

МЕХАТРОНИКА, АВТОМАТИЗАЦИЯ, УПРАВЛЕНИЕ

Том 1

2015

№ 4

Издается с 2000 года

ISSN 1684-6427

DOI 10.17587/issn.1684-6427

Редакционный совет:

CHYI-YEU LIN, PhD, prof.
GROOMPOS P. P., prof.
JEN-HWA GUO, PhD, prof.
KATALINIC B., PhD, prof.
SUBUDHI B., PhD, prof.
АЛИЕВ Т. А., акад. НАНА, проф.
АНШАКОВ Г. П., чл.-корр. РАН, проф.
БОЛОТНИК Н. Н., чл.-корр. РАН, проф.
ВАСИЛЬЕВ С. Н., акад. РАН, проф.
КАЛЯЕВ И. А., чл.-корр. РАН, проф.
КРАСНЕВСКИЙ Л. Г., чл.-корр. НАНБ, проф.
КУЗНЕЦОВ Н. А., акад. РАН, проф.
ЛЕОНОВ Г. А., чл.-корр. РАН, проф.
МАТВЕЕНКО А. М., акад. РАН, проф.
МИКРИН Е. А., акад. РАН, проф.
ПЕШЕХОНОВ В. Г., акад. РАН, проф.
РЕЗЧИКОВ А. Ф., чл.-корр. РАН, проф.
СЕБРЯКОВ Г. Г., чл.-корр. РАН, проф.
СИГОВ А. С., акад. РАН, проф.
СОЙФЕР В. А., чл.-корр. РАН, проф.
СОЛОВЬЕВ В. А., чл.-корр. РАН, проф.
СОЛОМЕНЦЕВ Ю. М., чл.-корр. РАН, проф.
ФЕДОРОВ И. Б., акад. РАН, проф.
ЧЕНЦОВ А. Г., чл.-корр. РАН, проф.
ЧЕРНОУСЬКО Ф. Л., акад. РАН, проф.
ШЕРБАТЮК А. Ф., чл.-корр. РАН, проф.
ЮСУПОВ Р. М., чл.-корр. РАН, проф.

Главный редактор:

ФИЛИМОНОВ Н. Б., д. т. н., с. н. с.

Заместители гл. редактора:

ПОДУРАЕВ Ю. В., д. т. н., проф.
ПУТОВ В. В., д. т. н., проф.
ЮЩЕНКО А. С., д. т. н., проф.

Ответственный секретарь:

БЕЗМЕНОВА М. Ю.

Редакционная коллегия:

АЛЕКСАНДРОВ В. В., д. ф.-м. н., проф.
АНТОНОВ Б. И.
АРШАНСКИЙ М. М., д. т. н., проф.
БУКОВ В. Н., д. т. н., проф.
ВИТТИХ В. А., д. т. н., проф.
ГРАДЕЦКИЙ В. Г., д. т. н., проф.
ЕРМОЛОВ И. Л., д. т. н., доц.
ИВЧЕНКО В. Д., д. т. н., проф.
ИЛЬЯСОВ Б. Г., д. т. н., проф.
КОЛОСОВ О. С., д. т. н., проф.
КОРОСТЕЛЕВ Ф. Ф., д. т. н., проф.
ЛЕБЕДЕВ Г. Н., д. т. н., проф.
ЛОХИН В. М., д. т. н., проф.
ПАВЛОВСКИЙ В. Е., д. ф.-м. н., проф.
ПРОХОРОВ Н. Л., д. т. н., проф.
ПШИХОПОВ В. Х., д. т. н., проф.
РАПОПОРТ Э. Я., д. т. н., проф.
СЕРГЕЕВ С. Ф., д. пс. н., с. н. с.
ФИЛАРЕТОВ В. Ф., д. т. н., проф.
ФРАДКОВ А. Л., д. т. н., проф.
ФУРСОВ В. А., д. т. н., проф.
ЮРЕВИЧ Е. И., д. т. н., проф.

Редакция:

ГРИГОРИН-РЯБОВА Е. В.

МЕТОДЫ ТЕОРИИ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

- Пшихопов В. Х., Медведев М. Ю., Крухмалев В. А.** Базовые алгоритмы адаптивного позиционно-траекторного управления подвижными объектами при позиционировании в точке 219
- Козырев В. Г.** Асимптотическое разложение закона терминального управления выходом разнотемповых систем 225

МЕТОДЫ КОМБИНАТОРНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ И ПРИНЯТИЕ РЕШЕНИЙ

- Ченцов А. Г., Кошелева М. С.** Динамическое программирование в задаче курьера со стоимостями, зависящими от списка заданий 232
- Андронов А. В., Шибанов Г. П.** Современная технология научного выбора наиболее перспективного образца техники из ряда образцов аналогичного назначения . . . 245

КОНТРОЛЬ И ДИАГНОСТИКА МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

- Мусатов В. Ю., Киселев И. В., Варезников А. С., Большаков А. А., Сысоев В. В.** Анализ возможностей применения в газоаналитических приборах вида "электронный нос" на основе однокристальных чипов переходных электрических процессов в сенсорных сегментах при воздействии различных газов 250
- Колосов О. С., Анисимов Д. Н., Хрипков Д. В.** Исследование многоуровневых нечетких диагностических систем с использованием стохастической модели 254

ЭРГАТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

- Сержантова М. В., Ушаков А. В.** Рекреативный интервал в проблеме управления производительностью деятельности антропокомпонента-оператора в квазистатической функциональной среде 262

Журнал в журнале

"УПРАВЛЕНИЕ И ИНФОРМАТИКА В АВИАКОСМИЧЕСКИХ И МОРСКИХ СИСТЕМАХ"

- Корсун О. Н., Николаев С. В.** Методика идентификации аэродинамических коэффициентов продольного движения самолета в эксплуатационном диапазоне углов атаки 269
- Лосев С. Н., Макаренко В. И., Подольская Н. Н.** Вероятностно-геометрический метод среднесрочного обнаружения конфликтов между воздушными судами . . . 277
- Филаретов В. Ф., Зуев А. В., Жирабок А. Н., Проценко А. А., Subudhi B.** Метод синтеза систем непрерывной аккомодации к дефектам в навигационно-пилотажных датчиках автономных подводных роботов 282

Журнал входит в Перечень периодических изданий, рекомендованных ВАК РФ для публикации основных результатов диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук; журнал включен в систему Российского индекса научного цитирования

Информация о журнале доступна по сети Internet по адресу:
<http://novtex.ru/mech>, e-mail: mech@novtex.ru

MECHATRONICS, AUTOMATION, CONTROL



MEHATRONIKA, AVTOMATIZACIA, UPRAVLENIE

Published since 2000

ISSN 1684-6427

DOI 10.17587/issn.1684-6427

Editorial Council:

ALIEV T. A., Prof., Azerbaijan
 ANSHAKOV G. P., Russia
 BOLOTNIK N. N., Russia
 CHENTSOV A. G., Russia
 CHERNOUSKO F. L., Russia
 CHYI-YEU LIN, PhD, Prof., Taiwan
 FEDOROV I. B., Russia
 GROUMPOS P. P., Prof., Greece
 JEN-HWA GUO, PhD, Prof., Taiwan
 KALYAEV I. A., Russia
 KATALINIC B., PhD, Prof., Austria
 KRASNEVSKIY L. G., Belarus
 KUZNETSOV N. A., Russia
 LEONOV G. A., Russia
 MATVEENKO A. M., Russia
 MIKRIN E. A., Russia
 PESHEKHONOV V. G., Russia
 REZCHIKOV A. F., Russia
 SCHERBATYUK A. F., Russia
 SEBRYAKOV G. G., Russia
 SIGOV A. S., Russia
 SOJFER V. A., Russia
 SOLOMENTSEV Yu. M., Russia
 SOLOVJEV V. A., Russia
 SUBUDHI B., PhD, Prof., India
 VASILYEV S. N., Russia
 YUSUPOV R. M., Russia

Editor-in-Chief:

FILIMONOV N. B., Russia

Deputy Editor-in-Chief:

PODURAEV Yu. V., Russia
 PUTOV V. V., Russia
 YUSCHENKO A. S., Russia

Responsible Secretary:

BEZMEENOVA M. Yu., Russia

Editorial Board:

ALEXANDROV V. V., Russia
 ANTONOV B. I., Russia
 ARSHANSKY M. M., Russia
 BUKOV V. N., Russia
 ERMOLOV I. L., Russia
 FILARETOV V. F., Russia
 FRADKOV A. L., Russia
 FURSOV V. A., Russia
 GRADETSKY V. G., Russia
 ILYASOV B. G., Russia
 IVCHENKO V. D., Russia
 KOLOSOV O. S., Russia
 KOROSTELEV V. F., Russia
 LEBEDEV G. N., Russia
 LOKHIN V. M., Russia
 PAVLOVSKY V. E., Russia
 PROKHOROV N. L., Russia
 PSHIKHOPOV V. Kh., Russia
 RAPOPORT E. Ya., Russia
 SERGEEV S. F., Russia
 VITTIKH V. A., Russia
 YUREVICH E. I., Russia

Editorial Staff:

GRIGORIN-RYABOVA E. V., Russia

CONTENTS METHODS OF THE THEORY OF AUTOMATIC CONTROL

Pshikhopov V. Kh., Medvedev M. Yu., Krukhmalev V. A. Base Algorithms of the Adaptive Position-Path Control for the Mobile Objects' Positioning 219

Kozyrev V. G. Asymptotic Expansion of the Terminal Control Law of the Output of Two-Tame-Scale Systems 225

METHODS OF COMBINATORIAL OPTIMIZATION AND DECISION-MAKING

Chentsov A. G., Kosheleva M. S. Dynamic Programming in the Precedence Constrained TSP with the Costs Depending on a List of Tasks 232

Andronov A. V., Shibanov G. P. Modern Technology for a Scientific Selection of the Most Promising Samples of Technology out of a Number of Analogs 245

**CONTROLLING AND DIAGNOSTICS
IN THE MECHATRONIC SYSTEMS AND TECHNOLOGIES**

Musatov V. Yu., Kiselev I. V., Varegnikov A. S., Bolshakov A. A., Sysoev V. V. Analysis of Possible Applications in the Gas Analytical Instruments of the "Electronic Nose" Based on the Single-Chip Transient Electrical Processes in the Sensory Segments under Effect of Different Gases 250

Kolosov O. S., Anisimov D. N., Khripkov D. V. Research of the Multilevel Fuzzy Diagnostic Systems with the Use Stochastic Models 254

ERGATIC CONTROL SYSTEMS

Serzhantova M. V., Ushakov A. V. Interval for Rest in the Problem of Management of Productivity of a Human Operator in a Static Functional Environment 262

Journal within journal**"CONTROL AND INFORMATICS IN AEROSPACE AND MARINE SYSTEMS"**

Korsun O. N., Nikolaev S. V. Identification of the Aerodynamic Coefficients of Longitudinal Motion of an Aircraft in the Operational Range of the Attack Angles 269

Losev S. N., Makarenko V. I., Podolskaya N. N. Probabilistic-Geometric Method for a Medium Term Conflict Detection in Air Traffic Control 277

Filaretov V. F., Zuev A. V., Zhirabok A. N., Prochenko A. A., Subudhi B. Method of Synthesis of Continuous Systems of Accommodation to the Faults in Navigation Sensors of Autonomous Underwater Robots 282

Information about the journal is available online at:
<http://novtex.ru/mech.html>, e-mail: mech@novtex.ru

УДК 681.513.66

В. Х. Пшихопов, д-р техн. наук, профессор, pshichop@rambler.ru,
М. Ю. Медведев, д-р техн. наук, профессор, medvmihal@sfedu.ru,
В. А. Крухмалев, аспирант, doc61rus@gmail.com,
 Южный федеральный университет, 347928, г. Таганрог, Россия

Базовые алгоритмы адаптивного позиционно-траекторного управления подвижными объектами при позиционировании в точке¹

Рассматривается задача позиционирования подвижного объекта в точке при наличии неизмеряемых возмущений. Предлагается структура адаптивной позиционно-траекторной системы с эталонной моделью и интегральным или пропорционально-интегральным алгоритмом адаптации. Проводится синтез адаптивных регуляторов и анализ устойчивости замкнутых систем. Приводятся результаты моделирования замкнутых систем с синтезированными алгоритмами адаптивного управления при постоянных и переменных возмущениях детерминированного характера.

Ключевые слова: позиционно-траекторное управление, адаптивное управление, подвижный объект, эталонная модель

Введение

Задачи управления подвижными объектами остаются весьма актуальными в современной теории и практике управления. На XII Всероссийском совещании по проблемам управления были отражены актуальные направления развития теории и систем управления подвижными объектами [1]. Согласно итогам конференции большое внимание уделено методам адаптивного и интеллектуального управления подвижными объектами, включая мобильные роботы.

Для управления подвижными объектами успешно применяются системы позиционно-траекторного управления [2], которые вместе с алгоритмами робастного оценивания возмущений [3] позволяют синтезировать эффективные не прямые адаптивные системы для подвижных объектов морского базирования [4, 5], воздухоплавательных комплексов [6–8]. Известно, что в системах непрямого адаптивного управления на качество замкнутой системы существенно влияют алгоритмы оценивания [9, 10]. В данной работе развивается метод прямого адаптивного управления, представленный в работах [11–13]. В работе [11] предложены адаптивные алгоритмы управления приводами, основанные на расширении моделей управляемых объектов уравнениями, генерирующими заданный класс возмущений. Для такой расширенной модели в работе [11] строится система управления, обеспечивающая устойчивость замкнутой системы. В работе [12] данный метод развивается для подвижных объектов, описываемых уравнениями кинематики и динамики твердого тела в трехмерном пространстве. В работе [13] предложен адаптивный алгоритм позиционно-траекторного управления для уравнений динами-

ки подводного аппарата, проведен анализ структуры и устойчивости замкнутой системы. Анализ устойчивости в работе [13] показал, что замкнутая система управления является линейной, что позволяет выбрать матрицу коэффициентов настройки алгоритма адаптации. Недостатком алгоритмов, приведенных в работе [13], представляется тот факт, что входной информацией для алгоритма адаптации является текущее отклонение состояния системы от его значения в установившемся режиме. Иными словами, алгоритм адаптации не имеет информации о требованиях к переходному процессу, задаваемому эталонным уравнением. В частности, в работе [13] заданное эталонным уравнением быстродействие может быть обеспечено только при равенстве матрицы эталонного уравнения и матрицы настроек алгоритма адаптации. Так, эталонное характеристическое уравнение в работе [13] имеет вид

$$s + T_1 = 0, \quad (1)$$

где T_1 — диагональная матрица постоянных коэффициентов.

Характеристическое уравнение замкнутой системы имеет вид

$$s^2 + (A + T_1)S + T_1A = 0, \quad (2)$$

где A — диагональная матрица постоянных коэффициентов настройки алгоритма адаптации.

Из уравнений (1), (2) следует, что повышение быстродействия алгоритма адаптации в работе [13] приводит к повышению быстродействия замкнутой системы, т. е. к отклонению от заданного эталонного уравнения (1).

В данной работе для устранения этого недостатка используется идеология адаптивных систем с эталонной моделью [14–16]. При этом рассматриваются как уравнения кинематики, так и уравнения динамики подвижного объекта. Такая постановка задачи

¹ Работа поддержана грантом Президента Российской Федерации № НИШ-3437.2014.10 и грантом РФФИ 13-08-00315а.

обусловлена тем, что при решении задач позиционирования часто предъявляют высокие требования к точности, например, при стыковке. В связи с этим дополнительные погрешности, вносимые при решении прямой и обратной задачи кинематики, нежелательны.

Позиционно-траекторный регулятор с эталонной моделью и пропорциональным алгоритмом адаптации

Рассмотрим модель подвижного объекта на базе уравнений кинематики и динамики твердого тела [2]:

$$\begin{aligned} \dot{y} &= R(y)x; \\ \dot{x} &= M^{-1}(F_u + F_d) + \Delta F_d, \end{aligned} \quad (3)$$

где y — вектор линейных и угловых положений подвижного объекта во внешней системе координат; x — вектор линейных и угловых скоростей подвижного объекта в связанной системе координат; $R(y)$ — матрица кинематики; M — матрица инерционных параметров; F_u — вектор управляющих сил и моментов; F_d — вектор прочих сил и моментов, действующих на подвижный объект; ΔF_d — вектор неучтенных возмущений, который в процессе синтеза алгоритма адаптации принимается нулевым.

Наряду с моделью (3) рассмотрим эталонную модель вида

$$\begin{aligned} \dot{y}_m &= R(y_m)x_m; \\ \dot{x}_m &= M^{-1}(F_{um} + F_{dm}), \end{aligned} \quad (4)$$

где y_m — вектор линейных и угловых положений эталонной модели во внешней системе координат; x_m — вектор линейных и угловых скоростей эталонной модели в связанной системе координат; $R(y_m)$ — матрица кинематики эталонной модели; F_{um} — вектор управляющих сил и моментов эталонной модели; F_{dm} — вектор прочих сил и моментов, действующих на эталонную модель.

Матрица $R(y_m)$ и вектор F_{dm} совпадают по структуре с матрицей $R(y)$ и вектором F_d соответственно.

Синтезируем управление для эталонной модели (4). В соответствии с методом позиционно-траекторного управления [2] введем ошибку позиционирования эталонной модели в виде

$$\Psi_{\text{эт}} = A_1 y_m + A_2, \quad (5)$$

где A_1, A_2 — матрица и вектор постоянных коэффициентов, отражающих требования к точке позиционирования.

Вычислим первую и вторую производные по времени от выражения (5) в силу уравнений эталонной модели (4):

$$\dot{\Psi}_{\text{эт}} = A_1 R(y_m)x_m; \quad (6)$$

$$\ddot{\Psi}_{\text{эт}} = A_1 \dot{R}(y_m)x_m + A_1 R(y_m)M^{-1}(F_{um} + F_{dm}). \quad (7)$$

Потребуем, чтобы вектор (5) удовлетворял следующему эталонному дифференциальному уравнению:

$$\ddot{\Psi}_{\text{эт}} + T_2 \dot{\Psi}_{\text{эт}} + T_1 \Psi_{\text{эт}} = 0, \quad (8)$$

где T_1, T_2 — матрицы постоянных коэффициентов.

Подставим выражения (5)–(7) в уравнение (8) и решим его относительно вектора управляющих сил и моментов F_{um} :

$$\begin{aligned} F_{um} &= -F_{dm} + (A_1 R(y_m)M^{-1})^{-1} \times \\ &\times \{-A_1 \dot{R}(y_m)x_m - T_2 \dot{\Psi}_{\text{эт}} - T_1 \Psi_{\text{эт}}\}. \end{aligned} \quad (9)$$

В соответствии с работами [11–13] расширим модель подвижного объекта (3):

$$\begin{aligned} \dot{y} &= R(y)x; \\ \dot{x} &= M^{-1}(F_u + F_d + Cz); \\ \dot{z} &= \Psi - \Psi_{\text{эт}}, \end{aligned} \quad (10)$$

где C — матрица настройки алгоритма адаптации.

Ошибка позиционирования для подвижного объекта (3) задается в том же виде, что и для эталонной модели:

$$\Psi = A_1 y + A_2. \quad (11)$$

Чтобы подчеркнуть отличие от работ [11–13], отметим, что в них последнее уравнение в системе (10) задавалось в виде $\dot{z} = \Psi$, т. е. не использовался выход динамической эталонной модели (4).

Вычислим первую и вторую производные по времени от выражения (11) в силу уравнений расширенной модели подвижного объекта (10):

$$\dot{\Psi} = A_1 R(y)x; \quad (12)$$

$$\ddot{\Psi} = A_1 \dot{R}(y)x + A_1 R(y)M^{-1}(F_u + F_d + Cz). \quad (13)$$

Введем ошибку управления в виде

$$e = \Psi - \Psi_{\text{эт}}. \quad (14)$$

Вычислим первую и вторую производные по времени от ошибки регулирования (14) и подставим их в эталонное уравнение замкнутой системы:

$$\ddot{e} + T_2 \dot{e} + T_1 e = 0. \quad (15)$$

В результате получим следующий алгоритм адаптивного позиционно-траекторного управления с эталонной моделью и пропорциональной адаптацией:

$$\begin{aligned} F_u &= -F_d - Cz + (A_1 R(y)M^{-1})^{-1} \{-A_1 \dot{R}(y)x + \\ &+ A_1 \dot{R}(y_m)x_m + A_1 R(y_m)M^{-1}(F_{um} + F_{dm}) - \\ &- T_2(\dot{\Psi} - \dot{\Psi}_{\text{эт}}) - T_1(\Psi - \Psi_{\text{эт}})\}. \end{aligned} \quad (16)$$

Подставив в (17) выражение для эталонного управления (9), получим управление в виде

$$\begin{aligned} F_u &= -F_d - Cz + \\ &+ (A_1 R(y)M^{-1})^{-1} \{-A_1 \dot{R}(y)x - T_2 \dot{\Psi} - T_1 \Psi\}. \end{aligned} \quad (17)$$

На рис. 1 представлена структура прямой адаптивной позиционно-траекторной системы управления подвижным объектом с эталонной моделью и пропорциональным алгоритмом адаптации. На данной структуре видны две обратные связи, формирующие две составляющие управления. Первая составляющая формируется по ошибке между эталонной ошибкой $\Psi_{\text{эт}}$ и реальной ошибкой Ψ . Вторая составляющая вводится дополнительно и формируется интегралом от величины $\Psi - \Psi_{\text{эт}}$.

Подставим выражение (18) в уравнения объекта (3), эталонное управление (9) — в эталонную модель (4). В результате получим следующие уравнения замкнутой системы:

$$\begin{aligned} \dot{y} &= R(y)x; \\ \dot{x} &= -M^{-1}Cz + (A_1R(y))^{-1} \times \\ &\times (-A_1\dot{R}(y)x - T_2A_1Rx - T_1(A_1y + A_2)); \\ \dot{z} &= A_1(y - y_m); \\ \dot{y}_m &= R(y_m)x_m; \\ \dot{x}_m &= (A_1R(y_m))^{-1}(-A_1\dot{R}(y_m)x_m - \\ &- T_2A_1R_mx_m - T_1(A_1y_m + A_2)). \end{aligned} \quad (18)$$

Проведем анализ системы (19) при следующих предположениях:

- матрицы кинематики $R(y) = R = \text{const}$ и $R(y_m) = R_m = \text{const}$ являются постоянными, что на практике означает рассмотрение уравнений подвижного объекта при медленно изменяющихся углах ориентации;
- матрицы T_1, T_2 являются диагональными, что допустимо при задании эталонных уравнений по различным каналам управления независимо друг от друга;
- матрица A_1 является диагональной, а вектор $A_2 = 0$, что позволяет решать задачу позиционирования в нулевую точку.

При данных допущениях система (19) преобразуется к виду

$$\begin{aligned} \dot{y} &= Rx; \\ \dot{x} &= -M^{-1}Cz - T_2x - R^{-1}T_1y; \\ \dot{z} &= A_1(y - y_m); \\ \dot{y}_m &= R_mx_m; \\ \dot{x}_m &= T_2x_m - T_1y_m. \end{aligned} \quad (19)$$

Собственная матрица системы (20) имеет вид

$$A_s = \begin{bmatrix} 0 & R & 0 & 0 & 0 \\ -R^{-1}T_1 & -T_2 & -M^{-1}C & 0 & 0 \\ A_1 & 0 & 0 & -A_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_m \\ 0 & 0 & 0 & -R_m^{-1}T_1 & -T_2 \end{bmatrix}. \quad (20)$$

Характеристическое уравнение замкнутой системы имеет вид:

$$D(s) = (s^3 + T_2s^2 + T_1s + RM^{-1}CA_1)(s^2 + T_2s + T_1). \quad (21)$$

Анализ уравнения (22) показывает, что матрица настройки пропорционального контура адаптации может быть выбрана из условия

$$C = MR^{-1}C'A_1^{-1}, \quad (22)$$

$$T_1T_2 > C'. \quad (23)$$

Для повышения эффекта адаптации требуется увеличивать матрицу C' . Однако условия устойчивости (24) ограничивают возможности увеличения коэффициента C' . Нетрудно моделированием убедиться, что при нарушении условия (24) система становится неустойчивой.

При $C = 0$ уравнение (22) принимает вид

$$D(s) = s(s^2 + T_2s + T_1)(s^2 + T_2s + T_1), \quad (24)$$

т. е. система распадается на три независимые подсистемы.

На рис. 2 приведены результаты моделирования замкнутой системы (3) — (18) при постоянных возмущениях.

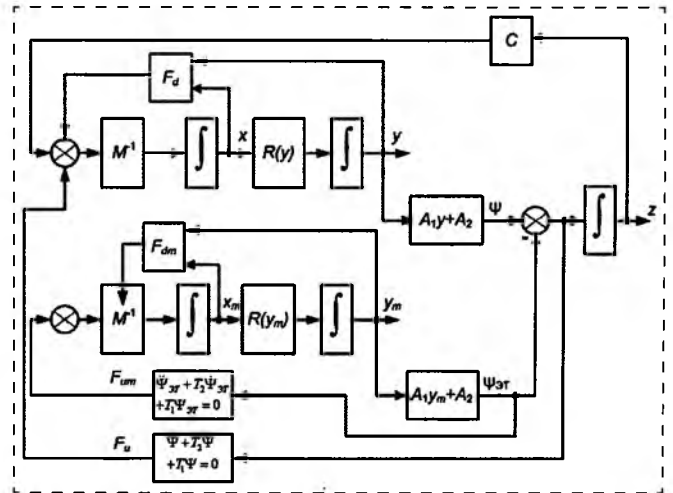


Рис. 1. Структура адаптивной позиционно-траекторной системы с эталонной моделью и пропорциональным алгоритмом адаптации

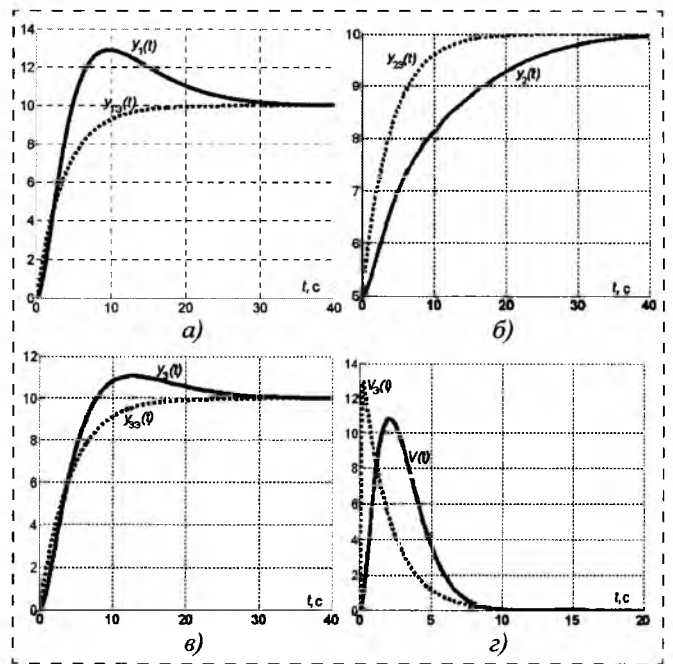


Рис. 2. Результаты моделирования: а — y_1 ; б — y_2 ; в — y_3 ; г — квадрат скорости ПО

Моделирование проводилось для следующих параметров и матриц объекта управления и регулятора:

$$R = \begin{bmatrix} A & 0 \\ 0 & A_\omega \end{bmatrix};$$

$$A = \begin{bmatrix} \cos\psi \cos\vartheta & -\cos\psi \sin\vartheta \cos\gamma + \sin\psi \sin\gamma & \cos\psi \sin\vartheta \sin\gamma + \sin\psi \cos\gamma \\ \sin\vartheta & \cos\vartheta \cos\gamma & -\cos\vartheta \sin\gamma \\ -\sin\psi \cos\vartheta & \cos\psi \sin\gamma + \sin\psi \sin\vartheta \cos\gamma & \cos\psi \cos\gamma - \sin\psi \sin\vartheta \sin\gamma \end{bmatrix};$$

$$\Delta F_d = \begin{bmatrix} 5 \\ -3 \\ 2 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; A_\omega = \begin{bmatrix} 0 & \frac{\cos\gamma}{\cos\vartheta} & -\frac{\sin\gamma}{\cos\vartheta} \\ 0 & \sin\gamma & \cos\gamma \\ 1 & -\operatorname{tg}\vartheta \cos\gamma & \operatorname{tg}\vartheta \sin\gamma \end{bmatrix};$$

$$M = \begin{bmatrix} 5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 5 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 10 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 100 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 100 \end{bmatrix}; F_d = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; A_2 = \begin{bmatrix} -10 \\ -10 \\ -10 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix};$$

$$T_1 = 0,25I, T_2 = I, A_1 = I, C' = 0,1I,$$

где I — единичная матрица размерностью 6×6 .

По результатам моделирования видны существенные отклонения переменных подвижного объекта от переменных эталонной модели. Увеличение значений коэффициентов матрицы C' ограничено условиями устойчивости (24) и приводит к появлению колебаний. Данный недостаток не проявляется в установившемся режиме при постоянных возмущениях, однако особенно заметен при переменных возмущениях.

Позиционно-траекторный регулятор с эталонной моделью и пропорционально-интегральным алгоритмом адаптации

Для устранения недостатков, связанных с пропорциональной адаптацией, модифицируем структуру системы управления так, как показано на рис. 3. По сравнению с рис. 1 на ней введена дополнительная связь с матричным коэффициентом передачи B .

Тогда процедура синтеза изменяется следующим образом. Управление для эталонной модели (4) формируется в виде (9). Ошибка позиционирования подвижного объекта и ее первая и вторая производные по времени определяются соответственно выражениями (11), (12) и (13).

Ошибка управления вводится в виде

$$e = \Psi - \Psi_{ЭТ} + Bz, \quad (25)$$

где B — матрица настройки алгоритма адаптации.

Вычислив первую и вторую производные по времени от ошибки регулирования (25) и подставив их в эталонное уравнение замкнутой системы (16), получим следующий алгоритм адаптивного позици-

онно-траекторного управления с эталонной моделью и пропорционально-интегральной адаптацией:

$$F_u = -F_d - Cz + (A_1 R(y) M^{-1})^{-1} \{ -(A_1 \dot{R}(y) + BA_1 R(y) + T_2 A_1 R(y))x - (T_2 BA_1 + T_1 A_1)y + BA_1 R(y_m)x_m + T_2 BA_1 y_m - T_1 Bz - T_1 A_2 \}. \quad (26)$$

Подставим управление (26) в уравнения подвижного объекта (3), управления (9) — в уравнения эталонной модели (4) и проанализируем полученную замкнутую систему при постоянных матрицах кинематики, диагональных матрицах регулятора T_1, T_2 и A_1 , а также нулевом векторе $A_2 = 0$.

В результате получим линейную модель замкнутой системы управления, собственная матрица которой описывается выражением

$$A_s = \begin{bmatrix} 0 & R & 0 & 0 & 0 \\ -R^{-1}(T_1 + T_2 B) & -T_2 - B & -M^{-1}C - (A_1 R)^{-1}T_1 B & R^{-1}T_2 B & R^{-1}B R_m \\ A_1 & 0 & 0 & -A_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_m \\ 0 & 0 & 0 & -R_m^{-1}T_1 & -T_2 \end{bmatrix}. \quad (27)$$

Тогда характеристическое уравнение имеет вид

$$D(s) = (s^3 + (B + T_2)s^2 + (T_1 + T_2 B)s + RA_1 M^{-1}C + T_1 B)(s^2 + T_2 s + T_1). \quad (28)$$

При $C = 0$ из уравнения (28) получаем

$$D(s) = (s^3 + (B + T_2)s^2 + (T_1 + T_2 B)s + T_1 B)(s^2 + T_2 s + T_1) = (s^2 + T_2 s + T_1)(s + B)(s^2 + T_2 s + T_1). \quad (29)$$

Таким образом, введенная дополнительная связь позволила обеспечить асимптотическую устойчивость замкнутой системы. При этом характеристические уравнения системы адаптации, эталонной модели и основного контура регулирования входят в общее характеристическое уравнение в виде произведения, т. е. допускают независимую настройку.

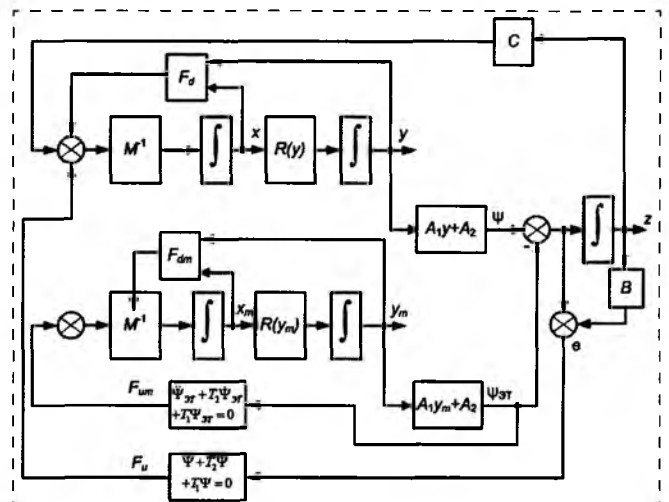


Рис. 3. Структура адаптивной позиционно-траекторной системы с эталонной моделью и пропорционально-интегральным алгоритмом адаптации

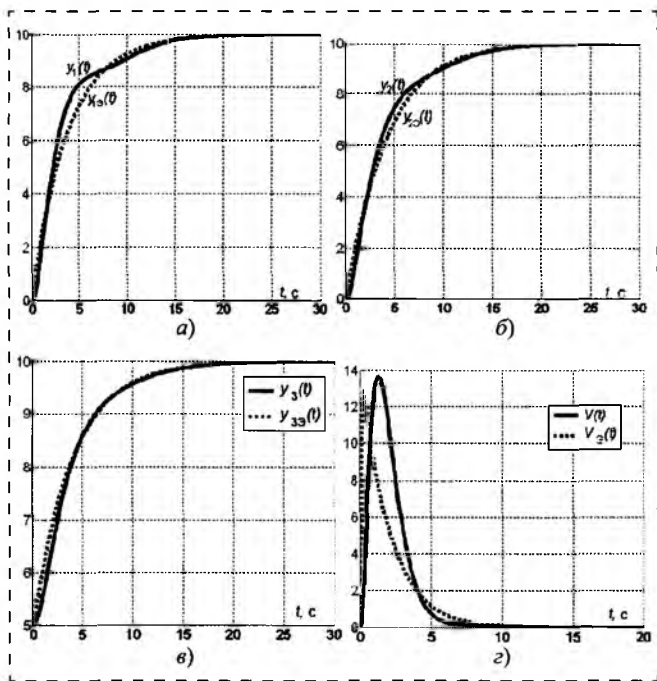


Рис. 4. Результаты моделирования системы с пропорционально-интегральной адаптацией:

a — y_1 ; *b* — y_2 ; *v* — y_3 ; *z* — квадрат скорости ПО

Иными словами, за счет увеличения матрицы B можно повысить быстродействие алгоритма адаптации, не изменяя остальных корней замкнутой системы.

На рис. 4 представлены результаты моделирования при тех же условиях, что и в предыдущем разделе. При этом матрица настройки алгоритма адаптации выбрана единичной $B = I$. Из результатов моделирования, представленных на рис. 4, видно, что пропорционально-интегральный алгоритм адаптации позволяет существенно уменьшить ошибки слежения за выходом эталонной модели. При увеличении коэффициентов матрицы B динамические ошибки уменьшаются. Это позволяет при достаточно больших значениях коэффициентов матрицы использовать данный алгоритм адаптации для компенсации переменных неизмеряемых возмущений.

В частности, на рис. 5 представлены результаты моделирования адаптивной позиционно-траекторной системы управления подвижного объекта (3) с

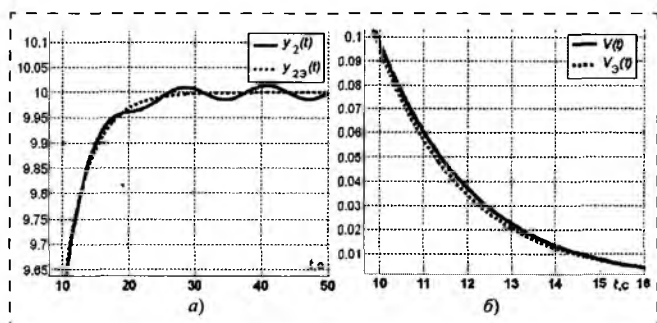


Рис. 5. Результаты моделирования при переменных возмущениях:

a — переменная y_2 ; *б* — квадрат скорости ПО

управлением (26) при гармонических возмущениях $\Delta F_d = [5 - 3 + 2\sin(0,5t) \ 2 + 3\cos(0,4t) \ 0 \ 0 \ 0]^T$ и при матрице $B = 30I$.

В силу того что при больших коэффициентах матрицы B ошибки становятся малыми, на рис. 5 представлены отдельные участки переходных процессов, на которых можно оценить значение ошибки.

Заключение

В данной работе решается задача позиционирования подвижного объекта при наличии неизмеряемых возмущений. Для решения задачи применяется адаптивная система, базовый закон управления которой синтезируется на основе метода позиционно-траекторного управления, а адаптация осуществляется в рамках беспойсковых систем с эталонными моделями. Использование эталонных моделей обусловлено необходимостью при позиционировании с заданной динамической точностью отслеживать желаемую траекторию движения. Предложены алгоритмы адаптивного управления с пропорциональным и пропорционально-интегральным алгоритмом слежения за сигналом эталонной модели. Проведенный анализ показал, что при использовании пропорционально-интегрального алгоритма слежения осуществляется разделение базового контура и контура адаптации.

Список литературы

1. **Итоги XII** Всероссийского совещания по проблемам управления: аналитический обзор. URL: <http://vspu2014.ipu.ru/>.
2. **Пшихопов В. Х., Медведев М. Ю.** Управление подвижными объектами в определенных и неопределенных средах. М.: Наука, 2011. 350 с.
3. **Пшихопов В. Х., Медведев М. Ю.** Алгоритмы оценивания в системе управления автономного роботизированного дирижабля // Известия ЮФУ. Технические науки. 2013. № 2 (139). С. 200—207.
4. **Pshikhopov V. Kh., Medvedev M. Y., Gurenko B. V.** Homing and Docking Autopilot Design for Autonomous Underwater Vehicle // Applied Mechanics and Materials. 2014. V. 490—491. P. 700—707. Trans Tech Publications, Switzerland. doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.490-491.700.
5. **Пшихопов В. Х., Гуренко Б. В., Медведев М. Ю., Маевский А. М., Голосов С. П.** Оценка аддитивных возмущений АНПА робастным наблюдателем с нелинейными обратными связями // Известия ЮФУ. Технические науки 2014. № 3 (152). С. 128—137.
6. **Пшихопов В. Х., Медведев М. Ю., Гайдук А. Р., Нейдорф Р. А., Беляев В. Е., Федоренко Р. В., Костюков В. А., Крухмалев В. А.** Система позиционно-траекторного управления роботизированной воздухоплавательной платформой: математическая модель // Мехатроника, автоматизация и управление. 2013. № 6. С. 14—21.
7. **Пшихопов В. Х., Медведев М. Ю., Гайдук А. Р., Нейдорф Р. А., Беляев В. Е., Федоренко Р. В., Костюков В. А., Крухмалев В. А.** Система позиционно-траекторного управления роботизированной воздухоплавательной платформой: алгоритмы управления // Мехатроника, автоматизация, управление. 2013. № 7. С. 13—20.
8. **Пшихопов В. Х.** Дирижабли: перспективы использования в робототехнике // Мехатроника, автоматизация, управление. 2004. № 5. С. 15—20.
9. **Земляков С. Д., Рутковский В. Ю.** О некоторых результатах развития теории и практики применения беспойсковых адаптивных систем // Автоматика и телемеханика. 2001. № 7. С. 103—121.

10. Путов В. В. Прямые и не прямые беспоисковые адаптивные системы с мажорирующими функциями и их приложения к управлению многостепенными нелинейными упругими механическими объектами // Мехатроника, автоматизация, управление. 2007. № 10. С. 4–11.

11. Медведев М. Ю. Алгоритмы адаптивного управления исполнительными приводами // Мехатроника, автоматизация и управление. 2006. № 6. С. 17–22.

12. Пшихопов В. Х., Медведев М. Ю. Синтез адаптивных систем управления летательными аппаратами // Известия ЮФУ. Технические науки. 2010. № 3 (104). С. 187–196.

13. Пшихопов В. Х., Федотов А. А., Медведев М. Ю., Медведева Т. Н., Гуренко Б. В. Позиционно-траекторная система прямого адаптивного управления морскими подвижными объектами // Инженерный вестник Дона. 2014. № 3.

14. Рутковский В. Ю., Глузов В. М., Суханов В. М. Физически реализуемый алгоритм адаптивного управления с эталонной моделью // Автоматика и телемеханика. 2011. № 8. С. 96–108.

15. Земляков С. Д., Рутковский В. Ю. Алгоритм функционирования адаптивной системы с эталонной моделью, гарантирующий заданную динамическую точность управления нестационарным динамическим объектом в условиях неопределенности // Автоматика и телемеханика. 2009. № 10. С. 35–44.

16. Глузов В. М., Земляков С. Д., Рутковский В. Ю., Суханов В. М. Применение принципа построения адаптивных систем с эталонной моделью к задачам мониторинга текущего состояния трансмиссионных валов // Автоматика и телемеханика. 2003. № 5. С. 131–146.

Base Algorithms of the Adaptive Position-Path Control for the Mobile Objects' Positioning

V. Kh. Pshikhopov, pshichop@rambler.ru, M. Yu. Medvedev, medvmihal@sfnu.ru,
V. A. Krukhmalev, doc61rus@gmail.com,
Southern Federal University, Taganrog, 347928, Russian Federation

Received on November 28, 2014

This paper presents a task of a mobile object positioning in the presence of determinate disturbances. A mobile object is described by kinematics and dynamics equations of a solid body in a three dimensional space. The control inputs of the mobile object are forces and torques. Design of the adaptive control is based on the position-path control method for the mobile objects. This article presents two algorithms of the adaptive position-path control. The first algorithm is the adaptive position-path control with an integration component and reference model. The second algorithm is the adaptive position-path control with a reference model and an extended mobile robot model. The authors propose a unit diagram for a direct adaptive position-path control system with a reference model. The article also presents the design procedures for the adaptive position-path control systems and stability analysis of the closed-loop system, as well as the computer simulation results of the designed adaptive closed-loop systems with both constant and variable disturbances. The authors make conclusions on the basis of the analysis and modeling results. The main advantage of the proposed method is separation of the basic position-path regulator and adaptation algorithms. The parameters of the position-path controller are the parameters of the reference model. Therefore, a classical structure of the adaptive control with a reference model requires a change in the parameters of the model. The adaptation algorithms presented in this paper can be applied for the parameters of the additional dynamic units.

Keywords: position-path control, adaptive control, mobile object, reference model

Acknowledgements: This work was supported by a grant from the President of the Russian Federation no. IIII-3437.2014.10 and the Russian Foundation for Basic Research, projects no. 13-08-00315a.

For citation:

Pshikhopov V. Kh., Medvedev M. Yu., Krukhmalev V. A. Base Algorithms of the Adaptive Position-Path Control for the Mobile Objects' Positioning, *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*, 2015, vol. 16, no. 4, pp. 219–225.

DOI: 10.17587/mau.16.219-225

References

1. *Itogi XII Vserossijskogo soveshhanija po problemam upravlenija: analiticheskij obzor* (Resume of the XII Russian Conference on Control problems: an analytical review). Available at: <http://vspu2014.ipu.ru>

2. Pshikhopov V. H., Medvedev M. Ju. *Upravlenie podvizhnymi ob'ektami v opredelennyh i neopredelennyh sredah* (Control of vehicles in certain and uncertain environments), Moscow, Nauka, 2011, 350 p. (in Russian).

3. Pshikhopov V. H., Medvedev M. Ju. *Algoritmy ocenivanija v sisteme upravlenija avtonomnogo robotizirovannogo dirizhablja* (Transactions of Southern Federal University. Engineering Sciences), *Izvestija JuFU. Tehniceskie Nauki*, 2013, no 2 (139), pp. 200–207. (in Russian)

4. Pshikhopov V. Kh., Medvedev M. Y., Gurenko B. V. Homing and Docking Autopilot Design for Autonomous Underwater Vehicle, *Applied Mechanics and Materials*, 2014, vol. 490–491, pp. 700–707. Trans Tech Publications, Switzerland. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.490-491.700.

5. Pshikhopov V. H., Gurenko B. V., Medvedev M. Ju., Maevskij A. M., Golosov S. P. *Ocenivanie additivnyh vozmozhnenij ANPA robnym nabljudatelem s nelinejnymi obratnymi svyazjami* (Estimation of added UAV disturbances by robust estimator with nonlinear

feedbacks), *Izvestija JuFU. Tehniceskie Nauki*, 2014, no 3 (152), pp. 128–137 (in Russian).

6. Pshikhopov V. H., Medvedev M. Ju., Gajduk A. R., Nejdorf R. A., Beljaev V. E., Fedorenko R. V., Kostjukov V. A., Krukhmalev V. A. *Sistema pozicijno-traekornogo upravlenija robotizirovannoj vozduhoplavitel'noj platformoj: matematicheskaja model'* (System of position-trajectory control for robotic airship: mathematical model), *Mekhatronika, Avtomatizacija, Upravlenie*, 2013, no 6, pp. 14–21 (in Russian).

7. Pshikhopov V. H., Medvedev M. Ju., Gajduk A. R., Nejdorf R. A., Beljaev V. E., Fedorenko R. V., Kostjukov V. A., Krukhmalev V. A. *Sistema pozicijno-traekornogo upravlenija robotizirovannoj vozduhoplavitel'noj platformoj: algoritmy upravlenija* (System of position-trajectory control for robotic airship: control algorithms), *Mekhatronika, Avtomatizacija, Upravlenie*, 2013, no 7, pp. 13–20 (in Russian).

8. Pshikhopov V. H. *Dirizhabli: perspektivy ispol'zovanija v robototekhnike* (Airships: perspectives for robotics), *Mekhatronika, Avtomatizacija, Upravlenie*, 2004, no. 5, pp. 15–20 (in Russian).

9. Zemljakov S. D., Rutkovskij V. Ju. *O nekotoryh rezul'tatah razvitiya teorii i praktiki primenenija bespoiskovyh adaptivnyh sistem* (About some results of the un-searched adaptive systems theory and applications), *Avtomatika i Telemechanika*, 2001, no 7, pp. 103–121 (in Russian).

10. Putov V. V. *Prjamyje i neprjamyje bespoiskovyje adaptivnye sistemy s mazhorirujushimi funkcijami i ih prilozhenija k upravleniju mnogostepennymi nelinejnymi uprugimi mehanicheskimimi ob'ektami* (Direct and indirect unsearched adaptive systems with majorized functions and applications for control of multidegree nonlinear elastic mechanical objects), *Mekhatronika, Avtomatizacija, Upravlenie*, 2007, no 10, pp. 4–11 (in Russian).

11. Medvedev M. Ju. *Algoritmy adaptivnogo upravlenija ispolnitel'nymi privodami* (Algorithms of adaptive control for actuators), *Mekhatronika, Avtomatizacija, Upravlenie*, 2006, no 6, pp. 17–22 (in Russian).

12. Pshikhopov V. H., Medvedev M. Ju. *Sintez adaptivnyh sistem upravlenija letatel'nymi apparatami* (Design of adaptive control systems

for aircrafts), *Izvestija JuFU. Tehnicheskie Nauki*, 2010, no 3 (104), pp. 187–196 (in Russian).

13. Pshihopov V. H., Fedotov A. A., Mcdvedev M. Ju., Medvedeva T. N., Gurenko B. V. *Pozicionno-traektorijaja sistema prjamogo adaptivnogo upravlenija morskimi podvizhnymi ob'ektami* (Position-path system of the direct adaptive control for marine vehicles), *Inzhenernyj Vestnik Dona*, 2014, no 3 (in Russian).

14. Rutkovskij V. Ju., Glumov V. M., Suhanov V. M. *Fizicheski realizuemyj algoritm adaptivnogo upravlenija s jetalonnoj model'ju* (Physically realizable algorithm of the adaptive control with reference model), *Avtomatika i Telemekhanika*, 2011, no 8, pp. 96–108 (in Russian).

15. Zemljakov S. D., Rutkovskij V. Ju. *Algoritm funkcionirovanij a adaptivnoj sistemy s jetalonnoj model'ju, garantirujushhij zadannuju dinamicheskiju tochnost' upravlenija nestacionarnym dinamicheskim ob'ektom v uslovijah neo-predelennosti* (Algorithm of the adaptive sys-

tem with reference model, ensuring given dynamic error for non-stationary dynamic object with uncertainty), *Avtomatika i Telemekhanika*, 2009, no 10, pp. 35–44 (in Russian).

16. Glumov V. M., Zemljakov S. D., Rutkovskij V. Ju., Suhanov V. M. *Primenenie principa postroenija adaptivnyh sistem s jetalonnoj model'ju k zadacham monitoringa tekushhego sostojanija transmissionnyh valov* (Application of the adaptive systems with reference model theory for monitoring of transmission shafts state), *Avtomatika i Telemekhanika*, 2003, no 5, pp. 131–146 (in Russian).

Corresponding autor:

Pshihopov Vyatcheslav Kh., Head of Department, Professor, Dr. Sci. Tech., Southern Federal University, 347928, Taganrog, Russian Federation, e-mail: pshichop@rambler.ru

УДК 517.72

В. Г. Козырев, канд. техн. наук, доц., vldr.kzrv@yandex.ru,
Севастопольский государственный университет

Асимптотическое разложение закона терминального управления выходом разнотемповых систем

Получено рациональное по форме асимптотическое разложение закона терминального управления выходом разнотемповых систем в форме синтеза. Использование пограничных функций делает его равномерным на отрезке времени управления. Для разложения доказаны усиленные оценки точности.

Ключевые слова: терминальное управление, разнотемповая динамика, малый параметр, сингулярные возмущения, асимптотическое приближение, метод пограничного слоя

Введение

Многие современные технологии связаны с необходимостью приведения движущихся объектов в заданное положение за конечный промежуток времени. Такая проблема возникает, например, в задачах автоматической посадки самолета, позиционирования исполнительного органа технологической установки, перемещения мобильного робота в заданную точку на местности и т. п. Последовательность физических воздействий, подаваемых на объект для достижения указанной цели, принято называть терминальным управлением.

Разработка законов терминального управления осуществляется в основном с помощью методов оптимального управления. Критерий оптимальности содержит в этом случае специальный, терминальный, член, выражающий штраф за промах, т. е. за отклонение конечного положения объекта от заданного, либо на правый конец траектории накладываются ограничения. При использовании квадратичного критерия и линейной математической модели объекта решение удается довести до получения замкнутого закона управления — в форме обратной связи. Данному подходу посвящено множество работ, представленных в обзоре [1].

Математическое решение терминальной задачи не означает, однако, успешного завершения разработки закона управления. Одной из причин возможных затруднений может послужить особый характер

динамики, встречающийся у многих движущихся объектов. Он состоит в наличии у них медленных поступательных и быстрых вращательных собственных движений. Такая разнотемповость, разномасштабность процессов по времени усложняет численное решение задачи. Когда постоянные времени движений разнесены, приходится вычислять с малым шагом интегрирования быстропеременные составляющие движений на больших временных интервалах и оперировать при этом плохо обусловленными матрицами. Указанная особенность известна под названием жесткости систем.

Несмотря на принципиальный характер возникающих затруднений, фактор разнотемповости может быть обращен, тем не менее, на пользу исследованиям. Это удается сделать, если попытаться применить асимптотические методы. Они позволяют составлять приближенные уравнения, которыми описываются быстрые и медленные составляющие по отдельности. Эти уравнения можно считать на компьютере — каждое в своем масштабе времени [1, 2]. В результате не только устраняются трудности моделирования, связанные с жесткостью систем, но и упрощаются сами модели систем. Данное положение относится и к законам управления разнотемповыми объектами: законы становятся проще, если разделить их на быстрые и медленные компоненты.

Свойство разнотемповости математически моделируется путем введения малого множителя при части производных уравнений системы. Те перемен-