



ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕОРИИ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ДЛЯ АНАЛИЗА ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ ВОЗМУЩЕНИЙ НА ДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Н.А. Малёв¹, О.В. Погодицкий¹, А.М. Цветкович²

¹Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

²АО «Татэнерго», г. Казань, Россия

maleev@mail.ru

Резюме: На этапе проектирования и испытаний электромеханических преобразователей актуальным является анализ влияния параметрических возмущений на динамические свойства объекта с применением теории чувствительности, которая позволяет оценить качество работы машин в зависимости от условий эксплуатации. На основании системы дифференциальных уравнений электромеханического преобразователя постоянного тока получены уравнения чувствительности соответствующих координат по трем параметрам. Сформирована векторная структурная схема модели чувствительности, а также Simulink-модель, с помощью которой проведено моделирование и получены графики функций чувствительности, определяющие дополнительное движение объекта исследования при изменении параметров в заданных пределах. Показано, что наибольшие установившиеся значения функций чувствительности соответствуют изменениям момента инерции и влияние момента инерции на координаты объекта исследования является наиболее значительным. При этом наиболее чувствительной к вариациям параметров координатой является скорость вращения электромеханического преобразователя. Также решена задача статистического анализа погрешностей выходных координат электромеханического преобразователя в предположении нормального распределения параметрических возмущений. Проведено моделирование с вычислением дисперсий и относительных оценок влияния варьируемых параметров и получены графики, позволяющие оценить степень влияния параметрических возмущений.

Ключевые слова: электромеханический преобразователь, параметрические возмущения, анализ динамических свойств, модель чувствительности.

Для цитирования: 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. Т.21. № 6. С.101-110. doi:10.30724/1998-9903-2019-21-6-101-110.

FEATURES OF APPLICATION OF SENSITIVITY THEORY FOR ANALYSIS OF INFLUENCE OF PARAMETRIC DISTURBANCES ON DYNAMIC PROPERTIES ELECTROMECHANICAL CONVERTERS

NA Malev¹, OV Pogoditsky¹, AM Cvetkovich²

¹Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

²JSC "Tatenergo", Kazan, Russia

maleev@mail.ru

Abstract: At the design and testing stage of electromechanical converters, the analysis of the influence of parametric perturbations on the dynamic properties of an object using sensitivity theory, which allows to evaluate the quality of operation of electrical machines depending on operating conditions, is relevant. Based on the system of differential equations of a DC motor, the sensitivity equations of the corresponding coordinates were obtained in three parameters. A vector structural scheme of the sensitivity model has been formed, as well as the Simulink-model, with the help of which sensitivity function plots were obtained, which determine the additional motion of the object of study when parameters change within specified limits. It is shown that the largest steady-state values of the sensitivity functions correspond to changes in the moment of inertia. It is revealed that the influence of the moment of inertia on the coordinates of the object of study is the

most significant. Where in the coordinate most sensitive to variations in parameters is the rotation speed of the electromechanical converter. The problem of statistical analysis of errors of the output coordinates of a DC motor under the assumption of normal distribution of parametric disturbances was also solved. Simulations were carried out and dispersions and relative estimates of the influence of variable parameters were calculated, and graphs were obtained to estimate the degree of influence of parametric disturbances.

Keywords: electromechanical converter, parametric disturbances, analysis of dynamic properties, sensitivity model.

For citation: Malev NA, Pogoditsky OV, Cvetkovich AM. 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. doi:10.30724/1998-9903-2019-21-6-101-110.

Введение

Анализ влияния параметрических возмущений, обусловленных эксплуатационными воздействиями при функционировании электромеханических преобразователей (ЭМП) является актуальной задачей [1], поскольку позволяет заранее, на этапе проектирования оценить степень соответствия реального объекта и его математической модели. Одной из важнейших задач, возникающих при проектировании и эксплуатации ЭМП, является задача учёта отклонений реальных значений параметров объектов от расчётных и обеспечения требуемого качества функционирования. Поэтому на этапе проектирования и испытаний опытных образцов с точки зрения инженерной практики целесообразным является использование подходов, базирующихся на методах теории чувствительности [2, 3, 4]. Применение методов теории чувствительности позволяет провести качественное и количественное исследование модели электромеханического преобразователя в заданном диапазоне изменения всей совокупности нестабильных параметров. Математический аппарат функций чувствительности – частных производных переменных состояния по соответствующим параметрам – дает возможность решения уравнений чувствительности, полученных непосредственно из известной математической модели электромеханического преобразователя. Предложенный в работе метод, основанный на использовании функций чувствительности, позволяет получить надежную оценку процесса функционирования ЭМП как при строго определенных, так и при стохастических вариациях параметров, выявить из множества нестабильных параметров наиболее влияющие и определить наиболее чувствительные к параметрическим возмущениям фазовые координаты.

Методы

Определим функции чувствительности для ЭМП постоянного тока, который описывается следующей системой дифференциальных уравнений в форме Коши:

$$\begin{cases} \frac{di(t)}{dt} = \frac{1}{L_a} [u \cdot 1(t) - R_a i(t) - c\omega(t)]; \\ \frac{d\omega(t)}{dt} = \frac{1}{J} [c i(t) - M_c \cdot 1(t)]. \end{cases} \quad (1)$$

Продифференцируем каждое из уравнений системы (1) по следующим параметрам: активному сопротивлению якоря R_a , индуктивности якоря L_a и моменту инерции J . В результате получим следующую систему уравнений чувствительности [5, 6, 7]:

$$\begin{cases} \dot{I}_{R_a} = -\frac{1}{L_a} I_0 - \frac{R_a}{L_a} I_{R_a} - \frac{c}{L_a} \omega_{R_a}; \\ \dot{I}_{L_a} = \frac{R_a}{L_a^2} I_0 - \frac{R_a}{L_a} I_{L_a} + \frac{c}{L_a^2} \omega_0 - \frac{c}{L_a} \omega_{L_a} - \frac{1}{L_a^2} u; \\ \dot{I}_J = -\frac{R_a}{L_a} I_J - \frac{c}{L_a} \omega_J; \\ \dot{\omega}_{R_a} = \frac{c}{J} I_{R_a}; \\ \dot{\omega}_{L_a} = \frac{c}{J} I_{L_a}; \\ \dot{\omega}_J = -\frac{c}{J^2} I_0 + \frac{c}{J} I_J + \frac{1}{J^2} M_c. \end{cases} \quad (2)$$

Для приведения системы (2) к векторно-матричной форме

$$\dot{x}_\chi = A_\chi x_\chi + B_\chi u_0, \quad (3)$$

где x_χ – вектор чувствительности; χ – вектор параметров; A_χ – основная матрица системы (матрица Якоби); B_χ – матрица входа; u_0 – вектор номинальных значений входных координат, введем обозначения переменных состояния $x_1 = I_{R_a}; x_2 = I_{L_a}; x_3 = I_J; x_4 = \omega_{R_a}; x_5 = \omega_{L_a}; x_6 = \omega_J$ и перепишем систему (2):

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -\frac{R_a}{L_a} x_1 - \frac{c}{L_a} x_4 - \frac{1}{L_a} I_0; \\ \dot{x}_2 = -\frac{R_a}{L_a} x_2 - \frac{c}{L_a} x_5 + \frac{R_a}{L_a^2} I_0 + \frac{c}{L_a^2} \omega_0 - \frac{1}{L_a^2} u; \\ \dot{x}_3 = -\frac{R_a}{L_a} x_3 - \frac{c}{L_a} x_6; \\ \dot{x}_4 = \frac{c}{J} x_1; \\ \dot{x}_5 = \frac{c}{J} x_2; \\ \dot{x}_6 = \frac{c}{J} x_3 - \frac{c}{J^2} I_0 + \frac{1}{J^2} M_c. \end{cases} \quad (4)$$

Приведем систему дифференциальных уравнений чувствительности (4) к форме (3):

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \\ \dot{x}_5 \\ \dot{x}_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_a}{L_a} & 0 & 0 & -\frac{c}{L_a} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{R_a}{L_a} & 0 & 0 & -\frac{c}{L_a} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{R_a}{L_a} & 0 & 0 & -\frac{c}{L_a} \\ \frac{c}{J} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{c}{J} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{c}{J} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{1}{L_a} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{R_a}{L_a^2} & \frac{c}{L_a^2} & -\frac{1}{L_a^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{c}{J^2} & 0 & 0 & \frac{1}{J^2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_0 \\ \omega_0 \\ u \\ M_c \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Полученным соотношениям соответствует структурная схема для исследования влияния вариаций параметров R_a, L_a и J на динамические свойства ЭМП постоянного тока, представленная на рис. 1.

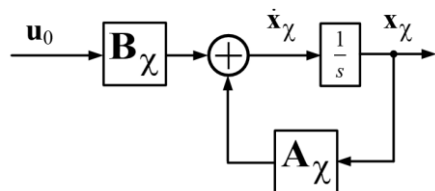


Рис. 1. Структурная схема вычисления вектора чувствительности

Результаты и обсуждение

В качестве объекта исследования рассмотрим двигатель постоянного тока типа 4ПБ112М2Г [8]. Соответствующая Simulink – модель представлена на рис. 2.

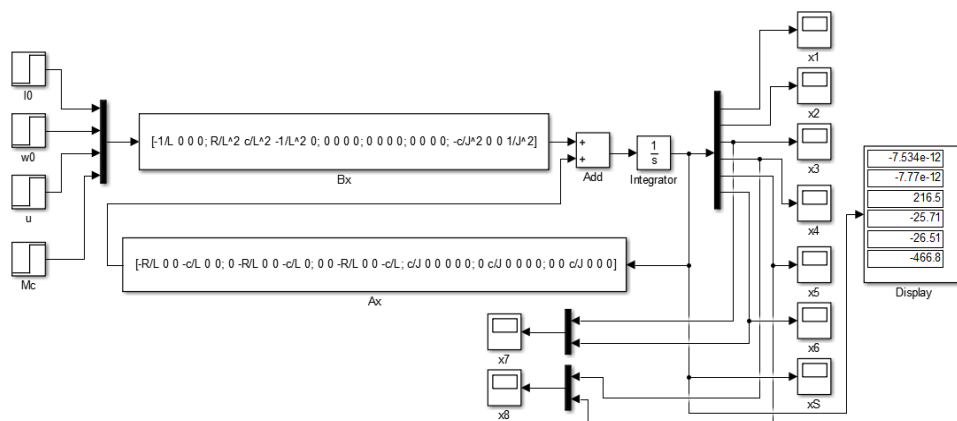


Рис. 2. Simulink – модель вычисления вектора чувствительности

Компоненты вектора входных координат $[I_0 \ \omega_0 \ u \ M_c]^T$ формируются на входе мультиплексора Mux в виде сигналов задания с блоков I0, w0, u, Mc. Блоки Bx и Ax служат для реализации матрицы входа B_χ и основной матрицы системы A_χ . В блоке Display отображаются числовые значения функций чувствительности по окончании переходного процесса. Как следует из рис. 2, координаты $x_1 = I_{Ra}$ и $x_2 = I_{La}$ с течением времени устанавливаются около нуля. Графики функций чувствительности $x_3 = I_J$ и $x_6 = \omega_J$, а также $x_4 = \omega_{Ra}$ и $x_5 = \omega_{La}$ отображаются в регистрирующих блоках x7 и x8 и представлены на рис. 3 и рис. 4 соответственно.

$$x_3(t), x_4(t)$$

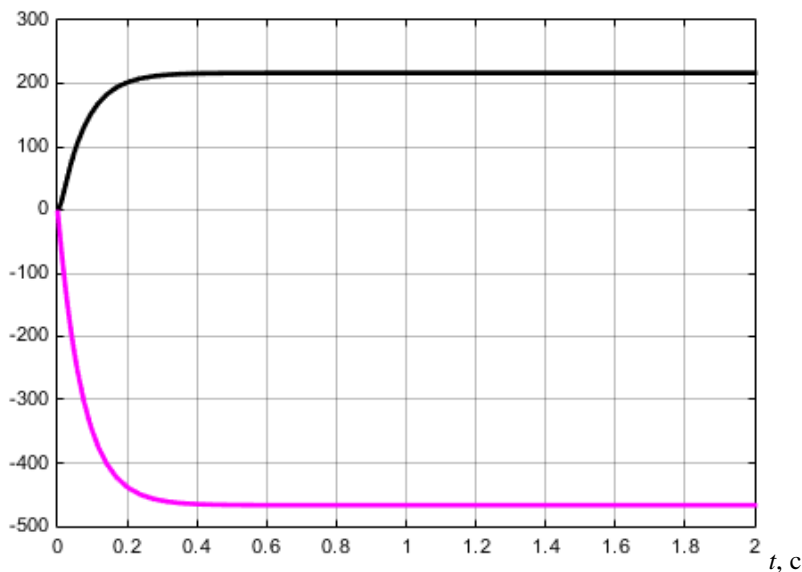


Рис. 3. Графики функций чувствительности $x_3(t)$ и $x_4(t)$

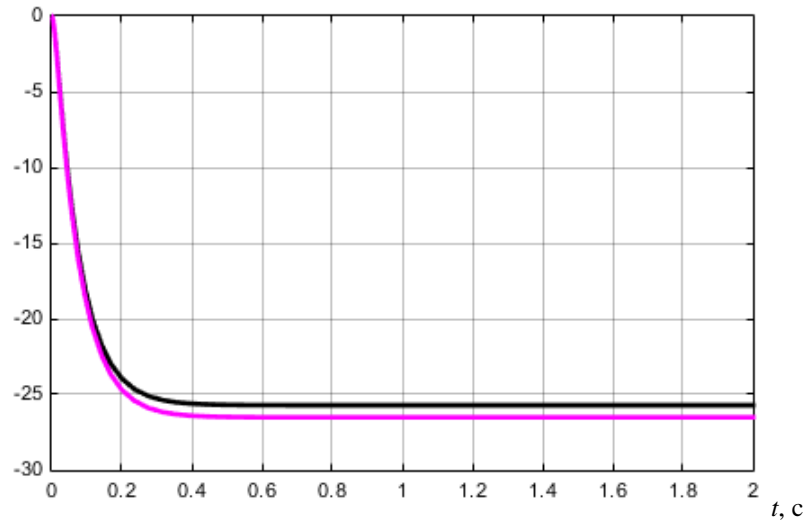


Рис. 4. Графики функций чувствительности $x_5(t)$ и $x_6(t)$

Из анализа полученных зависимостей следует, что переходные процессы завершаются примерно к 0,3 с. Максимальные установившиеся значения функций чувствительности соответствуют изменениям момента инерции (см. рис. 3). Как видно из рис. 2 и 3, влияние момента инерции на координаты ЭМП является наиболее значительным [9]. Так, скорость вращения ω более, чем в 18 раз чувствительнее к вариациям момента инерции, чем к изменениям сопротивления и индуктивности, а ток якоря – более, чем в 8 раз.

Вариации сопротивления и индуктивности якоря практически не оказывают влияния на ток, как было показано выше, однако вызывают дополнительное движение относительно скорости вращения ω . Соответствующие графики для тока якоря и скорости вращения показаны на рис. 5.

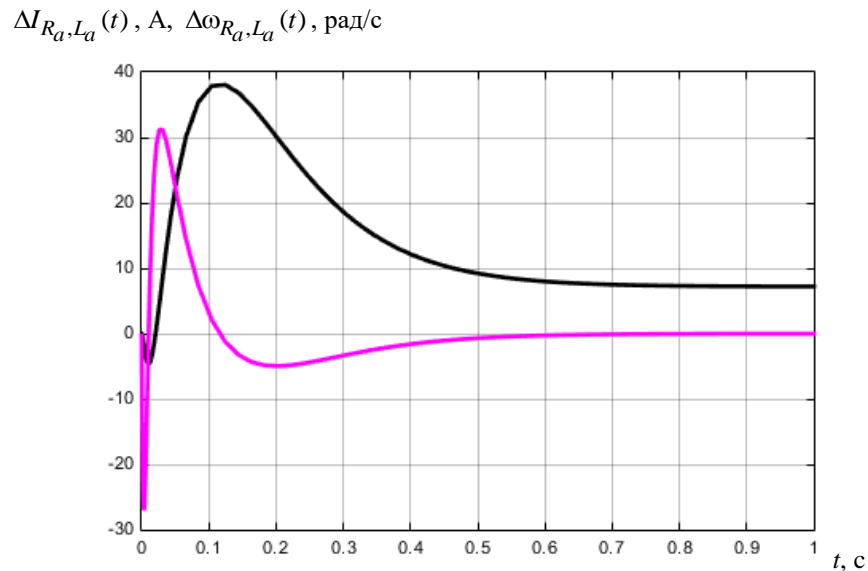


Рис. 5. Графики дополнительного движения $\Delta I_{R_a, L_a}(t)$ и $\Delta \omega_{R_a, L_a}(t)$

Моделирование проводилось при увеличении сопротивления и индуктивности якоря на 20%. Из рис. 5 видно, что дополнительное движение $\Delta I_{R_a, L_a}(t)$ устанавливается около нуля, т.е. вариации R_a и L_a не вносят погрешности в установившееся значение $I(t)$. Величина $\Delta \omega_{R_a, L_a}(t) = 7,2$ рад/с, что говорит о наличии погрешности по скорости вращения при изменении указанных параметров [10].

Следует отметить, что изменения параметров ЭМП являются недетерминированными [11, 12, 13, 14] и аппарат теории чувствительности для анализа динамических свойств ЭМП при случайных параметрических возмущениях является предпочтительным [15].

В инженерной практике для анализа статистических характеристик особое значение имеет гипотеза о нормальном (гауссовском) распределении отклонений параметров [16].

Нормальное распределение предполагает применение правила 3σ, когда среднеквадратическое отклонение σ *i*-го параметра определяется по формуле

$$\sigma_i = \frac{\Delta\chi_i}{3}. \tag{6}$$

Соответственно, дисперсия отклонения параметра Δχ_{*i*} определяется выражением

$$D_{\chi_i} = \sigma_i^2 = \frac{\Delta\chi_i^2}{9}. \tag{7}$$

Суммарная дисперсия выходной координаты для нормального распределения параметров

$$D_{x_i} = \frac{1}{9} \sum_{i=1}^n (x_{\chi_i} \Delta\chi_i)^2. \tag{8}$$

Решение задачи оценки влияния каждого из *n* параметров на дополнительное движение может быть сведена к вычислению относительной оценки [17]

$$S_i = \frac{x_{\chi_i}^2 D_{x_i}}{\sum_{i=1}^n x_{\chi_i} D_{x_i}}. \tag{9}$$

Определим графики суммарной дисперсии и относительных оценок, полагая, что отклонения Δ*R_a*, Δ*L_a* и Δ*J* являются случайными и подчиняются нормальному закону распределения, а регистрируемой выходной координатой является скорость вращения ω [18].

Расчет суммарной дисперсии проведем в относительных единицах в форме

$$\Delta\chi_i = \frac{\partial x_i}{\partial \chi_i} \frac{\chi_0}{x_0} \frac{\Delta\chi}{\chi_0} = \frac{\partial x_i}{\partial \chi_i} \frac{\Delta\chi}{x_0}.$$

Схема вычисления относительных дисперсий и относительных оценок в соответствии с выражениями (7), (8), (9) показана на рис. 6.

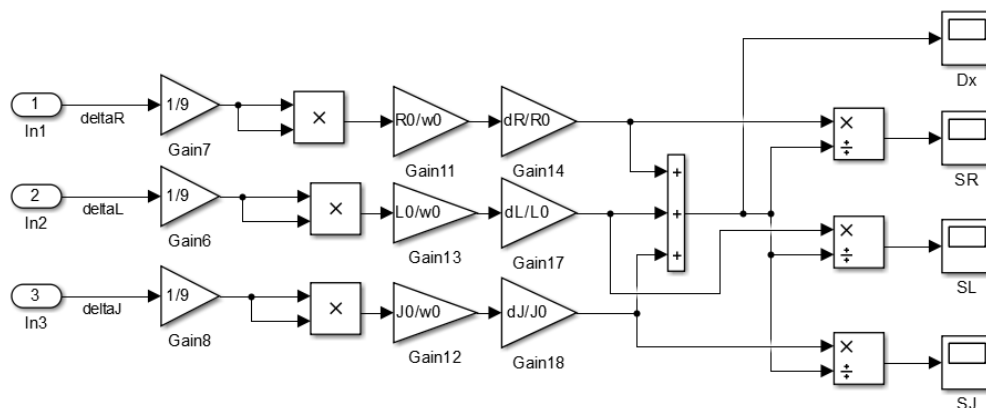


Рис. 6. Simulink – модель вычисления суммарной дисперсии и относительных оценок

Результаты моделирования представлены на рис. 7, 8. Суммарная относительная дисперсия D_x^* определяется переменными состояния $x_4 = \omega_{R_a}$, $x_5 = \omega_{L_a}$, $x_6 = \omega_J$, формируется на выходе сумматора схемы на рис. 6 и регистрируется в блоке *Dx*. В регистрирующих приборах *SR*, *SL*, *SJ* отображаются графики относительных оценок по параметрам *R_a*, *L_a* и *J* соответственно.

$D_x^*, D_{R_a}^*, D_{L_a}^*, D_J^*, \text{о.е.}$

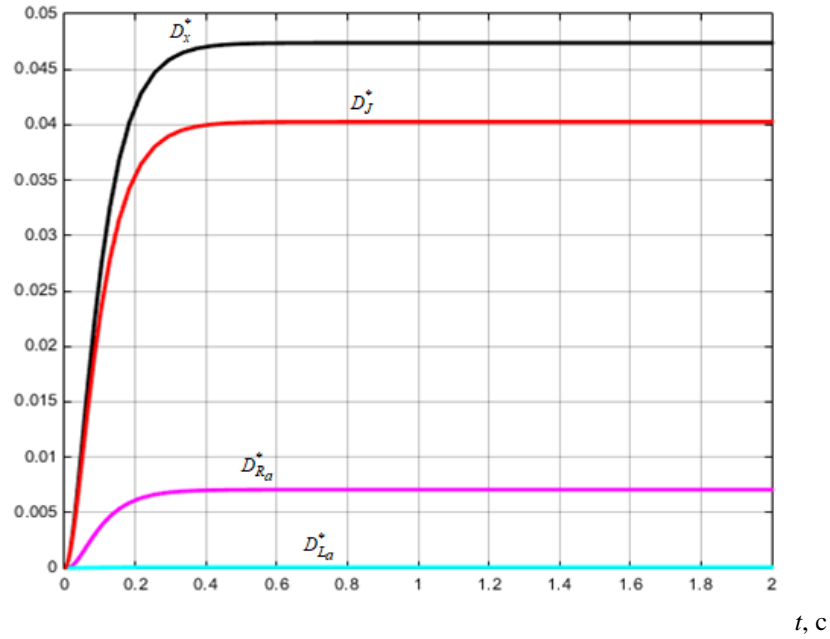


Рис. 7. Графики относительных дисперсий выходной координаты ω

Из анализа рис. 7 следует, что определяющий вклад в график суммарной относительной дисперсии $D_x^* = 0,0474$ о.е. вносит дисперсия при изменении момента инерции D_J^* , установившееся значение которой составляет 0,04 о.е.

$S_{R_a}, S_{L_a}, S_J, \text{о.е.}$

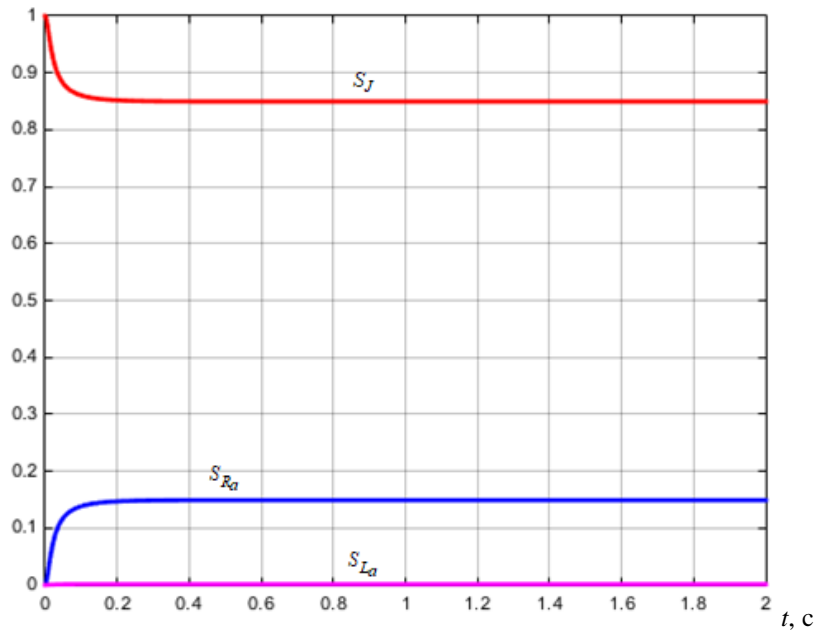


Рис. 8. Графики относительных оценок S_{R_a}, S_{L_a}, S_J

Графики относительных оценок, показанные на рис. 8, характеризуют погрешность, вносимую изменением параметра в отклонение выходной координаты. В установившемся режиме максимальную погрешность, равную 0,85 о.е. вносит изменение момента инерции. Относительная оценка $S_{R_a} = 0,15$ о.е., а $S_{L_a} = 0,0012$ о.е., то есть величина последней пренебрежимо мала.

Выводы

В работе рассмотрены особенности применения теории чувствительности для анализа динамических свойств электромеханических преобразователей при

параметрических возмущениях на примере машины постоянного тока. Сформирована структурная схема вычисления вектора чувствительности и проведено моделирование многомерной системы с вычислением функций чувствительности по току якоря и скорости вращения при изменении активного сопротивления, индуктивности якорной цепи и момента инерции. Моделирование проводилось как при детерминированном характере изменения параметров, так и при случайных изменениях в соответствии с нормальным законом распределения отклонений.

Показано, что наиболее чувствительной к вариациям параметров координатой является скорость вращения, а максимальную погрешность в её отклонение вносит момент инерции. Результаты проведенного исследования могут быть использованы при решении задач анализа электромеханических преобразователей на этапах проектирования, испытаний опытных образцов, а также эксплуатации в процессе функционирования в составе рабочих комплексов.

Литература

1. Кислицын А.Л. Вопросы теории и проектирования электрических машин. Параметры и характеристики электрических машин в статических и динамических режимах. Сборник научных трудов. Ульяновский государственный технический университет, Ульяновск: УлГТУ, 2017. 304 с.
2. Юсупов Р.М., Костельцев В.И. Возмущения структуры и функции чувствительности математических моделей при их алгоритмизации. Тезисы докладов. Т. 1 (5 СПб конференция «Региональная информатика – 96»). Санкт-Петербург. 1996.
3. Юсупов Р.М., Громько П.С., Панченко А.Е. Исследование эффективности сложных систем методами теории чувствительности и корреляционного анализа. Вопросы кибернетики. Теория чувствительности и ее применение: Сборник научных трудов, АН СССР, М., 1981.
4. Zorzi M. Multivariate Spectral Estimation based on the concept of Optimal Prediction, IEEE Trans. Automat. Control. 2015. №60. pp. 1647-1652.
5. Levy B.C. and Nikoukhah R. Robust state-space filtering under incremental model perturbations subject to a relative entropy tolerance, IEEE Trans. Automat. Control. 2013. №58. pp. 682-695.
6. Иванов А.Н., Кузнецов П.М. Идентификация динамических систем на основе нелинейного матричного преобразования Ли // Вестник Уфимского гос. авиационного технического университета. 2014. Т. 18. № 2 (63). С. 237-242.
7. Гарькина И.А., Данилов А.М., Тюкалов Д.Е. Сложные системы: идентификация динамических характеристик, возмущений и помех // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 1. Ч. 1. С. 88.
8. Малёв Н.А., Мухаметшин А.И., Погодицкий О.В., и др. Экспериментально-аналитическая идентификация математической модели электромеханического преобразователя постоянного тока с применением метода наименьших квадратов. Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2019. Т.21. №4. С.113-122.
9. Малёв Н.А., Погодицкий О.В. Статистический анализ динамических характеристик асинхронного электромеханического преобразователя с изменяющимися параметрами. Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2019. Т.21. №1-2. С.120-130.
10. Малёв Н.А., Погодицкий О.В., Любарчук Ф.Н. Анализ вариаций параметров асинхронного электромеханического преобразователя по линейному интегральному критерию с применением эталонной модели // Вестник КГЭУ. 2019. №1. С. 60-67.
11. Фуртат И.Б. Динамическая компенсация возмущений в условии насыщения сигнала управления // Управление большими системами. 2017. № 65. С. 24-40.
12. Furtat I., Fradkov A., Tsykunov A. Robust synchronization of linear dynamical systems with compensation of disturbances // Int. J. Robust and Nonlinear Control. 2014. V.24, N. 17. pp. 2774-2784.
13. Поляк Б.Т., Тремба А.А., Хлебников М.В., и др. Большие отклонения в линейных системах при ненулевых начальных условиях // Автоматика и телемеханика. 2015. № 6. С. 18-41.
14. Кузнецов Б.И., Никитина Т.Б., Коломиец В.В., и др. Исследование влияния нелинейностей и вариации параметров объекта управления на динамические характеристики электромеханических следящих систем // Вісник НТУ «ХП». 2015. №12(1121). С. 68-71.
15. Ивашин В.В., Пенчев В.П. Особенности динамики работы и энергетических диаграмм импульсного электромагнитного привода при параллельном и последовательном соединении обмоток возбуждения // Электротехника. 2013. №6. С. 42-46.
16. Pabitra Kumar Behera., Manoj Kumar Behera., Amit Kumar Sahoo. Speed Control of Induction Motor using Scalar Control Technique // International Journal of Computer Applications. Proceedings on International Conference on Emergent Trends in Computing and Communication ETCC. 2014. №1. pp. 37-39.
17. Rojas-Moreno A. Parameter extraction of an induction motor with gearbox for dynamic simulation // 2016 IEEE ANDESCON. 2016. pp. 1-4.

18. Pradeep Kumar, Mandeep Kumar, Surender Dahiya. Sensor Less Speed Control of PMSM using SVPWM Technique Based on MRAS Method for Various Speed and Load Variations // Proceedings of the World Congress on Engineering. 2015 pp. 198-204.

Авторы публикации

Малёв Николай Анатольевич – доцент кафедры Приборостроение и мехатроника, Казанский государственный энергетический университет, Россия. Email: maleev@mail.ru.

Погодицкий Олег Владиславович – канд. техн. наук, доцент кафедры Приборостроение и мехатроника, Казанский государственного энергетического университета, Россия.

Цветкович Александр Михайлович – специалист первой категории Управления технического надзора Отдела надежности, охраны труда и пожарной безопасности АО «Татэнерго», г. Казань, Россия.

References

1. Kisilitsyn AL. Questions of the theory and design of electrical machines. Parameters and characteristics of electric cars in static and dynamic modes. *Collection of scientific papers*. Ulyanovsk State Technical University. Ulyanovsk: UIGTU, 2017. 304 p.
2. Yusupov RM, Kosteltsev VI. *Perturbations of the structure and sensitivity functions of mathematical models with their algorithmization. Theses of reports*. V.1. 5 St. Petersburg Conference “Regional Informatics-96”).1996.
3. Yusupov RM, Gromyko PS, Panchenko AE. Investigation of the effectiveness of complex systems by the methods of sensitivity theory and correlation analysis. Questions of cybernetics. *The theory of sensitivity and its application: Sat. scientific papers*. Academy of Sciences of the USSR. 1981.
4. Zorzi M. *Multivariate Spectral Estimation based on the concept of Optimal Prediction, IEEE Trans. Automat. Control*. 2015;60:1647-1652.
5. Levy BC and Nikoukhah R. Robust state-space filtering under incremental model perturbations subject to a relative entropy tolerance, *IEEE Trans. Automat. Control*. 2013;58:682-695.
6. Ivanov AN, Kuznetsov PM. Identification of dynamic systems based on nonlinear matrix Li transformation. *Bulletin of Ufa State Aviation Technical University*. 2014;18:2 (63):237-242.
7. Garkina IA, Danilov AM, Tyukalov DE. Complex systems: identification of dynamic characteristics, disturbances and interferences. *Modern problems of science and education*. 2015;1(1):88.
8. Malev NA, Mukhametshin AI, Pogoditsky OV, et al. Experimental-analytical identification of a mathematical model of a dc motor using the least squares method. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2019;21(4):113-122.
9. Malev NA, Pogoditsky OV. Statistical analysis of dynamic characteristics asynchronous electric motor with changing load parameters. *Proceedings of the higher educational institutions. Energy sector problems*. 2019;21 (1-2):120-130.
10. Malev NA, Pogoditsky OV. Research and synthesis of the modal regulator of the two-mass electromechanical system of the crane lifting mechanism. *Proceedings of the higher educational institutions. Energy sector problems*. 2018;20(7-8):99-106.
11. Furtat I. Dynamic compensation of disturbances in the condition of control signal saturation. *Control of large systems*. 2017;6:24-40.
12. Furtat I, Fradkov A, Tsykunov A. Robust synchronization of linear dynamical systems with compensation of disturbances. *Int. J. Robust and Nonlinear Control*. 2014;24(17):2774-2784.
13. Polyak BT, Tremba AA, Khlebnikov MV, et al. Large deviations in linear systems with non-zero initial conditions. *Automation and Remote Control*. 2015;6:18-41.
14. Kuznetsov BI, Nikitina TB, Kolomiets VV, et al. Investigation of the influence of nonlinearities and variations in the parameters of the control object on the dynamic characteristics of electromechanical servo systems. *Visnik NTU "KhPI"*. 2015;12(1121):68-71.
15. Ivashin VV, Penchev VP. Features of the dynamics of work and energy diagrams of a pulsed electromagnetic drive with parallel and series connection of the excitation windings. *Electrical Engineering*. 2013;6:42-46.
16. Pabitra Kumar Behera, Manoj Kumar Behera, Amit Kumar Sahoo. Speed Control of Induction Motor using Scalar Control Technique. *International Journal of Computer Applications. Proceedings on International Conference on Emergent Trends in Computing and Communication ETCC*. 2014;1:37-39.
17. Rojas-Moreno A. Parameter extraction of an induction motor with gearbox for dynamic simulation. 2016 *IEEE ANDESCON*. 2016. pp. 1-4.

18. Pradeep Kumar, Mandeep Kumar, Surender Dahiya. Sensor Less Speed Control of PMSM using SVPWM Technique Based on MRAS Method for Various Speed and Load Variations. *Proceedings of the World Congress on Engineering*. 2015. pp. 198-204.

Authors of the publication

Nikolai A. Malev – Kazan State Power Engineering University, Russia. Email:maleev@mail.ru.

Oleg V. Pogoditsky – Kazan State Power Engineering University, Russia.

Alexander M. Cvetkovich – JSC "Tatenergo", Kazan, Russia.

Поступила в редакцию

7 октября 2019 г.