

ISSN 1991-3494

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ
ҰЛТТЫҚ ҒЫЛЫМ АКАДЕМИЯСЫНЫҢ

Х А Б А Р Ш Ы С Ы

ВЕСТНИК

НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

THE BULLETIN

OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES
OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

1944 ЖЫЛДАН ШЫҒА БАСТАҒАН
ИЗДАЕТСЯ С 1944 ГОДА
PUBLISHED SINCE 1944

4

АЛМАТЫ
АЛМАТЫ
ALMATY

2015

ШІЛДЕ
ИЮЛЬ
JULY

Б а с р е д а к т о р

ҚР ҰҒА академигі

М. Ж. Жұрынов

Р е д а к ц и я а л қ а с ы :

биол. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА академигі **Айтхожина Н.А.**; тарих ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА академигі **Байпақов К.М.**; биол. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА академигі **Байтулин И.О.**; биол. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА академигі **Берсімбаев Р.И.**; хим. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА академигі **Газалиев А.М.**; а.-ш. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА академигі **Дүйсенбеков З.Д.**; а.-ш. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА академигі **Елешев Р.Е.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА академигі **Қалменов Т.Ш.**; фил. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА академигі **Нысанбаев А.Н.**; экон. ғ. докторы, проф., ҰҒА академигі **Сатубалдин С.С.**; тарих ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Әбжанов Х.М.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Әбішев М.Е.**; техн. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Әбішева З.С.**; техн. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Абсадықов Б.Н.** (бас редактордың орынбасары); а.-ш. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Баймұқанов Д.А.**; тарих ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Байтанаев Б.А.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Давлетов А.Е.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Қалимолдаев М.Н.**; геогр. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Медеу А.**; техн. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Мырхалықов Ж.У.**; биол. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Огарь Н.П.**; техн. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Таткеева Г.Г.**; а.-ш. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Үмбетаев И.**

Р е д а к ц и я к е ñ е с і :

Ресей ҒА академигі **Велихов Е.П.** (Ресей); Әзірбайжан ҰҒА академигі **Гашимзаде Ф.** (Әзірбайжан); Украинаның ҰҒА академигі **Гончарук В.В.** (Украина); Армения Республикасының ҰҒА академигі **Джрбашян Р.Т.** (Армения); Ресей ҒА академигі **Лаверов Н.П.** (Ресей); Молдова Республикасының ҰҒА академигі **Москаленко С.** (Молдова); Молдова Республикасының ҰҒА академигі **Рудик В.** (Молдова); Армения Республикасының ҰҒА академигі **Сагян А.С.** (Армения); Молдова Республикасының ҰҒА академигі **Тодераш И.** (Молдова); Тәжікстан Республикасының ҰҒА академигі **Якубова М.М.** (Тәжікстан); Молдова Республикасының ҰҒА корр. мүшесі **Лупашку Ф.** (Молдова); техн. ғ. докторы, профессор **Абиев Р.Ш.** (Ресей); техн. ғ. докторы, профессор **Аврамов К.В.** (Украина); мед. ғ. докторы, профессор **Юрген Аппель** (Германия); мед. ғ. докторы, профессор **Иозеф Банас** (Польша); техн. ғ. докторы, профессор **Гарабаджиу** (Ресей); доктор PhD, профессор **Ивахненко О.П.** (Ұлыбритания); хим. ғ. докторы, профессор **Изабелла Новак** (Польша); хим. ғ. докторы, профессор **Полещук О.Х.** (Ресей); хим. ғ. докторы, профессор **Поняев А.И.** (Ресей); профессор **Мохд Хасан Селамат** (Малайзия); техн. ғ. докторы, профессор **Хрипунов Г.С.** (Украина)

Главный редактор

академик НАН РК

М. Ж. Журинов

Редакционная коллегия:

доктор биол. наук, проф., академик НАН РК **Н.А. Айтхожина**; доктор ист. наук, проф., академик НАН РК **К.М. Байпаков**; доктор биол. наук, проф., академик НАН РК **И.О. Байтулин**; доктор биол. наук, проф., академик НАН РК **Р.И. Берсимбаев**; доктор хим. наук, проф., академик НАН РК **А.М. Газалиев**; доктор с.-х. наук, проф., академик НАН РК **З.Д. Дюсенбеков**; доктор сельскохоз. наук, проф., академик НАН РК **Р.Е. Елешев**; доктор физ.-мат. наук, проф., академик НАН РК **Т.Ш. Кальменов**; доктор фил. наук, проф., академик НАН РК **А.Н. Нысанбаев**; доктор экон. наук, проф., академик НАН РК **С.С. Сатубалдин**; доктор ист. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **Х.М. Абжанов**; доктор физ.-мат. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **М.Е. Абишев**; доктор техн. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **З.С. Абишева**; доктор техн. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **Б.Н. Абсадыков** (заместитель главного редактора); доктор с.-х. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **Д.А. Баймуканов**; доктор ист. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **Б.А. Байтанаев**; доктор физ.-мат. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **А.Е. Давлетов**; доктор физ.-мат. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **М.Н. Калимолдаев**; доктор геогр. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **А. Медеу**; доктор техн. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **Ж.У. Мырхалыков**; доктор биол. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **Н.П. Огарь**; доктор техн. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **Г.Г. Таткеева**; доктор сельскохоз. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **И. Умбетаев**

Редакционный совет:

академик РАН **Е.П. Велихов** (Россия); академик НАН Азербайджанской Республики **Ф. Гашимзаде** (Азербайджан); академик НАН Украины **В.В. Гончарук** (Украина); академик НАН Республики Армения **Р.Т. Джрбашян** (Армения); академик РАН **Н.П. Лаверов** (Россия); академик НАН Республики Молдова **С. Москаленко** (Молдова); академик НАН Республики Молдова **В. Рудик** (Молдова); академик НАН Республики Армения **А.С. Сагиян** (Армения); академик НАН Республики Молдова **И. Тодераш** (Молдова); академик НАН Республики Таджикистан **М.М. Якубова** (Таджикистан); член-корреспондент НАН Республики Молдова **Ф. Лупашку** (Молдова); д.т.н., профессор **Р.Ш. Абиев** (Россия); д.т.н., профессор **К.В. Аврамов** (Украина); д.м.н., профессор **Юрген Аппель** (Германия); д.м.н., профессор **Иозеф Банас** (Польша); д.т.н., профессор **А.В. Гарабаджиу** (Россия); доктор PhD, профессор **О.П. Ивахненко** (Великобритания); д.х.н., профессор **Изабелла Новак** (Польша); д.х.н., профессор **О.Х. Полещук** (Россия); д.х.н., профессор **А.И. Поняев** (Россия); профессор **Мохд Хасан Селамат** (Малайзия); д.т.н., профессор **Г.С. Хрипунов** (Украина)

«Вестник Национальной академии наук Республики Казахстан». ISSN 1991-3494

Собственник: РОО «Национальная академия наук Республики Казахстан» (г. Алматы)

Свидетельство о постановке на учет периодического печатного издания в Комитете информации и архивов Министерства культуры и информации Республики Казахстан №5551-Ж, выданное 01.06.2006 г.

Периодичность: 6 раз в год

Тираж: 2000 экземпляров

Адрес редакции: 050010, г. Алматы, ул. Шевченко, 28, ком. 219, 220, тел. 272-13-19, 272-13-18.

www: nauka-nanrk.kz, bulletin-science.kz

© Национальная академия наук Республики Казахстан, 2015

Адрес типографии: ИП «Аруна», г. Алматы, ул. Муратбаева, 75

Editor in chief

M. Zh. Zhurinov,
academician of NAS RK

Editorial board:

N.A. Aitkhozhina, dr. biol. sc., prof., academician of NAS RK; **K.M. Baipakov**, dr. hist. sc., prof., academician of NAS RK; **I.O. Baitulin**, dr. biol. sc., prof., academician of NAS RK; **R.I. Bersimbayev**, dr. biol. sc., prof., academician of NAS RK; **A.M. Gazaliyev**, dr. chem. sc., prof., academician of NAS RK; **Z.D. Dyusenbekov**, dr. agr. sc., prof., academician of NAS RK; **R.Ye. Yeleshev**, dr. agr. sc., prof., academician of NAS RK; **T.Sh. Kalmenov**, dr. phys. math. sc., prof., academician of NAS RK; **A.N. Nysanbayev**, dr. phil. sc., prof., academician of NAS RK; **S.S. Satubaldin**, dr. econ. sc., prof., academician of NAS RK; **Kh.M. Abzhanov**, dr. hist. sc., prof., corr. member of NAS RK; **M.Ye. Abishev**, dr. phys. math. sc., prof., corr. member of NAS RK; **Z.S. Abisheva**, dr. eng. sc., prof., corr. member of NAS RK; **B.N. Absadykov**, dr. eng. sc., prof., corr. member of NAS RK (deputy editor); **D.A. Baimukanov**, dr. agr. sc., prof., corr. member of NAS RK; **B.A. Baytanayev**, dr. hist. sc., prof., corr. member of NAS RK; **A.Ye. Davletov**, dr. phys. math. sc., prof., corr. member of NAS RK; **M.N. Kalimoldayev**, dr. phys. math. sc., prof., corr. member of NAS RK; **A. Medeu**, dr. geogr. sc., prof., corr. member of NAS RK; **Zh.U. Myrkhalykov**, dr. eng. sc., prof., corr. member of NAS RK; **N.P. Ogar**, dr. biol. sc., prof., corr. member of NAS RK; **G.G. Tatkeeva**, dr. eng. sc., prof., corr. member of NAS RK; **I. Umbetayev**, dr. agr. sc., prof., corr. member of NAS RK

Editorial staff:

E.P. Velikhov, RAS academician (Russia); **F. Gashimzade**, NAS Azerbaijan academician (Azerbaijan); **V.V. Goncharuk**, NAS Ukraine academician (Ukraine); **R.T. Dzhrbashian**, NAS Armenia academician (Armenia); **N.P. Laverov**, RAS academician (Russia); **S.Moskalenko**, NAS Moldova academician (Moldova); **V. Rudic**, NAS Moldova academician (Moldova); **A.S. Sagiyan**, NAS Armenia academician (Armenia); **I. Toderas**, NAS Moldova academician (Moldova); **M. Yakubova**, NAS Tajikistan academician (Tajikistan); **F. Lupaşcu**, NAS Moldova corr. member (Moldova); **R.Sh. Abiyev**, dr.eng.sc., prof. (Russia); **K.V. Avramov**, dr.eng.sc., prof. (Ukraine); **Jürgen Appel**, dr.med.sc., prof. (Germany); **Joseph Banas**, dr.med.sc., prof. (Poland); **A.V. Garabadzhiu**, dr.eng.sc., prof. (Russia); **O.P. Ivakhnenko**, PhD, prof. (UK); **Isabella Nowak**, dr.chem.sc., prof. (Poland); **O.Kh. Poleshchuk**, chem.sc., prof. (Russia); **A.I. Ponyaev**, dr.chem.sc., prof. (Russia); **Mohd Hassan Selamat**, prof. (Malaysia); **G.S. Khripunov**, dr.eng.sc., prof. (Ukraine)

Bulletin of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan.
ISSN 1991-3494

Owner: RPA "National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan" (Almaty)

The certificate of registration of a periodic printed publication in the Committee of Information and Archives of the Ministry of Culture and Information of the Republic of Kazakhstan N 5551-Ж, issued 01.06.2006

Periodicity: 6 times a year

Circulation: 2000 copies

Editorial address: 28, Shevchenko str., of. 219, 220, Almaty, 050010, tel. 272-13-19, 272-13-18,
<http://nauka-nanrk.kz/>, <http://bulletin-science.kz>

© National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, 2015

Address of printing house: ST "Aruna", 75, Muratbayev str, Almaty

STUDING THE PROPERTIES OF THE ROBUSTNESS OF CONTROL ALGORITHMS ACTIVE MAGNETIC LEVITATION

K. A. Ozhikenov, A. D. Abildayeva

Kazakh National Technical University named after K. I. Satpayev, Almaty, Kazakhstan

Key words: active magnetic levitation, nonlinear control, sliding mode, sigmoid function, linear control law, algorithm, object management, stabilization.

Abstract. The basic idea of the use of electric and magnetic fields for the active magnetic suspension exist for many years. It may be noted that the development of instrument making and mechanical engineering major progress of the active magnetic suspension.

As a model of active magnetic suspension can be considered a device that allows you to stabilize the steel ball in a magnetic suspension. This device is part of a complete magnetic bearing.

The purpose of management is the task of stabilizing the object in a certain position. Such an object can be a steel ball or a certain shaft assembly. It may also be considered the problem of tracking certain command signal that sets the desired position of an object in a magnetic suspension as a known function of time. The substantiation of the traditional mathematical model of single-axis active magnetic suspension.

The article have been developed and investigated nonlinear control algorithms for active magnetic suspension in solving the problem of stabilization given command signal. The analyses of non-linear model of the control object.

A procedure for the synthesis of the control loop on the basis of linerizatsi feedback. The stability of the selected control algorithms. A comparative analysis of the three management methods, as well as an analysis of the robustness of the developed algorithms based on computer simulation.

УДК 681.513.6'114(043)

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ РОБАСТНОСТИ АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ АКТИВНЫМ МАГНИТНЫМ ПОДВЕСОМ

К. А. Ожикенов, А. Д. Абилдаева

Казахский национальный университет им. К. И. Сатпаева, Алматы, Казахстан

Ключевые слова: активный магнитный подвес, нелинейное управление, скользящий режим, сигмоидная функция, линейный закон управления, алгоритм, объект управления, стабилизация.

Аннотация. Основная идея использование электрических и магнитных полей для активного магнитного подвеса существует в течение многих годов. Можно отметить, что развитие приборостроения и машиностроения основной прогресс развития активного магнитного подвеса.

В качестве модели активного магнитного подвеса можно рассмотреть устройство, которое позволяет стабилизировать стальной шарик в магнитном подвесе. Данное устройство является частью полного магнитного подшипника.

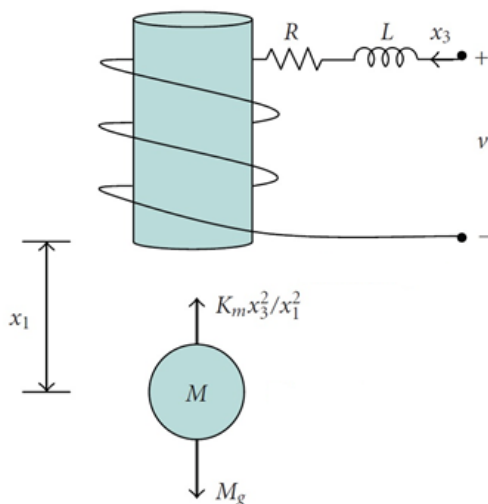
Целью управления является задача стабилизации некоего объекта в заданном положении. Таким объектом может быть стальной шарик или вал некоего агрегата. Также может быть рассмотрена задача слежения за неким командным сигналом, который задает требуемое положение предмета в магнитном подвесе, как известную функцию времени. Дается обоснование традиционной математической модели одноосного активного магнитного подвеса.

В статье были разработаны и исследованы алгоритмы нелинейного управления активным магнитным подвесом при решении задачи стабилизации заданного командного сигнала. Проведен анализ нелинейной модели объекта управления.

Разработана процедура синтеза контура управления на основе метода линеаризации обратной связью. Доказана устойчивость выбранных алгоритмов управления. Проведен сравнительный анализ трех методов управления, а также проведен анализ робастности разработанных алгоритмов на основе компьютерного моделирования.

Введение. Активный магнитный подшипник – это управляемое электромагнитное устройство, которое поддерживает вращающуюся часть машины (ротор) в заданной позиции относительно неподвижной части (статора).

В качестве модели активного магнитного подвеса можно рассмотреть устройство, которое позволяет стабилизировать стальной шарик в магнитном подвесе. Данное устройство является частью полного магнитного подшипника [1]. Принцип действия показан на рисунке:



Принцип действия активного магнитного подвеса

Для шарика в магнитном подвесе в [2] получена модель вида:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = g - \frac{c}{m} \left(\frac{x_3}{x_1}\right)^2 \\ \dot{x}_3 = -\frac{R}{L(x_1)} x_3 + \frac{2c}{L(x_1)} \frac{x_2 x_3}{x_1^2} + \frac{1}{L(x_1)} u, \end{cases} \quad (1)$$

где x_1 – перемещение шарика; x_2 – скорость перемещения шарика; x_3 – ток; $L(x_1)$ – индуктивность, $L(x_1) = L_1 + \frac{2c}{x_1}$.

Методы исследования

1. Задача стабилизации шарика в магнитном подвесе. Пусть требуется стабилизировать шарик в положении x_{1d} . Тогда точка равновесия системы (1) будет $(x_{1d}, 0, x_{3d})$, где

$$x_{3d} = \sqrt{\frac{gm}{c}} x_{1d}.$$

Приведем систему (1) к нормальной форме [3]. Для этого введем новые фазовые координаты:

$$\begin{cases} z_1 = x_1 - x_{1d} \\ z_2 = x_2 \\ z_3 = g - \frac{c}{m} \left(\frac{x_3}{x_1}\right)^2. \end{cases} \quad (2)$$

Заметим, что z_3 – ускорение перемещения шарика. В новых координатах система примет вид:

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = z_2 \\ \dot{z}_2 = z_3 \\ \dot{z}_3 = f_1(x) + g_1(x)u \end{cases} \quad (3)$$

где

$$f_1(x) = \frac{2C}{m} \left(\left(1 - \frac{2C}{L(x_1)x_1} \right) \frac{x_2 x_3^2}{x_1^3} + \frac{R}{L(x_1)} \frac{x_3^2}{x_1^2} \right)$$

$$g_1(x) = -\frac{2C}{L(x_1)m} \frac{x_3}{x_1^2}$$

Для управления объектом (3) можно использовать метод линеаризации обратной связью [3]. Для этого возьмем управление в виде:

$$u = \frac{1}{g_1(x)} (-f_1(x) + V), \quad (4)$$

где V новое управление.

Подставляем (4) в (3), получаем:

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = z_2 \\ \dot{z}_2 = z_3 \\ \dot{z}_3 = V \end{cases} \quad (5)$$

Таким образом, мы получили линейную систему, для которой нужно определить управление V . Выражения (4) можно применять к системе (3) поскольку ток x_3 в выражении для $g_1(x)$ никогда не равен нулю и всегда положителен. Аналогично для x_1 - это всегда положительная величина не равная нулю.

2. Синтез линейного алгоритма управления. Предположим, что нам доступен для измерения весь фазовый вектор системы (1) и, соответственно, системы (5).

Возьмем следующий закон управления V для системы (2.5)

$$V = -\lambda_1 z_3 - \lambda_2 z_2 - \lambda_3 z_1 - \lambda_4 \int_0^t z_1(\tau) d\tau \quad (6)$$

Введем новую переменную

$$z_0 = \int_0^t z_1(\tau) d\tau$$

Тогда система (5), (6) может быть представлена в виде:

$$\begin{cases} \dot{z}_0 = z_1 \\ \dot{z}_1 = z_2 \\ \dot{z}_2 = z_3 \\ \dot{z}_3 = -\lambda_1 z_3 - \lambda_2 z_2 - \lambda_3 z_1 - \lambda_4 z_0 \end{cases} \quad (7)$$

Система (7) будет устойчивой, если будет устойчив полином [3]:

$$p^4 + \lambda_1 p^3 + \lambda_2 p^2 + \lambda_3 p + \lambda_4 = 0.$$

Выбором распределения корней этого полинома можно обеспечить желаемую динамику системы (5), (6).

3. Синтез нелинейного закона управления. Введем следующую комбинацию выходов системы (5)

$$S(x) = z_3 + k_1 z_2 + k_2 z_1 \quad (8)$$

Другое представление:

$$S(x) = \ddot{z}_1 + k_1 \dot{z}_1 + k_2 z_1$$

Коэффициенты k_1 и k_2 выбираются, так, чтобы $k_1 > 0$ и $k_2 > 0$. Отсюда следует, что полином

$$\rho^2 + k_1\rho + k_2 = 0 - \text{устойчивый}$$

Сделаем замену переменной z_3 на S в системе (5). Из (8) можно получить

$$z_3 = S - k_1z_2 - k_2z_1 \quad (9)$$

Подставив (9) во второе уравнения (5), получим

$$\dot{z}_2 = -k_1z_2 - k_2z_1 + S \quad (10)$$

Продифференцировав (8), получаем

$$\dot{S} = \dot{z}_3 + k_1\dot{z}_1 + k_2\dot{z}_1$$

Отсюда

$$\dot{z}_3 = \dot{S} - k_1\dot{z}_2 - k_2\dot{z}_1 \quad (11)$$

Подставляя (10), (11) в (5), получаем

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = \dot{z}_2 \\ \dot{z}_2 = -k_1z_2 - k_2z_1 + S \\ \dot{S} = k_1z_3 - k_2z_2 + V \end{cases} \quad (12)$$

Возьмем управление V в (2.12) в виде

$$V = -k_1z_3 - k_2z_2 - \alpha \operatorname{sign}(S), \quad (13)$$

где $\alpha > 0$ – параметр

Тогда система (12) примет вид

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = \dot{z}_2 \\ \dot{z}_2 = -k_1z_2 - k_2z_1 + S \\ \dot{S} = -\alpha \operatorname{sign}(S) \end{cases} \quad (14)$$

Проверим устойчивость системы (14). Третье уравнение обеспечивает равенство $S = 0$ за некоторое конечное время t_* , поскольку там возникает скользящий режим [4, 5].

Первые два уравнения в (14) - это линейная система с возмущением в виде S .

Эта линейная система устойчива в силу выбора коэффициентов k_1 и k_2 . Отсюда следует, что при $S = 0$, начиная с момента времени t_* , z_1 и z_2 будут асимптотически стремиться к нулю.

Закон управления (13) дает разрывной сигнал управления, что не всегда приемлемо на практике и приводит нежелательному эффекту под названием chattering (дребезг) [3-5].

Этого эффекта можно избежать, если взять управления (13) в следующем виде [5]:

$$V = -k_1z_3 - k_2z_2 - \alpha \frac{S}{|S|+\varepsilon}, \quad (15)$$

где $\varepsilon > 0$ – достаточно малый параметр.

Подобная функция $\frac{S}{|S|+\varepsilon}$ называется сигмоидной [3], поэтому закон управления (15) мы далее будем называть законом управления с сигмоидной функцией.

Результат исследования. Далее для проверки работоспособности синтезированных алгоритмов было проведено моделирование в системе MATLAB/SIMULINK. Для этого возьмём номинальный режим. В этом режиме сравнивалась работоспособность трех синтезированных законов управления в задаче стабилизации.

Параметры объекта управления были следующими:

$$R_0=27,8 \text{ Ом}$$

$$L_0=0,65 \text{ Н}$$

$$C_0=0,000141 \text{ Н м}^2 \text{ А}^2$$

$$m_0=0,01187 \text{ кг}$$

$$g=9,81 \text{ м/с}^2$$

Начальные условия для фазовых переменных:

$$x_1(0) = 0,015 \text{ м}$$

$$x_2(0) = 0$$

$$x_3(0) = x_2(0) \sqrt{\frac{g \cdot m_0}{c_0}} \text{ А}$$

Требуемое положение шарика в магнитном подвесе:

$$x_{1d} = 0,018 \text{ м}$$

В результате проведенных расчетов были выбраны следующие параметры для законов управления:

1. Линейный закон управления (6)

$$\lambda_1 = 900$$

$$\lambda_3 = 950\,000$$

$$\lambda_2 = 80\,000$$

$$\lambda_4 = 3\,000\,000$$

Эти значения соответствуют следующим корням характеристического уравнения системы (7)

$$-5,8623$$

$$-7,5151$$

$$-84,9404$$

$$-801,6822$$

2. Закон управления на скользящем режиме (13)

$$k_1 = 150$$

$$k_2 = 12\,500$$

$$\lambda = 1000$$

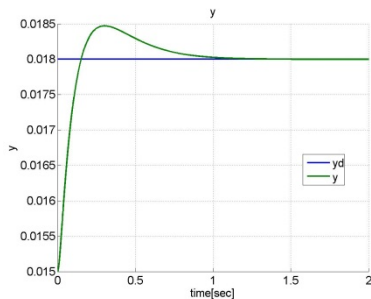
3. Закон управления с сигмоидной функцией (15)

$$k_1 = 150$$

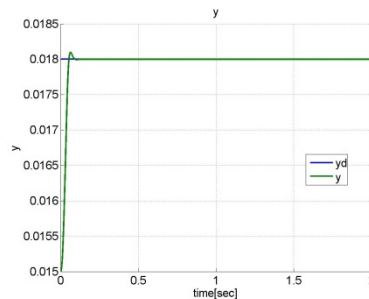
$$k_2 = 12\,500$$

$$\lambda = 1000$$

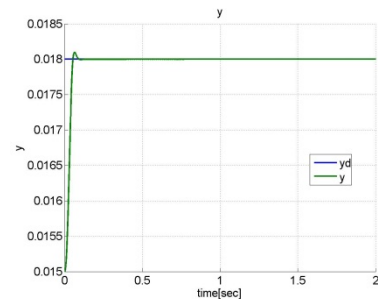
$$\varepsilon = 0,005$$



а)



б)

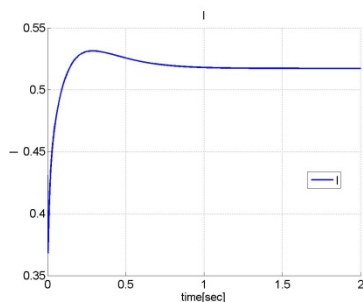


в)

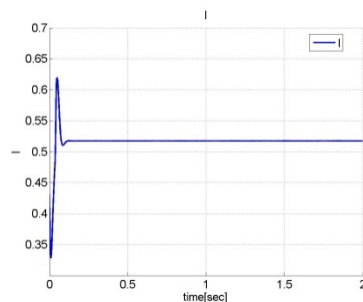
а) График изменения положения шарика в номинальном режиме при линейном законе управления (6)

б) График изменения положения шарика в номинальном режиме при законе управления на скользящем режиме (13)

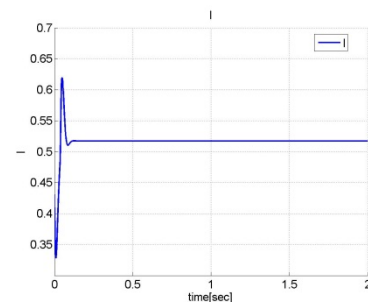
в) График изменения положения шарика в номинальном режиме при законе управления с сигмоидной функцией (15)



а)



б)

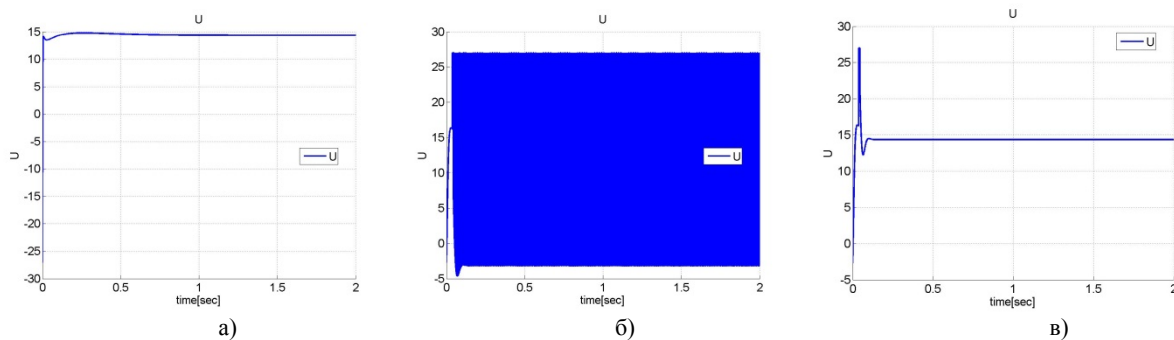


в)

а) График изменения положения шарика в номинальном режиме при линейном законе управления (6)

б) График изменения положения шарика в номинальном режиме при законе управления на скользящем режиме (13)

в) График изменения положения шарика в номинальном режиме при законе управления с сигмоидной функцией (15)



а) График управляющего сигнала в номинальном режиме при линейном законе управления (6)
 б) График управляющего сигнала в номинальном режиме при законе управления на скользящем режиме (13)
 в) График управляющего сигнала в номинальном режиме при законе управления с сигмоидной функцией (15)

Выводы. Алгоритм номинальный режим с линейным законом управления показал невысокое быстродействие. Нелинейные алгоритмы в номинальном режиме при законе управления на скользящем режиме и в номинальном режиме при законе управления с сигмоидной функцией показали высокое быстродействие, но алгоритм номинальном режиме при законе управления на скользящем режиме дает существенно разрывное управление.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Журавлев Ю.Н. Активные магнитные подшипники. Теория, расчет, применение. – Санкт-Петербург: Политехника, 2003. – 206 с.
- [2] Barie W. Linear and nonlinear state-space controllers for magnetic levitation // International Journal of Systems. – 1996. – №11. – P. 1153-1163.
- [3] Khalil H. Nonlinear Systems, 3rd ed. Upper Saddle River. // NJ: Prentice–Hall. 2002.
- [4] Shtessel Y., Edwards C., Fridman L., Levant A. Sliding mode control and observation. // Birkhauser. – 2013.
- [5] Utkin V. I., Guldner J., Shi. Sliding J. Mode Control in Electro-Mechanical Systems // Boca Raton, FL: CRC. – 2009.
- [6] Boerdijk, A.H. Technical aspects of levitation // Philips Res. Rep. – 11. – 1965. – P.45-56.
- [7] Geary, P.J. Magnetic and electric suspensions / BSIRA. – R314. – London, 1964. – 162p.
- [8] Вышков, Ю.Д. В.И. Иванов, Магнитные опоры в автоматике. / М.: Энергия, 1978. – 163с.
- [9] Осокин Ю. А., Станкевич Н.Н. Разработка и применение электромагнитных подвесов в приборостроении // Изв. вузов. Приборостроение. – 1982. - №2.-С.56-59.
- [10] Фролов Б.В. Сравнительный анализ силовых электромагнитных опор // Изв. вузов. Электромеханика. – 1985. - №2.-С. 73-76.

REFERENCES

- [1] Zhuravlev Y. N. Active magnetic bearings. Theory, calculation, application. – St.Peterburg: Politehnica, 2003 – 206 p
- [2] Barie W. Linear and nonlinear state-space controllers for magnetic levitation International Journal of Systems. – 1996. – №11. – P. 1153-1163.
- [3] Khalil H. Nonlinear Systems, 3rd ed. Upper Saddle River. NJ: Prentice–Hall. 2002.
- [4] Shtessel Y., Edwards C., Fridman L., Levant A. Sliding mode control and observation. Birkhauser. – 2013.
- [5] Utkin V. I., Guldner J., Shi. Sliding J. Mode Control in Electro-Mechanical Systems Boca Raton, FL: CRC. – 2009.
- [6] Boerdijk, A.H. Technical aspects of levitation Philips Res. Rep. – 11. – 1965. – P.45-56.
- [7] Geary, P.J. Magnetic and electric suspensions BSIRA. – R314. – London, 1964. – 162p.
- [8] Vyskov, YD VI Ivanov, the magnetic bearing in automation. M.: Energia, 1978. - 163с.
- [9] Osokin Yu, N. Stankevich Development and application of electromagnetic suspension device manufacturing Math. universities. Instrument. - 1982. - №2.-S.56-59.
- [10] Frolov BV Comparative analysis of the power of electromagnetic poles Math. universities. Electromechanics. - 1985. - №2.-С. 73-76.

БЕЛСЕНДІ МАГНИТТІ ІЛМЕСІНІҢ БАСҚАРУ АЛГОРИТІМІНІҢ РОБАСТЫЛЫҚ ҚАСИТЕТЕРІН ЗЕРТТЕУ

Қ. Ә. Өжікенов, А. Д. Абилдаева

Қ. И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық университеті, Алматы, Қазақстан

Тірек сөздер: белсенді магнитті ілме, сызықты емес басқару, жылжымалы режим, сигмоидалық функция, сызықты басқару жүйесі, алгоритм, басқару объектісі, тұрақтандыру.

Аннотация. Мақалада белсенді магнитті ілменің сызықты емес басқару алгоритмінде берілген командалық сигналда тұрақтандыру әдістері зерттелді және жасалынды. Сызықты емес басқару жүйесі моделіне зерттеу жасалынды.

Сызықты кері байланыс әдісі негізінде басқару контур құбылысына талдау жасалынды. Таңдалынып алынған басқару алгоритмдерінің тұрақтылығы дәлелденді. Таңдалынып алынған 3 басқару әдістеріне салыстыру жүргізілді, сонымен қатар талданған алгоритмдерді қолданып компьютерлік модель негізінде робастылық талдау жасалынды.

Поступила 22.05.2015 г.

Publication Ethics and Publication Malpractice in the journals of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan

For information on Ethics in publishing and Ethical guidelines for journal publication see <http://www.elsevier.com/publishingethics> and <http://www.elsevier.com/journal-authors/ethics>.

Submission of an article to the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan implies that the described work has not been published previously (except in the form of an abstract or as part of a published lecture or academic thesis or as an electronic preprint, see <http://www.elsevier.com/postingpolicy>), that it is not under consideration for publication elsewhere, that its publication is approved by all authors and tacitly or explicitly by the responsible authorities where the work was carried out, and that, if accepted, it will not be published elsewhere in the same form, in English or in any other language, including electronically without the written consent of the copyright-holder. In particular, translations into English of papers already published in another language are not accepted.

No other forms of scientific misconduct are allowed, such as plagiarism, falsification, fraudulent data, incorrect interpretation of other works, incorrect citations, etc. The National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan follows the Code of Conduct of the Committee on Publication Ethics (COPE), and follows the COPE Flowcharts for Resolving Cases of Suspected Misconduct (http://publicationethics.org/files/u2/New_Code.pdf). To verify originality, your article may be checked by the Cross Check originality detection service <http://www.elsevier.com/editors/plagdetect>.

The authors are obliged to participate in peer review process and be ready to provide corrections, clarifications, retractions and apologies when needed. All authors of a paper should have significantly contributed to the research.

The reviewers should provide objective judgments and should point out relevant published works which are not yet cited. Reviewed articles should be treated confidentially. The reviewers will be chosen in such a way that there is no conflict of interests with respect to the research, the authors and/or the research funders.

The editors have complete responsibility and authority to reject or accept a paper, and they will only accept a paper when reasonably certain. They will preserve anonymity of reviewers and promote publication of corrections, clarifications, retractions and apologies when needed. The acceptance of a paper automatically implies the copyright transfer to the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan.

The Editorial Board of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan will monitor and safeguard publishing ethics.

Правила оформления статьи для публикации в журнале смотреть на сайте:

www.nauka-nanrk.kz

<http://www.bulletin-science.kz/index.php/ru/>

Редакторы *М. С. Ахметова, Д. С. Аленов*
Верстка на компьютере *Д. Н. Калкабековой*

Подписано в печать 21.07.2015.
Формат 60x881/8. Бумага офсетная. Печать – ризограф.
12,9 п.л. Тираж 2000. Заказ 4.