DOI: 10.47026/1810-1909-2023-2-102-111

УДК 004.896, 519.876.5
ББК 32.96

А.Г. КОРОБЕЙНИКОВ, А.Ю. ГРИШЕНЦЕВ

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЕЙ В МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ МАГНИТНОЙ ЛЕВИТАЦИИ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ*

Ключевые слова: *системы автоматического управления, магнитная левитация, переходная функция, робастность, неопределенность, MATLAB.*

Вопрос устойчивости при проектировании систем автоматического управления является одним из основных, потому что нестабильная система не имеет практической значимости. Это связано с тем, что любая система управления уязвима к помехам и шумам в реальной рабочей среде, и эффект, вызванный этими сигналами, отрицательно скажется на ожидаемом нормальном выходе в неустойчивой системе.

Цель исследования *– проектирование и анализ системы автоматического управления с учетом требования робастности на базе H_∞-нормы.*

Материалы и методы*. Построение робастной автоматической системы управления производилось при помощи методов, базирующихся на вычислении соответствующей H_∞-нормы с привлечением методов решения матричного уравнения Риккати. В качестве инструментария использовался MATLAB.*

Результаты исследований. *При наличии неопределенностей важное значение имеют алгоритмы управления, при помощи которых достигается цель управления с заданными требованиями и которые обладают свойством устойчивости при трансформации параметров объекта управления и характеристик воздействий разного рода возмущений. Методы управления с обратной связью позволяют уменьшить влияние неопределенностей и обеспечить желаемую производительность. Однако неадекватный контроллер с обратной связью может привести к нестабильной замкнутой системе, хотя изначально разомкнутая система стабильна. В работе рассматривается задача проектирования стабилизирующего регулятора для системы автоматического управления левитирующим телом с неопределенностями в параметрах. Исходная математическая модель магнитной левитации, служащая объектом управления, выведена на базе второго закона Ньютона и электромагнитной индукции и представляет собой обыкновенное дифференциальное уравнение второго порядка с параметрами, содержащими неопределенности, обусловленные экзогенными или эндогенными факторами. Согласно теореме Ирншоу, такая система, даже с нулевыми величинами неопределенностей в параметрах, изначально неустойчива. С добавлением неопределённостей с ненулевыми величинами ситуация с достижением устойчивости существенно ухудшается. Поэтому необходима разработка специальных автоматических систем управления. Представлены результаты исследования влияния неопределенностей в математической модели магнитной левитации на характеристики ее непрерывной системы автоматического управления с одним входом и одним выходом (SISO-системы) в графической форме.*

Выводы. *Устойчивый эффект магнитной левитации достигается даже при достаточно больших величинах неопределенностей в математической модели объекта управления.*

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

Введение. Разрабатываемые в настоящее время системы автоматического управления (САУ) реальными процессами должны удовлетворять различным требованиям, например, устойчивостью к немоделируемой динамике (робастная устойчивость). Кроме того, они должны обладать требуемым качеством переходных процессов, возникающих в случае внешних возмущений различной природы – экзогенные или эндогенные факторы.

Целью исследований являются разработка и исследование робастной математической модели управления системой магнитной левитации, имеющей неопределенные коэффициенты в дифференциальных уравнениях.

Материалы и методы. В статье рассмотрено проектирование САУ на базе H_∞-нормы [6, 8]. Этот подход был выбран потому, что H_∞-норма характеризует робастность системы по отношению к различного рода неопределенностям. В качестве инструментария использовался MATLAB.

Результаты исследования. Электродинамическая магнитная левитация (ЭМЛ) достаточно интенсивно используется в разнообразных технических системах [5, 7]. В настоящее время имеется значительное количество публикаций, в которых отражены результаты исследований применения ЭМЛ при проектировании высокопроизводительных «парящих» транспортных средств [9].

Эффект ЭМЛ начинает проявляться при определенных условиях. А именно при наличии возле проводящего элемента (проводника) катушки с током или постоянного магнита, который вращается или совершает поступательные движения. При таком условии вокруг проводника возникает переменное магнитное поле, вследствие чего появляются наводки (вихревые токи) в самом проводнике. Эти токи являются причиной генерации магнитного поля противоположной направленности. В этом случае между проводником и источником электромагнитного поля (ЭМП) возникает сила отталкивания. Такой механизм служит основой взаимовлияния левитирующих тел (ЛТ).

Задача динамической устойчивости ЛТ относится к числу основных проблем, связанных с ЭМЛ. Это объясняется теоремой Ирншоу, формулировка которой следующая: «Всякая равновесная конфигурация точечных зарядов неустойчива, если на них кроме кулоновских сил притяжения и отталкивания не действуют иные силы» [4]. Эта теорема верна и для магнитостатики в случае стационарных токов. То есть эта теорема устанавливает запрет на создание устойчивого эффекта ЭМЛ при помощи только лишь статического ЭМП. Следовательно, для создания устойчивого эффекта ЭМЛ требуется генерация с помощью переменного ЭМП, потенциальной ямы в области осуществления ЭМЛ. Такую задачу решают, например, с использованием индукционных катушек, генерирующих переменное ЭМП. Нахождение ЛТ в требуемой области обеспечивается лишь при наличии соответствующего управления этим ЭМП.

Неопределенности в такой системе могут возникать, например, при измерении положения ЛТ, величины электромагнитного поля катушки, зависящего от индуктивности и др. В условиях неопределенности особо важное значение приобретают методы построения робастных САУ, при помощи которых достигается цель управления и которые обладают необходимым запасом устойчивости по отношению к изменяющимся параметрам и возмущениям.

Постановка задачи робастного анализа и синтеза САУ в матричном виде позволяет использовать единообразный подход к ее решению.

Математическая модель динамики левитирующего тела. В данной работе за основу была взята математическая модель (ММ) динамики ЛТ в ЭМП, представленная в [1]:

$$\begin{cases} \dfrac{di(t)}{dt} = -\dfrac{R}{L} i(t) + \dfrac{1}{L} u(t); \\ \dfrac{dz(t)}{dt} = v(t); \\ \dfrac{dv(t)}{dt} = -g + \dfrac{k_m}{m}\left(\dfrac{i(t)}{H - z(t)}\right)^2 - \dfrac{k_D}{m} v(t), \end{cases} \tag{1}$$

где $i(t)$ – электрический ток; $u(t)$ – напряжение (управляющее воздействие); $v(t)$ – вертикальная скорость (изменение высоты) ЛТ; $z(t)$ – вертикальное расстояние от геометрического центра ЛТ до подложки; R – сопротивление; L – индуктивность катушки; k_D – коэффициент демпфирования; k_m – постоянный коэффициент, зависящий от подложки; m – масса ЛТ; H – расстояние от катушки до подложки; t – время.

Основное отличие заключается во введение неопределенностей в параметры ММ. В данной работе неопределенность задавалась в параметрах R, L и H. Анализируя первое уравнение (1), можно видеть, что при условии постоянства напряжения $U(t) = U_0 = \text{const}$, решение:

$$i(t) = -\frac{U_0}{LR}\left(\left(L - R\right)e^{-\frac{R}{L}t} - L\right)$$

быстро устремляется к установившемуся значению

$$i(t) \xrightarrow[t\to\infty]{} \frac{U_0}{R}.$$

А это, как было сказано выше, противоречит теореме Ирншоу. Отсюда следует, что для устойчивого эффекта ЭМЛ необходимо применять переменное электромагнитное поле, управление которым происходит при помощи соответствующей САУ. Следовательно, необходима разработка математической модели САУ ЛТ.

Математическая модель САУ ЛТ. В данной работе формальное выражение математической модели САУ ЛТ приведено в пространстве состояний (State Space) и представлено в следующем виде [3]:

$$\begin{cases} \dot{X} = AX + Bu + Dw; \\ Y = CX, \end{cases} \tag{2}$$

где X – вектор в пространстве состояний размером $n \times 1$; A – квадратная матрица размером $n \times n$; u – вектор управляющих воздействий размером $m \times 1$; B –матрица размером $n \times m$; w – вектор внешних возмущений размером $p \times 1$; D – матрица размером $n \times p$; Y – вектор измерений размером $k \times 1$; C – матрица размером $k \times n$.

«Зависание» ЛТ происходит в области заданной точки равновесия или рабочей точки. То есть математическую модель управления эффектом ЭМЛ (2) можно получить путем линеаризации (1) в окрестности рабочей точки ($i_{равн}$, $z_{равн}$, 0). Введем для удобства следующие обозначения:

$$f_1\left(i(t),U(t)\right)=-\frac{R}{L}i(t)+\frac{1}{L}U(t);$$

$$f_2\left(v(t)\right)=v(t);$$

$$f_3\left(i(t),z(t),v(t)\right)=-g+\frac{k_m}{m}\left(\frac{i(t)}{H-z(t)}\right)^2-\frac{k_D}{m}v(t).$$

Тогда матрица A из (2) вычисляется при помощи матрицы Якоби:

$$A=\left.\begin{pmatrix}\frac{\partial f_1}{di} & \frac{\partial f_1}{dz} & \frac{\partial f_1}{dv}\\ \frac{\partial f_2}{di} & \frac{\partial f_2}{dz} & \frac{\partial f_2}{dv}\\ \frac{\partial f_3}{di} & \frac{\partial f_3}{dz} & \frac{\partial f_3}{dv}\end{pmatrix}\right|_{\substack{i=i_{равн},\\ z=z_{равн},\\ v=0}}=\begin{pmatrix}-\frac{R}{L} & 0 & 0\\ 0 & 0 & 1\\ 2\frac{k_m}{m}\cdot\frac{i_{равн}}{\left(H-z_{равн}\right)^2} & 2\frac{k_m}{m}\cdot\frac{i_{равн}^2}{\left(H-z_{равн}\right)^3} & -\frac{k_D}{m}\end{pmatrix}.$$

Матрица B из (2) вычисляется при помощи следующей матрицы Якоби:

$$B=\begin{pmatrix}\frac{\partial f_1}{dU} & \frac{\partial f_2}{dU} & \frac{\partial f_3}{dU}\end{pmatrix}^T=\begin{pmatrix}\frac{1}{L} & 0 & 0\end{pmatrix}^T.$$

После элементарных преобразований и учета равновесия в рабочей точке, подробно рассмотренных в [1], система (2) примет следующий вид:

$$\dot{X}=\begin{pmatrix}\dot{x}_1\\ \dot{x}_2\\ \dot{x}_3\end{pmatrix}=AX+Bu=\begin{pmatrix}-\frac{R}{L} & 0 & 0\\ 0 & 0 & 1\\ -2\frac{g}{i_{равн}} & +2\frac{g}{z_{равн}} & -\frac{k_D}{m}\end{pmatrix}\begin{pmatrix}x_1\\ x_2\\ x_3\end{pmatrix}+\begin{pmatrix}\frac{1}{L}\\ 0\\ 0\end{pmatrix}U; \qquad (3)$$

$$Y=CX=\begin{pmatrix}0 & 0 & 1\end{pmatrix}\begin{pmatrix}x_1 & x_2 & x_3\end{pmatrix}^T=x_3=y_3,$$

где $x_1=i(t), x_2=v(t), x_3=z(t)$.

Блок-схема замкнутой САУ ЛТ представлена на рис. 1. Здесь К – это контроллер, ОУ – объект управления.

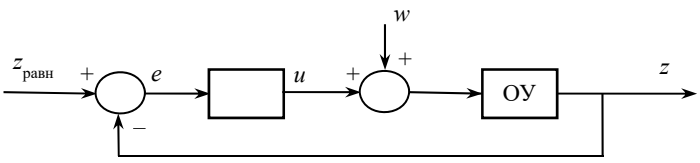


Рис. 1. Блок-схема замкнутой САУ ЛТ

Анализ разработанной математической модели САУ ЛТ. Исследование устойчивости ММ произведем при помощи анализа корней характеристического уравнения системы [2]:

$$\chi_A = \det\left|A - \lambda E\right| = \det\begin{vmatrix} -\dfrac{R}{L} - \lambda & 0 & 0 \\ 0 & -\lambda & 1 \\ -\dfrac{2g}{i_{\text{равн}}} & \dfrac{2g}{z_{\text{равн}}} & -\dfrac{k_D}{m} - \lambda \end{vmatrix} = \tag{4}$$

$$= -mx_{20}\left(\frac{R}{L} + \lambda\right)\left(\lambda^2 + \frac{k_D}{m}\lambda - 2\frac{g}{z_{\text{равн}}}\right) = 0,$$

где E – единичная матрица.

Корнями характеристического уравнения (4) являются следующие:

$$\lambda_1 = -\frac{R}{L};$$

$$\lambda_{2,3} = \frac{-k_D z_{\text{равн}} \pm \sqrt{8m^2 z_{\text{равн}} g + k_D^2 z_{\text{равн}}^2}}{2mz_{\text{равн}}}.$$

Корни уравнения (4) являются вещественными, но один из них больше нуля. Следовательно, система (3) неустойчивая. Отсюда следует необходимость осуществления соответствующего управления для устойчивости процесса ЭМЛ. Можно отметить, что неустойчивость системы (3) не зависит от неопределенности в параметрах R, L и H.

Анализ системы (3) на наблюдаемость и управляемость также дает положительные результаты. Отсюда следует, что системой (3) в окрестности рабочей точки в принципе можно успешно управлять. В данной работе для этого будет добавлен робастный контроллер.

Процедура нахождения робастного контроллера для САУ ЛТ. Непосредственно найти регулятор K, который придаст H_∞-норме замкнутой системы самое маленькое возможное значение, достаточно трудно. Но можно подобрать число γ и, если это в принципе возможно для данной системы, найти регулятор, который гарантирует, что величина H_∞-нормы меньше γ. Поиск соответствующей H_∞-нормы в этом случае происходит при помощи решения матричного уравнения Риккати. Наименьшее число γ можно найти, например, уменьшая γ наполовину на следующем шаге. В случае отсутствия решения уравнения Риккати надо отойти назад и уменьшить, например, шаг тоже вдвое. Поиск прекращается в случае получения достаточно малого числа γ, при котором существует решение.

При помощи MATLAB, используя команду

```
[W,gamma,infocontr] = hinfstruct(W0,opt);
```

где W0 – передаточная всей системы, представленной на рис. 1; opt – опции.

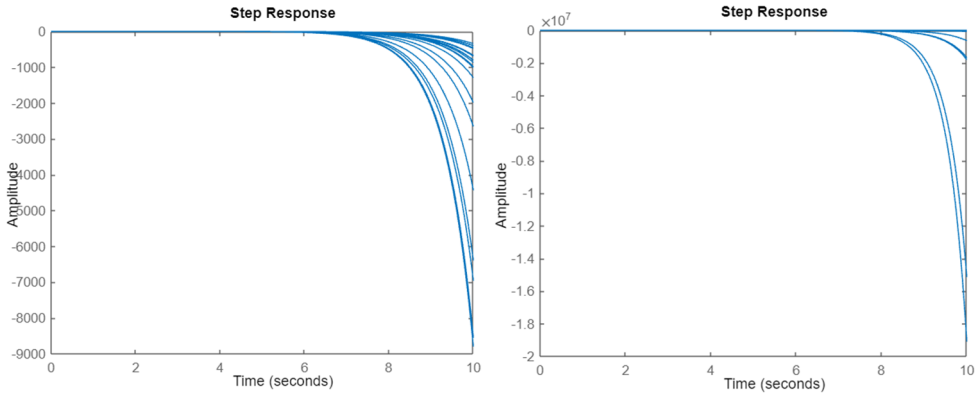
Было вычислено число $\gamma = 1{,}2$ при параметрах, которые будут указаны ниже.

Запас по усилению равен [0; 0,1256], запас по фазе – 58,1693.

Результаты моделирования. При проведении компьютерного моделирования были выбраны следующие параметры:

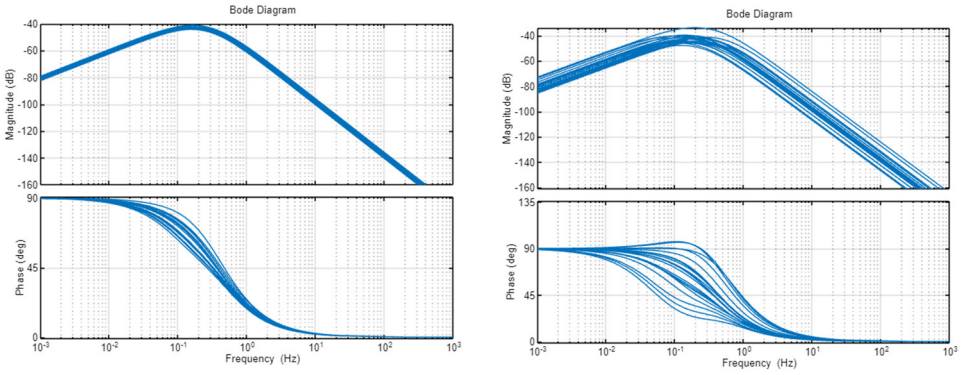
$$R = 10;\ L = 10;\ H = 10;\ m = 5;\ g = 9{,}8;\ K_m = 1;\ K_d = 1.$$

В параметры R, L и H вносилась неопределенность. В первом эксперименте неопределенность задавалась величиной в 20%, а во втором – 70%. На рис. 2 и 3 представлены переходная функция ЛАФЧХ (диаграмма Боде) разомкнутой системы (3).



а *б*

Рис. 2. Переходная функция разомкнутой системы (3):
а – 20% неопределенности; *б* – 70% неопределенности

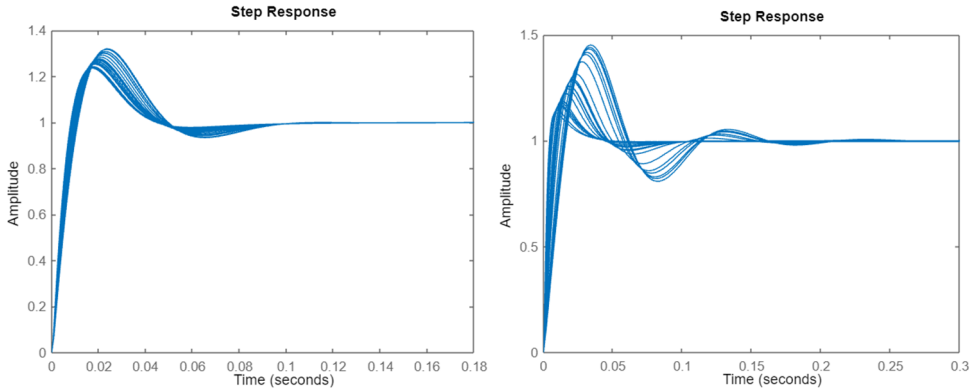


а *б*

Рис. 3. Диаграмма Боде разомкнутой системы (3):
а – 20% неопределенности; *б* – 70% неопределенности

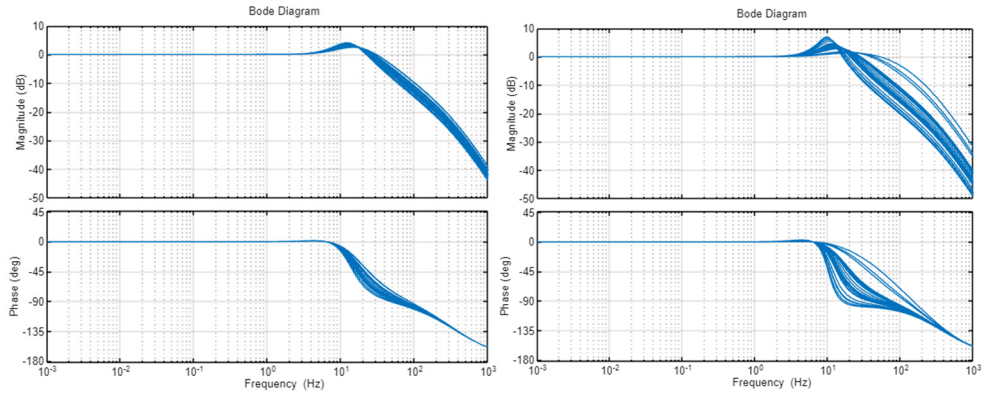
После вычисления регулятора на H_∞-нормы были получены результаты, которые представлены ниже в графическом виде. На рис. 4 и 5 представлены переходная функция и ЛАФЧХ замкнутой системы с регулятором K на базе H_∞-нормы.

Моделирование работы САУ ЛТ с введением в параметры 70% неопределенности проведено в Simulink. Результаты представлены на рис. 6.



а *б*

Рис. 4. Переходная функция замкнутой системы с регулятором K на базе H_∞-нормы:
а – 20% неопределенности; *б* – 70% неопределенности



а *б*

Рис. 5. Диаграмма Боде замкнутой системы с регулятором K на базе H_∞-нормы:
а – 20% неопределенности; *б* – 70% неопределенности

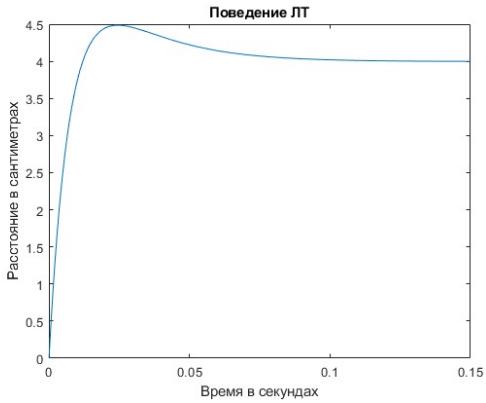


Рис. 6. Результаты моделирования работы САУ ЛТ
с введением в параметры 70% неопределенности

Выводы. Анализ проведенного компьютерного моделирования позволяет сделать следующие выводы.

1. Введение неопределенности в параметры существенно изменяет поведение разомкнутой системы (см. рис. 2–3).

2. Применение робастного регулятора в системе с обратной связью позволяет сделать систему устойчивой. Но показатели качества, такие как, например, время нарастания (Rise time), перерегулирование (Overshoot), лучше у системы с меньшей неопределенностью (см. рис. 4–5).

3. Применение H_∞-нормы при проектировании САУ ЛТ позволяет даже при достаточно больших значениях неопределенностей оставаться всей системе устойчивой. То есть система будет оставаться робастной.

4. Разработанная САУ ЛТ выводит ЛТ в заданную рабочую точку достаточно быстро. Согласно рис. 6 на это потребуется 0,08 с.

Таким образом, применение методов проектирования САУ с использованием на H_∞-нормы позволяет создавать системы с высокой степенью робастности.

Литература

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

2. *Первозванский А.А.* Курс теории автоматического управления. 3-е изд., стер. СПб.: Лань, 2021. 624 с.

3. *Федянин В.П., Монахов О.И., Антонов Д.А.* Моделирование следящих систем с учётом нелинейностей. М.: РУТ (МИИТ), 2019. 46 с.

4. *Abanov A., Hayford N., Khavinson D., Teodorescu R.* Around a theorem of F. Dyson and A. Lenard: Energy equilibria for point charge distributions in classical electrostatics. *Expositiones Mathematicae*, 2021, vol. 39(2), pp. 182–196. DOI: 10.1016/j.exmath.2021.03.003.

5. *Anh Tuan Vo, Thanh Nguyen Truong, Hee-Jun Kang.* A Novel Fixed-Time Control Algorithm for Trajectory Tracking Control of Uncertain Magnetic Levitation Systems. *IEEE Access*, 2021, vol. 9, pp. 47698–47712. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3068140.

6. *Boukas H., Shi P*. H∞ control for Discrete-Time Linear Systems with Frobenius Norm-Bounded Uncertainties. *Automatica*, 2004, vol. 35, pp. 1625–1631.

7. *Mirica K.A., Phillips S.T., Mace Ch.R., Whitesides G.M.* Magnetic Levitation in the Analysis of Foods and Water. *J. Agric. Food Chem*., 2010, vol. 58(11), pp. 6565–6569. DOI: 10.1021/jf100377n.

8. *Xiao-Heng Chang, Ju H. Park, Jianping Zhou.* Robust static output feedback H∞ control design for linear systems with polytopic uncertainties. Systems & Control Letters, 2015, vol. 85, pp. 23–32. DOI: https://doi.org/10.1016/j.sysconle.2015.08.007.

9. *Zakria Qadir, Arslan Munir, Tehreem Ashfaq et al.* A prototype of an energy-efficient MAGLEV train: A step towards cleaner train transport. *Cleaner Engineering and Technology*, 2021, vol. 4. DOI: doi.org/10.1016/j.clet.2021.100217.

КОРОБЕЙНИКОВ АНАТОЛИЙ ГРИГОРЬЕВИЧ – доктор технических наук, профессор, Национальный исследовательский университет ИТМО; заместитель директора по науке, Санкт-Петербургский филиал Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн имени Н.В. Пушкова Российской академии наук, Россия, Санкт-Петербург (Korobeynikov_A_G@mail.ru; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9968-0207).

ГРИШЕНЦЕВ АЛЕКСЕЙ ЮРЬЕВИЧ – доктор технических наук, доцент, Национальный исследовательский университет ИТМО, Россия, Санкт-Петербург (agrishentsev@yandex.ru; ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1373-0670).

Anatoly G. KOROBEYNIKOV, Alexey Yu. GRISHENTSEV

ANALYSIS OF THE EFFECT OF UNCERTAINTY IN THE MATHEMATICAL MODEL OF MAGNETIC LEVITATION ON THE CHARACTERISTICS OF THE AUTOMATIC CONTROL SYSTEM

Key words: *Automatic Control System, magnetic levitation, transient function, robustness, uncertainty, MATLAB.*

Stability in the design of automatic control systems is one of the main issues, because an unstable system has no practical significance. This is due to the fact that any control system is vulnerable to interference and noise in real working environment, and the effect caused by these signals will adversely affect the expected normal output in an unstable system.
The purpose of the study *is the design and analysis of an automatic control system, taking into account the requirement of robustness based on the H_∞-norm.*
Materials and methods*. The construction of a robust automatic control system was carried out using methods based on the calculation of the corresponding H∞-norm with the involvement of methods for solving the matrix Riccati equation. MATLAB was used as a toolkit.*
Research results. *Under uncertainties, control algorithms are of great importance. They enable to achieve the goal of control with given requirements and possess the property of stability during the transformation of the parameters of the control object and the characteristics of the effects of various kinds of disturbances. Feedback control methods can reduce the impact of uncertainties and provide the desired performance. However, an inadequate feedback controller can result in an unstable closed system, although an initially open system is stable. In this paper, we consider the problem of designing a stabilizing controller for an automatic control system for a levitating body with uncertainties in the parameters. The initial mathematical model of magnetic levitation, which serves as an object of control, was derived on the basis of Newton's second law and electromagnetic induction and is a second-order ordinary differential equation with parameters containing uncertainties due to exogenous or endogenous factors. According to the Earnshaw theorem, such a system, even with zero uncertainties in the parameters, is initially unstable. With the addition of uncertainties with non-zero values, the situation with achieving stability worsens significantly. Therefore, it is necessary to develop special automatic control systems. The results of studying the influence of uncertainties in the mathematical model of magnetic levitation on the characteristics of its continuous automatic control system with one input and one output (SISO-system) are presented in a graphical form.*
Conclusions. *The stable effect of magnetic levitation is achieved even with sufficiently large uncertainties in the mathematical model of the control object.*

References

1. Korobeynikov A.G. *Proektirovanie matematicheskoi modeli sistemy avtomaticheskogo upravleniya magnitnoi levitatsii* [Designing a mathematical model of a magnetic levitation automatic control system]. *Mezhdunarodnyi zhurnal gumanitarnykh i estestvennykh nauk*, 2021, no. 12-2(63), pp. 15–26. DOI: 10.24412/2500-1000-2021-12-2-15-26.

2. Pervozvansky A.A. *Kurs teorii avtomaticheskogo upravleniya. 3-e izd., ster.* [Course of the theory of automatic control. 3rd ed.]. St. Petersburg, Lan' Publ., 2021, 624 p.

3. Fedyanin V.P., Monakhov O.I., Antonov D.A. *Modelirovanie sledyashchikh sistem s uchetom nelineinostei* [Modeling of servo systems taking into account nonlinearities]. Moscow, 2019, 46 p.

4. Abanov A., Hayford N., Khavinson D., Teodorescu R. Around a theorem of F. Dyson and A. Lenard: Energy equilibria for point charge distributions in classical electrostatics. *Expositiones Mathematicae*, 2021, vol. 39(2), pp. 182–196. DOI: 10.1016/j.exmath.2021.03.003.

5. Anh Tuan Vo, Thanh Nguyen Truong, Hee-Jun Kang. A Novel Fixed-Time Control Algorithm for Trajectory Tracking Control of Uncertain Magnetic Levitation Systems. *IEEE Access*, 2021, vol. 9, pp. 47698–47712. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3068140.

6. Boukas H., Shi P. H∞ control for Discrete-Time Linear Systems with Frobenius Norm-Bounded Uncertainties. *Automatica*, 2004, vol. 35, pp. 1625–1631.

7. Mirica K.A., Phillips S.T., Mace Ch.R., Whitesides G.M. Magnetic Levitation in the Analysis of Foods and Water. *J. Agric. Food Chem*., 2010, vol. 58(11), pp. 6565–6569. DOI: 10.1021/jf100377n.

8. Xiao-Heng Chang, Ju H. Park, Jianping Zhou. Robust static output feedback H∞ control design for linear systems with polytopic uncertainties. Systems & Control Letters, 2015, vol. 85, pp. 23–32. DOI: https://doi.org/10.1016/j.sysconle.2015.08.007.

9. Zakria Qadir, Arslan Munir, Tehreem Ashfaq et al. A prototype of an energy-efficient MAGLEV train: A step towards cleaner train transport. *Cleaner Engineering and Technology*, 2021, vol. 4. DOI: doi.org/10.1016/j.clet.2021.100217.

ANATOLY G. KOROBEYNIKOV – Doctor of Technical Sciences, Professor, ITMO University; Deputy Director on a Science, Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio wave Propagation of the Russian Academy of Sciences St.-Petersburg Filial, Russia, St. Petersburg (Korobeynikov_A_G@mail.ru; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9968-0207).

ALEXEY Yu. GRISHENTSEV – Doctor of Technical Sciences, Assistant Professor, ITMO University, Russia, St. Petersburg (agrishentsev@yandex.ru; ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1373-0670).

Формат цитирования: *Коробейников А.Г., Гришенцев А.Ю.* Анализ влияния неопределенностей в математической модели магнитной левитации на характеристики системы автоматического управления // Вестник Чувашского университета. – 2023. – № 2. – С. 102–111. DOI: 10.47026/1810-1909-2023-2-102-111.