

РОБАСТНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПРИВОДОМ ЛАЗЕРА СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ

Гурко А. Г. – д-р техн. наук, профессор кафедры автоматизации и компьютерно-интегрированных технологий Харьковского национального автомобильно-дорожного университета, Харьков, Украина.

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Решение задачи SLAM для автономного мобильного робота требует эффективных технических средств для сканирования окружающей местности с целью ее картографирования и обнаружения препятствий. В качестве таких средств широко применяются лазерные сканирующие системы, которые используются как самостоятельно, так и в комплексе с другими средствами в составе единой системы технического зрения робота. Одной из проблем при работе систем технического зрения является способность выявлять относительно небольшие препятствия, что требует сканирования ограниченного сектора поля зрения или даже фокусировки на конкретной точке пространства. Данное исследование посвящено вопросу повышения надежности обнаружения препятствия в поле зрения робота за счет усовершенствования привода лазера системы его технического зрения.

Цель работы – повышение надежности обнаружения препятствия в поле зрения системы технического зрения робота за счет робастного управления приводами системы позиционирования лазера.

Метод. В работе синтезирован классический ПД-регулятор привода позиционирования лазера, удовлетворяющий предъявленным требованиям к качеству переходного процесса. Проведенная оценка робастных свойств полученной системы управления приводом показала как значительную зависимость ее динамических свойств от вариации значений параметров модели привода, так и потенциальную возможность повышения ее быстродействия.

При помощи средств Robust Control Toolbox пакета MATLAB переопределены настройки регулятора, обеспечивающие робастные свойства системы управления. Выполнен анализ влияния параметрической неопределенности модели привода на динамические свойства системы.

Результаты. Синтезирован робастный ПД-регулятор привода системы позиционирования луча лазера в системе технического зрения, сочетающий в себе простоту реализации классического регулятора со слабой чувствительностью к наличию неопределенностей.

Выводы. Применение полученного регулятора в лазерной системе технического зрения мобильного робота повысит надежность обнаружения препятствия и, как следствие, точность построения карты ограниченного сектора поля зрения робота в условиях параметрической неопределенности модели привода.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: система технического зрения, лазер, двигатель постоянного тока, робастный регулятор.

АББРЕВИАТУРЫ

SLAM – Simultaneous Localization and Mapping;

ДПТ – двигатель постоянного тока;

СА – сканирующая апертура;

СПЛ – система позиционирования лазера;

СТЗ – система технического зрения.

НОМЕНКЛАТУРА

b – коэффициент трения;

$i(t)$ – значение электрического тока в якорной обмотке ДПТ;

J – суммарный момент инерции вала ДПТ с лазером СТЗ;

K_b – постоянная противоЭДС ДПТ;

K_m – постоянная ДПТ;

L – индуктивность якорной обмотки ДПТ;

R – сопротивление якорной обмотки ДПТ;

$V(t)$ – напряжение питания цепи якоря ДПТ;

δ – вариации значений параметров ДПТ в пределах заданного диапазона.

$\omega(t)$ – угловая скорость вала ДПТ;

$\theta(t)$ – угловое положение вала ДПТ;

(\cdot) – номинальное значение соответствующего параметра ДПТ;

ВВЕДЕНИЕ

Эффективность использования автономных мобильных роботов, работающих в неизвестной обстановке, требует решения ряда задач, связанных с построением карты окружающей среды и определением пространственно-временной ориентации робота на этой карте (так наз. SLAM) [1].

Для решения указанных задач роботы оснащаются СТЗ, принцип действия которых базируется на использовании различных датчиков: камер, радаров, лазеров, средств инерциальной навигации и т.д. [2–10], причем СТЗ на основе лазеров занимают значительную часть [3, 6–10].

Одной из проблем при работе СТЗ независимо от способов их реализации является способность выявлять относительно небольшие препятствия, что требует сканирования ограниченного сектора поля зрения или даже фокусировки на конкретной точке пространства.

Путем решения указанной проблемы является повышение точности поворота лазерного луча СТЗ на заданный угол. С этой целью, например, в СТЗ, расположенной в [10], шаговые двигатели СПЛ в вертикальной и горизонтальной плоскостях (рис. 1), заменены ДПТ [11]. Использование в качестве привода ДПТ вместо шагового двигателя обеспечивает непрерывность сканирования заданного ограниченного сек-

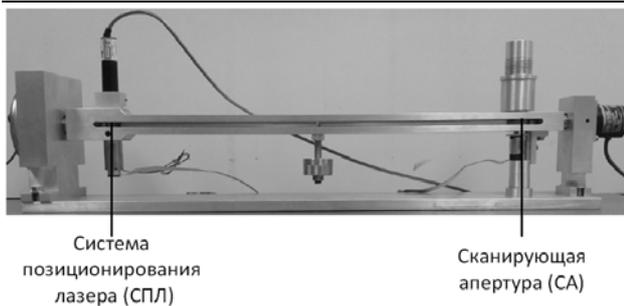


Рисунок 1 – Рассматриваемая лазерная СТЗ [14]

тора в пределах поля зрения СТЗ т.к. появляется возможность повернуть лазерный луч на произвольный угол. Однако испытания [12, 13] показывают, что привод СПЛ СТЗ все еще имеет некоторые недостатки. Это, в первую очередь, связано с использованием неточных значений параметров ДПТ и СПЛ, упрощением самой модели ДПТ, в частности, пренебрежением некоторыми нелинейными эффектами, такими как, например, кулоновское трение; недостатком информации о наличии возмущений, а также вариацией значений параметров двигателя.

Сказанное выше обуславливает необходимость синтеза и применения системы робастного управления ДПТ, используемого в рассматриваемой СТЗ.

Таким образом, **объектом данного исследования** является процесс обнаружения препятствий СТЗ мобильного робота в пределах поля ее зрения.

Предмет исследования: привод системы СПЛ СТЗ мобильного робота.

Цель работы: повышение надежности обнаружения препятствия в поле зрения СТЗ робота за счет робастного управления приводами СПЛ.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассматривается СТЗ, в качестве приводов СПЛ которой используются двигатели Maxon RE-max29. Номинальные значения параметров указанного ДПТ приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Номинальные значения параметров ДПТ Maxon RE-max29

Параметр	Номинальное значение	Неопределенность
R	104 Ом	$\pm 40\%$
L	8,46 мГн	$\pm 40\%$
J	$7,2 \times 10^{-6}$ кг·м ²	$\pm 40\%$
K_m	0,168 Нм/А	$\pm 40\%$
K_b	0,168 Вc/рад	$\pm 40\%$
b	$2,71 \times 10^{-4}$ Нмс/рад	$\pm 40\%$

Предполагается, что значения параметров модели ДПТ известны не точно и могут варьироваться в диапазоне $\pm 40\%$ от номинальных значений (табл. 1).

К качеству переходного процесса при разгоне и торможении привода предъявляются следующие требования:

- астатизм первого порядка по отношению к задающему воздействию;
- время регулирования не должно превышать 1 с;
- перерегулирование должно отсутствовать;
- слабая чувствительность первых трех показателей качества к вариации значений параметров двигателя в диапазоне до 40% (табл. 1).

2 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Широкое распространение ДПТ в качестве приводов различных технических объектов стимулировало целый ряд исследований по построению робастного им управления, т.е. подходящего управления в условиях неполного, нечеткого и неточного знания характеристик объекта управления и характеристик окружающей среды, в которой функционирует этот объект [15].

Первые работы по робастному управлению ДПТ появились еще в 80-х годах XX века на волне интереса к стремительно развивающейся теории робастности. В частности, в [16] с целью улучшения характеристик ДПТ и придания системе робастных свойств разработана микропроцессорная система управления, состоящая из двух независимых контуров. Первый контур содержит классический позиционный регулятор, а второй – дополнительный робастный регулятор.

Двухконтурная система управления, но уже скоростью вращения ДПТ, предложена в [17]. Система включает ПИ-регулятор и наблюдатель возмущений на основе фильтра Баттерворта.

Робастная система управления положением ДПТ с «нечетким» регулятором со скользящим режимом и дополнительным компенсатором представлена [18].

Регулятор со скользящим режимом в комбинации с ПИД-регулятором применен для управления скоростью вращения ДПТ в [19].

По мере возрастания интереса к методам H^∞ -управления, они стали применяться и при управлении ДПТ [20–23]. Однако, несмотря на серьезные теоретические достижения, методы H^∞ -управления относительно медленно входят в повседневную практику управления ДПТ [22], где все еще доминируют электроприводы с «классическими» алгоритмами управления. Это объясняется не только относительной простотой реализации и понятностью принципов работы «классических» регуляторов, но и несовершенством робастных алгоритмов, в частности, трудностями при определении функции чувствительности.

В то же время, как варианты ПИД-регуляторов, так и классические ПИД-регуляторы, могут обеспечить системе робастные свойства [17, 24–28].

Данная статья лежит в русле работ, посвященных синтезу робастных систем с регуляторами на основе ПИД законов управления.

3 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Известно, что модель динамики ненагруженного ДПТ, управляемого по цепи якоря, строится на основе 2-го закона Ньютона и закона Кирхгофа для напряжений и, при допущении о постоянстве магнитного потока, имеет следующий вид:

$$\begin{cases} L \frac{di(t)}{dt} + Ri(t) + K_b \omega(t) = V(t), \\ J \frac{d\omega(t)}{dt} + b\omega(t) = K_m i(t). \end{cases} \quad (1)$$

После несложных преобразований, приняв в качестве координат состояния $x_1 = i(t)$, $x_2 = \omega(t)$, $x_3 = \theta(t)$, получим

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & -\frac{K_b}{L} & 0 \\ \frac{K_m}{J} & -\frac{b}{J} & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} u, \quad (2)$$

$$y = [0 \quad 0 \quad 1] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где $y = \theta(t)$ – выходная координата (угловое положение вала) двигателя, а $u = V(t)$.

Соответствующая уравнениям (2), (3) структурная схема приведена на рис. 2.

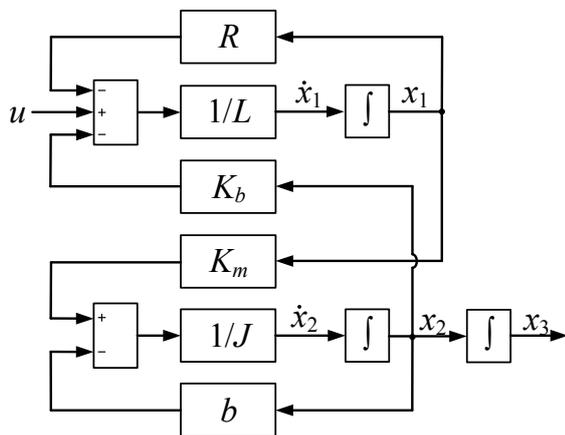


Рисунок 2 – Блок-схема привода лазера СТЗ

На практике точные значения параметров R , L , J , K_b , K_m и b , как правило, неизвестны. В то же время всегда можно найти такие интервалы, которым эти значения будут принадлежать. Тогда уравнение (2) можно записать в следующем виде:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \frac{1}{\bar{L} + \delta_L} \left[-(\bar{R} + \delta_R)x_1 - (\bar{K}_b + \delta_{K_b})x_2 + u \right], \\ \dot{x}_2 = \frac{1}{\bar{J} + \delta_J} \left[(\bar{K}_m + \delta_{K_m})x_1 - (\bar{b} + \delta_b)x_2 \right], \\ \dot{x}_3 = x_2. \end{cases} \quad (4)$$

В этом случае, на структурной схеме рис. 1 блоки с параметрами R , L , J , K_m , K_b и b могут быть заменены блок-схемами с обратными связями в терминах \bar{R} , \bar{L} , \bar{J} , \bar{K}_m , \bar{K}_b и \bar{b} (рис. 3).

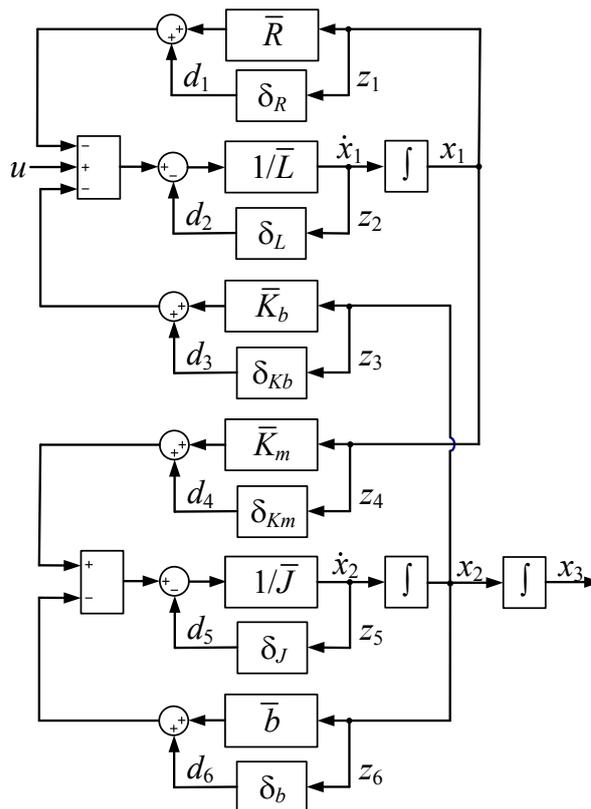


Рисунок 3 – Блок-схема для привода с неопределенными параметрами

Использование изображенной представленной на рис. 3 модели с неопределенными параметрами позволяет решить следующие задачи:

- 1) синтезировать регулятор для системы позиционирования лазера;
- 2) оценить робастные свойства синтезированного регулятора, и
- 3) оценить степень влияния на характеристики всей системы отклонения значения каждого из параметров от номинального значения.

4 ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Решение указанных выше задач выполнено путем проведения вычислительных экспериментов с привлечением возможностей пакета MATLAB. Эксперименты проводились с двигателем Maxon RE-max29, который установлен на рассматриваемой СТЗ, и но-

минальные значения параметров которого приведены в табл. 1.

Сначала синтезирован ПД-регулятор для ДПТ с номинальными значениями (табл. 1). Соответствующая Simulink-модель изображена на рис. 4.

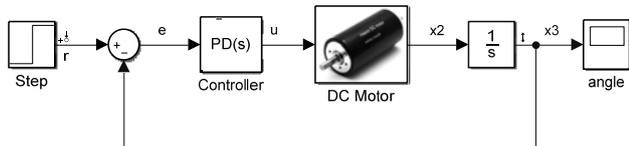


Рисунок 4 – Simulink-модель номинальной системы управления

Содержимое блока «DC Motor» на рис. 4 соответствует схеме рис. 2 без последнего интегратора, преобразующего угловую скорость x_2 в угловое положение x_3 .

Синтез ПД-регулятора для детерминированного объекта не вызывает серьезных трудностей. Целью синтеза было удовлетворение системой указанных в п. 1 показателей качества.

На следующем этапе вычислительного эксперимента выполнялась проверка, насколько робастной получилась данная система. При этом значения параметров модели ДПТ варьировались в диапазоне $\pm 40\%$ от номинальных значений (табл. 1).

Далее синтезирован робастный ПД-регулятор, для чего использована встроенная функция MATLAB systune.

На последнем этапе для определения влияния на динамические характеристики всей системы отклонения значения каждого из параметров от номинального, попарно варьировались значения параметров R и L , J и b , K_m и K_b при номинальных значениях остальных параметров. В качестве критерия влияния использован нормированный показатель *Performance* указанных выше требований к качеству переходного процесса, сгенерированный функцией MATLAB evalGoal.

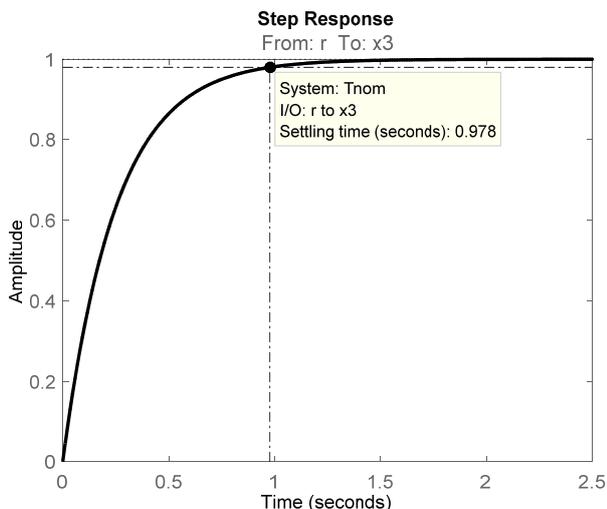


Рисунок 5 – Переходная характеристика системы с ПД-регулятором (5) при номинальных параметрах ДПТ

5 РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты вычислительных экспериментов иллюстрируют рис. 5–10. На рис. 5 приведена реакция на единичное ступенчатое воздействие системы с ПД-регулятором с передаточной функцией вида:

$$C(s) = k_p + \frac{k_d s}{T_f s + 1}, \quad (5)$$

где $k_p = 1,39$; $k_d = 3,15 \cdot 10^{-3}$; $T_f = 3,59 \cdot 10^{-6}$.

Чтобы определить, является ли данная система робастной, значения параметров модели ДПТ варьировались случайным образом в диапазоне $\pm 40\%$ от номинальных значений (табл. 1). Переходные характеристики для 20 вариантов системы со значениями параметров из указанного диапазона и с регулятором (5), синтезированном при номинальной модели ДПТ, отображены на рис. 6, где 1 – характеристика номинальной системы, 2 – характеристики системы с неопределенными параметрами.

Робастные свойства системы с модифицированным регулятором отображает рис. 7, на котором представлены переходные характеристики системы с неопределенными параметрами (кривые 2). Для удобства сравнения на этом же рисунке также приведена переходная характеристика системы с ПД-регулятором (5), синтезированном по номинальной модели (кривая 1).

Параметры робастного регулятора имеют следующие значения: $k_p = 3,1$; $k_d = 1,61 \cdot 10^{-2}$; $T_f = 1,24 \cdot 10^{-5}$.

Влияние отклонения от номинального значения каждого из параметров модели (1) на свойства системы иллюстрируют рис. 8 – 10. На этих рисунках верхние поверхности (рис. 8а, 9а, 10а) соответствуют системе с регулятором, настроенным по номинальной модели, а нижние (рис. 8б, 9б, 10б) – системе с робастным регулятором.

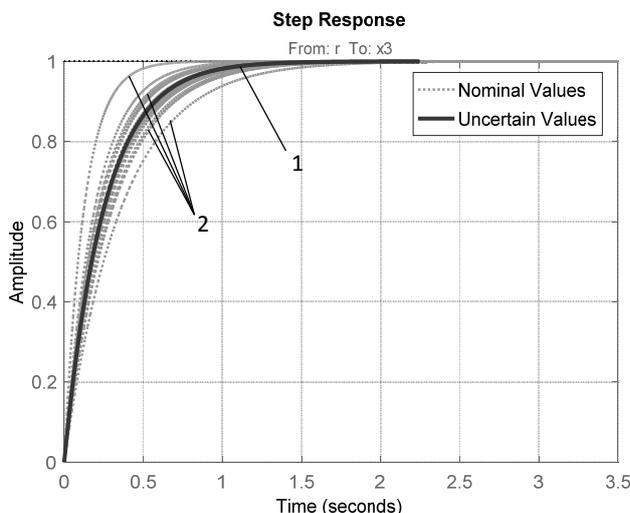


Рисунок 6 – Переходные характеристики «неопределенной» системы с ПД-регулятором

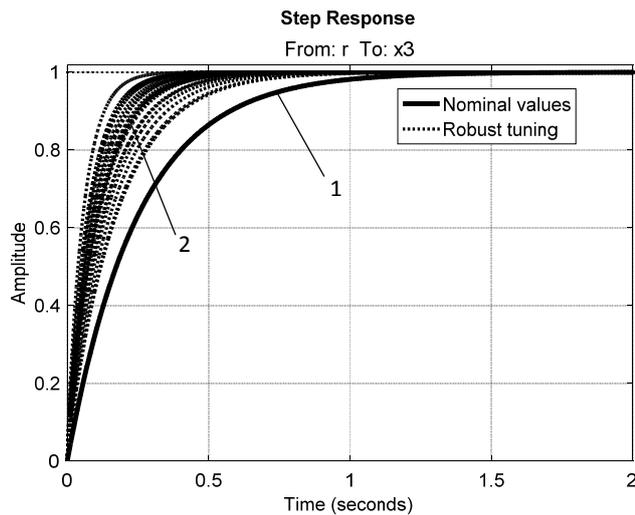


Рисунок 7 – Переходные характеристики системы с робастным регулятором

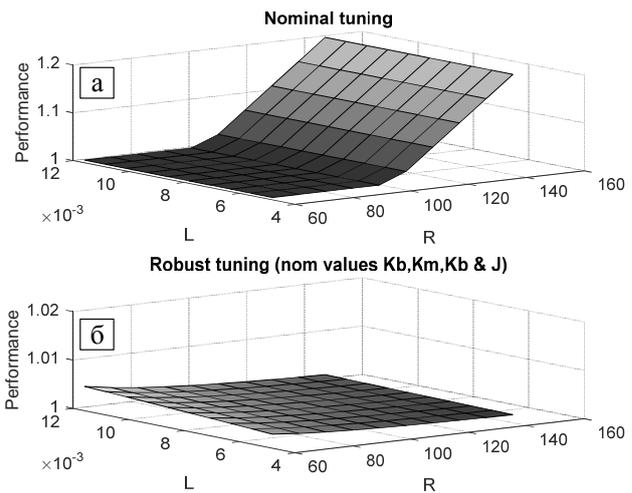


Рисунок 8 – Влияние неопределенности значений R и L на свойства системы при номинальных значениях параметров K_b, K_m, b и J

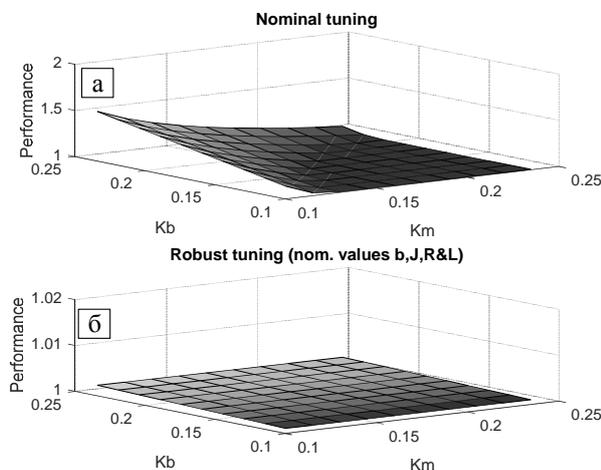


Рисунок 9 – Влияние неопределенности значений K_b и K_m на свойства системы при номинальных значениях параметров R и L, b и J

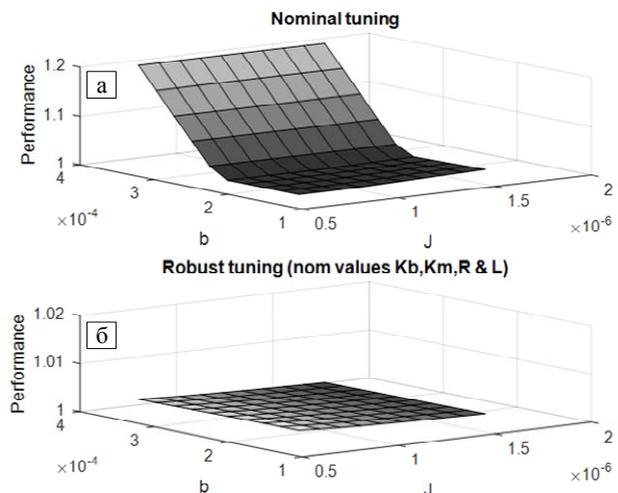


Рисунок 10 – Влияние неопределенности значений b и J на свойства системы при номинальных значениях параметров R и L, K_b и K_m

6 ОБСУЖДЕНИЕ

Рис. 4 показывает, что, как и ожидалось, регулятор (5), настроенный по номинальной модели привода лазера СТЗ удовлетворяет предъявляемым требованиям к качеству переходного процесса. Однако, вариации значений параметров R, L, K_b, K_m, b и J в диапазоне $\pm 40\%$ от номинальных значений оказывает существенное влияние на показатели качества и, в первую очередь, на быстродействие (рис. 6), причем как в сторону его уменьшения, так и повышения. Это указывает на следующее:

- на потенциальную возможность повышения быстродействия привода лазера СТЗ, что является крайне важным при решении задач навигации автономных мобильных роботов в реальных условиях;
- на необходимость использования робастного регулятора, минимизирующего негативное влияние неопределенностей на динамику системы.

Рис. 7 подтверждает эффективность синтезированного робастного регулятора: даже при самом неблагоприятном сочетании значений неопределенных параметров быстродействие робастной системы значительно выше номинальной системы при одновременном удовлетворении остальных требований качества.

Анализ влияния неопределенностей на качество системы показывает (рис. 8–10), что она крайне чувствительна к изменениям сопротивления в цепи якоря (рис. 8а), постоянной противоЭДС K_b (рис. 9а) и к непостоянству коэффициента трения b (рис. 10а). Следует отметить, что идентификация значения силы трения в приводе лазера СТЗ представляет собой непростую задачу [14]. Выходом из данной ситуации может быть применение подложенного робастного регулятора, поскольку как видно из рис. 7б, 8б, и 9б, система с этим регулятором весьма мало чувствительна к изменению значений ее параметров.

ВЫВОДЫ

Повышение эффективности использования в мобильной робототехнике лазерных СТЗ связано, кроме всего прочего, с повышением надежности обнаружения малогабаритных препятствий. Использование в качестве приводов вместо шаговых двигателей ДПТ позволяет обеспечить непрерывность сканирования ограниченного сектора в пределах поля зрения СТЗ и наведение лазерного луча в заданную точку, однако при этом возникает задача синтеза робастного регулятора привода лазера, снижающего влияние на работу СТЗ параметрических неопределенностей. Данная задача решена в настоящей работе.

Научная новизна полученных результатов заключается в дальнейшем развитии теории робастного управления путем ее распространения на новый класс объектов – лазерные СТЗ, что позволяет снизить ошибки позиционирования лазера при сканировании местности в пределах поля зрения, вызванные неточным знанием значений параметров модели привода СПЛ.

Практическая ценность результатов работы заключается в повышении надежности обнаружения препятствия и, как следствие, точности построения карты ограниченного сектора в поле зрения робота условиях параметрической неопределенности модели привода лазера СТЗ. Данный результат достигается за счет робастного управления приводами системы позиционирования луча. Синтезированный регулятор сочетает в себе простоту технической реализации классического регулятора со слабой чувствительностью к наличию неопределенностей, что подтверждается результатами моделирования.

Дальнейшие исследования связаны с экспериментальной проверкой разработанной системы управления приводом СТЗ, а также со сравнительным анализом с другими системами, в частности, на основе H^∞ -регулятора.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках совместного научно-исследовательского проекта «Improving accuracy and speed on dynamic laser scanners» Института инженерии Автономного университета Нижней Калифорнии, Мексика и Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. Автор выражает глубокую признательность д-ру Олегу Сергиенко (Oleg Sergiyenko) и д-ру Ларсу Линднеру (Lars Lindner) за помощь в подготовке статьи.

ЛИТЕРАТУРА / ЛІТЕРАТУРА

1. Simultaneous Localization and Mapping: A Survey of Current Trends in Autonomous Driving // [G. Bresson, Z. Alsayed, Li Yu, S. Glaser] // IEEE Transactions on Intelligent Vehicles. – 2017. – Vol. 20. – P. 194–220. DOI: 10.1109/TIV.2017.2749181
2. Vision-based model predictive control for steering of a non-holonomic mobile robot / [Z. Li, C. Yang, C. Y. Su et al] // IEEE Transactions on Control Systems Technology. – 2016.

- Vol. 24, No. 2. – P. 553–564. DOI: 10.1109/TCST.2015.2454484
3. Orchard mapping and mobile robot localisation using on-board camera and laser scanner data fusion – Part A: Tree detection / [N. Shalal, T. Low, C. McCarthy, N. Hancock] // Computers and Electronics in Agriculture. – 2015. – Vol. 119. – P. 254–266. DOI: 10.1016/j.compag.2015.09.025
4. Global localization of a mobile robot using lidar and visual features / [Z. Su, X. Zhou, T. Cheng, H. Zhang et al] // Robotics and Biomimetics : IEEE International Conference, Macao, China, 5–8 December 2017 : proceedings. – IEEE, 2017. – P. 2377–2383. DOI: 10.1109/ROBIO.2017.8324775
5. A LiDAR and IMU integrated indoor navigation system for UAVs and its application in real-time pipeline classification / [G. A. Kumar, A. K. Patil, R. Patil et al] // Sensors. – 2017. – Vol. 17, No. 6. – P. 1268. DOI: 10.3390/s17061268
6. An Algorithm for Automated Estimation of Road Roughness from Mobile Laser Scanning Data / [P. Kumar, P. Lewis, C. P. McElhinney, A. A. Rahman] // The Photogrammetric Record. – 2015. – Vol. 30, No. 149. – P. 30–45. DOI: 10.1111/phor.12090
7. Mobile Robot Path Planning Using Continuous Laser Scanning / [M. Ivanov, L. Lindner, O. Sergiyenko et al] // Optoelectronics in Machine Vision-Based Theories and Applications. – IGI Global, 2019. – P. 338–372. DOI: 10.4018/978-1-5225-5751-7.ch012
8. Применение пчелиного алгоритма для обработки данных лазерной сканирующей системы при навигации мобильных роботов / [А. И. Абрамов, И. В. Абрамов, Т. А. Мазитов, А. М. Пальмов] // Вестник ИжГТУ им. М. Т. Калашникова. – 2016. – № 2. – С. 101–104.
9. Комплексированная СТЗ в системе управления пожарного робота / [А. В. Ваззев, В. П. Носков, И. В. Рубцов, С. Г. Цариченко] // Известия Южного федерального университета. Технические науки. – 2017. – № 1 (186). – С. 121–132. DOI: 10.18522/2311-3103-2017-1-121132
10. Optical 3D laser measurement system for navigation of autonomous mobile robot / [L. C. Basaca-Preciado, O. Y. Sergiyenko, J. C. Rodríguez-Quinonez et al] // Optics and Lasers in Engineering. – 2014. – Vol. 54. – P. 159–169. DOI: 10.1016/j.optlaseng.2013.08.005
11. Mobile robot vision system using continuous laser scanning for industrial application / [L. Lindner, O. Sergiyenko, J. C. Rodríguez-Quinonez et al.] // Industrial Robot: An International Journal. – 2016. – Vol. 43, No. 4. – P. 360–369. DOI: 10.1108/IR-01-2016-0048
12. Machine vision system errors for unmanned aerial vehicle navigation / [L. Lindner, O. Sergiyenko, M. Rivas-López et al] // 26th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), Edinburgh, 19–21 June 2017 : proceedings. – IEEE, 2017. – P. 1615–1620. DOI: 10.1109/ISIE.2017.8001488
13. Reduction of Angular Position Error of a Machine Vision System using the Digital Controller LM629 / [M. Reyes-García, L. Lindner, M. Rivas-López et al] // 44th Annual Conference of the IEEE (IECON 2018), Washington, D. C., USA, 21–23 Oct. 2018 : proceedings. – IEEE, 2018. – P. 3200–3205.
14. UAV remote laser scanner improvement by continuous scanning using DC motors / [L. Lindner, O. Sergiyenko, M. Rivas-López et al] // 42nd Annual Conference of the IEEE (IECON 2016), Florence, 23–26 Oct. 2016 : proceedings. – IEEE, 2016. – P. 371–376. DOI: 10.1109/IECON.2016.7793316

15. Методы робастного, нейро-нечеткого и адаптивного управления / Под. ред. Н. Д. Егупова. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2001. – 744 с.
16. Microprocessor-Based Robust Control of a DC Servo Motor / [K. Tamaki, K. Ohishi, K. Ohnishi, K. Miyachi] // IEEE Control Systems Magazine. – 1986. – Vol. 6, No 5. – P. 30–36. DOI: 10.1109/MCS.1986.1105133
17. Umeno T. Y. Robust speed control of DC servomotors using modern two degrees-of-freedom controller design / T. Umeno, Y. Hori // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 1991. – Vol. 38, No 5. – P. 363–368. DOI: 10.1109/41.97556
18. Fallahi M. Robust control of DC motor using fuzzy sliding mode control with PID compensator / M. Fallahi, S. Azadi // International Multi-Conference of Engineers and Computer Scientists : Hong Kong, 18–20 March 2009 : proceedings. – Hong Kong, 2009. – Vol. 2. – 5 p.
19. Eker I. Sliding mode control with PID sliding surface and experimental application to an electromechanical plant // ISA transactions. – 2006. – Vol. 45, No. 1. – P. 109–118. DOI: 10.1016/S0019-0578(07)60070-6
20. Březina L. H-infinity controller design for a DC motor model with uncertain parameters / L. Březina, T. Březina // Engineering mechanics. – 2011. – Vol. 18, No. 5–6. – P. 271–279.
21. Полилов Е. В. Синтез робастного H^∞ -субоптимального регулятора положения позиционного электропривода / Е. В. Полилов, А. Б. Зеленов, Е. С. Руднев // Вісник КДПУ ім. М. Остроградського. – 2008. – Вип. 3, Ч. 1. – С. 64–71.
22. Руднев Е. С. Практическая реализация и исследование робастных алгоритмов управления синхронным электроприводом / Е. С. Руднев // Электромеханичні і енергозберігаючі системи. – 2012. – Т. 3, № 19. – С. 102–107.
23. Dey N. Design of a H-infinity robust controller for a DC servo motor system / N. Dey, U. Mondal, D. Mondal // Intelligent Control Power and Instrumentation (ICICPI): International Conference, Kolkata, India, 21–23 October 2016 : proceedings. – IEEE, 2016. – P. 27–31. DOI: 10.1109/ICICPI.2016.7859667
24. Nguyen Ba-Hai. Novel Robust Control Algorithm of DC Motors / Ba-Hai Nguyen, Hai-Bac Ngo, Jee-Hwan Ryu // 6th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence, Gwangju, Korea, 29–31 October 2009 : proceedings. – P. 119–122.
25. Shamseldin M. A. Practical Implementation of GA-Based PID Controller for Brushless DC Motor / M. A. Shamseldin, M. A. Eissa, A. A. EL-Samahy // 17th International Middle East Power System Conference, Mansoura University, Egypt, 15–17 December 2015 : proceedings. – Mansoura, 2015. – 5 p.
26. Veselý V. Generalized robust gain-scheduled PID controller design for affine LPV systems with polytopic uncertainty / V. Veselý, A. Ilka // Systems & Control Letters. – 2017. – Vol. 105. – P. 6–13. DOI: 10.1016/j.sysconle.2017.04.005
27. Design and realization of stand-alone digital fractional order PID controller for Buck converter fed DC motor / [S. Khubalkar, A. Chopade, A. Junghare, et al] // Circuits, Systems, and Signal Processing. – 2016. – Vol. 35, No. 6. – P. 2189–2211. DOI: 10.1007/s00034-016-0262-2
28. Дорф Р. Современные системы управления / Р. Дорф, Р. Бишоп. – М. : Лаборатория Базовых Знаний, 2002. – 832 с.

Статья поступила в редакцию 14.11.2018.
После доработки 09.12.2018.

УДК 681.53

РОБАСТНЕ КЕРУВАННЯ ПРИВОДОМ ЛАЗЕРА СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ

Гурко О. Г. – д-р техн. наук, професор кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій Харківського національного автомобільно-дорожнього університету, Харків, Україна.

АНОТАЦІЯ

Актуальність. Рішення завдання SLAM для автономного мобільного робота вимагає ефективних технічних засобів для сканування навколишньої місцевості з метою її картографування і виявлення перешкод. В якості таких засобів широко застосовуються лазерні скануючі системи, які використовуються як самостійно, так і в комплексі з іншими засобами в складі єдиної системи технічного зору робота. Однією з проблем при роботі систем технічного зору є здатність виявляти відносно невеликі перешкоди, що вимагає сканування обмеженого сектора поля зору або навіть фокусування на конкретній точці простору. Дане дослідження присвячене питанню підвищення надійності виявлення перешкоди в полі зору робота за рахунок удосконалення приводу лазера системи його технічного зору.

Мета роботи – підвищення надійності виявлення перешкоди в полі зору системи технічного зору робота за рахунок робастного керування приводами системи позиціонування лазера.

Метод. В роботі синтезовано класичний ПД-регулятор приводу позиціонування лазера, що задовольняє висунутим вимогам до якості перехідного процесу. Проведена оцінка робастних властивостей отриманої системи керування приводом показала як значну залежність її динамічних властивостей від варіації значень параметрів моделі приводу, так і потенційну можливість підвищення її швидкодії.

За допомогою засобів Robust Control Toolbox пакету MATLAB перевизначено налаштування регулятора, що забезпечують робастні властивості системи керування. Виконано аналіз впливу параметричної невизначеності моделі приводу на динамічні властивості системи.

Результати. Синтезовано робастний ПД-регулятор приводу системи позиціонування променя лазера в системі технічного зору, що поєднує в собі простоту реалізації класичного регулятора зі слабкою чутливістю до наявності невизначеностей.

Висновки. Застосування отриманого регулятора в лазерній системі технічного зору мобільного робота підвищить надійність виявлення перешкод і, як наслідок, точність побудови карти обмеженого сектора поля зору робота в умовах параметричної невизначеності моделі приводу.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: система технічного зору, лазер, двигун постійного струму, робастний регулятор.

ROBUST CONTROL OF LASER ACTUATOR FOR TECHNICAL VISION SYSTEM

Gurko A. G. – Dr. Sc., Professor, Automation and Computer-Integrated Department, Kharkov National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine.

ABSTRACT

Context. The SLAM problem solving for an autonomous mobile robot requires efficient technical means for surrounding terrain scanning with the purpose of its mapping and obstacles detecting. As such means, laser scanning systems are widely used both independently and in combination with other tools as a part of a uniform technical vision system of a mobile robot. One of the problems with a technical vision systems operation is the ability to detect relatively small obstacles, which requires scanning of a limited sector within the field of view or even focusing on a specific point of space. This study is devoted to the issue of improving the reliability of obstacles detecting within the robot field of view by improving the laser actuator of the technical vision system.

Objective. The objective of the work is to the reliability increasing of obstacles detection within the robot technical vision system field of view due to the robust control of the actuators of the positioning system of the laser.

Method. The classical PD-controller for the laser positioning actuator, which meets the requirements for the quality of the transient process, has been synthesized. The evaluation of robust properties of the obtained control system showed both a significant dependence of the actuator dynamic properties on the variation of the values of the actuator model parameters and the potential possibility of its time response increasing.

With the help of the MATLAB Robust Control Toolbox, the controller gains have been redefined to ensure the robust properties of the control system. The analysis of the influence of parametric uncertainties of the actuator model on the system dynamic properties is conducted.

Results. A robust PD-controller for the laser beam positioning system actuator for the technical vision system has been synthesized. It combines the simplicity of the implementation of a classic controller with a weak sensitivity to the uncertainties presence.

Conclusions. The using of the controller at the mobile robot laser technical vision system will increase the reliability of obstacle detection and, as a result, the accuracy of mapping of a limited sector within the robot field of view under the conditions of the parametric uncertainty of the actuator model.

KEYWORDS: technical vision system, laser, dc motor, robust controller.

REFERENCES

1. Bresson G., Alsayed Z., Yu Li, Glaser S. Simultaneous Localization and Mapping: A Survey of Current Trends in Autonomous Driving, *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 2017, Vol. 20, pp. 194–220. DOI: 10.1109/TIV.2017.2749181
2. Li Z., Yang C., Su C.Y., Deng J., Zhang W. Vision-based model predictive control for steering of a nonholonomic mobile robot, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2016, Vol. 24, No. 2, pp. 553–564. DOI: 10.1109/TCST.2015.2454484
3. Shalal N., Low T., McCarthy C., Hancock N. Orchard mapping and mobile robot localisation using on-board camera and laser scanner data fusion – Part A: Tree detection, *Computers and Electronics in Agriculture*, 2015, Vol. 119, pp. 254–266. DOI: 10.1016/j.compag.2015.09.025
4. Su Z., Zhou X., Cheng T., Zhang H., Xu B., Chen W. Global localization of a mobile robot using lidar and visual features, *Robotics and Biomimetics, IEEE International Conference*. Macao, China, 5–8 December 2017, proceedings, IEEE, 2017, pp. 2377–2383. DOI: 10.1109/ROBIO.2017.8324775
5. Kumar G. A., Patil A. K., Patil R., Park S. S., Chai Y. H. A LiDAR and IMU integrated indoor navigation system for UAVs and its application in real-time pipeline classification, *Sensors*, 2017, Vol. 17, No. 6, P. 1268. DOI: 10.3390/s17061268
6. Kumar P., Lewis P., McElhinney C. P., Rahman A. A. An Algorithm for Automated Estimation of Road Roughness from Mobile Laser Scanning Data, *The Photogrammetric Record*, 2015, Vol. 30, No. 149, pp. 30–45. DOI: 10.1111/phor.12090
7. Ivanov M., Lindner L., Sergiyenko O., Rodríguez-Quinonez J. C., Flores-Fuentes W., Rivas-Lopez M. Mobile Robot Path Planning Using Continuous Laser Scanning / M. Ivanov, // *Optoelectronics in Machine Vision-Based Theories and Applications*, IGI Global, 2019, pp. 338-372. DOI: 10.4018/978-1-5225-5751-7.ch012
8. Abramov A. I. Abramov I. V., Mazitov T. A., Pal'mov A. M. Primenenie pchelino algorithma dlya obrabotki dannyx lazernoj skaniruyushhej sistemy pri navigacii mobil'nyx robotov, *Vestnik IzhGTU im. M. T. Kalashnikova*, 2016, No. 2, pp. 101–104.
9. Vazaev A. V., Noskov V. P., Rubcov I. V., Carichenko S. G. Kompleksirovannaya STZ v sisteme upravleniya pozhar-nogo robota, *Izvestiya Yuzhnogo federal'nogo universiteta. Texnicheskie nauki*, 2017, No. 1 (186). pp. 121–132. DOI: 10.18522/2311-3103-2017-1-121132
10. Basaca-Preciado L. C., Sergiyenko O. Y., Rodríguez-Quinonez J. C. et al Optical 3D laser measurement system for navigation of autonomous mobile robot, *Optics and Lasers in Engineering*, 2014, Vol. 54, pp. 159–169. DOI: 10.1016/j.optlaseng.2013.08.005
11. Lindner L., Sergiyenko O., Rodríguez-Quinonez J. C. et al Mobile robot vision system using continuous laser scanning for industrial application, *Industrial Robot: An International Journal*, 2016, Vol. 43, No. 4, pp. 360–369. DOI: 10.1108/IR-01-2016-0048
12. Lindner L., Sergiyenko O., Rivas-López M. et al Machine vision system errors for unmanned aerial vehicle navigation, *26th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), Edinburgh, 19–21 June 2017 : proceedings, IEEE*, 2017, pp. 1615–1620. DOI: 10.1109/ISIE.2017.8001488
13. Reyes-García M., Lindner L., Rivas-López M. et al Reduction of Angular Position Error of a Machine Vision System using the Digital Controller LM629, *44nd Annual Conference of the IEEE (IECON 2018), Washington, D.C., USA*, 21–23 Oct. 2018, proceedings, IEEE, 2018, pp. 3200–3205.
14. Lindner L., Sergiyenko O., Rivas-López M. et al UAV remote laser scanner improvement by continuous scanning using DC motors, *42nd Annual Conference of the IEEE (IECON 2016), Florence, 23–26 Oct. 2016 : proceedings*,

- IEEE*, 2016. – P. 371–376. DOI: 10.1109/IECON.2016.7793316
15. Metody robustnogo, nejro-nechetkogo i adaptivnogo upravleniya. Pod. red. N. D. Egupova. Moscow, Izd-vo MGTU im. N. E. Baumana, 2001, 744 p.
 16. Tamaki K., Ohishi K., Ohnishi K., Miyachi K. Microprocessor-Based Robust Control of a DC Servo Motor, *IEEE Control Systems Magazine*, 1986, Vol. 6, No. 5, pp. 30–36. DOI: 10.1109/MCS.1986.1105133
 17. Umeno T. Y., Hori Y. Robust speed control of DC servomotors using modern two degrees-of-freedom controller design / T. Umeno, // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 1991, Vol. 38, No. 5, pp. 363–368. DOI: 10.1109/41.97556
 18. Fallahi M., Azadi S. Robust control of DC motor using fuzzy sliding mode control with PID compensator, *International MultiConference of Engineers and Computer Scientists : Hong Kong, 18–20 March 2009, proceedings*. Hong Kong, 2009, Vol. 2, 5 p.
 19. Eker I. Sliding mode control with PID sliding surface and experimental application to an electromechanical plant // *ISA transactions*, 2006, Vol. 45, No. 1, pp. 109–118. DOI: 10.1016/S0019-0578(07)60070-6
 20. Březina L., Březina T. H-infinity controller design for a DC motor model with uncertain parameters, *Engineering mechanics*, 2011, Vol. 18, No. 5–6, pp. 271–279.
 21. Polilov E. V., Zelenov A. B., Rudnev E. S. Cintez robustnogo H_∞ -suboptimal'nogo reguljatora polozheniya pozicionnogo e'lektroprivoda, *Visnyk KDPU im. M. Ostrograds'kogo*, 2008, Vyp. 3, Ch. 1, pp. 64–71.
 22. Rudnev E. S. Praktycheskaja realizacyja y yssledovanye robustnyyh aljorytmov upravlenija synhronnyym elektropyvodom / E. S. Rudnev // *Elektromehanični i energozberigajuchi systemy*, 2012, Vol. 3, No. 19, pp. 102–107.
 23. Dey N., Mondal U., Mondal D. Design of a H-infinity robust controller for a DC servo motor system / N. Dey, // *Intelligent Control Power and Instrumentation (ICICPI): International Conference, Kolkata, India, 21–23 October 2016 : proceedings, IEEE, 2016*, pp. 27–31. DOI: 10.1109/ICICPI.2016.7859667
 24. Nguyen Ba-Hai, Ngo Hai-Bac, Ryu Jee-Hwan Novel Robust Control Algorithm of DC Motors, *6th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence, Gwangju, Korea, 29–31 October 2009 : proceedings*, pp. 119–122.
 25. Shamseldin M. A., Eissa M. A., EL-Samahy A. A. Practical Implementation of GA-Based PID Controller for Brushless DC Motor / M. A. Shamseldin, // *17th International Middle East Power System Conference, Mansoura University, Egypt, 15–17 December 2015 : proceedings*. Mansoura, 2015, 5 p.
 26. Veselý V., Ilka A. Generalized robust gain-scheduled PID controller design for affine LPV systems with polytopic uncertainty, *Systems & Control Letters*, 2017, Vol. 105, pp. 6–13. DOI: 10.1016/j.sysconle.2017.04.005
 27. Khubalkar S., Chopade A., Junghare A. et al. Design and realization of stand-alone digital fractional order PID controller for Buck converter fed DC, *Circuits, Systems, and Signal Processing*, 2016, Vol. 35, No. 6, pp. 2189–2211. DOI: 10.1007/s00034-016-0262-2
 28. Dorf R., Bishop R. *Sovremennye sistemy upravlenija* [Translation from English]. Moscow, Laboratorija Bazovyh Znanij, 2002, 832 p.