

КОМПЬЮТЕРНЫЕ НАУКИ И ИНФОРМАТИКА

Научная статья

УДК 681.5

DOI: 10.17072/1993-0550-2025-1-109-117

<https://elibrary.ru/poyssz>**Разработка системы управления сервопривода
с параметрической адаптацией для поворотных
испытательных стендов****Вячеслав Александрович Лазарев¹, Павел Алексеевич Иванов²**^{1,2}Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет ЛЭТИ имени В.И. Ульянова–Ленина, г. Санкт-Петербург, Россия¹lazarevvy4eslav@yandex.ru²ivanov_etu@mail.ru

Аннотация. Предложено решение задачи параметрической адаптации системы управления сервопривода поворотного испытательного стенда под текущий момент инерции полезной нагрузки (объекта испытаний). Определение текущего момента инерции полезной нагрузки основано на реализации обратной связи от датчика тока обмоток сервомотора при воспроизведении движения с постоянным угловым ускорением. Динамическое изменение моментов инерции полезной нагрузки компенсируется адаптивными алгоритмами перенастройки этой системы, что приводит к сохранению и поддержанию заданных параметров качества управления движением. В работе проведено исследование частотных характеристик контура управления скоростью вращения планшайбы поворотного испытательного стенда при различных значениях моментов инерции полезной нагрузки, установленной на планшайбе стенда, с целью определения зависимости характеристик контура от значения текущего момента инерции полезной нагрузки.

Ключевые слова: поворотный испытательный стенд; система управления сервопривода; частотные характеристики системы; параметрическая адаптация; динамический момент двигателя; момент инерции полезной нагрузки; контур управления скоростью вращения

Для цитирования: Лазарев В.А., Иванов П.А. Разработка системы управления сервопривода с параметрической адаптацией для поворотных испытательных стендов // Вестник Пермского университета. Математика. Механика. Информатика. 2025. Вып. 1(68). С. 109–117. DOI: 10.17072/1993-0550-2025-1-109-117. <https://elibrary.ru/poyssz>.

Благодарности: работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант №20-19-00412-П.

Статья поступила в редакцию 28.01.2025; одобрена после рецензирования 20.02.2025; принята к публикации 20.03.2025.



Эта работа © 2025 Лазарев В.А., Иванов П.А. распространяется под лицензией CC BY 4.0. Чтобы просмотреть копию этой лицензии, посетите <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

COMPUTER SCIENCE

Research article

Development of a Servo Control System With Parametric Adaptation for Rotary Test Stands

Vyacheslav A. Lazarev¹, Pavel A. Ivanov²

^{1,2}Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI", Saint Petersburg, Russia

¹lazarevvy4eslav@yandex.ru

²ivanov_etu@mail.ru

Abstract. A solution to the problem of parametric adaptation of the servo control system of a rotary test stand to the current moment of inertia of the payload (test object) is proposed. The determination of the current moment of inertia of the payload is based on the implementation of feedback from the current sensor of the servo motor windings when reproducing motion with constant angular acceleration. The dynamic change in the moments of inertia of the payload is compensated by adaptive reconfiguration algorithms of this system, which leads to the preservation and maintenance of the set motion control quality parameters. The paper investigates the frequency characteristics of the control circuit for the rotation speed of the faceplate of a rotary test bench at various values of the moments of inertia of the payload mounted on the faceplate of the stand in order to determine the dependence of the contour characteristics on the value of the current moment of inertia of the payload.

Keywords: rotary test stand; servo control system; frequency characteristics of the system; parametric adaptation; dynamic torque of the motor; moment of inertia of the payload; speed control circuit

For citation: Lazarev, V. A. and Ivanov, P. A. (2025), "Development of a Servo Control System With Parametric Adaptation for Rotary Test Stands", *Bulletin of Perm University. Mathematics. Mechanics. Computer Science*, no. 1(68), pp. 109-117. (In Russ.). DOI: 10.17072/1993-0550-2025-1-109-117. <https://elibrary.ru/poyssz>.

Acknowledgments: the work was carried out with the financial support of the Russian Science Foundation, grant No. 20-19-00412-P.

The article was submitted 28.01.2025; approved after reviewing 20.02.2025; accepted for publication 20.03.2025

Введение

Для определения параметров навигации и ориентации подвижных объектов с высокой точностью применяются бесплатформенные инерциальные навигационные системы (БИНС). В настоящее время для калибровки и испытания инерциальных чувствительных элементов, входящих в состав БИНС, используются поворотные испытательные стенды, способные с заданной точностью воспроизводить и измерять угловые положения планшайбы (на которую устанавливается объект испытаний) относительно одной или нескольких взаимно-перпендикулярных осей [1, 2].

1. Система управления сервопривода

Для воспроизведения движения планшайбы в структуре стендов обычно используются следящие сервоприводы на основе бесколлекторных двигателей постоянного тока (ДПТ) с возбуждением от постоянных магнитов с обратной связью по инкрементному или абсолютному датчику угла [3, 4].

На рисунке 1 представлена традиционная схема трехконтурной системы управления сервопривода с подчиненным регулированием для систем позиционирования.

В такой схеме контур тока управляет моментом двигателя, контур скорости управляет контуром тока, а контур положения – контуром скорости.

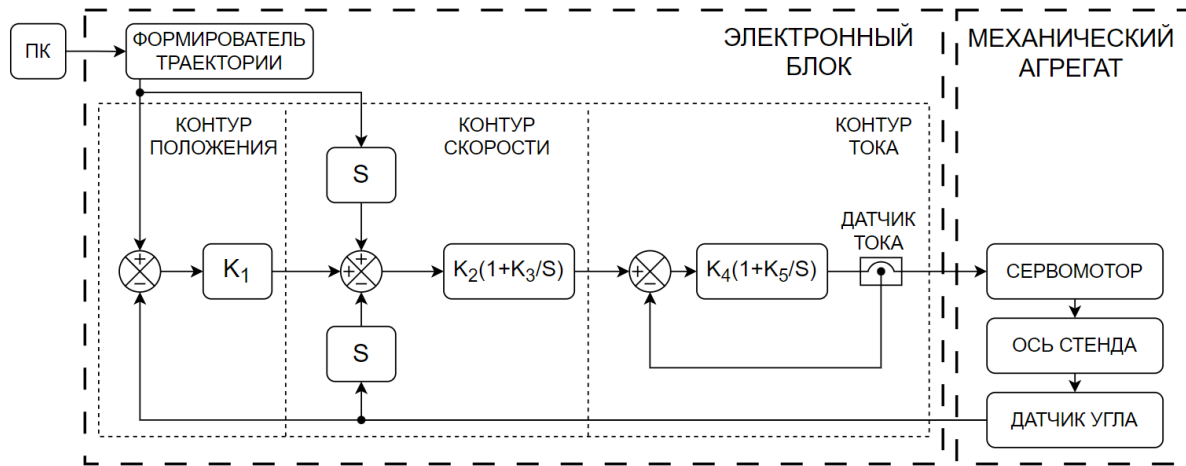


Рис. 1. Схема трехконтурной системы управления сервопривода

Настройка системы управления сводится к выбору коэффициентов регуляторов и параметров фильтров (на схеме не указаны). Выбор зависит как от параметров электро-механической системы стенда (частотные характеристики (ЧХ) контура тока и механического агрегата, эквивалентный момент инерции (МИ), приведенный к валу сервомотора (привода), так и от заданных критериев качества управления (быстродействие контура, величина перерегулирования, запас устойчивости и т.д.).

2. Система управления сервопривода с параметрической адаптацией

При изменении массогабаритных характеристик полезной нагрузки и/или ее расположения на планшайбе стенда изменяется эквивалентный МИ, приведенный к валу привода. Таким образом, система управления может перестать удовлетворять заданным критериям качества управления движением. Задача параметрической адаптации системы управления заключается в идентификации этого МИ с последующей корректировкой коэффициентов регуляторов системы управления движением.

Крутящий момент M привода определяется совокупностью момента $M_{ст}$ (Н·м) его статических сопротивлений и динамического момента $M_{дин}$ (Н·м) [5]:

$$M = M_{ст} + M_{дин}.$$

Момент $M_{дин}$ определяется следующим выражением:

$$M_{дин} = J \frac{d\omega}{dt} + \frac{\omega}{2} \cdot \frac{dJ}{dt},$$

где: ω – угловая скорость ротора привода, рад/с; J – приведенный к валу двигателя эквивалентный МИ, кг·м².

Применительно к поворотным испытательным стендам, в рамках одного эксперимента, примем $\frac{dJ}{dt} = 0$, тогда:

$$M_{дин} = J \frac{d\omega}{dt}.$$

Согласно уравнению момента ДПТ:

$$k \cdot \Phi \cdot I = k \cdot \Phi \cdot (I_{\text{ст}} + I_{\text{дин}}) = M = M_{\text{ст}} + J \frac{d\omega}{dt},$$

$$k \cdot \Phi \cdot I_{\text{дин}} = k \cdot \Phi \cdot (I - I_{\text{ст}}) = J\varepsilon,$$

$$\frac{\varepsilon}{I_{\text{дин}}} = \frac{k \cdot \Phi}{J} = k_{\text{МИ}},$$

где: k – конструктивный коэффициент привода; Φ – магнитный поток, создаваемый обмоткой возбуждения, Вб; ε – угловое ускорение ротора привода, рад/с²; I – полный ток обмоток привода, А; $I_{\text{ст}}$ – статический ток, используемый для преодоления момента $M_{\text{ст}}$, А; $I_{\text{дин}}$ – динамический ток, используемый для разгона ротора привода, А; $k_{\text{МИ}}$ – коэффициент, связывающий приведенный к валу двигателя эквивалентный МИ с динамическим током $I_{\text{дин}}$ привода, (рад/с²)/А.

Для ДПТ с постоянными магнитами $\Phi = \text{const}$, следовательно, $k \cdot \Phi = \text{const}$ (паспортная характеристика привода). Таким образом, идентификацию эквивалентного МИ, приведенного к валу привода можно выполнить с помощью обратной связи по коэффициенту $k_{\text{МИ}}$. Для этого предлагается использовать систему управления с дополнительной параметрической обратной связью по величине $k_{\text{МИ}}$ и блока параметрической адаптации (рис. 2).

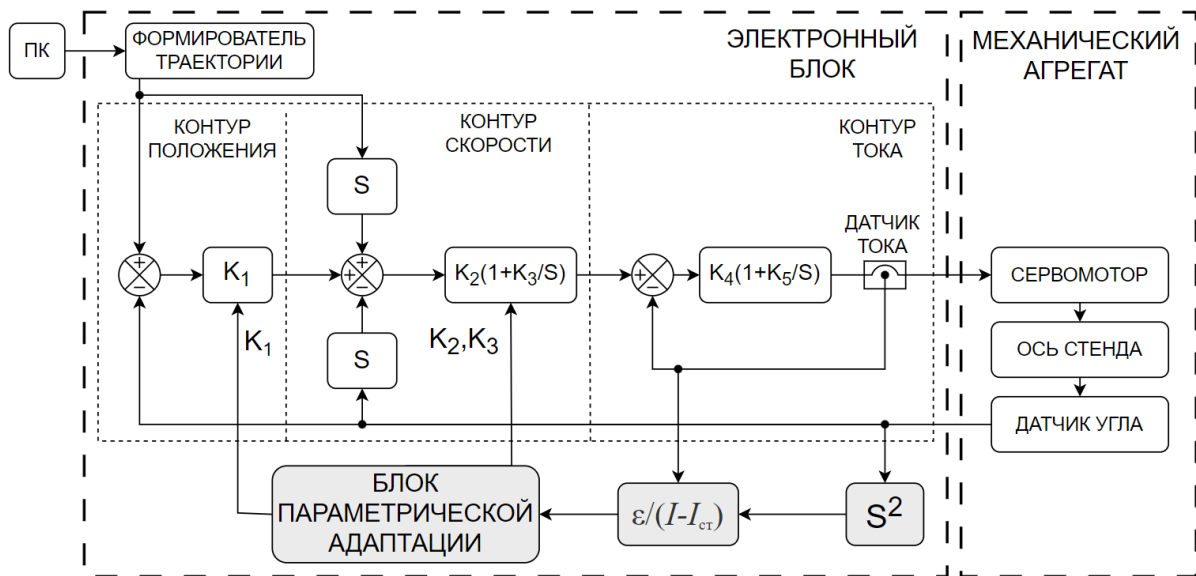


Рис. 2. Схема трехконтурной системы управления сервопривода с параметрической адаптацией

В этом случае необходима априорная информация зависимости настраиваемых параметров $K_1 - K_3$ от коэффициента $k_{\text{МИ}}$ для всего диапазона используемых значений МИ полезной нагрузки. Зависимость настраиваемых параметров K можно определить экспериментальным путем на этапе первичной настройки системы управления.

3. Экспериментальное исследование

Было проведено исследование ЧХ контура управления скоростью вращения планшайбы двухосного поворотного испытательного стенда СДА-15 (рис. 3) вокруг его внутренней оси при различных значениях МИ полезной нагрузки.



Рис. 3. Стенд СДА-15 (ИНЕРТЕХ)

В каждом эксперименте регулятор контура настраивался на максимальное быстродействие с запасом устойчивости разомкнутой системы по амплитуде и фазе 12 дБ и 40 °, соответственно. Запас устойчивости при настройке системы удобно определять по диаграмме Блэка–Николса, которая показывает зависимость ЛАЧХ от ФЧХ для разомкнутой системы с регулятором. Для построения диаграммы экспериментальным образом определяется ЧХ разомкнутой системы и подбирается регулятор таким образом, чтобы обеспечивался заданный запас устойчивости. На диаграмме запасы устойчивости по амплитуде и фазе – расстояния от точки неустойчивости до ЧХ по оси ординат и по оси абсцисс, соответственно. На рисунке 4 представлена диаграмма Блэка–Николса для различных значений МИ полезной нагрузки.

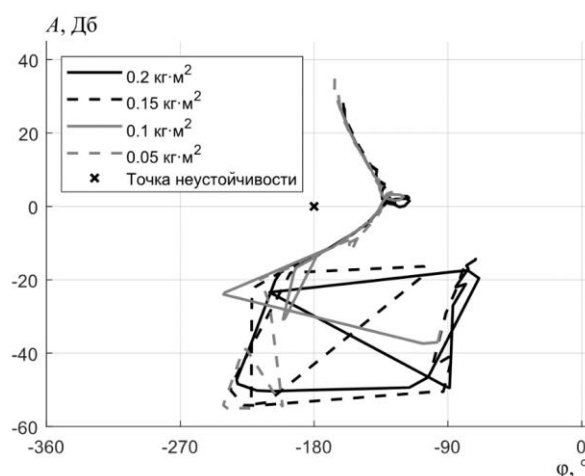


Рис. 4. Диаграмма Блэка–Николса контура скорости сервопривода внутренней оси стенда при различных значениях МИ полезной нагрузки

На рисунке 5 представлены графики ЛАЧХ и ФЧХ замкнутого контура скорости для различных значений МИ полезной нагрузки.

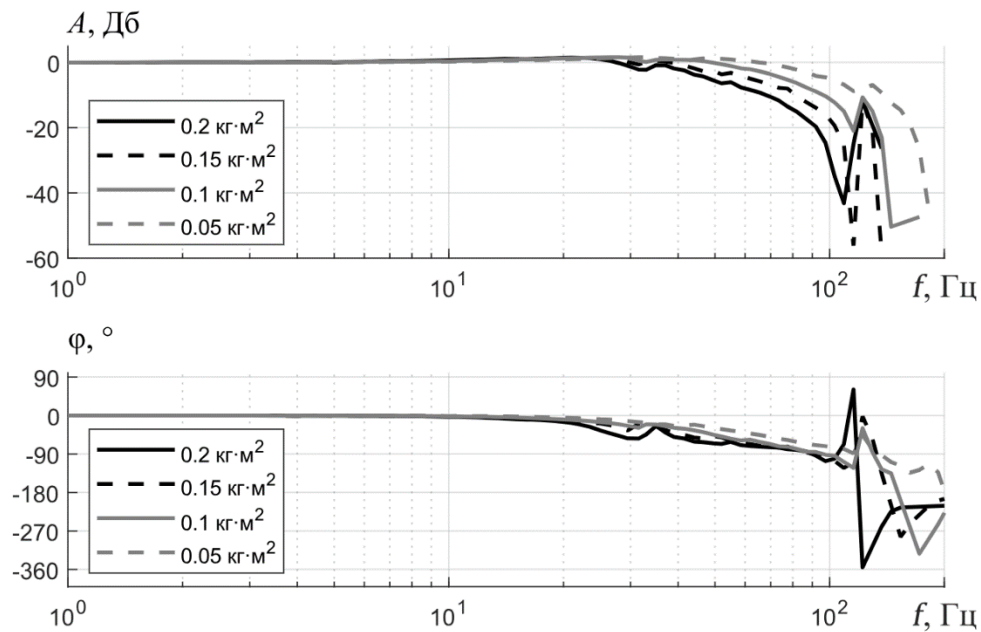


Рис. 5. ЛАЧХ и ФЧХ контура скорости сервопривода внутренней оси стэнда при различных значениях МИ полезной нагрузки

На рисунке 6 представлены графики ЛАЧХ и ФЧХ замкнутого контура скорости для значений МИ 0,2 кг·м² и 0,05 кг·м² при настройках контура на 0,05 кг·м² и 0,2 кг·м², соответственно.

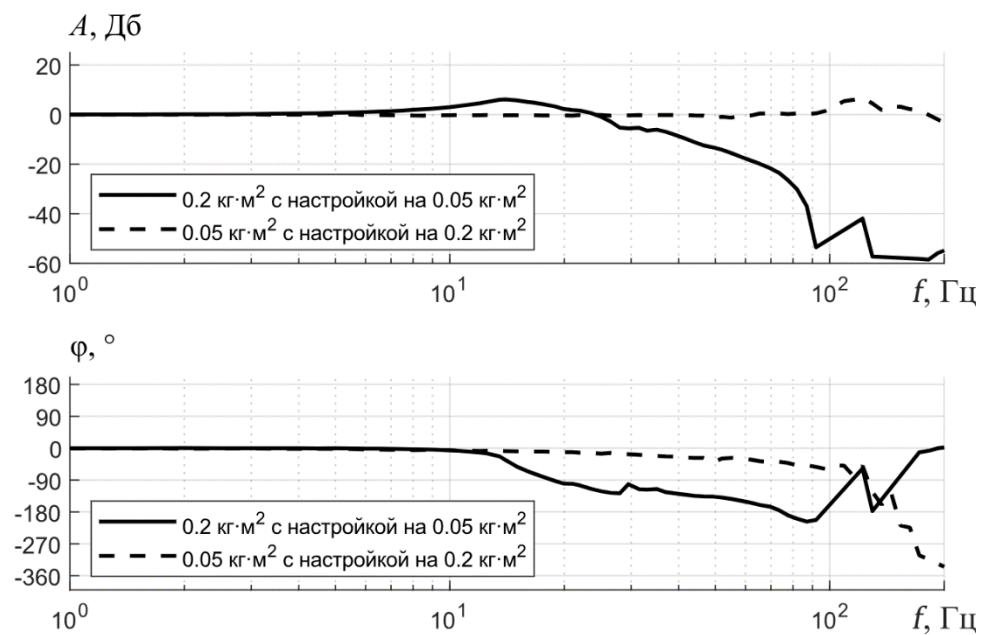


Рис. 6. ЛАЧХ и ФЧХ контура скорости сервопривода внутренней оси стэнда при несоответствии МИ полезной нагрузки настройке системы

При анализе данных, проиллюстрированных на рис. 6, видно, что заданного запаса устойчивости системы недостаточно в случае несоответствия значений МИ текущей нагрузки и нагрузки, используемой при настройке системы.

В первом случае наблюдается нежелательный "подъем" характеристики на частоте 12 Гц, а полоса пропускания по уровню -3 дБ снижается с 42 Гц до 27 Гц в сравнении с системой, настроенной при соответствующей нагрузке (рис. 5).

Во втором случае видно, что заданного запаса устойчивости недостаточно – система неустойчива. Решить данные проблемы можно увеличением запаса устойчивости разомкнутой системы, однако, это приведет к уменьшению полосы пропускания, и, как следствие, к снижению быстродействия контура управления.

Для определения коэффициента $k_{МИ}$ для каждой нагрузки было воспроизведено равноускоренное движение планшайбы стенда с ускорением $1000 \text{ }^\circ/\text{с}^2$.

На рисунке 7 представлена взаимосвязь между параметрами движения планшайбы и значением тока привода I для нагрузки различного номинала.

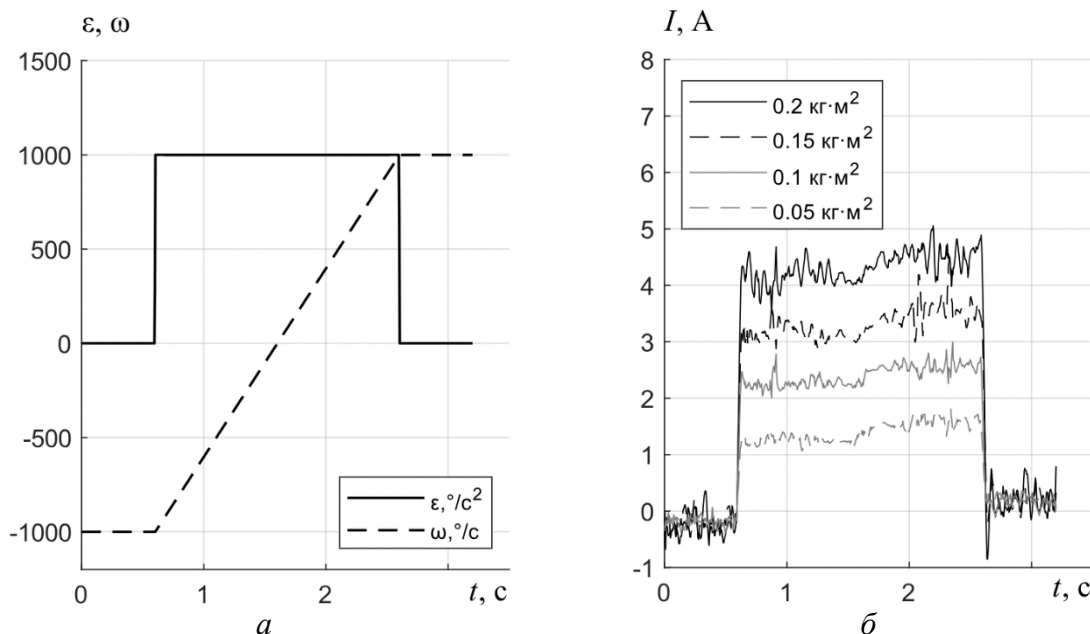


Рис. 7. Заданные скорость и ускорение планшайбы стенда (а) и измеренный ток обмоток соответствующего привода (б)

Видно, что для ускоренного и замедленного вращения планшайбы требуется различное значение тока (из-за действия момента статических сил). Среднее значение тока привода при симметричном относительно нуля равноускоренном движении не будет содержать в себе статический ток, следовательно, его можно использовать для определения $k_{МИ}$.

Были получены средние значения тока: 1,4 А; 2,4 А; 3,3 А и 4,3 А, что соответствует полезной нагрузке $0,05 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$; $0,1 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$; $0,15 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ и $0,2 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$.

На рис. 8, а изображена зависимость коэффициента $k_{МИ}$ от значения текущего момента инерции полезной нагрузки, а на рис. 8, б – зависимость коэффициентов K_2 и K_3 регулятора контура управления скоростью от коэффициента $k_{МИ}$.

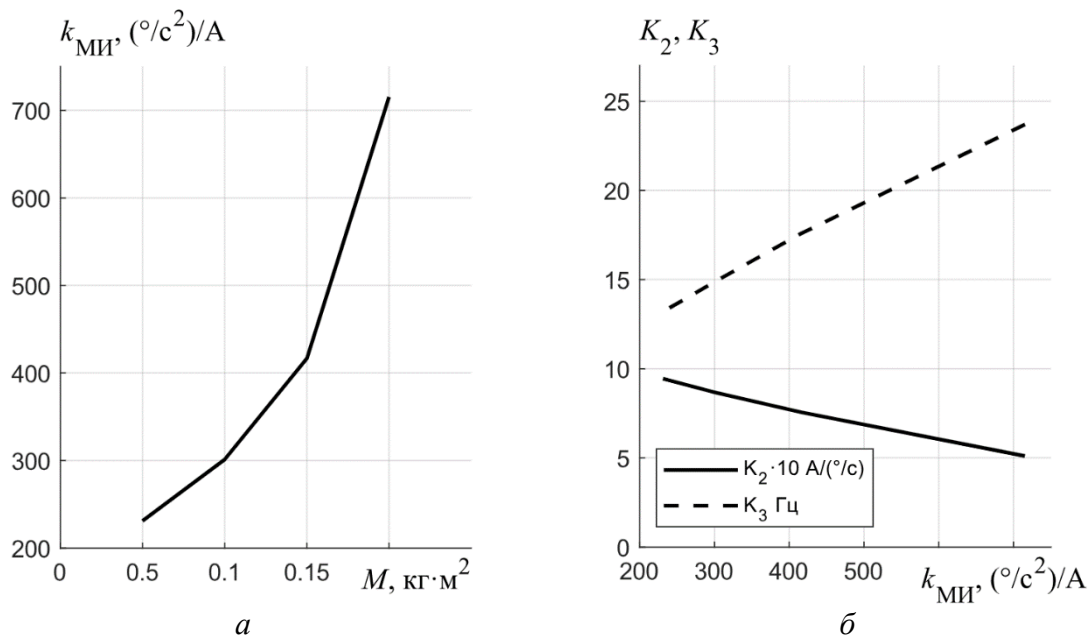


Рис. 8. а – коэффициент $k_{\text{МИ}}$, б – коэффициенты K_2 и K_3 регулятора контура скорости

По рис. 8, б видно, что коэффициенты K_2 и K_3 имеют линейную зависимость от коэффициента $k_{\text{МИ}}$, что, в свою очередь, говорит о возможности применения линейной интерполяции для определения коэффициентов K_2 и K_3 во всем диапазоне значений МИ полезной нагрузки.

Заключение

Предложен вариант построения системы управления сервопривода поворотного испытательного стенда, основанный на традиционной схеме трехконтурной системы с дополнительной параметрической обратной связью по динамическому току при равноускоренном движении.

Использование системы управления сервоприводами с параметрической адаптацией позволит сохранить устойчивость и быстродействие системы при варьировании значений МИ полезной нагрузки за счет корректировки коэффициентов контура управления. При отсутствии соответствующих корректировок диапазон возможных МИ полезной нагрузки снижается, уменьшается быстродействие системы и качество регулирования, что показано на рис. 6.

Список источников

1. Иванов П.А., Лазарев В.А., Бохман Е.Д., Павлов П.А., Филатов Ю.В. Исследование характеристик трехосного стенда для испытаний навигационных систем // Гироскопия и навигация. Т. 30, № 3(118), 2022. DOI: 10.17285/0869-7035.00100 EDN: KOPARD.
2. Боронахин А.М., Иванов П.А., Бохман Е.Д., Филатов Ю.В., Суров И.Л. Средства испытаний инерциальных систем и их чувствительных элементов // Материалы

- XVIII Санкт-Петербургской междунар. конф. по интегрированным навигационным системам. СПб.: ГНЦ РФ ЦНИИ, 2011. 338 с.
3. Балковой А.П., Цаценкин В.К. Прецизионный электропривод с вентильными двигателями. М.: Издат. Дом МЭИ, 2010. ISBN: 978-5-383-00457-9 EDN: QXSHYA.
 4. Самыгина, Е.К. Сравнение линейных алгоритмов управления положением для прямых сервоприводов / Е.К. Самыгина, Л.Н. Рассудов, А.П. Балкова // Вестник Московского энергетического института. Вестник МЭИ. 2019. № 2. С. 57–64. DOI: 10.24160/1993-6982-2019-2-57-64 EDN: ZBLXEL
 5. Дементьев Ю.Н., Чернышев А.Ю., Чернышев И.А. Электрический привод: учеб. пособие. Томск: Изд-во ТПУ, 2010. 232 с.

References

1. Ivanov, P. A., Lazarev, V. A., Bokhman, E. D., Pavlov, P. A. and Filatov, Y. V. (2022), "Investigation of the characteristics of a three-axis stand for navigation systems", *Giroskopiya I navigatsiya*, vol. 30, no. 3(118). (In Russ.).
2. Boronakhin, A. M., Ivanov, P. A., Bokhman, E. D., Filatov, Yu. V. and Surov, I. L. (2011), "Means of testing inertial systems and their sensitive elements", *Materialy XVIII Sankt-Peterburgskoj mezhdunarodnoj konferencii po integrirovannym navigacionnym sistemam*, SPb.: GNC RF CNII. 338 p. (In Russ.).
3. Balkov, A. P. and Tsatsenkin, V. K. (2010), "Precision electric drive with valve motors". М.: Izdat. Dom MEI. (In Russ.).
4. Samygina, E. K. (2019), "Comparison of linear position control algorithms for direct servos ", E. K., Samygina, L. N., Rassudov, A. P., Balkova, *Vestnik Moskovskogo energeticheskogo instituta*, Vestnik MEI, no. 2, pp. 57-64. (In Russ.).
5. Dementiev, Yu. N., Chernyshev, A. Yu. and Chernyshev, I. A. (2010), "Electric drive: a textbook", Tomsk: Izd-vo TPU, 232 p. (In Russ.).

Информация об авторах:

В. А. Лазарев – аспирант кафедры ЛИНС, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет–ЛЭТИ имени В.И. Ульянова–Ленина (197022, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5 б);

П. А. Иванов – кандидат технических наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет–ЛЭТИ имени В.И. Ульянова–Ленина (197022, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5 б).

Information about the authors:

V. A. Lazarev – PhD student of the LINS Department, Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI" (5b Professora Popova St., Saint Petersburg, Russia, 197022);

P. A. Ivanov – PhD in Engineering, Associate Professor, Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI" (5b Professora Popova St., Saint Petersburg, Russia, 197022).