгона.

Очевидно, что качество чувствительных элементов определяется не только качеством системы управления, но и характеристиками элементов, входящих в состав ЧЭ и СУ. При проектировании МЭД - ТТП использован системный подход, который позволяет наилучшим образом согласовать элементы между собой и максимально использовать их потенциальные возможности по динамике и энергетике.

При анализе электромагнитных процессов в системе будем рассматривать МЭД как “идеальную” машину, у которой ЭДС вращения в фазах обмотки имеет синусоидальную форму, магнитная цепь не насыщена, между фазами обмотки отсутствует магнитная связь, поверхности статора и ротора — гладкие. Индуктивность обмотки можно не учитывать, так как она на два порядка меньше индуктивности рассеяния вторичной обмотки ТТП из-за малой проницаемости материала магнитов. Для трансформаторных токоподводов цепь намагничивания в стационарном режиме замещаем линейной индуктивностью; активными потерями в магнитопроводе из феррита пренебрегаем, также пренебрегаем выпучиванием магнитного потока в зазоре и запасом энергии в электрических полях между слоями обмоток. Так как все электромагнитные расчеты, связанные с электромеханическим преобразованием энергии, будут проводиться для цепи вторичной обмотки ТТП, параметры его схемы замещения приведем ко вторичной обмотке через коэффициент $n = w_2/w_1$, где w_2 , w_1 число витков вторичной и первичной обмоток ТТП.

Все важнейшие характеристики в электрической машине определяются формой тока. Для получения максимального момента она должна соответствовать форме наведенной в ней ЭДС вращения [4]. Для выполнения этого условия в реальной системе и рассматриваемой модели, с

учетом допущения для МЭД, полагаем, что электронный преобразователь формирует по сигналам датчика положения ротора фазные напряжения синусоидальной формы с частотой, пропорциональной угловой скорости двигателя: $f = p\Omega / (2\pi)$. Предположим, что внутреннее выходное сопротивление электронного преобразователя равно нулю, а его выходная мощность достаточна, чтобы обеспечить любой режим работы МЭД.

Для расчета характеристик рассмотрим электромагнитные процессы в цепи питания одной фазы (рис. 1), считая другую симметричной, в которой напряжение, токи, ЭДС и потоки смещены по фазе на $\pi/2$. При установившейся скорости вращения ротора ($\Omega = \text{const}$) для анализа процессов целесообразно применить метод комплексных амплитуд, в соответствии с которым уравнения описываемой системы можно записать так:

$$\underline{U}_1 = Z_1 \underline{I}_1 - Z_M \underline{I}_2, \quad (-\underline{E}) = Z_M \underline{I}_1 - Z_2 \underline{I}_2, \quad \underline{I}_0 = \underline{I}_1 + (-\underline{I}_2) \quad (1)$$

В этих уравнениях $\underline{U}_1, \underline{I}_1, \underline{I}_2, \underline{I}_0, \underline{E}$ – комплексное изображение входного напряжения, токов в первичной и вторичной обмотках трансформатора и ЭДС вращения в фазе обмотки двигателя.

$$\underline{U}_1 = U_1 \exp(j\theta),$$

где $\theta = p\theta_r$ – начальная фаза входного напряжения относительно начальной фазы ЭДС вращения, θ_r – геометрический угол между осью катушки датчика положения ротора и осью катушки фазы обмотки магнитоэлектрического двигателя, p – число пар полюсов двигателя; $\underline{E} = E = C_e \Omega$, C_e – постоянная ЭДС вращения, Ω – угловая скорость вращения ротора.

Комплексное сопротивление определяют выражения

$$\underline{Z}_1 = R_1 + j\omega L_1,$$

$$\underline{Z}_2 = R_2 + R_6 + R_d + j\omega L_2,$$

$$\underline{Z}_M = j\omega M.$$

Для приведённого трансформатора

$$R_1 = R_2 = R,$$

$$L_1 = L_2 = L,$$

$$M = kL.$$

Запишем $\underline{Z}_1$, $\underline{Z}_2$ и $\underline{Z}_M$ в обобщённых координатах:

$$\underline{Z}_1 = R(1 + j\omega\tau) = R(1 + jq) = Z_1 \exp(j\varphi_1), Z_1 = R(1 + q^2)^{1/2},$$

$$\varphi_1 = \operatorname{arctg} q,$$

$$\underline{Z}_2 = R(1 + (R_6 + R_d)/R + j\omega\tau_2) = R(1 + \mathfrak{x} + jq) = Z_2 \exp(j\varphi_2),$$

$$Z_2 = R[(1 + \mathfrak{x})^2 + q^2]^{1/2},$$

$$\varphi_2 = \text{arctg}[q/(1 + \mathfrak{x})],$$

$$\underline{Z}_M = jkRq.$$

Здесь $q = \omega\tau$ – добротность ТТП, $\tau = R/L$ – электромагнитная постоянная времени, $\alpha = (R_6 + R_d)/R$ – коэффициент пропорциональности, R – резистивное сопротивление обмотки ТТП, R_d – сопротивление фазы обмотки двигателя и R_6 – сопротивление балластное, шунтирующее фазочувствительных выпрямителей, $\omega = p\Omega$ – электрическая угловая частота ЭДС вращения и входного напряжения, k – коэффициент магнитной связи.

На рис. 2 представлена векторная диаграмма напряжений и токов приведённого трансформатора, у которого параметры первичной обмотки приведены к вторичной обмотке, в контуре которой происходит преобразование электрической энергии в механическую энергию, через коэффициент трансформации $n = w_2/w_1$.

Рис. 2. Векторная диаграмма напряжений и токов.

Диаграмма показывает связи между векторами напряжений и токов.

Решая систему уравнений (1), получим

$$\underline{I}_1 = (\underline{U}_1 \underline{Z}_2 - \underline{E} \underline{Z}_M) / (\underline{Z}_1 \underline{Z}_2 - \underline{Z}_M^2), \quad \underline{I}_2 = (\underline{U}_1 \underline{Z}_M - \underline{E} \underline{Z}_1) / (\underline{Z}_1 \underline{Z}_2 - \underline{Z}_M^2). \quad (2)$$

Полученные решения (2) для токов позволяют определить выражение для электромагнитного момента и КПД двигателя.

Для синусоидальных токов и ЭДС симметричных фаз обмотки сумма мощностей фаз не зависит от времени и поэтому момент постоянен:

$$M = P_{\text{эм}} / \Omega = 2EI_2 \cos \beta / \Omega = 2EI_{2a} / \Omega. \quad (3)$$

Здесь I_{2a} есть составляющая тока I_2 , совпадающая с вектором $(-\underline{E})$ по фазе и, следовательно, участвующая в создании электромагнитного момента. Определим I_{2a} из $\underline{I}_2$ (2):

$$I_{2a} = [U_1 Z_M \sin(\varphi_{\text{Э}} - \theta) - E Z_1 \cos(\varphi_1 - \varphi_{\text{Э}})] / Z_{\text{Э}}^2, \quad (4)$$

где

$$Z_{\text{Э}}^2 = \underline{Z}_1 \underline{Z}_2 - \underline{Z}_M^2 = Z_{\text{Э}}^2 \exp(j\varphi_{\text{Э}}),$$

$$Z_{\text{Э}}^2 = r^2 \{ [1 + \varkappa - (1 - k^2) q^2]^2 + (2 + \varkappa)^2 q^2 \}^{1/2},$$

$$\varphi_{\text{Э}} = \arctg[(2 + \varkappa) q / (1 + \varkappa - (1 - k^2) q^2)],$$

$$Z_M = kRq.$$

Подставляя выражение для I_{2a} в (3) и преобразуя его, получим уравнение моментной характеристики $M = f(\Omega)$:

$$M = 2[U_1 C_e Z_M \sin(\varphi_{\text{Э}} - \theta) - C_e^2 \Omega^2 Z_1 \cos(\varphi_1 - \varphi_{\text{Э}})] / Z_{\text{Э}}^2 \quad (5)$$

Общепринятая форма представления механической характеристики

$\Omega = f(M)$ получается из выражения (5) в виде

$$\Omega = U_1 C_e Z_M \sin(\varphi_{\text{Э}} - \theta) / (C_e^2 Z_1 \cos(\varphi_1 - \varphi_{\text{Э}})) - M Z_{\text{Э}}^2 / (2 C_e^2 Z_1 \cos(\varphi_1 - \varphi_{\text{Э}})) \quad (6)$$

Необходимо заметить, что от угловой скорости вращения ротора Ω зависят значения параметров $Z_1, Z_2, Z_M, Z_{\text{Э}}^2, \varphi_1, \varphi_2, \varphi_{\text{Э}}$, поэтому механическую характеристики целесообразно рассчитывать через моментную характеристику.

Электромагнитный КПД, учитывающий только потери мощности в меди ТТП и МЭД равен

$$\eta = P_{эм}/P = 2P_{эм1}/2P_1 = EI_{2a}/P_1. \quad (7)$$

Здесь $P_{эм1}$, P_1 – мощности одной фазы двигателя,

$P_1 = \text{Re}(\underline{U}_1 \underline{I}_1^*)$, $\underline{I}_1^*$ – комплексно сопряжённое значение тока. С учётом выражений для

$\underline{U}_1 = U_1 \exp(j\theta)$, $\underline{I}_1$, $P_{эм1}$ имеем

$$\eta = [U_1 C_e \Omega Z_M \sin(\varphi_{\mathcal{E}} - \theta) - C_e^2 \Omega^2 Z_1 \cos(\varphi_1 - \varphi_{\mathcal{E}})] / [U_1^2 Z_2 \cos(\varphi_2 - \varphi_{\mathcal{E}}) - U_1 C_e \Omega Z_M \sin(\varphi_{\mathcal{E}} + \theta)] \quad (8)$$

Анализ влияния параметров на вид механической и энергетической характеристик удобно вести в относительных единицах. Так как штатный режим работы системы номинальный, то примем за базовые величины номинальную скорость Ω_n , номинальный момент M_n и напряжение питания $U_{1н}$. Тогда

$$M = \mu M_n, M_n = P_{эмн}/\Omega_n, \Omega = v\Omega_n,$$

$$P_{эмн} = E_n I_{2a},$$

$$\alpha = U_1 / U_{1н}.$$

Переходя к относительным единицам в (5) и в (7), запишем выражения для характеристик $\mu = f(v)$, $\eta = f(v)$

$$\mu = 2v [\alpha k_1 q_1 \sin(\varphi_{\mathcal{E}} - \theta) - v(1 + v^2 q_1^2)^{1/2} \cos(\varphi_1 - \varphi_{\mathcal{E}})] / [(1 + \alpha - (1 - k^2) v^2 q_1^2)^2 + (2 + \alpha)^2 v^2 q_1^2]^{1/2}, \quad (9)$$

$$\eta = v [\alpha k_1 q_1 \sin(\varphi_{\mathcal{E}} - \theta) - v(1 + v^2 q_1^2)^{1/2} \cos(\varphi_1 - \varphi_{\mathcal{E}})] / \alpha [(1 + \alpha)/v^4 + q_1^2/v^2]^{1/2} \cos(\varphi_2 - \varphi_{\mathcal{E}}) - v \alpha k q_1 \sin(\varphi_{\mathcal{E}} + \theta), \quad (10)$$

Здесь

$$k_1 = M_{\sigma} / M_n, M_{\sigma} = U_{1н} C_e / R,$$

$$v = E_n / U_{1н}, q_1 = p \tau_1 \Omega_n,$$

$$\varphi_1 = \arctg(v q_1),$$

$$\varphi_2 = \arctg[v q_1 / (1 + \alpha)],$$

$$\varphi_{\mathcal{E}} = \arctg[(2 + \alpha) v q_1 / (1 + \alpha - (1 - k^2) v^2 q_1^2)].$$

Из выражения (9) для моментной характеристики $\mu = f(u)$ видно, что в режиме идеального холостого хода двигателя ($\mu = 0$) $u = u_0 = 0$, т.е. МЭД с ТП не обладает пусковым моментом. На рис. 3 представлены механические и энергетические характеристики для $\theta = 0$ и различных значений U_1 .

Рис. 3. Механические характеристики и КПД для $\theta = 0$, $q = q_1$ и различных значений U_1

Механические характеристики, как видно, в полосе пропускания ТП для $u > 0.25$ аналогичны характеристикам исполнительного двигателя постоянного тока с независимым возбуждением при якорном управлении.

На рис. 4 представлены эти же характеристики для напряжения $U_1 = U_{1H}$ и различных значений его начальной фазы θ , регулируемой методом пространственного смещения обмотки датчика положения ротора.

Рис. 4. Механические характеристики и КПД для $U_1 = U_{1н}$, $q = q_1$ и различных значений θ

Изменение фазы входного напряжения приводит к незначительному изменению крутизны механической характеристики, но существенно влияет на $\eta = f(s)$. Из анализа характеристик следует, что для получения желаемых характеристик $\mu = f(s)$, $\eta = f(s)$ необходимо осуществлять связанное регулирование U_1 и θ .

Список литературы

1. Басараб М.А., Кравченко В.Ф., Матвеев В.А. Математическое моделирование физических процессов в гироскопии.- М.: Радиотехника, 2005. - 176 с. - ISBN 5-88070-072-0.
2. Рахтеенко Е.Р. Гироскопические системы ориентации. - М.: Машиностроение, 1989. - 223 с.
3. Тарасов В.Н. и др. Сравнительная оценка прецизионных гироскопических электроприводов на базе синхронных электродвигателей // Гироскопия и навигация.- 1996. - № 2 (13). - С. 41-47.
4. Конев Ю.И., Гулякович Г.Н., Полянин К.П. и др. Микроэлектронные системы. Применение в радиоэлектронике / под ред. Ю.И. Конева. - М.: Радио и связь, 1987.- 240 с.

Magnetoelectric drive with transformer current leads for float gyroscopic devices

10, October 2012

DOI: 10.7463/1012.0466325

Sherstnyakov Yu.G., Nazarov V.V.

Russia, Bauman Moscow State Technical University

Sher38@mail.ru
nazarov@bmstu.ru

In the article the authors give a rationale for the selection of the magnetoelectric drive with transformer current leads. They created a mathematical model of electromagnetic processes in the drive with account of steady-state conditions. A vector diagram of voltages and currents showing their mutual relationships was constructed. From these equations the authors obtained analytical expressions of mechanical characteristic and of electromagnetic coefficient of efficiency. For these expressions a family of mechanical characteristics and coefficient of efficiency for different amplitude values and the initial phase of the input voltage was constructed. The authors analyzed the characteristics and drew conclusions.

Publications with keywords: [magnetoelectric engine](#), [noncontact DC motor](#), [dielectric stator](#), [noncontact transformer current lead with ferromagnetic core](#)

Publications with words: [magnetoelectric engine](#), [noncontact DC motor](#), [dielectric stator](#), [noncontact transformer current lead with ferromagnetic core](#)

References

1. Basarab M.A., Kravchenko V.F., Matveev V.A. *Matematicheskoe modelirovanie fizicheskikh protsessov v girokopii* [Mathematical modeling of physical processes in gyroscopy]. Moscow, Radiotekhnika, 2005. 176 p. ISBN 5-88070-072-0.
2. Rakhtenko E.R. *Girokopicheskie sistemy orientatsii* [Gyroscopic system of orientation]. Moscow, Mashinostroenie, 1989. 223 p.
3. Tarasov V.N., et al. Sravnitel'naia otsenka pretsizionnykh girokopicheskikh elektroprivodov na baze sinkhronnykh elektrodvigateli [Comparative evaluation of precision gyroscopic electric drives based on synchronous motors]. *Girokopiia i navigatsiia* [Gyroscopy and navigation], 1996, no. 2 (13), pp. 41-47.
4. Konev Iu.I., Guliakovich G.N., Polianin K.P., et al. *Mikroelektronnye sistemy. Primenenie v radioelektronike* [Microelectronic systems. Application in radio electronics]. Moscow, Radio i svyaz', 1987. 240 p.