

# РОБОТЫ, МЕХАТРОНИКА И РОБОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ



УДК 681.61

DOI:10.30724/1998-9903-2022-24-3-158-174

## АНАЛИЗ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВЕНТИЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ МЕХАТРОННОЙ СИСТЕМЫ В УСЛОВИЯХ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ НЕОПРЕДЕЛЁННОСТИ МЕТОДАМИ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Малёв<sup>1</sup> Н.А., Погодицкий<sup>1</sup> О.В., Козелков<sup>1</sup> О.В., Дюрягин<sup>2</sup> А.М.

<sup>1</sup>Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

<sup>2</sup>КАЗ им. С.П Горбунова – филиал ПАО "Туполев", г. Казань, Россия

maleev@mail.ru

**Резюме:** *ЦЕЛЬ.* В настоящее время вентильные двигатели – электрические машины с постоянными магнитами на роторе и датчиком положения ротора, управляемые синусоидальным напряжением от преобразователей частоты, – находят широкое применение в мехатронных и робототехнических системах. Алгоритм управления формируется на основе информации о текущих значениях параметров вентильного двигателя мехатронной системы с применением номинальной или эталонной математической модели, представляющей собой, как правило, идеализированное представление реального устройства. Нестационарность параметров объекта исследования, а также возможная неопределенность его математического описания вследствие упрощения математической модели приводят к нежелательным либо недопустимым результатам при формировании алгоритма управления мехатронной системы. Возникает задача анализа динамических характеристик вентильного двигателя в условиях параметрической неопределенности с целью определения наиболее влияющих на функционирование мехатронной системы параметров и чувствительных к этим изменениям фазовых координат. *МЕТОДЫ.* При решении поставленной задачи применяются методы теории чувствительности с получением соответствующих векторно-матричных уравнений, решение которых осуществляется средствами программного среды MatLab. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* В работе получены уравнения чувствительности по активному сопротивлению и проекциям индуктивности обмотки статора на продольную и поперечную координатные оси, а также по моменту инерции вентильного двигателя. Сформирована векторно-матричная структурная схема вычисления функций чувствительности вентильного двигателя, характерной особенностью которой является наличие ненулевой матрицы свободных членов, приведенной ко входу модели чувствительности. Произведено построение соответствующих Simulink-моделей для исследования влияния перечисленных квазистационарных параметров на скорость вращения и момент на валу объекта исследования. Проведен анализ статистических характеристик дополнительного движения указанных фазовых координат вентильного двигателя и получены графические зависимости и установившиеся значения дисперсий и относительных оценок. *ЗАКЛЮЧЕНИЕ.* Анализ динамических характеристик вентильного двигателя в условиях параметрической неопределенности позволил определить, что скорость вращения машины является наиболее чувствительной к параметрическим возмущениям выходной координатой, которая, соответственно, является наиболее информативной и представляет максимальный интерес при формировании алгоритма оптимизации мехатронной системы. Определяющую роль в формировании дополнительного движения выходных координат вентильного двигателя вносит изменение проекции индуктивности статора на поперечную координатную ось, на порядок превышающее вклад в дополнительное движение координат от остальных нестабильных параметров. Полученные в процессе исследования результаты целесообразно использовать при построении алгоритма оптимального управления мехатронной системы в условиях параметрической неопределенности.

**Ключевые слова:** анализ характеристик; компьютерное моделирование; вентильный двигатель; мехатронная система; модель чувствительности; дополнительное движение.

**Для цитирования:** Малёв Н.А., Погодицкий О.В., Козелков О.В., Дюрягин А.М. Анализ динамических характеристик вентильного двигателя мехатронной системы в условиях параметрической неопределённости методами компьютерного моделирования // Известия высших учебных заведений. проблемы энергетики. 2022. Т.24. № 3. С. 158-174. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-3-158-174.

## ANALYSIS DYNAMIC CHARACTERISTICS BRUSHLESS MOTOR OF THE MECHATRONIC SYSTEM IN CONDITIONS OF PARAMETRIC UNCERTAINTY BY COMPUTER SIMULATION METHODS

NA. Malev<sup>1</sup>, OV. Pogoditsky<sup>1</sup>, OV. Kozelkov<sup>1</sup>, AM. Dyuryagin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

<sup>2</sup>KAP name for S.P. Gorbunov – branch of PJSC "Tupolev", Kazan, Russia  
maleev@mail.ru

**Abstract:** *THE PURPOSE.* Currently, brushless motors – electric machines with permanent magnets on the rotor and a rotor position sensor controlled by a sinusoidal voltage from frequency converters, are widely used in mechatronic and robotic systems. The control algorithm is formed on the basis of information about the current values of the parameters brushless motor mechatronic system using a nominal or reference mathematical model, which is, as a rule, an idealized representation of a real device. The non-stationarity of the parameters object of study, as well as the possible uncertainty of its mathematical description due to the simplification of the mathematical model, lead to undesirable or unacceptable results when forming the control algorithm of the mechatronic system. The problem arises of analyzing the dynamic characteristics of a brushless motor under conditions of parametric uncertainty in order to determine the parameters that most affect the functioning of the mechatronic system and the phase coordinates that are sensitive to these changes. *METHODS.* When solving the problem, methods of the sensitivity theory are used to obtain the corresponding vector-matrix equations, the solution of which is carried out by means of the MatLab software environment. *RESULTS.* In this paper, sensitivity equations are obtained for the active resistance and projections of the stator winding inductance on the longitudinal and transverse coordinate axes, as well as for the moment of inertia of the brushless motor. A vector-matrix block diagram for calculating the sensitivity functions of a brushless motor is formed, the characteristic feature of which is the presence of a non-zero matrix of free terms, reduced to the input of the sensitivity model. The corresponding Simulink models were built to study the influence of the listed quasi-stationary parameters on the rotation speed and torque on the shaft of the object of study. An analysis of the statistical characteristics additional motion of the specified phase coordinates of the brushless motor has been carried out, and graphical dependencies and steady-state values of dispersions and relative estimates have been obtained. *CONCLUSION.* An analysis of the dynamic characteristics of a brushless motor under conditions of parametric uncertainty made it possible to determine that the rotation speed of the machine is the most sensitive to parametric disturbances. This coordinate is the most informative and is of maximum interest in the formation of an optimization algorithm for a mechatronic system. The decisive role in the formation of the additional movement of the output coordinates of the brushless motor is made by a change in the projection of the stator inductance on the transverse coordinate axis, which is an order of magnitude greater than the contribution to the additional movement of coordinates from other unstable parameters. It is expedient to use the results obtained in the course of the study when constructing an optimal control algorithm for a mechatronic system under conditions of parametric uncertainty.

**Keywords:** characteristics analysis; computer simulation; brushless motor; mechatronic system; sensitivity model; additional motion.

**For citation:** Malev NA, Pogoditsky OV, Kozelkov OV, Dyuryagin AM. Analysis dynamic characteristics brushless motor of the mechatronic system in conditions of parametric uncertainty by computer simulation methods. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2022; 24(3): 158-174. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-3-158-174.

### Введение

В настоящее время вентильные двигатели (ВД) активно внедряются в состав систем управления, выполняя роль приводных исполнительных устройств в робототехнических и электроприводных системах, тяжелой и легкой промышленности, а также являются основными

элементами мехатронных систем, обеспечивающими автоматизацию производственных и технологических процессов. Вентильный двигатель как мехатронный модуль представляет собой электрическую машину с постоянными магнитами на роторе, датчиком положения ротора и полупроводниковым коммутатором статорных обмоток, переключение которых зависит от угла поворота ротора. К вентильным машинам традиционно относят два вида двигателей – бесколлекторные двигатели постоянного тока (БДПТ) или *Brushless DC Motor (BDCM)* и синхронные двигатели с постоянными магнитами (СДПМ) или *Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM)* [1, 2]. В первом случае противо-ЭДС машины имеет трапецеидальную форму и формируется благодаря соответствующему взаимному расположению постоянных магнитов ротора и обмоток статора. Во втором случае ЭДС вращения имеет синусоидальную форму.

Вентильный двигатель как объект настоящего исследования представляет собой синхронную машину с постоянными магнитами *PMSM* и синусоидальным законом изменения питающего напряжения, обеспечивающим круговое вращающееся магнитное поле в воздушном зазоре между статором и ротором. Далее по тексту именно к данной разновидности электрических машин будет применяться термин «вентильный двигатель». В качестве электрического преобразователя для питания таких двигателей в системах регулируемого электропривода применяются преобразователи частоты. Вентильные электроприводы на основе *PMSM* могут выполняться с частотным векторным или скалярным управлением. Векторное управление по сравнению со скалярным позволяет добиться плавного регулирования момента и скорости вращения ВД, обеспечивает увеличение диапазона регулирования и стабильность скорости на искусственных механических характеристиках, характеризуется высоким быстродействием, позволяет снизить потери в переходных режимах [1 – 5].

К перечисленным достоинствам векторного управления можно добавить, что математическое описание ВД становится аналогичным описанию двигателя постоянного тока независимого возбуждения при компенсации реакции якоря, что позволяет сравнительно просто синтезировать корректирующие устройства контуров регулирования. При этом необходимо обеспечивать равенство нулю проекции тока статора на продольную ось  $d$  и проекцию тока на поперечную ось  $q$ , равную линейному току при описании машины во вращающейся системе координат [3]. Вектор тока при этом сдвинут на 90 градусов относительно вектора магнитного потока и индуктивность реакции якоря не проявляется, т.е. учитывается только индуктивность обмотки статора [4]. При более простом с точки зрения технической реализации скалярном частотном управлении ВД ток по продольной оси не равен нулю, индуктивным сопротивлением реакции якоря пренебречь нельзя и закон частотного управления, в отличие от пропорционального закона  $\gamma = \frac{U_1}{U_{\text{ном}}} = \alpha = \frac{f_1}{f_{\text{ном}}}$  при

векторном управлении, описывается выражением  $\gamma = \alpha \sqrt{A^2 + \left(B + \frac{\rho}{\alpha}\right)^2}$ , где  $A$ ,  $B$ ,  $\rho$  – коэффициенты, зависящие от параметров вентильного двигателя [5, 6].

Таким образом, алгоритм и скалярного и векторного управления ВД со всеми их достоинствами и недостатками формируется на основе достоверной информации об электромеханических параметрах вентильного двигателя, которые обычно отсутствуют в справочной литературе [6 – 9]. Процедура расчета параметров машины базируется на известных соотношениях для электромагнитного момента и фазной ЭДС взаимной индукции, является итерационной [6, 7] и дает удовлетворительные результаты при номинальном режиме работы вентильного двигателя. Синтез корректирующих устройств электроприводов с вентильными двигателями, который осуществляется на основе известных значений параметров при недостоверных результатах вычислений может привести к невыполнению требуемых показателей качества переходных процессов, возникновению автоколебаний, а также потере устойчивости и работоспособности электропривода и, в свою очередь, нарушению технологического процесса [8, 9].

К параметрам вентильного двигателя относятся коэффициенты при фазовых координатах уравнений динамики машины: активные сопротивления  $R$  и индуктивности обмоток  $L$ , а также момент инерции  $J$ . Как было отмечено выше, данные параметры не

всегда имеются в паспортных данных, а их значения, имеющиеся в справочной литературе, в целях получения достоверной информации требуют, как правило, экспериментального подтверждения. В этой связи анализ динамических характеристик ВД в условиях параметрической неопределенности, а также вычисление отклонений нестабильных параметров ВД с применением методов теории чувствительности для оптимизации процесса управления мехатронной системой является актуальной задачей [10 – 12].

#### Материалы и методы.

Уравнения электромеханического преобразования энергии в вентильном двигателе в целях исключения гармонических входных воздействий удобно рассматривать во вращающейся со скоростью ротора декартовой системе координат с продольной  $d$  и поперечной  $q$  осями [13, 14]. Уравнения для проекций тока статора на координатные оси  $d$ - $q$  имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} \frac{di_d}{dt} &= \frac{1}{L_d} u_d - \frac{R}{L_d} i_d + \frac{L_q}{L_d} p \omega_2 i_q; \\ \frac{di_q}{dt} &= \frac{1}{L_q} u_q - \frac{R}{L_q} i_q + \frac{L_d}{L_q} p \omega_2 i_d - \frac{\Psi_0 p \omega_2}{L_q}; \\ M &= \frac{m}{2} p \left[ \Psi_0 i_q + (L_d - L_q) i_d i_q \right]; \\ \frac{d\omega_2}{dt} &= \frac{1}{J} (M - M_c). \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Данные уравнения справедливы при синусоидальном или квазисинусоидальном питающем напряжении.

В операторной форме с учетом электромагнитных постоянных времени  $T_d = \frac{L_d}{R}$ ,  $T_q = \frac{L_q}{R}$  и проекции потокоцепления ротора  $\Phi_0$  на продольную ось ВД с нестабильными (квазистационарными) параметрами описывается системой уравнений (2) и соответствующей ей структурной схемой (рис. 1), полученной на основе уравнений (1).

$$\left. \begin{aligned} U_d &= R(t)(T_d s + 1) i_d + \omega L_q(t) i_q; \\ U_q &= R(t)(T_q s + 1) i_q + \omega L_d(t) i_d - \Phi_0 \omega; \\ M &= \frac{3}{2} p \left( \Phi_0 i_q + (L_d(t) - L_q(t)) i_d i_q \right); \\ s \omega_2 &= \frac{M - M_c}{J}, \quad \omega = p \omega_2. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Третье уравнение системы (2) для вращающего момента  $M$  является алгебраическим и учитывает число фаз  $m = 3$  и число пар полюсов  $p$ , а четвертое уравнение представляет собой уравнение механического равновесия относительно скорости вращения ротора  $\omega_2$  при работе двигателя под нагрузкой с моментом сопротивления  $M_c$ .

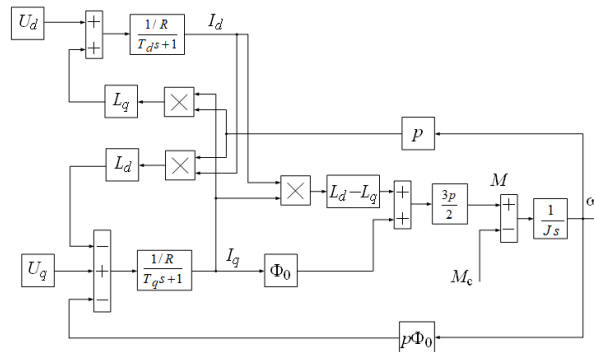


Рис. 1. Структурная схема вентильного двигателя во вращающейся системе координат

Fig. 1. Structural diagram of a PMSM with a rotating coordinate system

Перепишем систему операторных уравнений (2) с учетом следующих обозначений  $x_1 = i_d$ ;  $x_2 = i_q$ ;  $x_3 = \omega_2$ :



$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_1 &= -\frac{R}{L_d} x_1 - p \frac{L_q}{L_d} x_2 x_3 + \frac{u_d}{L_d}; \\ \dot{x}_2 &= -\frac{R}{L_q} x_2 + \frac{L_d}{L_q} x_1 x_3 + p \frac{\Phi_0}{L_q} x_3 + \frac{u_d}{L_d}; \\ \dot{x}_3 &= \frac{3}{2J} p (L_d - L_q) x_1 x_2 + \frac{3}{2J} p \Phi_0 x_2 - \frac{M_c}{J}; \\ M &= \frac{3}{2} p (L_d - L_q) x_1 x_2 + \frac{3}{2} p \Phi_0 x_2. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Продифференцируем систему уравнений (3) по каждому нестабильному параметру и получим соответствующие уравнения чувствительности.

Уравнения чувствительности по активному сопротивлению обмотки статора  $R$ :

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_1^R &= -\frac{1}{L_d} x_1^0 - \frac{R}{L_d} x_1^R - p \frac{L_q}{L_d} x_2^R x_3^0 - p \frac{L_q}{L_d} x_2^0 x_3^R; \\ \dot{x}_2^R &= \frac{L_d}{L_q} x_1^R x_3^0 + \frac{L_d}{L_q} x_1^0 x_3^R - \frac{1}{L_q} x_2^0 - \frac{R}{L_q} x_2^R + p \frac{\Phi_0}{L_q} x_3^R; \\ \dot{x}_3^R &= \frac{3}{2J} p (L_d - L_q) x_1^R x_2^0 + \frac{3}{2J} p (L_d - L_q) x_1^0 x_2^R + \frac{3}{2J} p \Phi_0 x_2^R. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Уравнения чувствительности по индуктивности  $L_d$  обмотки статора:

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_1^{L_d} &= \frac{R}{L_d^2} x_1^0 - \frac{R}{L_d} x_1^{L_d} + p \frac{L_q}{L_d^2} x_2^0 x_3^0 - p \frac{L_q}{L_d} x_2^{L_d} x_3^0 - p \frac{L_q}{L_d} x_2^0 x_3^{L_d} - \frac{u_d}{L_d^2}; \\ \dot{x}_2^{L_d} &= \frac{1}{L_q} x_1^0 x_3^0 + \frac{L_d}{L_q} x_1^{L_d} x_3^0 + \frac{L_d}{L_q} x_1^0 x_3^{L_d} - \frac{R}{L_q} x_2^{L_d} + p \frac{\Phi_0}{L_q} x_3^{L_d}; \\ \dot{x}_3^{L_d} &= -\frac{3}{2J} p L_q x_1^0 x_2^0 + \frac{3}{2J} p (L_d - L_q) x_1^{L_d} x_2^0 + \frac{3}{2J} p (L_d - L_q) x_1^0 x_2^{L_d} + \\ &+ \frac{3}{2J} p \Phi_0 x_2^{L_d}. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Уравнения чувствительности по индуктивности  $L_q$  обмотки статора:

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_1^{L_q} &= -\frac{R}{L_d} x_1^{L_q} - p \frac{1}{L_d} x_2^0 x_3^0 - p \frac{L_q}{L_d} x_2^{L_q} x_3^0 - p \frac{L_q}{L_d} x_2^0 x_3^{L_q}; \\ \dot{x}_2^{L_q} &= -\frac{L_d}{L_q^2} x_1^0 x_3^0 + \frac{L_d}{L_q} x_1^{L_q} x_3^0 + \frac{L_d}{L_q} x_1^0 x_3^{L_q} + \frac{R}{L_q^2} x_2^0 - \frac{R}{L_q} x_2^{L_q} - \\ &- p \frac{\Phi_0}{L_q^2} x_3^0 + p \frac{\Phi_0}{L_q} x_3^{L_q} - \frac{u_q}{L_q^2}; \\ \dot{x}_3^{L_q} &= \frac{3}{2J} p L_d x_1^0 x_2^0 + \frac{3}{2J} p (L_d - L_q) x_1^{L_q} x_2^0 + \frac{3}{2J} p (L_d - L_q) x_1^0 x_2^{L_q} + \\ &+ \frac{3}{2J} p \Phi_0 x_2^{L_q}. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Уравнения чувствительности по моменту инерции  $J$ :

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_1^J &= -\frac{R}{L_d} x_1^J - p \frac{L_q}{L_d} x_2^J x_3^0 - p \frac{L_q}{L_d} x_2^0 x_3^J; \\ \dot{x}_2^J &= \frac{L_d}{L_q} x_1^J x_3^0 + \frac{L_d}{L_q} x_1^0 x_3^J + \frac{R}{L_q} x_2^J + p \frac{\Phi_0}{L_q} x_3^J; \\ \dot{x}_3^J &= \frac{3}{2J^2} p (L_d - L_q) x_1^0 x_2^0 + \frac{3}{2J} p (L_d - L_q) x_1^J x_2^0 + \\ &\quad \frac{3}{2J} p (L_d - L_q) x_1^0 x_2^J - \frac{3}{2J^2} p \Phi_0 x_2^0 + \frac{3}{2J} p \Phi_0 x_2^J + \frac{M_c}{J^2}. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Уравнение чувствительности относительно вектора параметров  $\chi$  в векторно-матричной форме

$$\dot{\mathbf{x}}_\chi = \mathbf{A}_\chi \mathbf{x}_\chi + \mathbf{B}_\chi \mathbf{u}_0 + \mathbf{F}_\chi \quad (8)$$

содержит вектор чувствительности  $\mathbf{x}_\chi$ , блочную матрицу Якоби  $\mathbf{A}_\chi$ , матрицу входа  $\mathbf{B}_\chi$ , матрицу свободных членов  $\mathbf{F}_\chi$  и вектор входных координат  $\mathbf{u}_0 = [u_d \ u_q \ 0]^T$ . Векторно-матричная структурная схема, полученная по уравнению (8), приведена на рисунке 2.

Основная матрица системы уравнений (8) имеет размерность  $(12 \times 12)$

$$\mathbf{A}_\chi = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_R & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{A}_{L_d} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{A}_{L_q} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{A}_J \end{bmatrix} \quad (9)$$

и содержит блоки по каждому из нестабильных параметров ВД:

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_R &= \mathbf{A}_{L_d} = \mathbf{A}_{L_q} = \mathbf{A}_J = \\ &= \begin{bmatrix} -\frac{R}{L_d} & -p \frac{L_q}{L_d} x_3^0 & -p \frac{L_q}{L_d} x_2^0 \\ \frac{L_d}{L_q} x_3^0 & -\frac{R}{L_q} & \left( \frac{L_d}{L_q} x_1^0 + p \frac{\Phi_0}{L_q} \right) \\ \frac{3}{2J} p (L_d - L_q) x_2^0 & \frac{3}{2J} p [(L_d - L_q) x_1^0 + \Phi_0] & 0 \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (10)$$

Матрица входа  $\mathbf{B}_\chi$  размерностью  $(12 \times 3)$  представлена блочной матрицей

$$\mathbf{B}_\chi = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_R \\ \mathbf{B}_{L_d} \\ \mathbf{B}_{L_q} \\ \mathbf{B}_J \end{bmatrix}, \quad (11)$$

а её блоки запишутся как:

$$\begin{aligned} \mathbf{B}_R &= [\mathbf{0}], (3 \times 3); \\ \mathbf{B}_{L_d} &= \begin{bmatrix} -\frac{1}{L_d^2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{B}_{L_q} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{L_q^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \\ \mathbf{B}_J &= [\mathbf{0}], (3 \times 3). \end{aligned} \quad (12)$$

Третье слагаемое уравнения чувствительности (8) представляет собой матрицу свободных членов размерностью  $(12 \times 1)$

$$\mathbf{F}_\chi = \begin{bmatrix} \mathbf{F}_R \\ \mathbf{F}_{L_d} \\ \mathbf{F}_{L_q} \\ \mathbf{F}_J \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{L_d} x_1^0 \\ -\frac{1}{L_q} x_2^0 \\ 0 \\ -\frac{R}{L_d^2} x_1^0 + \frac{L_q}{L_d^2} x_2^0 x_3^0 \\ \frac{1}{L_q} x_1^0 x_3^0 \\ -\frac{3}{2} p L_q x_1^0 x_2^0 \\ -\frac{1}{L_q} x_2^0 x_3^0 \\ -\frac{L_d}{L_q^2} x_1^0 x_3^0 + \frac{R}{L_q^2} x_2^0 - \frac{\Phi_0}{L_q^2} x_3^0 \\ \frac{3}{2} p L_d x_1^0 x_2^0 \\ 0 \\ 0 \\ -\frac{3}{2J^2} p \left[ (L_d - L_q) x_1^0 x_2^0 + \Phi_0 x_2^0 \right] + \frac{M_c}{J^2} \end{bmatrix} \quad (13)$$

Четвертое уравнение системы (3) предполагает получение векторного уравнения моментов  $\mathbf{M}_\chi = \mathbf{C}_\chi \mathbf{x}_\chi$ , которое включает блочно-диагональную матрицу выхода  $\mathbf{C}_\chi$  размерностью  $(4 \times 12)$ , равную

$$\mathbf{C}_\chi = \begin{bmatrix} \mathbf{M}_R^0 & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{M}_{L_d}^0 & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{M}_{L_q}^0 & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{M}_J^0 \end{bmatrix}, \quad (14)$$

где  $\mathbf{0} = [0 \ 0 \ 0]$  – нулевая вектор-строка.

Блоки матрицы выхода запишутся как

$$\begin{aligned} \mathbf{M}_R^0 &= \begin{bmatrix} \frac{3}{2} p (L_d - L_q) x_2^0 & \frac{3}{2} p (L_d - L_q) x_1^0 + \frac{3}{2} p \Phi_0 & 0 \end{bmatrix}; \\ \mathbf{M}_{L_d}^0 &= \begin{bmatrix} \frac{3}{2} p (L_d - L_q) x_2^0 & \frac{3}{2} p (L_d - L_q) x_1^0 + \frac{3}{2} p \Phi_0 & 0 \end{bmatrix}; \\ \mathbf{M}_{L_q}^0 &= \begin{bmatrix} \frac{3}{2} p (L_d - L_q) x_2^0 & \frac{3}{2} p (L_d - L_q) x_1^0 + \frac{3}{2} p \Phi_0 & 0 \end{bmatrix}; \\ \mathbf{M}_J^0 &= \begin{bmatrix} \frac{3}{2} p (L_d - L_q) x_2^0 & \frac{3}{2} p (L_d - L_q) x_1^0 + \frac{3}{2} p \Phi_0 & 0 \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (15)$$

Уравнения чувствительности по нестабильным параметрам  $R, L, J$  в случае, когда выходной координатой является момент на валу, представим системой:

$$\left. \begin{aligned} M_R &= \frac{3}{2} p (L_d - L_q) x_1^R x_2^0 + \frac{3}{2} p (L_d - L_q) x_1^0 x_2^R + \frac{3}{2} p \Phi_0 x_2^R; \\ M_{L_d} &= -\frac{3}{2} p L_q x_1^0 x_2^0 + \frac{3}{2} p (L_d - L_q) x_1^{L_d} x_2^0 + \frac{3}{2} p (L_d - L_q) x_1^0 x_2^{L_d} + \\ &+ \frac{3}{2} p \Phi_0 x_2^{L_d}; \\ M_{L_q} &= \frac{3}{2} p L_d x_1^0 x_2^0 + \frac{3}{2} p (L_d - L_q) x_1^{L_q} x_2^0 + \frac{3}{2} p (L_d - L_q) x_1^0 x_2^{L_q} + \\ &+ \frac{3}{2} p \Phi_0 x_2^{L_q}; \\ M_J &= \frac{3}{2} p (L_d - L_q) x_1^J x_2^0 + \frac{3}{2} p (L_d - L_q) x_1^0 x_2^J + \frac{3}{2} p \Phi_0 x_2^J. \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

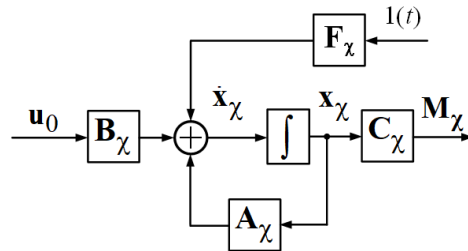


Рис. 2. Векторно-матричная структурная схема определения дополнительного движения координат вентильного двигателя

Fig. 2. Vector-matrix structural scheme for calculating the additional coordinate movement of a PMSM

Приведенная схема позволяет в компактной форме осуществить анализ динамических характеристик ВД в условиях параметрической неопределенности. Для анализа дополнительного движения скорости вращения ротора  $\omega_2$  матрица выхода  $C_\chi$  не учитывается.

### Результаты и обсуждение

На основе известных номинальных значениях параметров исследуемого вентильного двигателя типа LSRPM [10, 15] для момента на валу  $M$  и скорости вращения ротора  $x_3 = \omega_2$  на рисунке 3 показана *Simulink*-модель для определения дополнительного движения по указанным координатам.

Вычисление компонентов вектора чувствительности по сопротивлению, индуктивностям и моменту инерции осуществляется в подсистемах R, Ld, Lq, J соответственно. На рисунке 4 представлена *Simulink*-модель для определения дополнительного движения выходных координат  $M_{L_q}$  и  $\omega_{2L_q}$  при изменении индуктивности по поперечной оси обмотки статора.

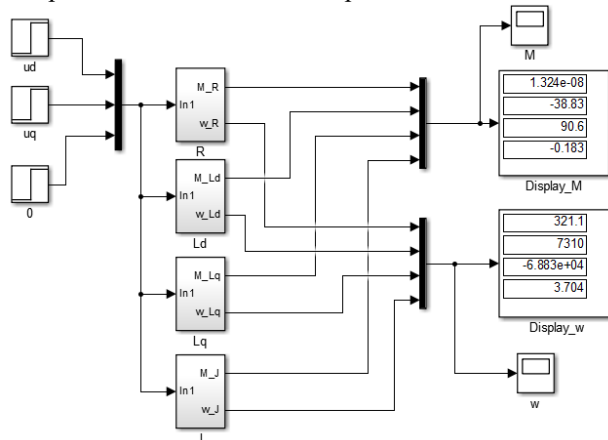


Рис. 3. *Simulink*-модель для вычисления дополнительного движения вентильного двигателя.

Fig. 3. *Simulink*-model for calculating the additional movement of a PMSM.

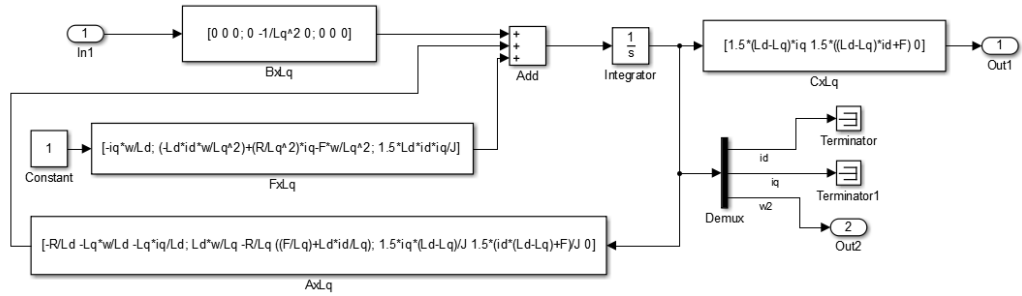


Рис. 4. Simulink-модель для вычисления функций чувствительности  $M_{Lq}$ ,  $\omega_{2Lq}$

Fig. 4. Simulink Model for Calculating Sensitivity Functions  $M_{Lq}$ ,  $\omega_{2Lq}$

В блоках AxLq, BxLq, FxLq и CxLq реализованы компоненты уравнений (9), (11), (13), (14) относительно индуктивности  $L_q$ . Подсистемы  $R$ ,  $L_d$  и  $J$  построены по тому же принципу. На выходе Out1 регистрируются изменения проекции  $M_{Lq}$  вектора выходных координат  $\mathbf{M}_x$ , а на выходе Out2 – проекции  $\omega_{2Lq}$  вектора скорости вращения ротора  $\mathbf{x}_3^x$ .

При необходимости имеется возможность получить информацию о дополнительном движении проекций тока статора на оси  $d$  и  $q$  в условиях параметрической неопределенности. При этом к выходам Terminator и Terminator1 следует подключить соответствующие регистрирующие устройства. В блоки подсистем  $R$ ,  $L_d$ ,  $L_q$  и  $J$   $\mathbf{A}_i$ ,  $\mathbf{B}_i$ ,  $\mathbf{F}_i$ ,  $\mathbf{C}_i$  перед началом моделирования вводятся номинальные значения параметров вентильного двигателя в соответствии с данными таблица 1, а также установившиеся значения промежуточных координат, полученных при моделировании ВД с номинальными значениями параметров:

$$R^0 = 0,96 \text{ Ом}; L_d^0 = 0,00525 \text{ Гн}; L_q^0 = 0,00225 \text{ Гн}; \Phi^0 = 0,183 \text{ Вб}; J^0 = 0,013 \text{ кг} \cdot \text{м}^2;$$

$$\omega^0 = 138 \text{ рад/с}; i_d^0 = -61 \text{ А}; i_q^0 = 188,6 \text{ А}.$$

Результаты моделирования представлены на рисунках 5 – 8.

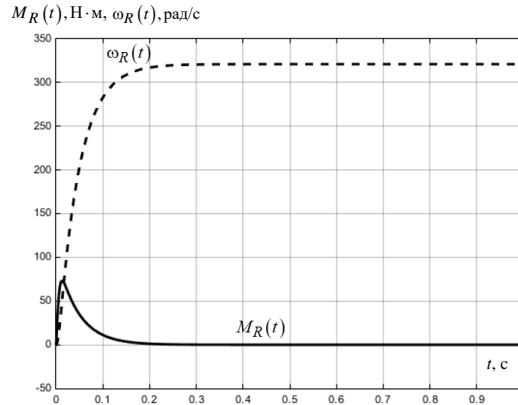


Рис. 5. Зависимости  $M_R(t)$ ,  $\omega_R(t)$

Fig. 5. Dependencies  $M_R(t)$ ,  $\omega_R(t)$

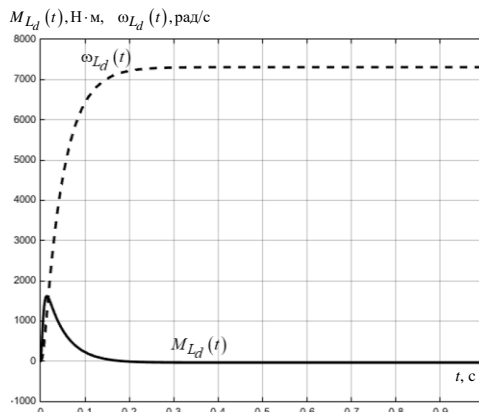


Рис. 6. Зависимости  $M_{Ld}(t)$ ,  $\omega_{Ld}(t)$

Fig. 6. Dependencies  $M_{Ld}(t)$ ,  $\omega_{Ld}(t)$

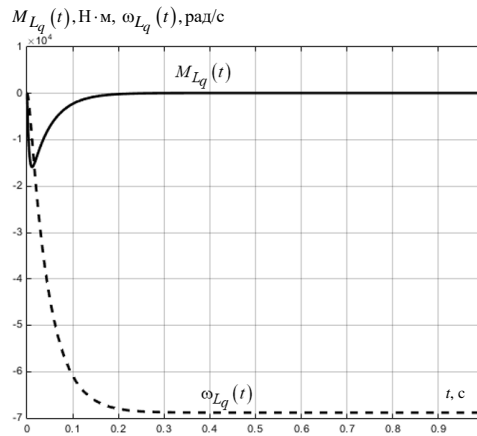


Рис. 7. Зависимости  $M_{Lq}(t)$ ,  $\omega_{Lq}(t)$

Fig. 7. Dependencies  $M_{Lq}(t)$ ,  $\omega_{Lq}(t)$

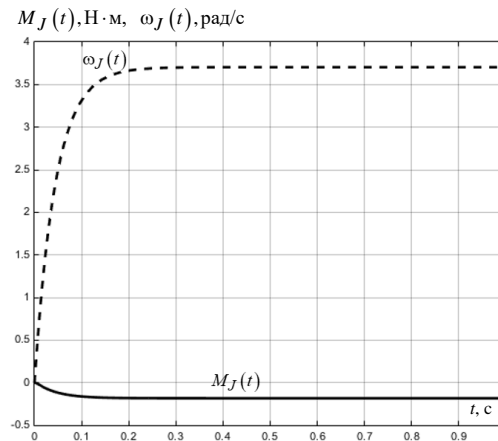


Рис. 8. Зависимости  $M_J(t)$ ,  $\omega_J(t)$

Fig. 8. Dependencies  $M_J(t)$ ,  $\omega_J(t)$

Из анализа результатов моделирования видно, что полученные графики функций чувствительности при малых отклонениях нестабильных параметров характеризуются устойчивыми переходными процессами, что говорит об отсутствии неустойчивых предельных циклов исследуемого нелинейного объекта [16]. Максимальный вклад в дополнительное движение координат вентильного двигателя вносит изменение индуктивности  $L_q$  и установившиеся значения выходных координат при вариации указанного параметра составляют:  $\omega_{Lq}^{уст} = -6,883 \cdot 10^4$  рад/с и  $M_{Lq}^{уст} = 90,6$  Н·м (см. рис. 3, 7). Зависимости  $M_{Ld}(t)$  и  $\omega_{Ld}(t)$  (рис. 6) инвертированы в вертикальной плоскости по отношению к рис. 7, а установившиеся значения функций чувствительности равны  $\omega_{Ld}^{уст} = 7310$  рад/с и  $M_{Ld}^{уст} = -38,83$  Н·м. Изменения  $R$  (рис. 5) и  $J$  (рис. 8) вентильного двигателя в меньшей степени влияют на выходные координаты ВД и установившиеся значения функций чувствительности равны:  $\omega_R^{уст} = 321,1$  рад/с,  $\omega_J^{уст} = 3,704$  рад/с,  $M_R^{уст} \approx 0$  Н·м,  $M_J^{уст} = -0,183$  Н·м. В результате максимальное установившееся значение дополнительного движения зарегистрировано у скорости вращения ВД при изменении индуктивности  $L_q$ .

Обобщенное математическое описание [17], характеризующее решение уравнений чувствительности при вариациях нестабильных параметров соответствует выражению

$$x(\chi + \Delta\chi, t) = x(\chi, t) + u^{(1)}\Delta\chi + \frac{1}{2!}u^{(2)}\Delta\chi^2 + \dots + \frac{1}{r!}u^{(r)}\Delta\chi^r + \dots, \quad (17)$$

где показатель степени в круглых скобках означает порядок функций чувствительности  $u$ .

Функция чувствительности  $r$ -го порядка для системы (3) описывается уравнением

$$\frac{\partial f}{\partial \ddot{x}} \ddot{u}^{(r)} + \frac{\partial f}{\partial \dot{x}} \dot{u}^{(r)} + \frac{\partial f}{\partial x} u^{(r)} = \Phi \left[ u^{(r-1)}, \dots, u^{(2)}, u^{(1)}, x, \chi, t \right]. \quad (18)$$

Наличие устойчивого предельного цикла решения уравнений чувствительности обеспечивает ограниченную амплитуду возмущающего дополнительного движения (правая часть уравнения (18)). Следовательно, если решение уравнений чувствительности представляет собой устойчивый предельный цикл, то ряд Тейлора, в который раскладывается решение уравнения движения ВД (четвертое уравнение системы (3)) всегда сходится.

Понятие параметрической неопределенности предполагает недетерминированный характер изменения параметров [16 – 19] и для анализа динамических свойств вентильного двигателя в данных условиях оправданным является применение аппарата теории чувствительности [20, 21]. В первом приближении для анализа статистических характеристик объекта исследования примем к рассмотрению гипотезу о нормальном (гауссовском) распределении отклонений параметров [22, 23] в соответствии с выражением:

$$f(\chi) = \frac{1}{\sigma_i \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\chi - m_\chi)^2}{2\sigma_i^2}}, \quad (19)$$

где  $m_\chi$  – математическое ожидание возможного отклонения неустойчивого параметра  $\chi$ ;  $\sigma_i$  – среднеквадратичное отклонение  $i$ -го неустойчивого параметра.

С учетом правила 3 $\sigma$  среднеквадратическое отклонение  $\sigma$   $i$ -го параметра при нормальном распределении определяется по формуле

$$\sigma_i = \frac{\Delta\chi_i}{3}. \quad (20)$$

Тогда дисперсия отклонения параметра  $\Delta\chi_i$  запишется как

$$D_{\chi_i} = \sigma_i^2 = \frac{\Delta\chi_i^2}{9}. \quad (21)$$

Суммарная дисперсия фазовых координат ВД при нормальном распределении определяется выражением

$$D_{x_i} = \frac{1}{9} \sum_{i=1}^n (x_{\chi_i} \Delta\chi_i)^2. \quad (22)$$

Еще одно количественное выражение оценки влияния неустойчивых параметров на дополнительное движение координат ВД представляется относительной оценкой

$$S_i = \frac{x_{\chi_i}^2 D_{x_i}}{\sum_{i=1}^n x_{\chi_i} D_{x_i}}. \quad (23)$$

Сформируем соответствующую Simulink-модель для определения указанных статистических характеристик и построим графики дисперсий и относительных оценок в соответствии с выражениями (21), (22), (23) (рис. 9).

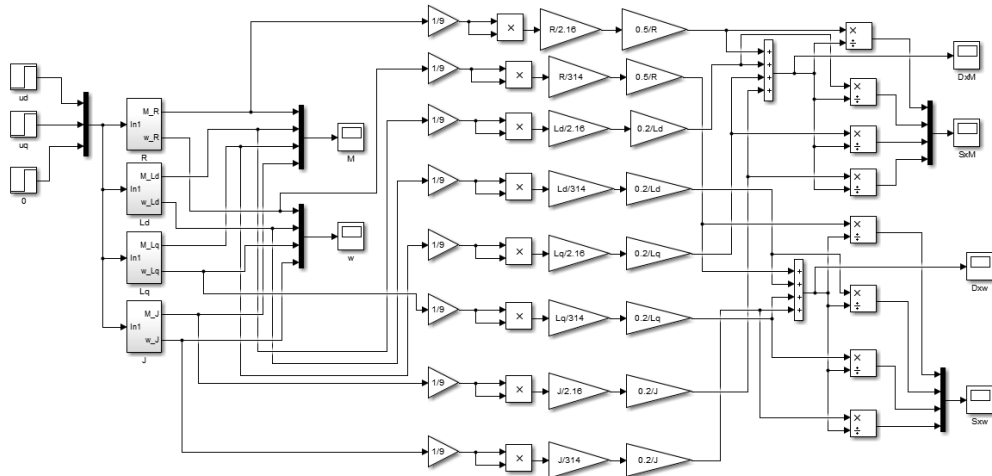


Рис. 9. Simulink-модель вычисления суммарной дисперсии и относительных оценок вентильного двигателя

Fig. 9. Simulink-model for calculating total variance and relative estimate of a PMSM s



Графики дисперсий при вариациях нестабильных параметров представлены на рис. 10, 11.

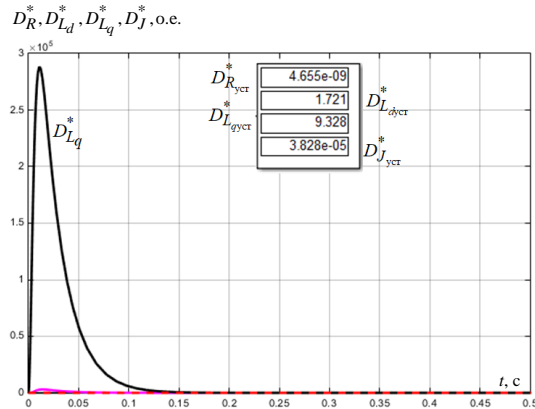


Рис. 10. Относительные дисперсии выходной координаты  $M$  по нестабильным параметрам

Fig. 10. Relative variances of the output coordinate  $M$  by unstable parameters

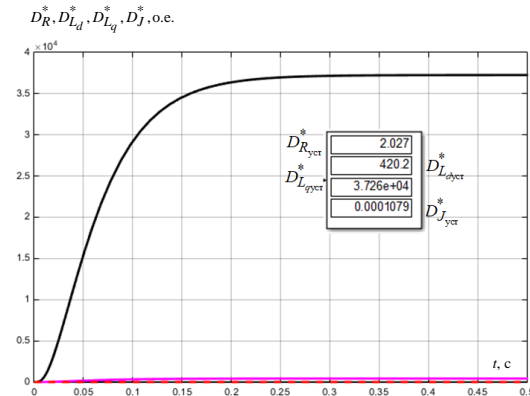


Рис. 11. Относительные дисперсии выходной координаты  $\omega$  по нестабильным параметрам

Fig. 11. Relative variances of the output coordinate  $\omega$  by unstable parameters

Графики относительных дисперсий, полученные с применением модели на рис. 9 позволили зарегистрировать следующие результаты: установившиеся значения относительных дисперсий составили соответственно  $D_{L_q}^{*уст,\omega} = 3,726 \cdot 10^4$  о.е. и  $D_{L_q}^{*уст,M} = 9,328$  о.е., причем зависимость  $D_{L_q}^{*M}(t)$  имеет динамический выброс около  $2,8 \cdot 10^5$  о.е.;  $D_{L_d}^{*уст,\omega} = 420,2$  о.е. и  $D_{L_d}^{*уст,M} = 1,721$  о.е.; влияние вариаций  $R$  и  $J$  на выходные координаты ВД пренебрежимо мало.

На рисунках 12, 13 показаны графики относительных оценок.

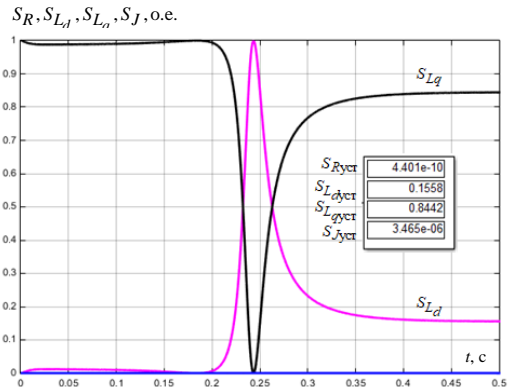


Рис. 12. Относительные оценки выходной координаты  $M$  по нестабильным параметрам

Fig. 12. Relative estimate of the output coordinate  $M$  by unstable parameters

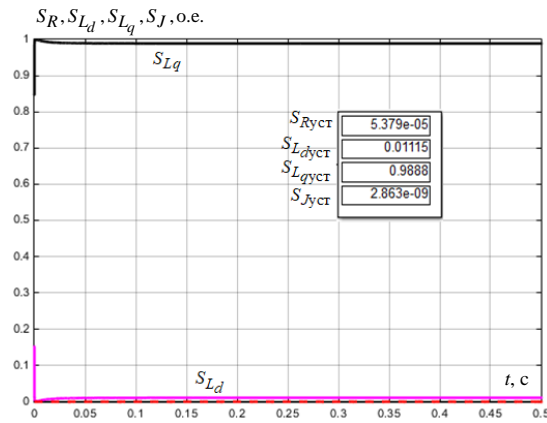


Рис. 13. Относительные оценки выходной координаты  $\omega$  по нестабильным параметрам

Fig. 13. Relative estimate of the output coordinate  $\omega$  by unstable parameters

Здесь в целом картина повторяется и наибольшие отклонения выходных координат ВД вызывают изменения проекций индуктивности обмотки статора:  $S_{L_q}^{уст,\omega} = 0,9888$  о.е.,

$$S_{L_q}^{уст,M} = 0,8442 \text{ о.е.}, \text{ а } S_{L_d}^{уст,\omega} = 0,01115 \text{ о.е.}, S_{L_d}^{уст,M} = 0,1558 \text{ о.е.}$$

Анализ динамических характеристик вентиляльного двигателя мехатронной системы в условиях параметрической неопределенности, состоящий в совместном решении дифференциальных уравнений объекта исследования и уравнений чувствительности позволяет не только выявить характер и установившиеся значения дополнительного движения фазовых координат в зависимости от чувствительности к изменениям нестабильных параметров, но, на основе полученной информации, обеспечить экстремум некоторого показателя качества управления мехатронной системы:

$$I(\Delta\chi_1, \Delta\chi_2, \dots, \Delta\chi_r) \rightarrow \min_{\Delta\chi}. \quad (24)$$

В соответствии с условием (24) можно сформировать систему алгебраических уравнений относительно вектора приращений нестабильных параметров  $\Delta\chi$ . Для этого необходимо вычислить частные производные от показателя качества  $I$  по каждому из нестабильных параметров и приравнять их к нулю. Решение полученной системы уравнений позволит получить оценки  $\Delta\chi$ , которые будут линейно зависеть от результатов моделирования (количества итераций компьютерного эксперимента). Точность вычисления оценок приращений  $\Delta\chi$  определяется количеством поддиапазонов в пределах заданного диапазона вариаций нестабильных параметров, а результаты этих вычислений могут быть использованы при решении задач проектирования мехатронных систем на этапе синтеза алгоритмов оптимального управления технологическими процессами.

### Выводы

Моделирование уравнения чувствительности (8) с применением *Simulink*-моделей показало, что определяющую роль в формировании дополнительного движения выходных координат ВД в условиях параметрической неопределенности играет составляющая  $L_q$  индуктивности статорной обмотки, а скорость вращения ротора является наиболее чувствительной к параметрическим возмущениям выходной координатой ВД.

Анализ параметрических возмущений вентиляльного двигателя как многосвязного нелинейного квазистационарного объекта позволяет судить о применимости векторных моделей чувствительности для оценки динамических свойств различных объектов исследования в условиях параметрической неопределенности путем математического моделирования в программной среде *MatLab*. Уравнения чувствительности вне зависимости от сложности математического описания объекта исследования являются линейными и могут быть сравнительно просто решены известными численными методами. Исследование моделей чувствительности вентиляльного двигателя в условиях параметрической неопределенности показало, что результаты моделирования характеризуются устойчивыми процессами и при случайных вариациях параметров в соответствии с нормальным распределением в заданном диапазоне значений полученные решения являются корректными, адекватными поставленной задаче и, кроме того, не требуют больших вычислительных мощностей. Данные обстоятельства приводят к выводу о возможности использования метода получения разработанных для вентиляльного двигателя моделей чувствительности для оценки нестабильных параметров различных элементов мехатронных

систем на стадии проектирования, изготовления и эксплуатации. На основе предварительных экспериментально-аналитических исследований может быть сформирован алгоритм оценки параметров мехатронных систем в процессе функционирования, позволяющий в автоматическом режиме получать значения нестабильных параметров в режиме реального времени с возможностью применения данной информации при расчетах проектируемых компонентов мехатронных систем на основе принципов оптимизации.

Полученные для вентильного двигателя уравнения чувствительности и *Simulink*-модели могут быть применены для решения комплексной задачи многопараметрической идентификации и построения алгоритмов адаптивного управления мехатронных систем при оптимизации автоматизированных технологических процессов.

### Литература

1. Ma Q., El-Refaie A., Lequesne B. Low-Cost Interior Permanent Magnet Machine with a Blend of Magnet Types, 2019 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), 2019, pp. 1303-1310.
2. Huynh T.A., Hsieh M-F. Performance Analysis of Permanent Magnet Motors for Electric Vehicles (EV) Traction Considering Driving Cycles. *Energies*. 2018; 11(6):1385.
3. Фролов В.Я., Жилиготов Р.И. Разработка системы бездатчикового векторного управления синхронным двигателем с постоянными магнитами в Matlab Simulink // Записки Горного института. 2018. Т. 229. С. 92-97.
4. Базылев Д.Н., Пыркин А.А., Бобцов А.А. Алгоритм адаптивного бессенсорного управления синхронным двигателем // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2018. Т. 18. № 1. С. 24–31.
5. Ortega R., Praly L., Astolfi A., Lee J., Nam K. Estimation of rotor position and speed of permanent magnet synchronous motors with guaranteed stability // *IEEE Transactions on Control Systems Technology*. 2011. V. 19. N 3. P. 601–614.
6. A. K. Morya et al. Wide Bandgap Devices in AC Electric Drives: Opportunities and Challenges, in *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 5, no. 1, pp. 3-20, March 2019.
7. J. He et al., "Multi-Domain Design Optimization of dv/dt Filter for SiC-Based Three-Phase Inverters in High-Frequency Motor-Drive Applications" in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 55, no. 5, pp. 5214-5222, Sept.-Oct. 2019.
8. R. A. Torres, H. Dai, W. Lee, T. M. Jahns and B. Sarlioglu, Development of Current-Source-Inverter-based Integrated Motor Drives using Wide-Bandgap Power Switches, 2019 IEEE 15th Brazilian Power Electronics Conference and 5th IEEE Southern Power Electronics Conference (COBEP/SPEC), 2019, pp. 1-6.
9. Петров Т.И., Сафин А.Р., Ившин И.В., Цветков А.Н., Корнилов В.Ю. Модель системы управления станком-качалкой на основе синхронных двигателей с бездатчиковым методом. *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2018;20(7-8):107-116.
10. N. A. Malev, A. I. Mukhametshin and O. V. Pogoditsky. Analysis and Study of the Dynamic Processes of a Permanent Magnet Synchronous Motor with a Wide Range of Parameter Variations Using the Reference Model, 2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon), Vladivostok, Russia, 2019, pp. 1-6.
11. S. Akita, T. Higuchi, Y. Yokoi, H. Saikusa, T. Abe, S. Makino, "Experimental Characteristics of a Line-Start Permanent Magnet Motor", The 19th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS 2016) DS2G–1–17, 2016.
12. Joost Bolder, Stephan Kleinendorst, and Tom Oomen. "Data-driven multivariable ILC: enhanced performance by eliminating L and Q filters. " *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 28(12):3728–3751, 2018.
13. T. Inoue, Y. Inoue, S. Morimoto and M. Sanada, "Mathematical Model for MTPA Control of Permanent-Magnet Synchronous Motor in Stator Flux Linkage Synchronous Frame," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 51, no. 5, pp. 3620-3628, Sept.-Oct. 2015.
14. S. Li and Z. Liu, "Adaptive Speed Control for Permanent-Magnet Synchronous Motor System With Variations of Load Inertia," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 56, no. 8, pp. 3050-3059, Aug. 2009.
15. C. He and T. Wu, "Analysis and design of surface permanent magnet synchronous motor and generator," in *CES Transactions on Electrical Machines and Systems*, vol. 3, no. 1, pp. 94-100, March 2019.
16. M. Bucolo, A. Buscarino, L. Fortuna and C. Famoso, "Stochastic resonance in imperfect electromechanical systems," *2020 IEEE 29th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, 2020, pp. 210-214.

17. Bolzern, P., P. Colaneri, G. de Nicolao, and U. Snaked, "Guaranteed  $H_\infty$  Robustness Bounds for Wiener Filtering and Prediction," *Int. J. Robust Nonlinear Contr.*, 12, 41–56, 2001.
18. Афанасьев А.Ю., Макаров В.Г., Загирова В.Н. Идентификация параметров и частоты вращения ротора асинхронного двигателя на основе функций чувствительности // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ. 2020.Т.6. С.128-131.
19. Eremin E.L. Combined system with an implicit standard for a class of uncertain a priori singlechannel non-affine control plants on the set of operation states. *Information Science and Control Systems*. 2018. No. 3(57). pp. 93-103.
20. Малёв Н.А., Погодицкий О.В., Цветкович А.М. Особенности применения теории чувствительности для анализа влияния параметрических возмущений на динамические свойства электромеханических преобразователей. *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2019;21(6):101-110.
21. Малёв Н.А., Мухаметшин А.И., Погодицкий О.В., Чичков П.В. Сравнительный анализ аппаратно-программного обеспечения метода контроля функционирования электромеханических преобразователей постоянного тока. *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2020;22(5):142-154.
22. Dr. Sasi Bhanu J, Dr. Baswaraj D, Sunitha Devi Bigul, and Dr. JKR Sastry. Generating Test cases for Testing Embedded Systems using Combinatorial Techniques and Neural Networks based Learning Model, *International Journal of Emerging Trends in Engineering Research*, vol. 7, is. 7, p.p. 417-429, 2019.
23. S. Herasimov, V. Pavlii, O. Tymoshchuk and other. Testing Signals for Electronics: Criteria for Synthesis, *Journal of Electronic Testing*, vol. 35, is.148, p.p. 1-9, 2019.

#### Авторы публикации

**Малёв Николай Анатольевич** – канд. техн. наук, доцент кафедры Приборостроение и мехатроника, Казанский государственный энергетический университет.

**Погодицкий Олег Владиславович** – канд. техн. наук, доцент кафедры Приборостроение и мехатроника, Казанский государственный энергетический университет.

**Козелков Олег Владимирович** – канд. техн. наук, заведующий кафедрой Приборостроение и мехатроника, Казанский государственный энергетический университет.

**Дюрягин Андрей Михайлович** – канд. техн. наук, ведущий специалист КАЗ им. С.П Горбунова – филиал ПАО "Туполев".

#### References

1. Ma Q., El-Refaie A., Lequesne B. Low-Cost Interior Permanent Magnet Machine with a Blend of Magnet Types. *IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC)*, 2019; 1303-1310.
2. Huynh T.A., Hsieh M-F. Performance Analysis of Permanent Magnet Motors for Electric Vehicles (EV) Traction Considering Driving Cycles. *Energies*, 2018; 11(6):1385.
3. Frolov V. Y. & Zhiligratov R. I. Development of sensorless vector control system for permanent magnet synchronous motor in Matlab Simulink, *Journal of Mining Institute*, 2018; 229: 92.
4. Bazylev D.N., Pyrkin A.A., Bobtsov A.A. Algorithm for adaptive sensorless control of synchronous motors. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2018; 18(1): 24–31.
5. Ortega R., Praly L., Astolfi A., Lee J., Nam K. Estimation of rotor position and speed of permanent magnet synchronous motors with guaranteed stability // *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2011; 19(3): 601–614.
6. A. K. Morya et al. Wide Bandgap Devices in AC Electric Drives: Opportunities and Challenges, in *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2019; 5(1): 3-20.
7. J. He et al., Multi-Domain Design Optimization of dv/dt Filter for SiC-Based Three-Phase Inverters in High-Frequency Motor-Drive Applications" in *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2019; 55(5): 5214-5222.

8. R. A. Torres, H. Dai, W. Lee, T. M. Jahns and B. Sarlioglu, Development of Current-Source-Inverter-based Integrated Motor Drives using Wide-Bandgap Power Switches, *2019 IEEE 15th Brazilian Power Electronics Conference and 5th IEEE Southern Power Electronics Conference (COBEP/SPEC)*, 2019; 1-6.
9. Petrov T.I., Safin A.R., Ivshin I.V., Tsvetkov A.N., Kornilov V.Yu. MODEL OF THE CONTROL SYSTEM ROCKING MACHINES OF OIL THE BASIC OF A SYNCHRONOUS ENGINES WITH THE SENSORLESS METHOD. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2018;20(7-8):107-116. (In Russ.).
10. N. A. Malev, A. I. Mukhametshin and O. V. Pogoditsky. Analysis and Study of the Dynamic Processes of a Permanent Magnet Synchronous Motor with a Wide Range of Parameter Variations Using the Reference Model, *2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon)*, Vladivostok, Russia, 2019; 1-6.
11. S. Akita, T. Higuchi, Y. Yokoi, H. Saikusa, T. Abe, S. Makino, "Experimental Characteristics of a Line-Start Permanent Magnet Motor", *The 19th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS 2016) DS2G-1-17*, 2016.
12. Joost Bolder, Stephan Kleinendorst, and Tom Oomen. "Data-driven multivariable ILC: enhanced performance by eliminating L and Q filters." *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2018; 28(12):3728–3751.
13. T. Inoue, Y. Inoue, S. Morimoto and M. Sanada, "Mathematical Model for MTPA Control of Permanent-Magnet Synchronous Motor in Stator Flux Linkage Synchronous Frame," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2015; 51(5): 3620-3628.
14. S. Li and Z. Liu, "Adaptive Speed Control for Permanent-Magnet Synchronous Motor System With Variations of Load Inertia," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2009; 56(8): 3050-3059.
15. C. He and T. Wu, "Analysis and design of surface permanent magnet synchronous motor and generator," in *CES Transactions on Electrical Machines and Systems*, 2019; 3(1): 94-100.
16. M. Bucolo, A. Buscarino, L. Fortuna and C. Famoso, "Stochastic resonance in imperfect electromechanical systems," *2020 IEEE 29th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, 2020; 210-214.
17. Bolzern, P., P. Colaneri, G. de Nicolao, and U. Snaked, "Guaranteed  $H_\infty$  Robustness Bounds for Wiener Filtering and Prediction," *Int. J. Robust Nonlinear Contr.*, 2001; 12: 41–56.
18. Afanasiev A.Y., Makarov V.G., Zagirova V.N. Identification of parameters and rotor speed of the induction motor with the sensitivity functions // *Mathematical methods in engineering and technology-MMTT*. 2020; 6: 128-131.
19. Eremin E.L. Combined system with an implicit standard for a class of uncertain a priori singlechannel non-affine control plants on the set of operation states. *Information Science and Control Systems*. 2018; 3(57): 93-103.
20. Malev N.A., Pogoditsky O.V., Cvetkovich A.M. Features of application of sensitivity theory for analysis of influence of parametric disturbances on dynamic properties electromechanical converters. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2019; 21(6):101-110. (In Russ.).
21. Malev N.A., Mukhametshin A.I., Pogoditsky O.V., Chichkov P.V. Comparative analysis of hardware and software of the monitoring method of functioning electromechanical DC converters. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2020; 22(5):142-154. (In Russ.).
22. Dr. Sasi Bhanu J, Dr. Baswaraj D, Sunitha Devi Bigul, and Dr. JKR Sastry. Generating Test cases for Testing Embedded Systems using Combinatorial Techniques and Neural Networks based Learning Model, *International Journal of Emerging Trends in Engineering Research*, 2019; 7(7): 417-429.
23. S. Herasimov, V. Pavlii, O. Tymoshchuk and other. Testing Signals for Electronics: Criteria for Synthesis, *Journal of Electronic Testing*, 2019; 35(148): 1-9.

#### Authors of the publication

**Nikolai A. Malev** –Kazan State Power Engineering University.

**Oleg V. Pogoditsky** – Kazan State Power Engineering University.

**Oleg V. Kozelkov** – Kazan State Power Engineering University.

*Andrei M. Dyuryagin* –KAP name for S.P. Gorbunov – branch of PJSC "Tupolev".

*Получено* *15.03.2022г.*

*Отредактировано* *25.03.2022г.*

*Принято* *02.04.2022г.*