

pp.9–16. **5.** *Chang C., Hu M., Cheng W., Chuang Y.* Rectangling Stereographic Projection for Wide-Angle Image Visualization. / *Chang C., Hu M., Cheng W., Chuang Y.* // In Proceedings of ICCV. – 2013. pp. 2824–2831. **6.** *Brosz J., Carpendale S., Samavati F., Wang H., Dunning A.* Art and Nonlinear Projection. / *Brosz J., Carpendale S., Samavati F., Wang H., Dunning A.* // In *Bridges 2009: Mathematical Connections in Art, Music and Science.* – 2009. **7.** *Carroll R., Agrawala M., Agarwala A.* Optimizing content-preserving projections for wide-angle images. / *Carroll R., Agrawala M., Agarwala A.* // ACM Trans. Graph. 28(3). – 2009. **8.** *Zorin D., Barr A. H.* Correction of geometric perceptual distortions in pictures. / *Zorin D., Barr A. H.* // In SIGGRAPH '95, pp. 257- 264. **9.** *Kubovy M.* The Psychology of Perspective and Renaissance Art. / *Kubovy M.* – Cambridge University Press, 1986. **10.** *Раушенбах Б.В.* Пространственные построения в живописи. Очерк основных методов. Приложения 1-9. / *Раушенбах Б.В.* – М.: Наука, 1980. – 289с. **11.** *Ковалёв А.М.* О системах перспектив для компьютерной графики. / *А.М. Ковалёв, В.Е. Лищенко, М.В. Степанов* // Автометрия. – 2007. – Т.43, № 3. **12.** *Ковалев А.М.* Оценка искажений предметов при отображении перцептивного пространства на картинную плоскость. / *А. М. Ковалев* // Автометрия. – 2004. – Т. 40, № 6.- С.87–100. **13.** *Ковалев А.М.* Об одном способе изображения предметов и группе линейных перспектив. / *А. М. Ковалев* // Автометрия. – 2009. – Т.45, № 2. – С. 36-44.

Bibliography (transliterated): **1.** *Raushenbach B. V.* (1986). The system of perspective in visual arts. General theory of perspective. Science, Moscow. **2.** *Zenkin G. M, Petrov A. P.* (1979). On the mechanisms of visual perception constancy of space. Sensing Systems. Science, Leningrad. **3.** *Kovalev A. M.* (2002). On increase of objects in the perceptual space. Avtometriya, V. 38, №5. **4.** *Sharpless T. K., Postle B., German D. M.* (2010). Pannini: a new projection for rendering wide angle perspective images. In Proceedings of the Sixth international conference on Computational Aesthetics in Graphics, Visualization and Imaging, 9–16. **5.** *Chang C., Hu M., Cheng W., Chuang Y.* (2013). Rectangling Stereographic Projection for Wide-Angle Image Visualization. In Proceedings of ICCV, 2824–2831. **6.** *Brosz J., Carpendale S., Samavati F., Wang H., Dunning A.* 2009. Art and Nonlinear Projection. In *Bridges 2009: Mathematical Connections in Art, Music and Science.* **7.** *Carroll R., Agrawala M., Agarwala A.* (2009). Optimizing content-preserving projections for wide-angle images. ACM Trans. Graph. 28(3). **8.** *Zorin D., Barr A. H.* (1995). Correction of geometric perceptual distortions in pictures. In SIGGRAPH '95, 257- 264. **9.** *Kubovy M.* (1986). The Psychology of Perspective and Renaissance Art. Cambridge University Press. **10.** *Rauschenbach B. V.* (1980). Spatial construction of a painting. Sketch of the basic methods. Annexes 1-9. Science, Moscow. **11.** *Kovalev A. M.* (2007). On systems of perspectives for computer graphics. Avtometriya, vol. 43, № 3. **12.** *Kovalev A. M.* (2004). Evaluation of distortion in displaying objects of perceptual space on the picture plane. Avtometriya, V. 40, № 6, 87-100. **13.** *Kovalev A. M.* (2009). On a method of visualize objects and the group of linear perspective. Avtometriya, V. 45, № 2, 36-44.

Надійшла (received) 07.10.2014

УДК 621.3.078

Н. Я. ОСТРОВЕРХОВ, д-р техн. наук, Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт";

Н. П. БУРИК, аспирант, Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт"

ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКАЯ СИСТЕМА С ВЕКТОРНО-УПРАВЛЯЕМЫМ АСИНХРОННЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Представлена электромеханическая система, которая обеспечивает слабую чувствительность к изменению параметров векторно-управляемого асинхронного электропривода, а также

© Н. Я. ОСТРОВЕРХОВ, Н. П. БУРИК 2014

осуществляет его динамическую декомпозицию. Алгоритмы управления получены при минимизации локальных функционалов мгновенных значений энергий в соединении с концепцией обратных задач динамики в условиях неопределенности математической модели объекта. Регуляторы системы имеют нетиповую структуру и не содержат параметров объекта управления, что характерно для классических регуляторов. Из.: 1. Библиограф.: 10 назв.

Ключевые слова: электромеханика, электропривод, система, регулирование, параметры, вариация, функционал, качество.

Введение. Одной из проблем практического применения законов управления координатами электромеханических систем, полученных на основании методов классической теории автоматического управления, является необходимость наличия полной информации о структуре и параметрах математической модели объекта управления. Это обусловлено тем, что эти законы по своей природе являются законами компенсационного типа. Изменение параметров объекта или погрешность их определения обуславливают неопределенность его математической модели и приводят к ухудшению заданного качества управления, требуя дополнительных алгоритмов адаптации, что повышает сложность систем [1, 2].

Вторая проблема возникает при управлении взаимосвязанными и нелинейными объектами, например, при управлении двигателями переменного тока и механизмами со сложной кинематикой [3, 4]. В этом случае традиционные законы управления получаются в результате статической декомпозиции на относительно независимые подсистемы, введения дополнительных компенсирующих связей, эффективность которых снова зависит от точных значений параметров.

Целью работы является повышение качества управления координатами электромеханических систем в условиях неопределенности математической модели объекта путем разработки законов управления при минимизации локальных функционалов мгновенных значений энергий в соединении с концепцией обратных задач динамики. Полученные законы управления обеспечивают слабую чувствительность к параметрическим возмущениям объекта и динамическую декомпозицию взаимосвязанной нелинейной системы.

Результаты исследований метода управления. В основу исследований положена идея обратимости прямого метода Ляпунова по исследованию устойчивости, что позволяет найти закон управления, при котором замкнутая система имеет наперед заданную функцию Ляпунова. Концепция обратных задач динамики позволяет решить современную проблему управления сложными объектами путем поиска управляющего воздействия по математической модели объекта, его первоначальному состоянию и заданной траектории движения. Поиск управляющих воздействий осуществляется при минимизации локальных функционалов, являющимися функциями Ляпунова, в качестве которых выступают мгновенные значения энергий [5, 6]. Характерной особенностью оптимизации является достижения не абсолютного минимума функционала качества, как в традиционных системах, а некоторого минимального значения, обеспечивающего допустимую по техническим условиям динамическую ошибку системы.

Метод управления координатами электромеханической системы излагается на типичном примере нелинейного и взаимосвязанного объекта – асинхронного двигателя с системой прямого векторного управления скоростью [7, 8]. Объект подвержен воздействию координатных и параметрических возмущений,

обусловленных перекрестными связями и изменением электрических сопротивлений обмоток в результате нагрева. Математическая модель асинхронного двигателя в синхронной системе координат, ориентированной по вектору потокосцепления ротора, представляется известной системой дифференциальных уравнений (1).

$$\begin{cases} \frac{di_{1d}}{dt} + \left(\frac{R_1}{\sigma} + \alpha\beta L_m\right)i_{1d} = \frac{u_{1d}}{\sigma} + V_{1d}; \\ \frac{di_{1q}}{dt} + \left(\frac{R_1}{\sigma} + \alpha\beta L_m\right)i_{1q} = \frac{u_{1q}}{\sigma} + V_{1q}; \\ \frac{d|\psi_2|}{dt} + \alpha|\psi_2| = \alpha L_m i_{1d}; \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{M}{J} - \frac{M_c}{J}; \end{cases} \quad (1)$$

где $\alpha = R_2 / L_2$, $\sigma = L_1 - L_m^2 / L_2$, $\beta = L_m / \sigma L_2$ – параметры модели; R_1, R_2 – активное электрическое сопротивление обмотки статора и ротора; L_1, L_2, L_m – индуктивность обмотки статора, ротора и контура намагничивания; ω, ω_0 – угловая скорость ротора и магнитного поля; J – момент инерции двигателя; M_c – момент сопротивления; u_{1d}, u_{1q} – компоненты вектора напряжения статора; i_{1d}, i_{1q} – компоненты вектора тока статора; $|\psi_2|$ – модуль вектора потокосцепления

ротора; $M = \frac{3}{2} p_n \frac{L_m}{L_2} |\psi_2| i_{1q}$ – момент двигателя; p_n – число пар полюсов; $V_{1d} = \omega_0 i_{1q} + \alpha\beta |\psi_2|$, $V_{1q} = -\omega_0 i_{1d} - \beta\omega p_n |\psi_2|$ – возмущения, описывающие взаимное влияние координат. Эти возмущения трактуются как неопределенные, но ограниченные по величине $V_{1d} \leq V_{1d}^0$, $V_{1q} \leq V_{1q}^0$ [9]. Уровни управляющих воздействий являются достаточными для их компенсации $u_{1d} / \sigma > V_{1d}^0$, $u_{1q} / \sigma > V_{1q}^0$.

Задача управления объектом (1) сводится к решению четырех локальных задач управления: полевой и моментной составляющей тока статора i_{1d} и i_{1q} , модулем вектора потокосцепления ротора $|\psi_2|$, скоростью двигателя ω .

Закон управления полевой составляющей тока i_{1d} по каналу потокосцепления ротора определяется на основании первого уравнения системы (1). Как видно, локальный объект управления описывается уравнением первого порядка. Порядок желаемого уравнения замкнутого контура тока также принимается равным единице

$$\dot{z} + \gamma_{0d} z = \gamma_{0d} i_{1d}^* \quad (2)$$

с обеспечением астатизма первого порядка и заданной добротностью по скорости $D_{\omega}^z = \gamma_{0d}$. Длительность монотонного переходного процесса тока $t_{ii} \approx 3 / \gamma_{0d}$ задается с помощью коэффициента γ_{0d} .

Требуется найти такую управляющую функцию регулятора тока u_{1d} , чтобы качество управления током приближалось к желаемому, заданному уравнением (2). Степень приближения реального процесса управления током к желаемому оценивается функционалом, который характеризует нормированную

по индуктивности энергию первой производной магнитного поля вида $\dot{W}_m = L \frac{i^2}{2}$

$$G(u_{1d}) = \frac{1}{2} [\dot{z}(t) - \dot{i}_{1d}(t, u_{1d})]^2. \quad (3)$$

Нахождение управляющей функции $u_{1d} = u_{1d}(i_{1d})$ классическими методами по условию достижения абсолютного минимума функционала $\min_u G(u_{1d}) = 0$ приводит к традиционному закону управления компенсационного типа, для реализации которого требуется точная информация о структуре и параметрах объекта. Отклонение параметров от расчетных значений приводит к ухудшению качества управления. Этот недостаток устраняется, если отказаться от точного выполнения условия, а лишь ограничиться требованием, чтобы значение функционала (3) принадлежало некоторой окрестности экстремального минимума, обеспечивающей допустимую по техническим условиям динамическую ошибку $|z(t) - i_{1d}(t)| \leq \varepsilon$. Для этого минимизация функционала осуществляется по градиентному закону первого порядка

$$\frac{du_{1d}(t)}{dt} = -\lambda_d \frac{dG(u_{1d})}{du_{1d}}, \quad (4)$$

где $\lambda_d > 0$ – константа.

С учетом (1) и (3) производная функционала равна

$$\frac{dG(u_{1d})}{du_{1d}} = -\frac{1}{\sigma} (\dot{z} - \dot{i}_{1d}). \quad (5)$$

После подстановки (5) в (4) находится закон управления током

$$\dot{i}_{1d}(t) = k_d (\dot{z} - \dot{I}), \quad (6)$$

где $k_d = \lambda_d / \sigma = const$ – коэффициент усиления регулятора тока.

Переменная \dot{z} в законе управления (6) исполняет роль требуемой производной тока, которая определяется в реальном времени из уравнения желаемого качества (2) путем замыкания системы обратной связью по току $z = i_{1d}$. Окончательно закон управления током принимает вид после интегрирования обеих частей уравнения (6)

$$u_{1d}(t) = k_d(z - i_{1d})$$

$$z = \gamma_{0d} \int (i_{1d}^* - i_{1d}) dt \quad (7)$$

На основании (7) построена структурная схема регулятора тока первого порядка, показанная на рис. 1.

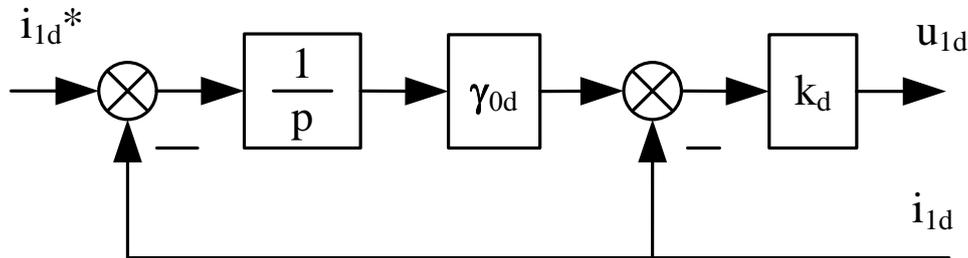


Рис. 1 – Структура регулятора тока первого порядка

Как видно из рис. 1, регулятор имеет нетиповую структуру, содержит только параметр γ_{0d} желаемого закона управления согласно (2) и не содержит параметров объекта управления (1), характерного для традиционных регуляторов.

Важной задачей синтеза является исследование устойчивости полученной системы управления. Уравнение замкнутого контура тока

$$\ddot{i}_{1d} + (R_1 / \sigma + \alpha\beta L_m + k_d / \sigma) \dot{i}_{1d} + (k_d \gamma_{0d} / \sigma) i_{1d} = (k_d \gamma_{0d} / \sigma) i_{1d}^* \quad (8)$$

полученное после подстановки в первое уравнение объекта (1) закона управления (7), показывает, что замкнутая система (8) является устойчивой даже при неограниченном увеличении коэффициента усиления регулятора тока $k_d \rightarrow \infty$, так как согласно критерию Гурвица коэффициенты уравнения являются положительными

$$(R_1 / \sigma + \alpha\beta L_m + k_d / \sigma) > 0; \quad k_d \gamma_{0d} / \sigma > 0 \quad (9)$$

С увеличением коэффициента усиления регулятора динамические процессы в контуре тока приближаются к желаемым, заданным уравнением (2), что очевидно при $k_d \rightarrow \infty$ после деления всех членов уравнения (8) на составляющую k_d / σ .

Важным вопросом является также определение свойств контура тока при конечных значениях коэффициента усиления регулятора. Согласно передаточной функции разомкнутого контура тока, полученной на основании (8)

$$W_r(p) = \frac{k_d \gamma_{0d} / \sigma}{p[p + (R_1 / \sigma + \alpha\beta L_m + k_d / \sigma)]} \quad (10)$$

токовый контур обладает заданным астатизмом первого порядка и добротностью по скорости равной

$$D_\omega = \frac{k \gamma_{0d} / \sigma}{R_1 / \sigma + \alpha\beta L_m + k_d / \sigma} = \frac{\gamma_{0d}}{R_1 / k_d + \alpha\beta L_m \sigma / k_d + 1} \quad (11)$$

Условием обеспечения допустимой динамической ошибки тока является соизмеримая заданная и реальная добротность $D_\omega^z = D_\omega$, что выполняется при

увеличении коэффициента усиления регулятора k_d .

На основании второго, третьего и четвертого уравнения системы (1) по вышеизложенной методике определяется закон управления моментной составляющей тока статора i_{1q} , модулем вектора потокосцепления ротора $|\psi_2|$ и угловой скоростью электропривода. Контур потокосцепления ротора и контур скорости являются внешними относительно контуров тока. Для уменьшения влияния на их работу динамики внутренних контуров тока значение параметра уравнения вида (2) выбирается из условия $\gamma_{od} > (3..5)\gamma_{ov}$. Полученные законы управления аналогичны закону (7). Структурные схемы регуляторов имеют вид, показанный на рис. 1.

Выводы. Метод разработки законов управления на основе минимизации локальных функционалов мгновенных значений энергий и концепции обратных задач динамики обеспечивает высокое качество управления в статическом режиме и во время переходных процессов в условиях действия параметрических и координатных возмущений. Закон управления записывается по уравнению объекта и по дифференциальному уравнению, с помощью которого задается желаемое качество управления координатой. На примере известной системы векторного управления скоростью асинхронного двигателя изложена методика получения законов управления.

Список литературы: 1. Akpolat, H. A Practical Approach to the Design of Robust Speed Controllers for Machine Drives [Text] / H. Akpolat, G. Asher // In IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2000. – Vol. 47. – № 2. – P. 315-324. 2. Apkarian, P. Robust modal controllers. New H_∞/μ synthesis structures [Text] / P. Apkarian, J. Morris // In Proceedings of the European Control Conference ECC'93, March 1-4, Netherlands. – 1993. – P. 1819-1825. 3. Birou, I. Sensorless AC Driving Systems Based on Adaptive Identification Algorithms and Robust Control Strategies [Text] / I. Birou, S. Pavel // In Proceedings of the 9th International Conference DAS'2008, May 22-24, Romania. – 2008. – P. 93-96. 4. Holtz, J. Sensorless Vector Control of Induction Motors at Very Low Speed Using a Nonlinear Inverter Model and Parameter Identification [Text] / J. Holtz, J. Quan // In IEEE Transaction on Industry Applications. – 2002. – Vol. 38. – № 4. – P. 1087-1095. 5. Крутько, П. Д. Робастно устойчивые структуры управляемых систем высокой динамической точности. Алгоритмы и динамика управления движением модельных объектов [Текст] / П. Д. Крутько // Изв. РАН. ТиСУ. – 2005. – № 2. – С. 120–140. 6. Островерхов, Н. Я. Управление координатами электроприводов на основании концепции обратных задач динамики при минимизации локальных функционалов мгновенных значений энергий [Текст] / Н. Я. Островерхов, Н. П. Бурик // Электротехника и электроэнергетика. – Запорожье: ЗНТУ, 2011. – № 1. – С. 41-49. 7. Jezernik, K. Robust direct torque and flux vector control of induction motor [Text] / K. Jezernik // Proc. IECON'98. – 1998. – Vol. 2. – P. 667-672. 8. Nakano, H. Sensorless field oriented control of an induction motor using an instantaneous slip frequency estimation method [Text] / H. Nakano, I. Takahashi // PESC. – 1998. – P. 847-854. 9. Черноусько, Ф. Л. Методы управления нелинейными механическими системами [Текст] / Ф. Л. Черноусько, И. М. Ананьевский, С. А. Решмин – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 328 с. 10. Островерхов, Н. Я. Метод синтеза регуляторов электромеханических систем на основании концепции обратных задач динамики в соединении с минимизацией локальных функционалов мгновенных значений энергий движения [Текст] / Н. Я. Островерхов // Вестник НТУ „ХПИ”. – Харьков: НТУ “ХПИ”, 2008. – № 30. – С. 105-110.

Bibliography (transliterated): 1. Akpolat, H., Asher, G. (2000). A Practical Approach to the Design of Robust Speed Controllers for Machine Drives. In IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol.47, No.2, pp. 315–324. 2. Apkarian, P., Morris, J. (1993). Robust modal controllers. New

H_{∞}/μ synthesis structures. In Proceedings of the European Control Conference ECC'93, March 1-4, Netherlands, 1819–1825. **3.** Birou, I., Pavel, S. (2008). Sensorless AC Driving Systems Based on Adaptive Identification Algorithms and Robust Control Strategies. In Proceedings of the 9th International Conference DAS'2008, May 22-24, Romania, 93–96. **4.** Holtz, J., Quan, J. (2002). Sensorless Vector Control of Induction Motors at Very Low Speed Using a Nonlinear Inverter Model and Parameter Identification. In IEEE Transaction on Industry Applications, 38, 1087–1095. **5.** Krut'ko, P. D. (2005). Robustly stable structures of control systems of high dynamic precision. Algorithms and dynamics of control of model objects, Izvestija RAN. TiSU, 2, 120–140. **6.** Ostroverkhov, N. J. and Buryk, N. P. (2011). Control of coordinates electric drives based on the concept of inverse dynamics problems for minimization local functionals momentary values of energy. Electrotechnics and electroenergetics ZNTU, 1, 41–49. **7.** Jezernik, K. (1998). Robust direct torque and flux vector control of induction motor. Proc. IECON'98, 2, 667-672. **8.** Nakano, H. (1998). Sensorless field oriented control of an induction motor using an instantaneous slip frequency estimation method. PESC, 847-854. **9.** Chernous'ko, F. L., Anan'evskij I. M., Reshmin S. A. (2006). Methods of control nonlinear mechanical systems, Fizmatlit, Moscow. **10.** Ostroverkhov, N. J. (2008). Method for the synthesis of regulators of electromechanical systems based on of the concept of inverse problems of dynamics in combination with the minimization of local functionals of the instantaneous motion energy values. Vestnik NTU "KPI", 30, 105–100.

Надійшла (received) 09.10.2014

УДК 656.96:330.123.6

В. В. ОЧЕРЕТНА, аспірант, асистент, Одеський національний морський університет

ОБГРУНТУВАННЯ РИНКОВОЇ СТРАТЕГІЇ В РОБОТІ ТРАНСПОРТНО-ЕКСПЕДИТОРСЬКОЇ КОМПАНІЇ

У статті розглянута ринкова стратегія транспортно-експедиторської компанії як об'єкту управління, розуміння її внутрішніх взаємозв'язків і механізмів функціонування. Обґрунтовується цілісна відкрита система компанії з певною внутрішньою організацією. А також розглядається рівень організації процесів, якість їх виконання, що впливають на кінцеві споживчі властивості транспортно-експедиторської послуги, які у свою чергу безпосередньо пов'язані з конкурентоспроможністю послуги.

Ключові слова: транспортно-експедиторська компанія, ринкова стратегія, конкурентоспроможність, ресурси, транспортування, послуга, консолідація.

Вступ. На ранньому етапі розвитку ринку послуг з доставки вантажів клієнт, вибираючи компанію, якій доручить доставку вантажу, найчастіше сам приймав рішення про те, яким видом транспорту необхідно виконати доставку і потім вибирав експедитора, працюючого з відповідним видом транспорту. Проте зі швидким розвитком і розширенням сфери діяльності експедиторів цей спосіб застарів і втратив актуальність. Клієнт часто залишає свободу вибору виду транспорту експедитору при дотриманні обумовлених якісних параметрів перевезення.

Сьогодні на ринку транспортно-експедиторських послуг дуже складно виявити явних лідерів, межі між лідерами та їх послідовниками дуже розмиті. Сьогоднішні лідери практично не мають переваг, які були б складно копіюваними для конкурентів. Саме тому, ті компанії, які сьогодні зможуть виявити перспективні ринкові ніші і зосередити на них свою діяльність,