

A. G. Lavrov, E. N. Popov  
Saint Petersburg Electrotechnical University

## ANALYSIS OF VOLTAGE REGULATION PROCESSES OF POWER THREE-WINDING TRANSFORMERS

*Theoretical aspects of regulating the voltage of power transformers are considered and conclusions are drawn about the need to make adjustments to GOST 30830-2002, as well as changes to the applied terminology and formulas are proposed. A detailed description of the regulation modes of the secondary voltage of a three-winding transformer is given, which is currently missing in the educational-methodical and scientific-technical literature. Formulas are proposed for determining the branch transformation coefficient, expressed not through the branch voltage, but through the number of turns of the windings. Thus returning to the regulation process its physical meaning, the main purpose of this replacement is the ability to operate with the number of turns in any regulation mode. Methods have been developed for choosing the necessary regulatory branch, which correspond to the true physical meaning of the voltage regulation process, consider both options for placing the on-load tap-changer on the windings of a three-winding transformer and allow them to be used in any regulation mode.*

**Three-winding transformer, voltage control, alternating magnetic flux, control modes, transformation ratio**

УДК 621.316.73

Ю. Н. Журавлев  
ООО «Псковская Инженерная Компания»

М. Е. Лазарев, Р. К. Шарапов  
Псковский государственный университет

## Математическое моделирование подвеса ротора синхронного реактивного электродвигателя на активных магнитных подшипниках

*Описываются генерируемые магнитным полем 2-полюсного синхронного реактивного электродвигателя силы и моменты. С помощью анализа магнитных потенциалов ротора, вызванных несимметричным распределением потока при перемещениях ротора были определены магнитные потоки и индуктивности. Зная индуктивности, была получена магнитная энергия, частные производные которой дают вращающий момент и радиальные силы. Получено уравнение вращающего момента, состоящее из возмущающего и движущего момента, уравнения которого представлены для двигательного и генераторного режима. Показано, что в полученных аналитических выражениях для радиальных сил и угловых моментов содержатся возмущающие и позиционные компоненты, обладающие «отрицательной» жесткостью и оказывающие дестабилизирующее влияние на подвес ротора. В связи с этим применяется учет их в математическом описании объекта управления системы магнитного подвеса ротора на активных магнитных подшипниках.*

**Активный магнитный подшипник, магнитные силы и моменты, синхронный реактивный электродвигатель**

Дифференциальные уравнения движения жесткого ротора любой машины, опорами которого являются активные магнитные подшипники (АМП), имеют хорошо известный вид [1]–[3]:

$$\begin{aligned} m\ddot{x} &= P_x + F_x + m\omega^2 \cos \omega t, \\ m\ddot{y} &= P_y + F_y + m\omega^2 \sin \omega t, \\ J\ddot{\phi}_x + \omega J_0 \dot{\phi}_y &= L_x + M_x + (J - J_0) \gamma \omega^2 \cos \omega t, \\ J\ddot{\phi}_y - \omega J_0 \dot{\phi}_x &= L_y + M_y + (J - J_0) \gamma \omega^2 \sin \omega t, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $x$  и  $y$  – линейные,  $\varphi_x$  и  $\varphi_y$  – угловые обобщенные координаты;  $m$  – масса ротора;  $J$  и  $J_0$  – экваториальный и осевой моменты инерции ротора;  $e$  и  $\gamma$  – линейный и угловой параметры неуравновешенности масс ротора;  $\omega$  – угловая скорость вращения;  $P_x, P_y$  и  $L_x, L_y$  – генерируемые АМП силы и моменты, обеспечивающие магнитный подвес ротора;  $F_x, F_y$  и  $M_x, M_y$  – силы и моменты, действующие на ротор со стороны внешней среды.

Если машиной является электродвигатель, то внешней средой служит его магнитное поле, генерирующее эти силы и моменты, и их важно знать и учитывать при синтезе регулятора системы подвеса ротора на АМП.

Объектом математического моделирования был выбран синхронный реактивный двигатель с АМП, поскольку он имеет наиболее простую и дешевую конструкцию: на роторе нет ни обмоток, ни постоянных магнитов [4]. Это дает ему преимущество в высокоскоростных приложениях и в условиях высоких температур, а возникающие в них подшипниковые проблемы могут успешно решаться через использование АМП.

Будем рассматривать двигатель с 2-полюсным ротором и 2-полюсной обмоткой статора, создающей вращающееся магнитное поле. Такое поле может создаваться как одной 3-фазной, так и двумя 2-фазными обмотками. Вид обмотки роли не играет, если они создают одинаковую магнитодвижущую силу (МДС). Выбор сделан в пользу варианта с 2-фазными обмотками, позволяющего более просто вычислить магнитную энергию.

Задача определения магнитных сил в синхронных реактивных машинах не нова – она решалась во многих публикациях, однако практиче-

ски все они посвящены бесподшипниковым машинам [5], [6]. Такие машины состоят из двух модулей, продольный размер статора которых вдвое меньше, чем у подшипниковых машин. Это обстоятельство позволяет авторам считать статор коротким, рассматривать только поступательные перемещения ротора  $x$  и  $y$  и учитывать только радиальные силы  $F_x$  и  $F_y$ .

Применительно же к подшипниковым машинам, к которым относится и рассматриваемый двигатель, статор нельзя считать коротким и нужно наряду с перемещениями  $x$  и  $y$  и силами  $F_x$  и  $F_y$  учитывать также угловые перемещения  $\varphi_x$  и  $\varphi_y$  и моменты  $M_x$  и  $M_y$ .

**Расчетная схема и основные допущения.**

Схема машины и поперечный разрез двигателя изображены на рис. 1 (а и б соответственно). Подвес ротора осуществляют два радиальных АМП1 и АМП2 (осевой АМП на рисунке не показан).

Введены две системы координатных осей: неподвижная  $\bar{O}xyz$  и скрепленная с ротором подвижная  $Ox'y'z'$ ; ось  $Oz'$  совмещена с геометрической осью ротора; ось  $Ox'$  проходит через середины полюсов ротора. Магнитные силы подшипников  $P_1$  и  $P_2$  действуют на ротор в точках управления  $O_1$  и  $O_2$ , расстояние между которыми равно  $l$ . Статор двигателя имеет длину  $l_s$ . На ротор со стороны магнитного поля статора действуют радиальная сила  $F$  с проекциями  $F_x$  и  $F_y$ , вращающий момент  $M_z = M$  и моменты  $M_x$  и  $M_y$  относительно осей  $\bar{O}x$  и  $\bar{O}y$ .

Ротор двигателя (рис. 1, б) имеет два полюса, угловой размер которых обозначен через  $\alpha$ . Скрепленная с ротором ось  $Ox'$  образует с непо-

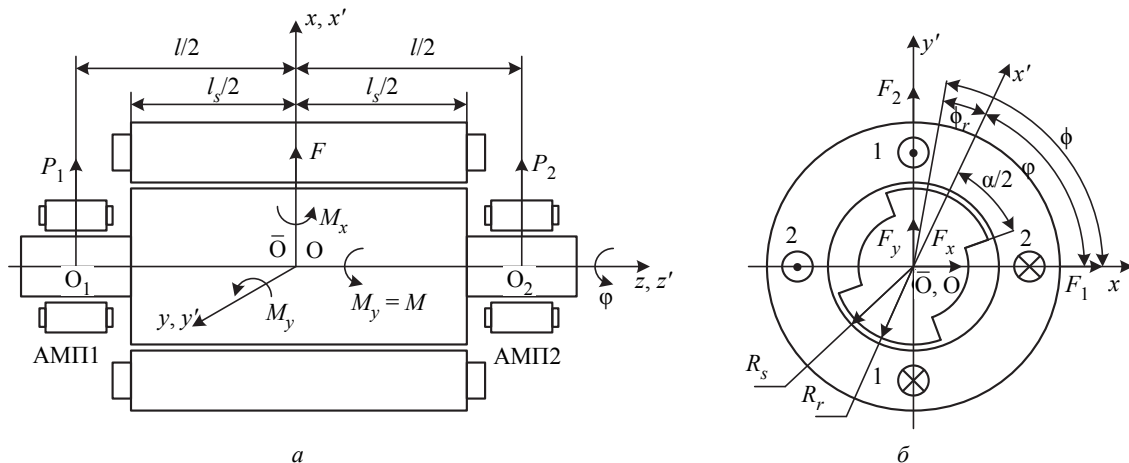


Рис. 1

движной осью  $\overline{Ox}$  угол поворота ротора  $\varphi$ . Текущая угловая координата полюсов относительно подвижной оси  $Ox'$  определяется углом  $\phi_r$ , а относительно неподвижной оси  $\overline{Ox}$  – углом  $\phi$ , при этом  $\phi = \varphi + \phi_r$ . Угол  $\phi_r$  изменяется в диапазонах  $-\alpha/2 \leq \phi_r \leq \alpha/2$  и  $(\pi - \alpha/2) \leq \phi_r \leq (\pi + \alpha/2)$ .

Статор имеет две 2-фазные 2-полюсные обмотки 1 и 2 с числом витков  $w_0$  и токами  $i_1$  и  $i_2$ . Обмотка 1 создает МДС  $F_1 = wi_1$  по оси  $\overline{Ox}$ , обмотка 2 – МДС  $F_2 = wi_2$  по оси  $\overline{Oy}$ . Здесь  $w = k_w w_0$  – расчетное число витков, связанное с реальным  $w_0$  коэффициентом  $k_w$ , учитывающим распределенность витков обмотки по пазам ( $k_w = 0.64$  при 12 пазах).

Полюса ротора и расточка статора имеют, соответственно, радиусы  $R_r$  и  $R_s$ , поэтому в центральном положении радиальный воздушный зазор имеет высоту  $\delta_0 = R_s - R_r$ .

Введем следующие допущения: магнитным сопротивлением стали, вихревыми токами, магнитным гистерезисом и магнитной проводимостью зазора между полюсами ротора пренебрегаем; радиальные перемещения ротора малы по сравнению с высотой воздушного зазора; угловой размер полюсов ротора примем равным  $\alpha = \pi/2$ .

**Радиальные перемещения и силы.** Пусть ротор получил поступательные радиальные перемещения  $x$  и  $y$ . Магнитная проводимость воздушного зазора под элементом площади внутренней поверхности статора  $dS = l_s R_s d\phi$  равна  $dG = \mu_0 dS/h$ , где  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м – магнитная постоянная;  $h$  – высота зазора, определяемая известным соотношением  $h = \delta_0 - (x \cos \phi + y \sin \phi)$  или, если использовать безразмерные перемещения  $\bar{x} = x/\delta_0$  и  $\bar{y} = y/\delta_0$ , имеем  $h = \delta_0 [1 - (\bar{x} \cos \phi + \bar{y} \sin \phi)]$ . Раскладывая величину  $1/h$  в степенной ряд и учитывая слагаемые второй степени относительно  $\bar{x}$  и  $\bar{y}$ , получаем  $dG = gd\phi$ , где

$$g = g_0 \left[ 1 + \bar{x} \cos \phi + \bar{y} \sin \phi + \frac{1}{2}(\bar{x}^2 + \bar{y}^2) + \frac{1}{2}(\bar{x}^2 - \bar{y}^2) \cos 2\phi + \bar{x}\bar{y} \sin 2\phi \right] \quad (2)$$

– удельная проводимость;  $g_0 = \mu_0 l_s R_s / \delta_0$  – значение  $g$  при центральном положении ротора.

Найдем теперь магнитные потоки и индуктивности. Положив токи  $i_1 = i_2 = 1$  и проектируя векторы МДС на направление под углом  $\phi$  к оси  $\overline{Ox}$ , получаем

$$F_1 = w \cos \phi, \quad F_2 = w \sin \phi. \quad (3)$$

Единичные токи на элементе дуги  $d\phi$  создают магнитные потоки

$$\Phi_1 = g(F_1 - V_1), \quad \Phi_2 = g(F_2 - V_2), \quad (4)$$

где  $V_1$  и  $V_2$  – магнитные потенциалы ротора, вызванные несимметричным распределением потока при перемещениях ротора [7]. Они находятся из условия равенства нулю суммарного магнитного потока (сколько его входит в ротор, столько и выходит):

$$\int_0^{2\pi} \Phi_i d\phi = \int_0^{2\pi} g(F_i - V_i) d\phi = 0,$$

отсюда

$$V_i = \frac{\int_0^{2\pi} g F_i d\phi}{\int_0^{2\pi} g d\phi}, \quad \text{где } i = 1, 2. \quad (5)$$

Вычисляя интегралы, получаем

$$V_1 = \frac{w}{\pi} \left[ \bar{x} \left( \frac{\pi}{2} + \cos 2\phi \right) + \bar{y} \sin 2\phi \right];$$

$$V_2 = \frac{w}{\pi} \left[ \bar{x} \sin 2\phi + \bar{y} \left( \frac{\pi}{2} - \cos 2\phi \right) \right].$$

Потокосцепления  $\psi_1$  и  $\psi_2$  обмоток связаны с токами соотношениями:  $\psi_1 = L_1 i_1 + L_{12} i_2$ ,  $\psi_2 = L_{21} i_1 + L_2 i_2$ , где  $L_1$  и  $L_2$  – самоиндуктивности,  $L_{12} = L_{21}$  – взаимоиндуктивности. Индуктивности равны потокосцеплениям при единичных токах:

$$L_1 = \int_0^{2\pi} \Phi_1 F_1 d\phi, \quad L_2 = \int_0^{2\pi} \Phi_2 F_2 d\phi, \quad (6)$$

$$L_{12} = \int_0^{2\pi} \Phi_1 F_2 d\phi = \int_0^{2\pi} \Phi_2 F_1 d\phi.$$

Интегрирование дает следующие результаты:

$$L_1 = w^2 g_0 [1.57 + \cos 2\varphi + \bar{x}^2 (0.23 - 0.16 \cos 4\varphi) + \bar{y}^2 (0.23 + 0.16 \cos 4\varphi) - \bar{x} \bar{y} 0.32 \sin 4\varphi],$$

$$L_2 = w^2 g_0 [1.57 - \cos 2\varphi + \bar{x}^2 (0.23 + 0.16 \cos 4\varphi) + \bar{y}^2 (0.23 - 0.16 \cos 4\varphi) + \bar{x} \bar{y} 0.32 \sin 4\varphi], \quad (7)$$

$$L_{12} = w^2 g_0 [\sin 2\varphi - \bar{x}^2 0.16 \sin 4\varphi + \bar{y}^2 0.16 \sin 4\varphi + \bar{x} \bar{y} 0.32 \cos 4\varphi].$$

Теперь, зная индуктивности, можно найти магнитную энергию

$$W = \frac{1}{2} (\psi_1 i_1 + \psi_2 i_2) = \frac{1}{2} (L_1 i_1^2 + 2L_{12} i_1 i_2 + L_2 i_2^2),$$

частные производные которой по  $\varphi$ ,  $x$  и  $y$  дают вращающий момент  $M$  и радиальные силы  $F_x$  и  $F_y$  соответственно.

**Вращающий момент.** Взяв производную магнитной энергии по  $\varphi$ , получаем вращающий момент в виде суммы двух слагаемых  $M = M_1(\varphi) + \tilde{M}(\varphi, \bar{x}, \bar{y})$ , где  $M_1(\varphi)$  – вращающий момент при  $\bar{x} = \bar{y} = 0$ , или движущий момент;  $\tilde{M}(\varphi, \bar{x}, \bar{y})$  – возмущающий момент. В нашем случае интерес представляет движущий момент

$$M_1(\varphi) = w^2 g_0 [(i_2^2 - i_1^2) \sin 2\varphi + 2i_1 i_2 \cos 2\varphi]. \quad (8)$$

Создадим вращающееся магнитное поле, запитав обмотки токами  $i_1 = I \cos \omega t$  и  $i_2 = I \sin \omega t$ . Тогда движущий момент (8) принимает вид  $M_1(\varphi) = w^2 g_0 I^2 \sin 2(\omega t - \varphi)$ . При работе машины в установившемся синхронном режиме угол вращения ротора можно представить в виде суммы  $\varphi = \omega t - \theta$ , где  $\theta$  – угол отставания оси  $Ox'$  полюсов ротора от вектора МДС. В двигательном режиме движущий момент

$$M_1(\theta) = w^2 g_0 I^2 \sin 2\theta. \quad (9)$$

В генераторном режиме  $\theta$  – угол опережения,  $\varphi = \omega t + \theta$  и момент становится отрицательным:

$$M_1(\theta) = -w^2 g_0 I^2 \sin 2\theta.$$

**Радиальные силы.** Переходя в выражениях для индуктивностей (7) от безразмерных перемещений  $\bar{x}$  и  $\bar{y}$  к реальным  $x$  и  $y$ , вычисляя затем частные производные магнитной энергии по  $x$  и  $y$  и запитывая обмотки токами  $i_1 = I \cos \omega t$  и  $i_2 = I \sin \omega t$ , получаем радиальные магнитные силы

$$F_x = k_F [x(0.23 - 0.16 \cos 2(\omega t - 2\varphi)) + y 0.16 \sin 2(\omega t - 2\varphi)],$$

$$F_y = k_F [x 0.16 \sin 2(\omega t - 2\varphi) + y(0.23 + 0.16 \cos 2(\omega t - 2\varphi))], \quad (10)$$

где  $k_F = w^2 g_0 I^2 / \delta_0^2$ .

Делая замену  $\varphi = \omega t - \theta$ , где  $\theta$  – введенный ранее угол отставания, выражения (10) приводятся к виду  $F_x = F_x^0 + \tilde{F}_x(t)$ ,  $F_y = F_y^0 + \tilde{F}_y(t)$  с компонентами

$$F_x^0 = c_0 x,$$

$$\tilde{F}_x(t) \cong -0.16 k_F \sqrt{x^2 + y^2} \sin(2\omega t - 4\theta),$$

$$F_y^0 = c_0 y,$$

$$\tilde{F}_y(t) \cong 0.16 k_F \sqrt{x^2 + y^2} \cos(2\omega t - 4\theta), \quad (11)$$

где  $c_0 = 0.23 k_F = 0.23 w^2 g_0 I^2 / \delta_0^2$  – коэффициент радиальной «отрицательной» жесткости магнитного поля двигателя.

Проанализируем эти выражения. Компоненты  $F_x^0$  и  $F_y^0$  пропорциональны перемещениям  $x$  и  $y$  и действуют в направлении перемещений. Они относятся к разряду позиционных сил, обладающих «отрицательной» жесткостью  $c_0$ , и оказывают на подвес ротора в АМП дестабилизирующее влияние. Переменные во времени компоненты – это возмущающие силы, действующие на ротор с частотой  $2\omega$ .

**Угловые перемещения и моменты.** Пусть ротор получил малые угловые перемещения  $\varphi_x$  и  $\varphi_y$ . Тогда точка на геометрической оси ротора в сечении, имеющем координату  $z$ , получит радиальные перемещения  $x = z\varphi_y$  и  $y = -z\varphi_x$ . Высота воздушного зазора в этом сечении  $h = \delta_0 - (x \cos \phi + y \sin \phi)$  будет функцией двух переменных  $\phi$  и  $z$ :

$$h = \delta_0 \left[ 1 - \frac{1}{\delta_0} z (\varphi_y \cos \phi - \varphi_x \sin \phi) \right]. \quad (12)$$

Зазор под элементом площади статора  $dS = R_s d\phi dz$  имеет магнитную проводимость

$$dG = \frac{\mu_0 dS}{h} = g d\phi,$$

где  $g = g(\phi) = \mu_0 R_s \int_{Z_{1s}}^{Z_{2s}} \frac{1}{h(\phi, z)} dz$ ;  $Z_{1s}$  и  $Z_{2s}$  – левая

и правая стороны статора по оси  $z$ . Раскладывая подынтегральную функцию в степенной ряд с удержанием слагаемых второй степени относительно  $\phi_x$  и  $\phi_y$  и интегрируя, получаем удельную проводимость зазора

$$g = g_0 \left\{ 1 + a \left[ \frac{1}{2} (\phi_x^2 + \phi_y^2) + \frac{1}{2} (\phi_y^2 - \phi_x^2) \cos 2\phi - \phi_x \phi_y \sin 2\phi \right] \right\}, \quad (13)$$

где  $g_0 = \mu_0 R_s l_s / \delta_0$ ,  $a = l_s^2 / (12 \delta_0^2)$  – постоянные.

Вычисляя магнитные потенциалы ротора  $V_1$  и  $V_2$  по (5), с учетом (13) и (3) получаем, что при угловых перемещениях потенциалы  $V_1 = V_2 = 0$  и согласно (4) магнитные потоки  $\Phi_1 = gF_1$  и  $\Phi_2 = gF_2$ .

По (6) находим индуктивности:

$$L_1 = w^2 g_0 \left[ \frac{\pi}{2} + \cos 2\phi + \phi_x^2 \frac{a\pi}{8} + \phi_y^2 \left( \frac{3a\pi}{8} + a \cos 2\phi \right) - \phi_x \phi_y a \sin 2\phi \right],$$

$$L_2 = w^2 g_0 \left[ \frac{\pi}{2} - \cos 2\phi + \phi_x^2 \left( \frac{3a\pi}{8} - a \cos 2\phi \right) + \phi_y^2 \frac{a\pi}{8} - \phi_x \phi_y a \sin 2\phi \right],$$

$$L_{12} = w^2 g_0 \times \left( \sin 2\phi + \phi_x^2 \frac{a}{2} \sin 2\phi + \phi_y^2 \frac{a}{2} \sin 2\phi - \phi_x \phi_y \frac{a\pi}{4} \right).$$

Вычисляя частные производные магнитной энергии по  $\phi_x$  и  $\phi_y$  и запитывая обмотки токами  $i = I \cos \omega t$  и  $i_2 = I \sin \omega t$ , получаем моменты магнитных сил

$$M_x = k_\phi \left\{ \phi_x \left[ \frac{\pi}{4} - \frac{1}{2} \cos 2\phi - \frac{\pi}{8} \cos 2\omega t + \frac{1}{2} \cos 2(\omega t - \phi) \right] - \phi_y \left[ \frac{1}{2} \sin 2\phi + \frac{\pi}{8} \sin 2\omega t \right] \right\},$$

$$M_y = k_\phi \left\{ -\phi_x \left[ \frac{1}{2} \sin 2\phi + \frac{\pi}{8} \sin 2\omega t + \frac{\pi}{4} + \frac{1}{2} \cos 2\phi + \frac{\pi}{8} \cos 2\omega t + \frac{1}{2} \cos 2(\omega t - \phi) \right] + \phi_y \left[ \frac{\pi}{4} + \frac{1}{2} \cos 2\phi + \frac{\pi}{8} \cos 2\omega t + \frac{1}{2} \cos 2(\omega t - \phi) \right] \right\}, \quad (14)$$

где постоянная  $k_\phi = \mu_0 w^2 R_s l_s^3 I^2 / 12 \delta_0^3$ .

Делая замену  $\phi = \omega t - \theta$ , где  $\theta$  – угол отставания, выражения (14) приводятся к виду  $M_x = M_x^0 + \tilde{M}_x(t)$ ,  $M_y = M_y^0 + \tilde{M}_y(t)$  с компонентами

$$M_x^0 = c_\phi \phi_x,$$

$$\tilde{M}_x(t) \cong -c_\phi \left( \frac{1}{2} + \frac{\pi}{8} \right) \sqrt{\phi_x^2 + \phi_y^2} \cos 2(\omega t - \theta),$$

$$M_y^0 = c_\phi \phi_y,$$

$$\tilde{M}_y(t) \cong c_\phi \left( \frac{1}{2} + \frac{\pi}{8} \right) \sqrt{\phi_x^2 + \phi_y^2} \sin 2(\omega t - \theta),$$

где  $c_\phi$  – коэффициент угловой «отрицательной» жесткости магнитного поля двигателя, вычисляемый по формуле

$$c_\phi = k_\phi \left( \frac{\pi}{4} + \frac{1}{2} \cos 2\theta \right) = \frac{\mu_0 w^2 R_s l_s^3 I^2}{12 \delta_0^3} \left( \frac{\pi}{4} + \frac{1}{2} \cos 2\theta \right).$$

Итак, как и силы  $F_x$  и  $F_y$ , моменты  $M_x$  и  $M_y$  содержат позиционные компоненты  $M_x^0$  и  $M_y^0$ , обладающие «отрицательной» жесткостью  $c_\phi$  и оказывающие дестабилизирующее влияние на подвес ротора в АМП. Переменные во времени компоненты  $\tilde{M}_x(t)$  и  $\tilde{M}_y(t)$  – это возмущающие моменты, вызывающие колебания ротора с частотой  $2\omega$ .

В статье получены аналитические выражения (11) для радиальных сил  $F_x$  и  $F_y$  и (15) для моментов  $M_x$  и  $M_y$ , действующих на ротор со стороны магнитного поля 2-полюсного синхронного реактивного двигателя. Подстановка этих сил и моментов в уравнения движения ротора (1) позволяет получить полное описание объекта управления системы магнитного подвеса ротора на активных магнитных подшипниках.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Журавлев Ю. Н. Активные магнитные подшипники: теория, расчет, применение. СПб.: Политехника, 2003. 206 с.

2. Позняк Э. Л. Колебания роторов // Вибрации в технике: справ. М.: Машиностроение, 1980. С. 130–189.

3. Schweitzer G., Bleuler H., Traxler A. Active magnetic bearings // Hochschulverlag AG an der ETH. Zurich, 1994. P. 244.

4. Заблудский Е. И. Электрические машины. Ч. 3: Синхронные машины: учеб. пособие для вузов. М.: Изд-во МГАУ, 2008. 195 с.

5. Sugimoto H. Radial Force in a Bearingless Reluctance Motor // IEEE Trans. on Industry Applications. 2015. Vol. 51, № 5. P. 3696–3706.

---

6. Домрачева Ю. В. Математическое моделирование модуля синхронной индукторной бесподшипниковой машины // Фундаментальные исследования. 2013. № 10 (ч. 9). С. 1917–1921.

7. Chiba A. Magnetic Bearings and Bearingless Drives. London: ELSEVIER, 2005. 381 p.

---

Yu. N. Zhuravlev

LLC «Pskov Engineering Company»

M. E. Lazarev, R. K. Sharapov

Pskov State University

## MATHEMATICAL MODELING SUSPENSION SYSTEM OF A SYNCHRONOUS RELUCTANCE MOTOR ROTOR WITH ACTIVE MAGNETIC BEARING

*The article is devoted to the determination of the forces and moments generated by a magnetic field of a 2-pole synchronous jet electric motor. By analyzing the magnetic potentials of the rotor caused by the asymmetric flow distribution during rotor movements, magnetic fluxes and inductances were determined. Knowing the inductance, magnetic energy was obtained, the partial derivatives of which give torque and radial forces. An equation of torque is obtained, consisting of a disturbing and moving moment, the equations of which are presented for the motor and generator modes. It is shown that the obtained analytical expressions for radial forces and angular momenta contain perturbing and positional components that have «negative» stiffness and have a destabilizing effect on the rotor suspension. In this regard, they are taken into account in the mathematical description of the control object of the rotor magnetic suspension system using active magnetic bearings.*

**Active magnetic bearing, magnetic forces and moments, synchronous reluctance electric motor**

---

УДК 519.7:618.5

В. В. Путов, В. Н. Шелудько, Д. М. Филатов, Чан Куок Тоан, Чу Чонг Шы  
Санкт-Петербургский государственный электротехнический  
университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

## Электромеханические адаптивные системы управления продольным движением летательного аппарата, разработанные на основе метода адаптивного обхода интегратора

*Рассмотрены вопросы разработки и исследования электромеханических адаптивных систем управления продольным движением беспилотных летательных аппаратов легкого и сверхлегкого классов, выполненные на основе метода адаптивного обхода интегратора. Строятся нелинейные математические модели динамики продольного движения летательного аппарата, учитывающие и не учитывающие электромагнитную динамику исполнительного электропривода руля высоты. Приводятся результаты компьютерных исследований эффективности построенных электромеханических адаптивных систем в достижении ими свойств динамической устойчивости и быстродействия в условиях влияния электромагнитной динамики. Исследования проводились на базе расчетной модели легкого беспилотного летательного аппарата БПЛА-70V (массой 65 кг) компании «Aerospace Academy» (Вьетнам), предназначенного для дистанционного мониторинга подстилающих поверхностей.*

**Летательный аппарат, продольное движение, адаптивное управление, метод адаптивного обхода интегратора, электромагнитная динамика исполнительных электроприводов**

В последнее время беспилотные летательные аппараты (БПЛА) стали широко применяться не

только в оборонной технике, но и в отраслях народного хозяйства. Математические модели движения

---