

# АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ

DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-5-867-875

## MATHEMATICAL MODELING OF ROBUST AUTOMATIC CONTROL SYSTEM OF MAGNETIC LEVITATION WITH UNCERTAIN PARAMETERS

**A. G. Korobeynikov<sup>1,2</sup>, A. P. Nyrkov<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> — ITMO University, St. Petersburg, Russian Federation

<sup>2</sup> — SPbF IZMIRAN, St. Petersburg, Russian Federation

<sup>3</sup> — Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,  
St. Petersburg, Russian Federation

*The topic of the research is the development of automated control systems for real processes, which must satisfy various requirements, for example, resistance to unmodeled dynamics (robust stability), as well as meet the required quality of transient processes that arise in the case of external disturbances of various natures. In this regard, there is a need to create appropriate mathematical models for the control of non-stationary objects, the model of which includes uncertain parameters. The problem of developing and studying a mathematical model for controlling the process of electrodynamic magnetic levitation, the main problem of which is dynamic stability, is considered. It is noted that systems using the effect of magnetic levitation are widely used, for example, in shipbuilding, in elements of ship mechanisms, instrument making, as well as in the transportation of various cargoes. The relevance of the work related to the need to develop such automatic control systems that can suppress the emerging oscillatory motion of levitating bodies is substantiated. The initial mathematical model of the magnetic levitation control process, which has uncertain coefficients in differential equations and is nonlinear, is considered. To “hang” at a given (working) point of a levitating body, it is enough to create a mathematical control model in the vicinity of this point based on the linearization of the original mathematical model. A PID-based controller and feedback are added to the resulting model. The four controller coefficients are adjusted using special algorithms, taking into account the requirements for the robustness of the control system. Numerical experiments are carried out to analyze the behavior of the control system depending on the magnitude of the parameter uncertainty. Based on the analysis performed, a conclusion about the robustness of the developed control system for the object under consideration is made. The results of the study are presented in graphical form. The MATLAB system is used as a toolkit.*

*Keywords: linearization, magnetic levitation, mathematical modeling, parameters uncertainty, robustness, Earnshaw's theorem.*

### For citation:

Korobeynikov, Anatoliy G., and Anatoliy P. Nyrkov. “Mathematical modeling of robust automatic control system of magnetic levitation with uncertain parameters.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 15.5 (2023): 867–875. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-5-867-875.

**УДК 681.5.037.4**

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РОБАСТНОЙ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ МАГНИТНОЙ ЛЕВИТАЦИИ С НЕОПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

**А. Г. Коробейников<sup>1,2</sup>, А. П. Ныркoв<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> — Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Российская Федерация

<sup>2</sup> — СПбФ ИЗМИРАН, Санкт-Петербург, Российская Федерация

<sup>3</sup> — ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,  
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Темой исследования являются разрабатываемые автоматизированные системы управления реальными процессами, которые должны удовлетворять различным требованиям, например, устойчивости к немоделируемой динамике (робастной устойчивости), а также соответствовать необходимому качеству переходных процессов, возникающих в случае внешних возмущений различной природы. В связи с этим появляется необходимость создания соответствующих математических моделей управления нестационарными объектами, модель которых включает неопределенные параметры. Рассмотрена задача разработки и исследования математической модели управления процессом электродинамической магнитной левитации, основной проблемой которого является динамическая устойчивость. Отмечается, что системы, использующие эффект магнитной левитации, находят широкое применение, например, в судостроении, элементах судовых механизмов, приборостроении, а также при транспортировке различных грузов. Обоснована актуальность работ, связанных с необходимостью разработки таких систем автоматического управления, которые могут подавлять возникающее колебательное движение левитирующих тел. Рассмотрена исходная математическая модель процесса управления магнитной левитации, имеющая неопределенные коэффициенты в дифференциальных уравнениях и являющаяся нелинейной. Для «зависания» в заданной (рабочей) точке левитирующего тела достаточно создать математическую модель управления в окрестности этой точки на базе линеаризации исходной математической модели. В полученную модель добавляются контроллер на базе ПИД-регулятора и обратная связь. Четыре коэффициента контроллера настраиваются при помощи специальных алгоритмов с учетом требований к робастности системы управления. Проведены численные эксперименты с целью анализа поведения системы управления в зависимости от величины неопределенности параметров. На основании выполненного анализа сделан вывод о робастности разработанной системы управления рассматриваемым объектом. Результаты исследования представлены в графической форме. В качестве инструментария использована система MATLAB.

Ключевые слова: линеаризация, магнитная левитация, математическое моделирование, неопределенные параметры, робастность, теорема Ирншоу.

#### Для цитирования:

Коробейников А. Г. Математическое моделирование робастной системы автоматического управления магнитной левитации с неопределенными параметрами / А. Г. Коробейников, А. П. Нырков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 5. — С. 867–875. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-5-867-875.

### Введение (Introduction)

Один из самых существенных вопросов при проектировании любой системы автоматического управления (САУ) связан с устойчивостью. Нестабильная система не представляет практической ценности. Это объясняется тем, что любая САУ уязвима к помехам и шумам в реальной рабочей среде и эффект, вызванный этими сигналами, крайне отрицательно отражается на выходе неустойчивой системы [1].

Применение методов управления с обратной связью позволяет существенно уменьшить влияние неопределенностей, что сможет обеспечить требуемые характеристики САУ [2], [3]. Поэтому в настоящее время большой теоретический и практический интерес вызывают исследования, связанные с анализом зависимости устойчивости от степени неопределенности параметров математических моделей (ММ) конкретных САУ [2]–[8]. Это связано с тем, что в ходе реального процесса измерения практически всегда происходят с некоторой неопределенностью, что оказывает влияние на устойчивость процесса управления. Известна фундаментальная роль в изучении устойчивости механических структур теории демпфирования резонансных колебаний гироскопических систем [3] колебаний элементов судовых механизмов [4]. На судах для измерения давления в системах, где возможны кавитация, гидравлические удары или пики давления, применяются одобренные Российским морским регистром судоходства различные преобразователи давления с демпфером [5].

Эффект «парения», возникающий в ходе явления электродинамической магнитной левитации (ЭМЛ) проводящих объектов, нашел применение в магнитных и электрических подвесах, в бесконтактных магнитных и электромагнитных подшипниках [9]. Вращение вала в электромагнитных подшипниках происходит без физического контакта поверхностей друг с другом. В рабо-

тах [10], [11] представлены результаты анализа отказов на судах турбокомпрессоров (ТК) судовых дизель-генераторов. К основным элементам выходящих из строя ТК относятся подшипники качения и скольжения. Применение бесконтактных подшипников на судах позволяет не только исключить масляную систему смазки, которая оказывает существенное влияние на надежность работы ТК, но и повысить механический КПД и маневренность ТК.

Основной проблемой, на решение которой направлены усилия разработчиков САУ левитирующим телом (ЛТ), служит его динамическая неустойчивость. Данная проблема связана с физикой процесса ЛТ и объясняется при помощи теоремы Ирншоу [12], [13]. Согласно этой теореме, неустойчивость ЛТ возникает оттого, что магнитная сила, возникающая вблизи намагниченных тел (магнитов) или проводников с током, в одних случаях имеет одно направление — притяжение, а в других противоположное — отталкивание. Отсюда следует, что применяя только лишь статические электромагнитные поля, невозможно достичь эффекта ЭМЛ. Поэтому для решения данной задачи требуется использовать переменное электромагнитное поле для создания потенциальной ямы в окрестности проведения ЭМЛ. Это требование служит предпосылкой для разработки САУ ЭМЛ. Такие САУ применяют, например, в различных технических устройствах [6]–[9]. Основным направлением исследований в области разработки САУ ЭМЛ является перемещение (перевозка) различных грузов (например, в портовых складах) с целью создания эффективного и автоматического «парящего» транспорта. Исходя из этого, тематика данной публикации, направленная на разработку и исследование ММ САУ, позволяющих управлять динамикой ЛТ, является актуальной.

В предлагаемой работе рассмотрен анализ устойчивости (робастности) ММ ЛТ в зависимости от степени неопределенности ее параметров. В процессе исследования был использован инструмент в виде специализированных программных средств (Toolbox), входящих в MATLAB, позволяющих решать задачи в различных предметных областях [14], [15].

### Методы и материалы (Methods and Materials)

Обычно ММ управления ЛТ в переменном электромагнитном поле разрабатывают на базе теории управления нелинейными и неустойчивыми системами, что, в свою очередь, вызывает определенные трудности при компьютерном моделировании поведения и управления ЭМЛ. В работе рассматривается относительно быстрый физический процесс, имеющий период порядка миллисекунд (мс). За основу ММ управления этим процессом взята модель [16]:

$$\dot{X} = \begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{pmatrix} = AX + Bu = \begin{pmatrix} -\frac{R}{L} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -2\frac{g}{x_{10}} & +2\frac{g}{x_{20}} & -\frac{k_D}{m} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{1}{L} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} u; \quad (1)$$

$$Y = CX = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ y_2 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ x_2 \\ 0 \end{pmatrix},$$

где  $R, L, m$  — сопротивление, индуктивность катушки, и масса ЛТ соответственно;

$x_1, x_2, x_3$  — ток, вертикальное расстояние от центра ЛТ до подложки и напряжение соответственно;

$x_{10}, x_{20}$  — заданные координаты рабочей точки;

$k_D, g$  — коэффициент демпфирования и ускорение свободного падения соответственно.

Анализ на наблюдаемость и управляемость (1), выполненный в работе [9], дал положительный результат. В данной работе неопределенности были внесены в параметры модели (1), что является ее основным отличием от модели в [16]. Что касается устойчивости модели (1) (без неопределенностей), то она устойчива, если устойчива матрица передаточных функций  $M$ :

$$M = \begin{bmatrix} GK(I + GK)^{-1} & G(I + KG)^{-1} \\ K(I + GK)^{-1} & -KG(I + KG)^{-1} \end{bmatrix},$$

где  $G = C(sI - A)^{-1}B + D$  — передаточная функция системы (1);

$K$  — передаточная функция искомого контроллера;

$I$  — единичная матрица соответствующего размера.

При наличии неопределенностей вычисление матрицы  $M$  становится проблематичным и поэтому необходимо применять соответствующие методы. В реальном процессе неопределенности возникают, например, в ходе измерения положения ЛТ и задания величины тока в катушке индуктивности. Поэтому в данной работе для создания замкнутой системы с хорошим запасом устойчивости (робастности), был применен метод Гловера – Макфарлейна [17].

В работе представлены вычислительные эксперименты для двух случаев. В первом случае величина неопределенности задавалась 50 %, во втором — в десять раз меньше, т. е. 5 %. В системе MATLAB неопределенность можно задать, например, следующим образом:

%Расстояние от катушки до подложки 10 см

Uncertainty\_H=5;% Неопределенность в пять процентов

H = ureal('H',10,'Percentage', Uncertainty\_H).

Моделирование осуществлялось при следующих значениях параметров, взятых произвольно:

– с неопределенностями:  $R = 10$ ;  $L = 10$ ;  $H = 10$ ;

– без неопределенностей:  $g = 9,81$ ;  $K_d = 7$ ;  $K_m = 1$ .

Координата рабочей точки задавалась неопределенной величиной:  $z_p = 0,4H$ . После вычисления параметров замкнутой системы с регулятором была создана ее Simulink-модель, при помощи которой можно сделать выводы о робастности созданной модели.

## Результаты (Results)

В ходе проведения вычислительных экспериментов были получены следующие результаты. На рис. 1 приведены результаты расчета переходной функции разомкнутой системы с контроллером с неопределенностью 50 %.

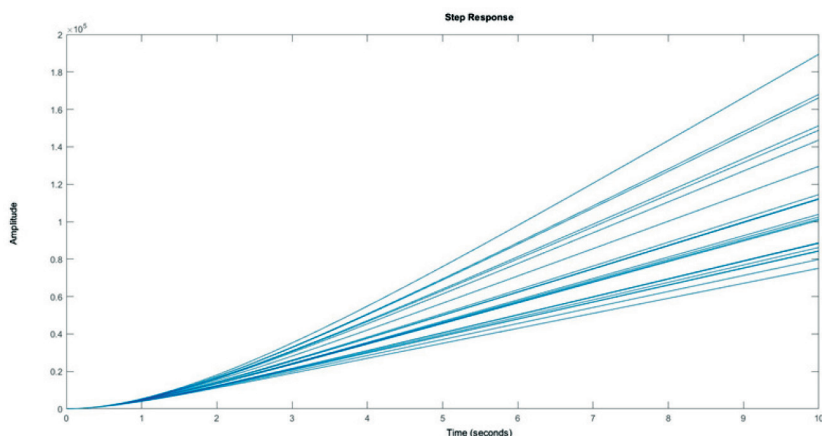
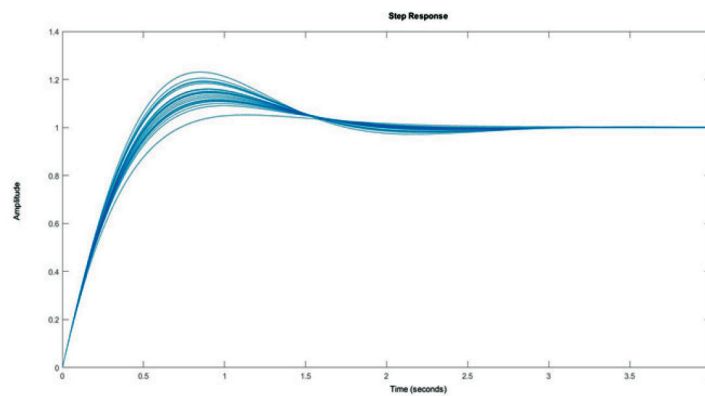


Рис. 1. График переходной функции разомкнутой системы с контроллером для первого вычислительного эксперимента

На рис. 2, а представлены результаты расчета переходной функции для замкнутой системы с ненастроенным ПИД-регулятором с неопределенностью 50 %, на рис. 2, б — для замкнутой системы с настроенным ПИД-регулятором с неопределенностью 50 %.

На рис. 3, а представлены результаты расчета переходной функции для замкнутой системы с ненастроенным ПИД-регулятором с неопределенностью 5 %, на рис. 3, б — для замкнутой системы с настроенным ПИД-регулятором с неопределенностью 5 %.

а)



б)

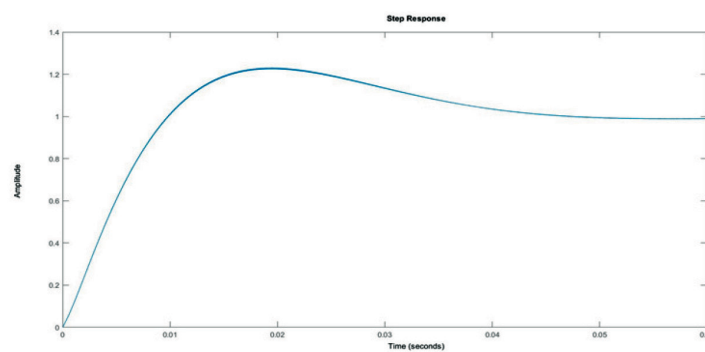
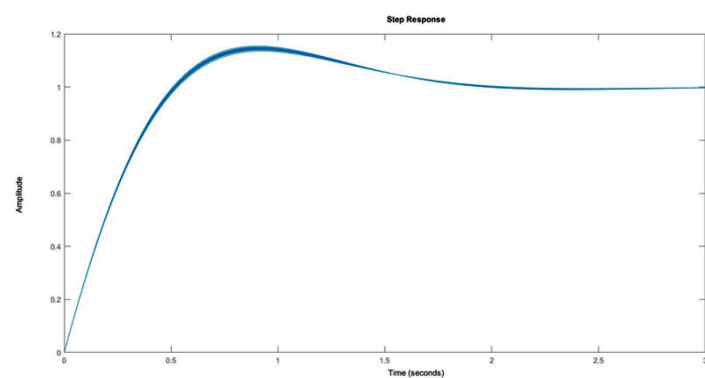


Рис. 2. График переходной функции замкнутой системы для первого вычислительного эксперимента:  
а — с ненастроенным ПИД-регулятором; б — с настроенным ПИД-регулятором

а)



б)

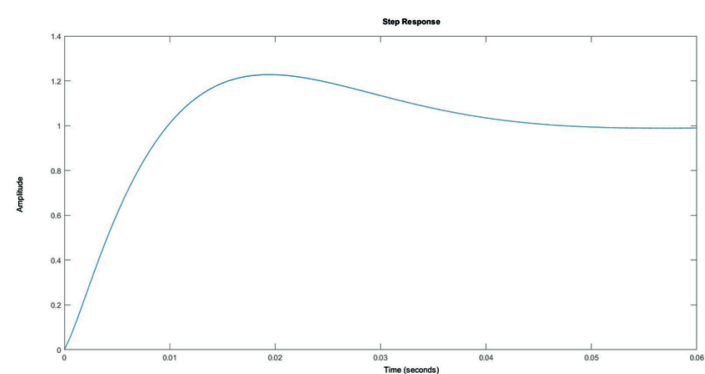


Рис. 3. График переходной функции замкнутой системы для второго вычислительного эксперимента:  
а — с ненастроенным ПИД-регулятором; б — с настроенным ПИД-регулятором

На рис. 4 представлена Simulink-модель разработанной САУ ЛТ.

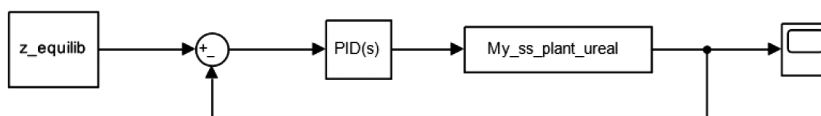


Рис. 4. Simulink-модель разработанной САУ ЛТ

На рис. 5 показан график переходного процесса при работе спроектированной САУ ЛТ.

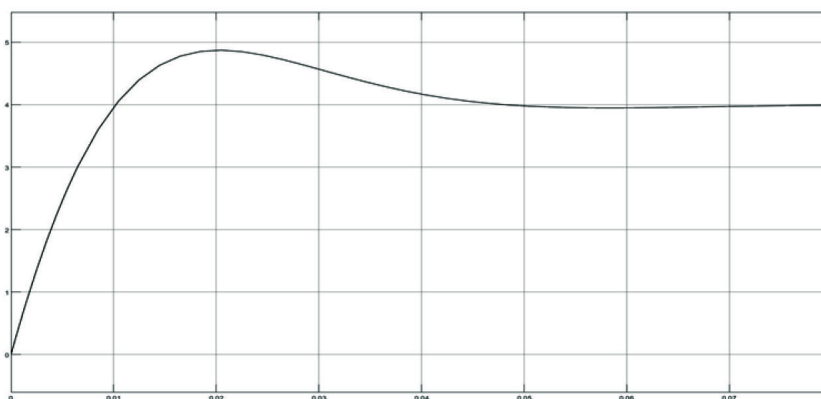


Рис. 5. График переходного процесса при работе предлагаемой САУ ЛТ

Графики переходного процесса, полученные в ходе имитационных экспериментов с Simulink-моделью САУ с неопределенностью параметров в диапазоне 10–45 %, имеют вид, аналогичный приведенному на рис. 1–5.

### Обсуждение (Discussion)

Анализ полученных результатов, представленных в графической форме, позволяет сделать следующие выводы:

1. Рис. 1 в полном соответствии с теоремой Ирншоу свидетельствует о невозможности управления ЛТ САУ без обратной связи.
2. Выбранная структура САУ обладает робастными свойствами, что подтверждено выбором достаточно произвольных коэффициентов регулятора несмотря на то, что переходные характеристики, как видно из рис. 2, не очень хорошие. Тем не менее процесс сходится, становясь через 3 с стабильным. Если настроить коэффициенты регулятора методом Гловера – Макфарлейна, то процесс стабилизируется уже через 0,05 с (см. рис. 2).
3. Еще большая робастность представленной САУ проявляется в системе с меньшей неопределенностью (см. рис. 3), так как в данном случае наблюдается гораздо меньшее перерегулирование.
4. Сравнение рис. 2 и 3 является дополнительным аргументом в пользу робастности представленной САУ. Графики, приведенные на этих рисунках, очень похожи, хотя неопределенность системы на рис. 2 в десять раз выше, чем на рис. 3.
5. Представленная на рис. 4 Simulink-модель в достаточной мере позволяет проанализировать разработанную САУ ЛТ.
6. Рис. 5 показывает, что разработанная САУ через 0,06 с переводит ЛТ из неподвижного состояния в заданный устойчивый «коридор».

### Заключение (Conclusion)

Полученные результаты свидетельствуют о робастности выбранной структуры САУ с отрицательной обратной связью. Выбор номинальных значений параметров модели не оказывает



существенного влияния на конечный результат. Это связано с линейностью модели (1). Кроме того, полученные результаты позволяют сделать вывод об эффективности применения ПИД-регулятора в данной задаче. Следовательно, применение других типов контроллеров, требующих больших вычислительных ресурсов, можно минимизировать.

Исходя из рис. 2 и 3, можно утверждать, что неопределенность параметров системы (1), в силу робастности ее структуры, достаточно слабо влияет на устойчивость всей системы вплоть до значения неопределенности, равного 50 %.

Планирование дальнейших исследований должно базироваться на работе с использованием нелинейных моделей. Это требование обусловлено нелинейностью магнитных устройств, например, соленоидов.

### Благодарности (Acknowledgements)

*Работа выполнена в рамках проекта «Многоуровневое управление сложными техническими системами» НИР 12441 (госзадание 2019–0898).*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белов А. А. Синтез робастного управления параметрически неопределенными линейными системами для подавления случайных внешних возмущений / А. А. Белов, О. Г. Андрианова // Автоматика и телемеханика. — 2020. — № 4. — С. 94–109. DOI: 10.31857/S0005231020040078.
2. Чертков А. А. Параметрическая настройка ПИД-регуляторов динамических систем средствами MatLab / А. А. Чертков, Д. С. Тормашев, С. В. Сабуров // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 5 (27). — С. 164–171.
3. Черников С. А. Демпфирование резонансных колебаний гироскопических систем динамическим гасителем переменной структуры / С. А. Черников, Самер-Салек // Вестник Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. Серия Приборостроение. — 2006. — № 4 (65). — С. 111–125.
4. Андрианов Е. Н. Модальный метод параметрического демпфирования элементов судовых механизмов / Е. Н. Андрианов, В. В. Сахаров, А. Г. Таранин // Журнал университета водных коммуникаций. — 2012. — № 4. — С. 56а–66.
5. Преобразователи давления Danfoss [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://jetpumps.ru/preobrazovateli-davleniya-danfoss> (дата обращения: 18.06.2023).
6. Vo A. T. A Novel Fixed-Time Control Algorithm for Trajectory Tracking Control of Uncertain Magnetic Levitation Systems / A. T. Vo, T. N. Truong, H. J. Kang // IEEE Access. — 2021. — Vol. 9. — Pp. 47698–47712. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3068140.
7. Mirica K. A. Magnetic Levitation in the Analysis of Foods and Water / K. A. Mirica, S. T. Phillips, C. R. Mace, G. M. Whitesides // Journal of agricultural and food chemistry. — 2010. — Vol. 58. — Is. 11. — Pp. 6565–6569. DOI: 10.1021/jf100377n.
8. Qadir Z. A prototype of an energy-efficient MAGLEV train: A step towards cleaner train transport / Z. Qadir, A. Munir, T. Ashfaq, H. S. Munawar, M. A. Khan, K. Le // Cleaner Engineering and Technology. — 2021. — Vol. 4. — Pp. 100217. DOI: 10.1016/j.clet.2021.100217.
9. Повный А. Как устроены и работают бесконтактные магнитные подшипники, их достоинства и недостатки [Электронный ресурс] / А. Повный. — Режим доступа: <https://electricalschool.info/spravochnik/poleznoe/1891-beskontaktnye-magnitnye-podshipniki.html> (дата обращения: 18.06.2023).
10. Николаев Н. И. Повышение эффективности и надежности турбокомпрессоров судовых двигателей в эксплуатации: монография / Н. И. Николаев. — СПб.: Судостроение, 2009. — 230 с.
11. Николаев Н. И. Современное состояние и техническая эксплуатация турбонаддувных агрегатов: монография / Н. И. Николаев, В. А. Савченко. — СПб.: Судостроение, 2005. — 114 с.
12. Фейнман Р. Фейнмановские лекции по физике / Р. Фейнман, Р. Лейтон, М. Сэндс. — М.: Издательство «МИР», 1977. — Т. 5: Электричество и магнетизм. — 300 с.
13. Abanov A. Around a theorem of F. Dyson and A. Lenard: Energy equilibria for point charge distributions in classical electrostatics / A. Abanov, N. Hayford, D. Khavinson, R. Teodorescu // Expositiones Mathematicae. — 2021. — Vol. 39. — Is. 2. — Pp. 182–196. DOI: 10.1016/j.exmath.2021.03.003.

14. Korobeynikov A. G. Calculation of regularization parameter in the problem of blur removal in digital image / A. G. Korobeynikov, A. Y. Grishentsev, E. N. Velichko, C. C. Korikov, S. A. Aleksanin, M. E. Fedosovskii, I. B. Bondarenko // *Optical Memory and Neural Networks*. — 2016. — Vol. 25. — Pp. 184–191. DOI: 10.3103/S1060992X16030036.

15. Гришенцев А. Ю. Понижение размерности пространства при корреляции и свертке цифровых сигналов / А. Ю. Гришенцев, А. Г. Коробейников // *Известия высших учебных заведений. Приборостроение*. — 2016. — Т. 59. — № 3. — С. 211–218. DOI: 10.17586/0021-3454-2016-59-3-211-218.

16. Коробейников А. Г. Проектирование математической модели системы автоматического управления магнитной левитации / А. Г. Коробейников // *Международный журнал гуманитарных и естественных наук*. — 2021. — № 12–2 (63). — С. 15–26. DOI: 10.24412/2500-1000-2021-12-2-15-26.

17. McFarlane D. A loop-shaping design procedure using  $H/\infty$  synthesis / D. McFarlane, K. Glover // *IEEE transactions on automatic control*. — 1992. — Vol. 37. — Is. 6. — Pp. 759–769. DOI: 10.1109/9.256330.

## REFERENCES

1. Belov, A. A., and O. G. Andrianova. “Robust control design for suppressing random exogenous disturbances in parametrically uncertain linear systems.” *Automation and Remote Control* 81.4 (2020): 649–661.

2. Chertkov, A. A., D. S. Tormashev, and S. V. Saburov. “Dynamic systems parametric arrange by means PID tuner in MatLab.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 5(27) (2014): 164–171.

3. Chernikov, S. A., and Samer-Salek. “Damping resonant vibrations of gyroscopic systems by dynamic damper of variable structure.” *Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Instrument Engineering* 4(65) (2006): 111–125.

4. Andrianov, E. N., V. V. Sakharov, and A. G. Taranin. “Modally damped parametric method for ship constructions.” *Zhurnal universiteta vodnykh kommunikatsii* 4 (2012): 56a-66.

5. Preobrazovateli davleniya Danfoss. Web. 18 Jun. 2023 <<https://jetpumps.ru/preobrazovateli-davleniya-danfoss/>>.

6. Vo, Anh Tuan, Thanh Nguyen Truong, and Hee-Jun Kang. “A novel fixed-time control algorithm for trajectory tracking control of uncertain magnetic levitation systems.” *IEEE Access* 9 (2021): 47698–47712. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3068140.

7. Mirica, Katherine A., Scott T. Phillips, Charles R. Mace, and George M. Whitesides. “Magnetic levitation in the analysis of foods and water.” *Journal of agricultural and food chemistry* 58.11 (2010): 6565–6569. DOI: 10.1021/jf100377n.

8. Qadir, Zakria, Arslan Munir, Tehreem Ashfaq, Hafiz Suliman Munawar, Muazzam A. Khan, and Khoa Le. “A prototype of an energy-efficient MAGLEV train: A step towards cleaner train transport.” *Cleaner Engineering and Technology* 4 (2021): 100217. DOI: 10.1016/j.clet.2021.100217.

9. Povnyi, A. “Kak ustroeny i rabotayut beskontaktnye magnitnye podshipniki, ikh dostoinstva i nedostatki.” Web. 18 Jun. 2023 <<https://electricalschool.info/spravochnik/poleznoe/1891-beskontaktnye-magnitnye-podshipniki.html>>.

10. Nikolaev, N. I. *Povyshenie effektivnosti i nadezhnosti turbokompressorov sudovykh dvigatelei v ekspluatatsii*. SPb.: Sudostroenie, 2009.

11. Nikolaev, N. I., and V. A. Savchenko. *Sovremennoe sostoyanie i tekhnicheskaya ekspluatatsiya turbonaduvocnykh agregatov*. SPb.: Sudostroenie, 2005.

12. Feynman, R., R. Layton, and M. Sands. *Feynman Lectures on Physics. Vol. 2 — Mainly Electromagnetism and Matter*. Addison Wesle, 1977.

13. Abanov, Artem, Nathan Hayford, Dima Khavinson, and Razvan Teodorescu. “Around a theorem of F. Dyson and A. Lenard: Energy equilibria for point charge distributions in classical electrostatics.” *Expositiones Mathematicae* 39.2 (2021): 182–196. DOI: 10.1016/j.exmath.2021.03.003.

14. Korobeynikov, A. G., A. Y. Grishentsev, E. N. Velichko, C. C. Korikov, S. A. Aleksanin, M. E. Fedosovskii, and I. B. Bondarenko. “Calculation of regularization parameter in the problem of blur removal in digital image.” *Optical Memory and Neural Networks* 25 (2016): 184–191. DOI: 10.3103/S1060992X16030036.

15. Grishentsev, A. Yu., and A. G. Korobeynikov. “On reduction of space dimension at digital signals correlation and convolution.” *Journal of Instrument Engineering* 59.3 (2016): 211–218. DOI: 10.17586/0021-3454-2016-59-3-211-218.



16. Korobeynikov, A. G. "Designing a mathematical model of a magnetic levitation automatic control system." *Mezhdunarodnyi zhurnal gumanitarnykh i estestvennykh nauk* 12–2(63) (2021): 15–26. DOI: 10.24412/2500–1000–2021–12–2–15–26.

17. McFarlane, Duncan, and Keith Glover. "A loop-shaping design procedure using  $H_{\infty}$  synthesis." *IEEE transactions on automatic control* 37.6 (1992): 759–769. DOI: 10.1109/9.256330.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Коробейников Анатолий Григорьевич** —  
доктор технических наук, профессор  
Университет ИТМО  
197101, Санкт-Петербург, Российская Федерация,  
Кронверкский проспект, д. 49, лит. А  
СПбФ ИЗМИРАН  
199034, Российская Федерация, Санкт-Петербург,  
Университетская наб, д. 5, лит. Б  
e-mail: [Korobeynikov\\_A\\_G@mail.ru](mailto:Korobeynikov_A_G@mail.ru)  
**Ныркв Анатолий Павлович** —  
доктор технических наук, профессор  
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала  
С. О. Макарова»  
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,  
ул. Двинская, 5/7  
e-mail: [kaf.koib@gmail.com](mailto:kaf.koib@gmail.com)

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Korobeynikov, Anatoliy G.** —  
Dr. of Technical Sciences, professor  
ITMO University  
49/A Kronverkskii Ave., St. Petersburg, 197101,  
Russian Federation  
SPbF IZMIRAN  
5/B Universitetskaya Embankment, St. Petersburg,  
199034, Russian Federation  
e-mail: [Korobeynikov\\_A\\_G@mail.ru](mailto:Korobeynikov_A_G@mail.ru)  
**Nyrkov, Anatoliy P.** —  
Dr. of Technical Sciences, professor  
Admiral Makarov State University of Maritime  
and Inland Shipping  
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,  
Russian Federation  
e-mail: [kaf.koib@gmail.com](mailto:kaf.koib@gmail.com)

*Статья поступила в редакцию 31 июля 2023 г.  
Received: July 31, 2023.*