

УДК 621.515

Н. Я. Островерхов, д-р техн. наук,
В. М. Пыжов, канд. техн. наук

РОБАСТНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ СИНХРОННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ

Аннотация. Представлены законы управления синхронным двигателем на основе концепции обратной задачи динамики в соединении с минимизацией локальных функционалов мгновенных значений энергий. Это обеспечивает робастность к изменению параметров электродвигателя, динамическую декомпозицию взаимосвязанной системы и простоту реализации законов управления.

Ключевые слова: синхронный двигатель, постоянные магниты, законы управления, минимизация функционалов, робастность, динамическая декомпозиция

N. Ostroverkhov, ScD.,
V. Pyzhov, PhD.

ROBUST SYSTEMS CONTROL A PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR

Abstract. Presents a synchronous motor control laws based on the concept of the inverse problem of dynamics in conjunction with local minimization functional instant energy values. This provides robustness to changes in the parameters of the motor, the dynamic decomposition of the interconnected system, and ease of implementation of control laws.

Keywords: synchronous motor, permanent magnets, control laws, minimization of functional, robustness, dynamic decomposition

М. Я. Островерхов, д-р техн. наук,
В. М. Пижов, канд. техн. наук

РОБАСТНА СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ СИНХРОНИМ ДВИГУНОМ З ПОСТІЙНИМИ МАГНІТАМИ

Анотація. Представлено закони керування синхронним двигуном на основі концепції зворотної задачі динаміки в поєднанні з мінімізацією локальних функціоналів миттєвих значень енергій. Це забезпечує робастність до зміни параметрів електродвигуна, динамічну декомпозицію взаємозв'язаної та простоту реалізації законів керування.

Ключові слова: синхронний двигун, постійні магніти, закони керування, мінімізація функціоналів, робастність, динамічна декомпозиція

Введение. Электромеханические системы с синхронными двигателями с постоянными магнитами (СДПМ) применяются в высокотехнологичных установках, в которых требования к качеству управления являются приоритетными [1 – 5].

При вычислении параметров схемы замещения СДПМ по его паспортным данным возникают погрешности, обусловленные допущениями в методике вычислений и неполной исходной информацией. Кроме того, вследствие нагрева двигателей в процессе работы изменяются электрические сопротивления обмоток. Это приводит к отклонению реальных параметров двигателей от расчетных значений (параметрическим возмущениям), в результате чего ухудшается качество управления координатами автоматизированных электромеханических систем, обусловленное неточной настройкой регуляторов.

По своей природе СДПМ, как и другие двигатели переменного тока, являются взаимосвязанными объектами управления, когда изменение одной координаты влияет на другие. Разработка законов управления электромеханическими системами с СДПМ в таких условиях связано с компенсацией влияния координатных возмущений.

Решение указанных проблем классическими методами теории автоматического управления повышает громоздкость систем управления вследствие использования дополнительных алгоритмов идентификации параметров, адаптации и компенсации.

Анализ современных методов оптимизации законов управления в условиях неопределенности математической модели объекта показывает, что поставленные задачи могут быть решены на основе концепции обратных задач динамики в сочетании с минимизацией локальных функционалов мгновенных значений энергий [6– 7]. Непосредственным содержанием обратной задачи динамики является разработка законов управления, при которых система обладает наперед заданными с помощью желаемого дифференциального уравнения динамическими и статическими свойствами.

В основу метода оптимизации положена идея обратимости прямого метода Ляпунова по исследованию устойчивости. Это позволяет находить закон управления, при котором замкнутый контур регулирования имеет заведомо заданную функцию Ляпунова, в качестве которой выступает мгновенное значение энергии. Полученный закон управления осуществляет динамическую декомпозицию взаимосвязанного объекта и придает замкнутой системе свойство устойчивости в

целом, что позволяет решать задачи управления взаимосвязанными объектами по математическим моделям локальных контуров. Характерной особенностью оптимизации являются достижение не абсолютного минимума функционала качества, как в классических системах, а некоторого минимального значения, обеспечивающего допустимую по техническим требованиям динамическую погрешность системы [7 – 10].

Цель работы состоит в повышении качества управления синхронным двигателем с постоянными магнитами в условиях параметрических и координатных возмущений путем разработки законов управления на основе концепции обратных задач динамики в сочетании с минимизацией локальных функционалов мгновенных значений энергий, что обеспечивает робастность к изменению параметров и динамическую декомпозицию системы.

Материалы исследования. Динамическая модель СДПМ в системе координат (d-q), ориентированной по магнитной оси ротора описывается известной взаимосвязанной системой уравнений (1)

$$\begin{cases} L_d \frac{di_d}{dt} + R_s i_d = U_d + F_1; \\ L_q \frac{di_q}{dt} + R_s i_q = U_q - F_3 - F_5; \\ J \frac{d\omega_r}{dt} = M - M_c - \beta \omega_r; \\ M = \frac{3}{2} Z_p [\psi_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q], \end{cases} \quad (1)$$

где i_d, i_q и U_d, U_q – токи и напряжения статора по осям d и q; $\omega = Z_p \omega_r$; ω_r, ω – угловая и электрическая скорость ротора; M, M_c – электромагнитный момент двигателя и момент нагрузки; ψ_f – потокосцепления, создаваемое постоянными магнитами; J – момент инерции; β – коэффициент вязкого трения; Z_p – число пар полюсов; R_s – активное сопротивление обмотки статора; L_d, L_q – индуктивности обмотки статора по осям d и q.

Координатные возмущения $F_1 = \omega L_q i_q$, $F_2 = \omega L_d i_d$, $F_3 = \omega \psi_f$ обуславливают взаимное влияние координат электродвигателя. В классических системах для компенсации их отрицательного действия в контуры управления вводятся дополнительные компенсирующие связи, точность действия которых зависит от точности параметров двигателя, а разработка законов управления осуществляется после статической декомпозиции объекта (1). В работе эта задача решается путем динамической декомпозиции системы [10]. Координатные возмущения F_1, F_2, F_3 трактуются как неопределенные, но ограниченные по величине $F_1 \leq F_{1max}$, $F_2 \leq F_{2max}$, $F_3 \leq F_{3max}$. Уровня управляющих напряжений U_d, U_q достаточно для их парирования.

Система векторного управления СДПМ состоит из двух контуров регулирования токов статора i_q по оси q, который определяет момент двигателя и i_d по оси d, магнитный поток от которого может как подмагничивать так и размагничивать основной поток от постоянных магнитов. Контур регулирования угловой скорости двигателя ω_r является внешним относительно контура тока i_q .

Объект локального контура управления током i_d , согласно первому уравнению системы (1), описывается дифференциальным уравнением первого порядка, на который действует управляющее напряжение U_d и координатное возмущение F_1 . Желаемое уравнение замкнутого контура тока, с помощью которого устанавливаются заданные показатели качества управления, также задается уравнением первого порядка [8 – 9]

$$\dot{z} + \gamma_{0i_d} z = \gamma_{0i_d} i_d^*, \quad (2)$$

где i_d^* – заданный ток. Уравнение (2) обеспечивает астатизм первого порядка по управляющему воздействию, переходной процесс тока без перерегулирования. Желаемое время регулирования $t_n \approx 3 / \gamma_{0i_d}$ задается коэффициентом γ_{0i_d} .

Степень приближения реального процесса управления током к желаемому оценивается функционалом, характеризующим нормированную по индуктивности мгновенную энергию магнитного поля от первой производной тока

$$G(u) = \frac{1}{2} [\dot{z}(t) - i_d(t)]^2. \quad (3)$$

Минимизация функционала осуществляется по градиентному закону первого порядка

$$\frac{du(t)}{dt} = -\lambda_{i_d} \frac{dG(u)}{du}, \quad (4)$$

где λ_{i_d} – константа.

После подстановки (1) и (3) в (4) и интегрирования обеих частей уравнения находится окончательный закон управления током i_d

$$\begin{aligned} U_d(t) &= k_{i_d} (z - i_d); \\ z &= \gamma_{0i_d} \int_0^t (i_d^* - i_d) dt. \end{aligned} \quad (5)$$

где $k_{i_d} = \lambda_{i_d} / L_d$ – коэффициент усиления регулятора.

Дифференциальное уравнение замкнутого контура управления током i_d с законом управления (5)

$$\ddot{i}_d + (R_s / L_d + k_{i_d} / L_d) \dot{i}_d + (k_{i_d} \gamma_{0i_d} / L_d) i_d = (k_{i_d} \gamma_{0i_d} / L_d) i_d^* \quad (6)$$

показывает, что процесс управления является асимптотически устойчивым. Согласно критерию Гурвица коэффициенты уравнения $(R_s / L_d + k_{i_d} / L_d) > 0$; $(k_{i_d} \gamma_{0i_d} / L_d) > 0$.

Устойчивость контура управления сохраняется при неограниченном повышении коэффициента усиления регулятора $k_{i_d} \rightarrow \infty$ и обеспечивает полное

совпадение реального (6) и желаемого (2) процессов управления, что очевидно при делении всех членов уравнения (6) на коэффициент k_{id}/L_d . Эта характерная особенность обеспечивает динамическую декомпозицию системы и робастность к параметрическим возмущениям. Во время работы взаимосвязанная система распадается на независимые локальные контуры управления, процессы в которых не зависят от действия параметрических и координатных возмущений, а протекают по траекториям, назначенным уравнениями желаемого качества вида (2). Конечно, при допустимом с точки зрения технической реализации коэффициенте усиления регулятора k_{id} существует динамическая погрешность, допустимая величина которой устанавливается техническими требованиями.

На основании второго уравнения системы (1) по этой же методике получается закон управления током статора i_q

$$\begin{aligned} U_q(t) &= k_{iq}(z - i_q); \\ z &= \gamma_{0iq} \int_0^t (i_q^* - i_q) dt. \end{aligned} \quad (7)$$

Закон управления скоростью разрабатывается на основе третьего уравнения системы (1) путем минимизации энергии ускорения массы и имеет вид

$$\begin{aligned} i_q^*(t) &= k_{\omega}(z - \omega_r); \\ z &= \gamma_{0\omega} \int_0^t (\omega_r^* - \omega_r) dt. \end{aligned} \quad (8)$$

Контур регулирования скоростью является внешним относительно контура тока i_q , поэтому коэффициенты регуляторов выбираются из условия $\gamma_{0iq} > (3 \div 5) \gamma_{0\omega}$.

Исследование динамических свойств разработанной системы векторного управления осуществлялось путем моделирования для двигателя с номинальной мощностью 5 кВт, частотой вращения 3000 об/мин, моментом 15,8 Н·м, током 13,8 А.

Параметры регуляторов системы имели следующие значения: регулятор тока по оси d: $\gamma_{0id} = 1000$, $k_{id} = 260$; регулятор тока по оси q: $\gamma_{0iq} = 1000$, $k_{iq} = 260$; регулятор скорости: $\gamma_{0\omega} = 120$, $k_{\omega} = 50$.

Исследования проводились при параметрическом возмущении в виде двукратного уменьшения (0,344 Ом) и трехкратного увеличения (2,064 Ом) электрического сопротивления обмотки статора относительно номинального значения (0,688 Ом). Моделирование осуществлялось в следующей последовательности: в момент времени 0,5 с двигатель без нагрузки разгонялся по S-образной характеристике до номинальной угловой скорости, а в момент времени 1,5 с набрасывался момент сопротивления равный номинальному.

На рис. 1 показан график переходного процесса заданной скорости двигателя.

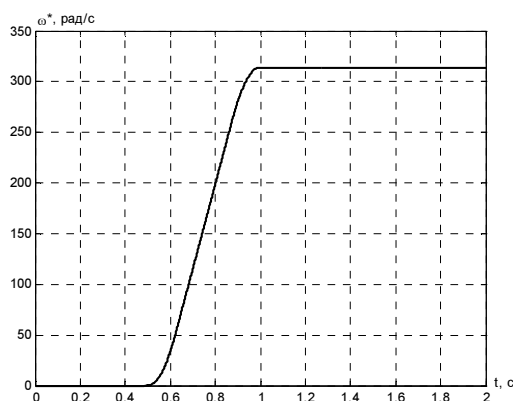


Рис. 1. График заданной скорости

На рис. 2 представлены три графика ошибки скорости для трех разных электрических сопротивлений обмотки статора. Как видно с рисунка, существенное параметрическое возмущение не вызывает такой же деградации качества переходных процессов. Графики практически сливаются между собой. Максимальные динамические ошибки скорости во время разгона не превышают 0,38 рад/с (0,12 %), а при отработке набрасывания нагрузки – 0,1 рад/с (0,032 %).

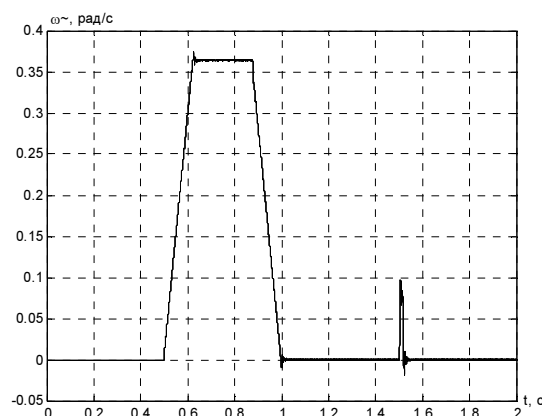


Рис. 2. Графики ошибок скорости

Выводы. Полученные на основе концепции обратной задачи динамики в сочетании с минимизацией локальных функционалов мгновенных значений энергий законы управления СДПМ обеспечивают динамическую декомпозицию взаимосвязанной системы на локальные подсистемы и робастность к изменению параметров электропривода.

Список использованной литературы

1. Uzel D., and Peroutka Z., (2011), Optimal Control and Identification of Model Parameters of Traction Interior Permanent Magnet Synchronous Motor Drive, *In 37th Annual Conference of the IEEE Industrial-Electronics-Society (IECON)*, Melbourne, Australia, pp. 1960 – 1965.
2. Sant A.V., and Rajagopal K.R., (2009), PM Synchronous Motor Speed Control using Hybrid Fuzzy PI with Novel Switching Functions, *IEEE Trans. Mag.*, Vol. 45, No. 10, pp. 4672 – 4675.

3. Tang L., Zhong L., Rahman M.F., and Hu Y., (2003), A Novel Direct Torque Control for Interior Permanent-magnet Synchronous Machine Drive with Low Ripple in Torque and Flux a Speed-sensorless Approach, *IEEE Transaction Industry Application*, (39), pp. 1748 – 1756.

4. Baik I.C., Kim K.H., and Youn M.J., (2000), Robust Nonlinear Speed Control of PM Synchronous Motor using Boundary Layer Integral Sliding Mode Control Technique, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 8(1), pp. 47 – 54.

5. Guchuan Zhu, Louis-A.Dessaint, and Ouassima Akhrif, (2000), Speed Tracking Control of a Permanent-Magnet Synchronous Motor with State and Load Torque Observer, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 47(2), pp. 346 – 355.

6. Потапенко Е. М. Высокоточное управление неопределенными объектами. Сравнение методов управления [Текст] / Е. М. Потапенко, А. Е. Казурова // Сб. научн. трудов Днепродзержинского гос. техн. ун-та. – Днепродзержинск : ДГТУ. – 2007. – С. 353 – 356.

7. 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.

8. 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.

9. 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.

10. Черноусько Ф. Л. Декомпозиция и субоптимальное управления в динамических системах [Текст] / Ф. Л. Черноусько // ПММ. – 1990. – Т. 54. – Вып. 6. – С. 883 – 893.

Получено 30.05.2015

References

1. Uzel D., and Peroutka Z., (2011), Optimal Control and Identification of Model Parameters of Traction Interior Permanent Magnet Synchronous Motor Drive, *In 37th Annual Conference of the IEEE Industrial-Electronics-Society (IECON)*, Melbourne, Australia, pp. 1960 – 1965.

2. Sant A.V., and Rajagopal K.R., (2009), PM Synchronous Motor Speed Control using Hybrid Fuzzy PI with Novel Switching Functions, *IEEE Trans. Mag.*, Vol. 45, No. 10, pp. 4672 – 4675.

3. Tang L., Zhong L., Rahman M.F., and Hu Y., (2003), A Novel Direct Torque Control for Interior Permanent-magnet Synchronous Machine Drive with Low Ripple

in Torque and Flux a Speed-sensorless Approach, *IEEE Transaction Industry Application*, (39), pp. 1748 – 1756.

4. Baik I.C., Kim K.H., and Youn M.J., (2000), Robust Nonlinear Speed Control of PM Synchronous Motor using Boundary Layer Integral Sliding Mode Control Technique, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 8(1), pp. 47 – 54.

5. Guchuan Zhu, Louis-A.Dessaint, and Ouassima Akhrif, (2000), Speed Tracking Control of a Permanent-Magnet Synchronous Motor with State and Load Torque Observer, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 47(2), pp. 346 – 355.

6. Potapenko E.M., and Kazurova A.E. Vysokotochnoe upravlenie neopredelennymi obektami. Sravnenie metodov upravleniya [Precision Control Uncertain Objects. Comparison of Methods of Control], (2007), *Sb. Nauchn. Trud. Dneprodzerzhinskogo Gos. Texn. Univer-ta*, pp. 353 – 356 (In Russian).

7. Krut'ko P.D. Robastno ustojchivye struktury upravlyaemyx sistem vysokoj dinamicheskoy tochnosti. Algoritmy i dinamika upravleniya dvizheniem modelnyx obektov [Robustly Stable Structures of Control Systems of High Dynamic Precision. Algorithms and Dynamics of Control of Model Objects], (2005), *Izvestiya RAN. TiSU*, Vol. 2, pp. 120 – 140 (In Russian).

8. Ostroverkhov N., and Buryk N. Upravlenie koordinatami elektroprivodov na osnovanii koncepcii obratnyx zadach dinamiki pri minimizacii lokalnyx funkcionalov mgnovennyx znachenij energij [Control of Coordinates Electric Drives Based on the Concept of Inverse Dynamics Problems for Minimization Local Functionals Momentary Values of Energy], (2011), *Elektrotehnika i Elektroenergetika*, Vol. 1, pp. 41 – 49 (In Russian).

9. Ostroverkhov N.J. Metod sinteza reguljatorov elektromehaničeskix sistem na osnovanii kontseptsii obratnyx zadach dinamiki v soedinenii s minimizatsiej lokalnyx funktsionalov mgnovennyx znachenij energij dvizheniya [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 Functional of the Instantaneous Motion Energy Values], (2008), *Vestnik NTU "KPI"*, Vol. 30, pp. 105 – 100 (In Russian).

10. Chernousko F. Dekompoziciya i suboptimalnoe upravleniya v dinamicheskix sistemax [Decomposition and Suboptimum Control in Dynamic Systems], (1990), *PMM*, Vol. 6, pp. 883 – 893 (In Russian).



Островерхов
Николай Яковлевич,
д.т.н., проф., зав. каф. теоретической
электротехники НТУУ «КПИ», 03056, г.
Киев, просп. Победы,
37(044) 406-82-39.
E-mail: ostroverkhov@list.ru



Пыжов
Владимир Михайлович,
к.т.н., доц., доц. каф. автоматизации элек-
tromеханических систем и электроприво-
да, НТУУ «КПИ», 03056, г. Киев, просп.
Победы, 37,(044) 406-83-56.
E-mail: vpyzhov@gmail.com