

УДК 681.515

DOI 10.22213/2410-9304-2019-1-110-116

## НАСТРОЙКА РЕГУЛЯТОРА ВРАЩАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ ДВУХКОЛЕСНОЙ МОБИЛЬНОЙ ПЛАТФОРМЫ

Е. К. Карпов, кандидат технических наук, доцент, Курганский государственный университет, Курган, Россия

Е. М. Кузнецова, старший преподаватель, Курганский государственный университет, Курган, Россия

*В данной статье приведено краткое описание исследуемых параметров двухколесной мобильной платформы. Для исследуемой платформы определен вид передаточной функции в канонической форме и выполнен расчет ее коэффициентов. Сравнение выходных характеристик вращательного движения мобильной платформы и ее математической модели показало, что с достаточной долей достоверности модель может быть использована для расчета коэффициентов и настройки регулятора мобильной платформы. Расхождение экспериментальной и расчетной кривой вызвано погрешностями эксперимента. Полное подавление колебаний и незначительное запаздывание при выходе переходной характеристики на установившееся значение обусловлено неучитываемыми компонентами передаточной функции при ее представлении колебательным звеном. На основе экспериментальных данных вычислены коэффициенты преобразователя управляющих воздействий, представляющего собой автоматический регулятор системы управления вращательным движением двухколесной мобильной платформы. Проведены исследования принципиальных возможностей реализации разработанного алгоритма на базе микроконтроллера. Особенность этого алгоритма состоит в отсутствии подобных решений для операционных систем микроконтроллеров, а также в отсутствии стандартных библиотек для программирования таких преобразователей на микроконтроллерах или программируемых логических контроллерах. Применяемая настройка регулятора позволяет быстрее и точнее управлять процессом вращения мобильной платформы вокруг вертикальной оси с учетом изменения характеристик управляемого объекта.*

**Ключевые слова:** мобильная платформа, модель объекта управления, преобразователь управляющих воздействий, микроконтроллер.

### Введение

Исследование возможностей автоматического управления мобильными платформами является актуальной задачей, так как условия их применения обладают высокой степенью неопределенности. Для преобразователя управляющих воздействий характерна большая робастность в сравнении с классическими регуляторами, поэтому он предпочтителен для управления именно мобильными платформами. Возможная реализация алгоритма подобного преобразователя на базе микроконтроллеров обеспечит высокую скорость обработки входной и выходной информации, высокую точность управления и универсальность устройства. Использование преобразователя в качестве регулятора при решении задачи управления движением мобильной платформы, как максимально приближенной модели транспортной машины, позволит более качественно оценить его эффективность.

Применение преобразователя управляющих воздействий не ограничивается лишь управлением мобильными платформами. Их принцип действия позволяет повысить качество систем управления различных умеренных и быстрых систем. Например, в статье [1] метод уменьшения остаточной вибрации для гибкой структуры с использованием модифицированной технологии формирования входа построен на основе концепции модально-фильтрующего импульс-

ного отклика. Эксперименты подтвердили эффективность подобного метода.

Новые типы сглаживателей закрытой формы и преобразователей с распределенной задержкой для затухающих колебательных моделей, основанные на экспоненциальном распределении чистого запаздывания, предложены в статье [2].

Сравнение методов фильтрации команд для уменьшения остаточной вибрации машин с компьютерным управлением выявило, что применение преобразователей входных сигналов (FIR-фильтров) более эффективно для уменьшения остаточной вибрации, чем обычных фильтров [3]. Результаты моделирования и эксперимента на роботизированном манипуляторе с гибким соединением, приведенные в статье [4], показывают, что технология формирования задающих воздействий, дополненная адаптивной нейронной сетью, превосходит аналоги по показателям времени переходных процессов.

В работе [5] представлен метод, использующий непрерывную функцию для формирования управляющего сигнала и снижения вибрации в гибких системах. Исследуется его эффективность и определяется количественно на основании экспериментов с мостовым краном.

Другим новым методом уменьшения вибрации является цифровая фильтрация при формировании входного сигнала [6]. В рукописи приведены доказательства того, что формирователи

входа подавляют вибрацию быстрее, чем нечеткие и низкочастотные фильтры.

Аналитическое рассмотрение фильтров с отрицательной амплитудой импульсов, приведенное в статье [7], направлено на реализацию преобразователя входного сигнала для сервомеханизмов в реальном времени.

Решения фильтров с минимальным квадратичным коэффициентом усиления с учетом ограничений отрицательного воздействия (пикового усиления) рассматриваются в статье [8]. Вопрос уменьшения при движении до нуля остаточной вибрации посредством низкочастотных преобразователей входных сигналов описан в статье [9]. Решение подобной задачи приведено в работе [10], посвященной разработке алгоритма адаптивного ввода, использующего рекурсивные методы наименьших квадратов. Sharper-фильтры используются для систем управления с несколькими входными параметрами [11] и позволяют снизить вибрации при высокоскоростном движении [12]. В литературе исследовано влияние ПИД-регулирования, фильтрации частоты и использование sharper-фильтра на системы, которые реагируют при изменении управляющего сигнала на колебания на выходе системы [13]. Получены решения замкнутых незатухающих систем для фильтра с ограничением по времени рывка [14]. Были исследованы sharper-фильтры, параметры которых рассчитывали с учетом нулей и полюсов передаточной функции системы [15].

Исследования российских ученых показали, что применение алгоритма нулевой вибрации (ZV-Shaper) [16] и shaping-фильтров в системах управления движением быстроходной гусеничной машины [17], позволяет повысить качество переходных процессов как при прямом движении, так и при ее повороте [18].

#### **Цели и задачи исследования**

Цель данной работы состоит в разработке алгоритма настройки коэффициентов преобразователя управляющих воздействий для повышения качества характеристик поворота двухколесной мобильной платформы. Основными задачами, которые необходимо решить, для достижения поставленной цели, являются:

- определение и расчет передаточной функции объекта управления;
- разработка программно-аппаратного комплекса регистрации процесса вращения мобильной платформы вокруг вертикальной оси;
- расчет преобразователя управляющих воздействий и экспериментальная оценка его эффективности.

#### **Объект управления – двухколесная мобильная платформа**

Мобильная платформа представляет собой пластмассовую раму с двумя ведущими колесами и шаровой опорой (рис. 1). На верхней части закреплены контроллер управления приводами на базе ATmega328, щелевые датчики вращения колес, подключенные к линиям прерываний микроконтроллера. При регулировании процесса вращения вокруг вертикальной оси используются данные, поступающие с трехосевого гироскопа и акселерометра MPU6050. Питание платформы осуществляется от аккумуляторного модуля.

Для расчета коэффициентов преобразователя управляющих воздействий необходимо определить вид и коэффициенты передаточной функции объекта управления.

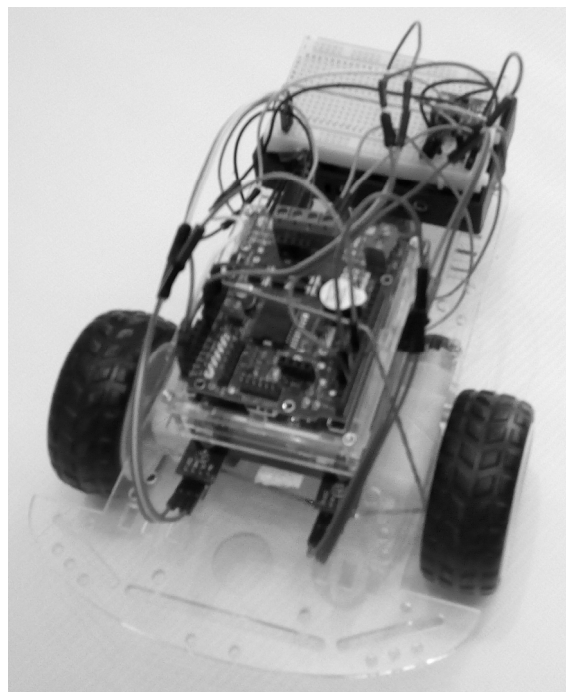


Рис. 1. Внешний вид мобильной платформы

Математическое описание объекта может быть получено либо аналитически, либо экспериментальными методами. Аналитические методы связывают входные и выходные параметры объекта с помощью дифференциальных, интегральных и разностных уравнений, основанных на физической природе процессов, происходящих в объекте. Экспериментальные методы базируются на пассивном либо активном эксперименте. В пассивном эксперименте регистрируются контролируемые параметры процесса в режиме нормальной работы объекта без внесения в него каких-либо преднамеренных возмущений. При активном эксперименте

используются искусственные возмущения, которые целенаправленно вводятся в объект. В данной работе определение передаточной функции производится по кривой переходного процесса, полученной в ходе эксперимента. В проводимом эксперименте движение мобильной платформы состоит только из вращения вокруг

вертикальной оси при линейной скорости движения, стремящейся к нулю, а продольная координата оси колес совпадает с центром масс мобильной платформы. График изменения угла поворота платформы во времени приведен на рис. 2.

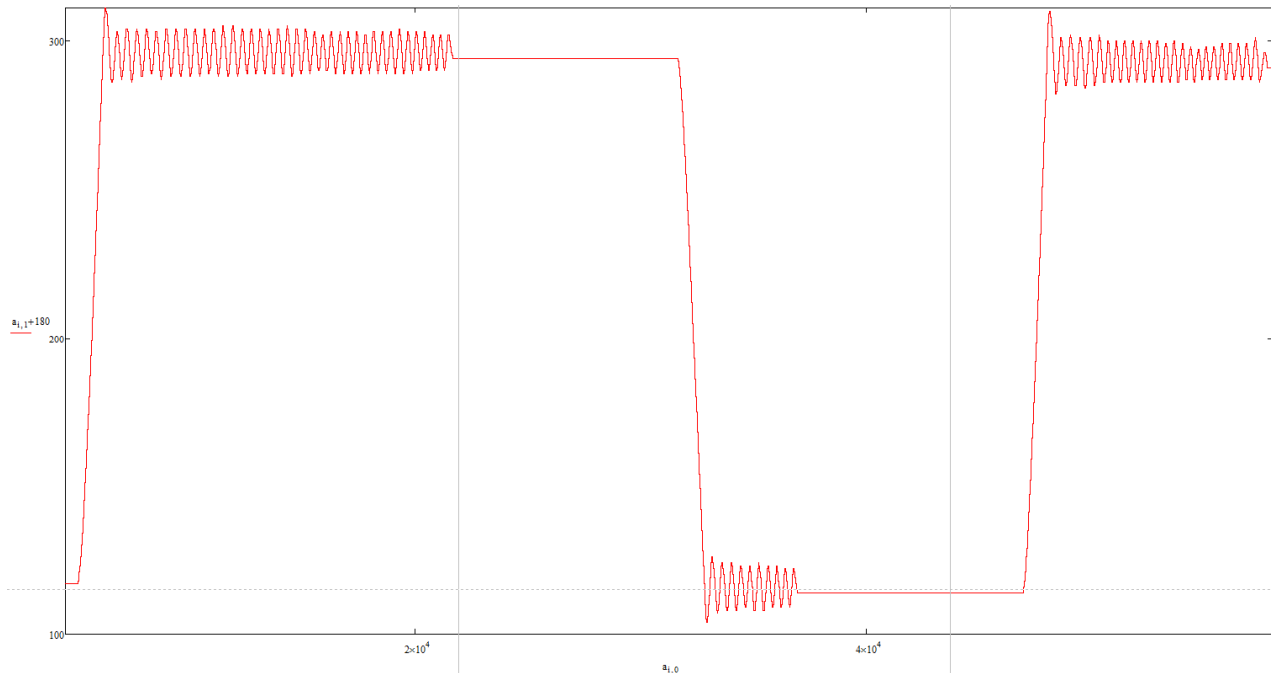


Рис. 2. Регистрируемая системой информация, поступающая с гироскопа-акселерометра

Переходная характеристика, полученная в результате эксперимента, имеет вид затухающих колебаний. Поэтому с определенными допущениями передаточную функцию мобильной платформы, как объекта управления, можно представить колебательным звеном с передаточной функцией:

$$W(p) = \frac{k}{T^2 p^2 + 2\zeta Tp + 1}. \quad (1)$$

Характеристики звена можно определить непосредственно из графика переходного процесса [19]. Связь параметров переходной характеристики с коэффициентами передаточной функции показана на рис. 3. Коэффициент передачи представляет собой отношение разностей выходных и входных величин объекта в установившемся режиме  $y(\infty)$  и  $x$  в начальный момент времени  $y(0)$  и  $x(0)$ :

$$k = \frac{y(\infty) - y(0)}{x - x(0)}. \quad (2)$$

Постоянная времени в  $\pi$  раз меньше периода собственных колебаний. А коэффициент демпфирования:

$$\zeta = \gamma/q, \quad (3)$$

где  $q=1/T$  – угловая частота свободных колебаний,  $\gamma$  – логарифмический декремент затухания:

$$\gamma = \frac{\lambda}{\pi} \ln \frac{A_1}{A_2}. \quad (4)$$

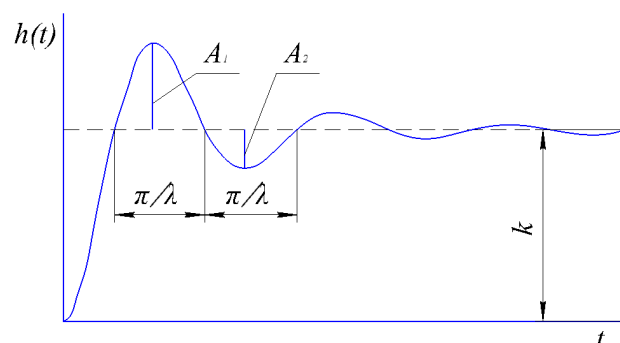


Рис. 3. Кривая переходного процесса типового колебательного звена

Графическим способом определяются значения  $\pi/\lambda$ ,  $A_1$ ,  $A_2$ , а затем по формулам (4) и (3) вычисляются основные параметры передаточной функции звена. Мобильная платформа в первом приближении может быть описана следующим уравнением:

$$W(p) = \frac{17}{0,32^2 p^2 + 2 \cdot 0,595 \cdot 0,32 p + 1}. \quad (5)$$

Кривая переходного процесса, построенная для данного колебательного звена с целью проверки адекватности модели, имеет более выраженные затухания. Незатухающие колебания экспериментальной кривой вызваны неучтенными параметрами системы, влияние которых нивелируется использованием преобразователя управляющих воздействий, рассчитанного для данного колебательного звена (рис. 4).

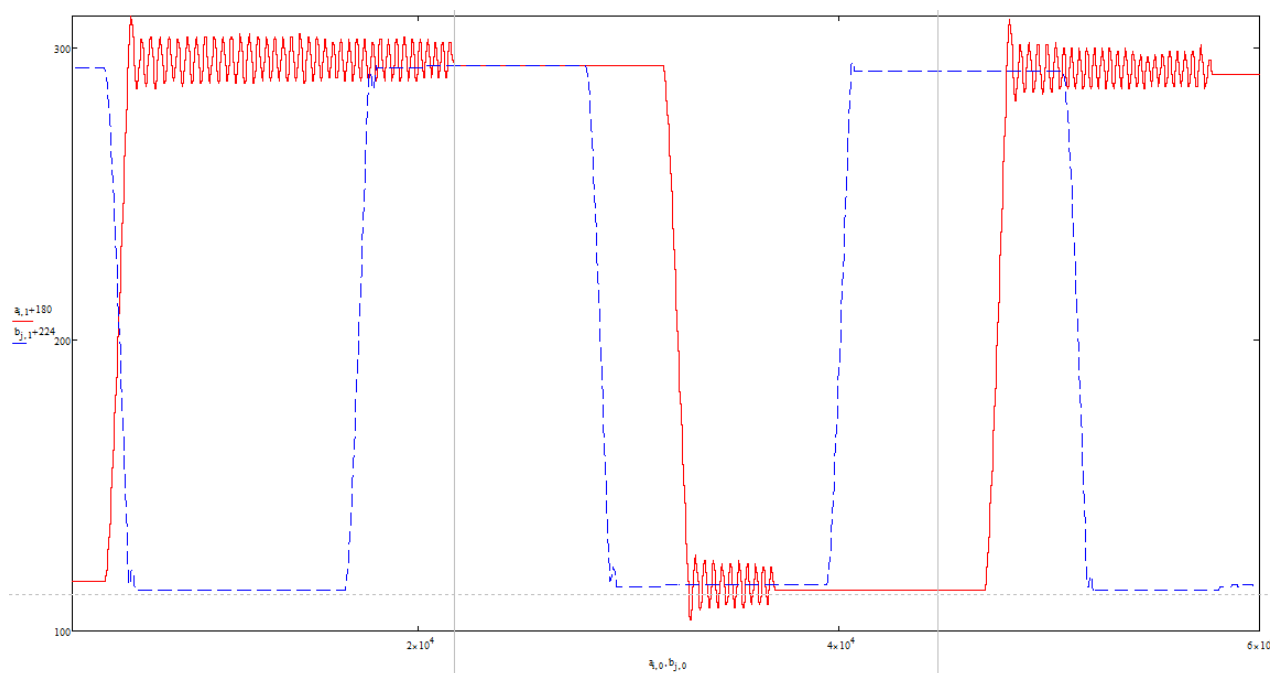


Рис. 4. Кривые переходного процесса для мобильной платформы, полученные с гироскопа-акселерометра, без регулятора (сплошная линия) и с использованием регулятора (штриховая линия)

Расчет коэффициентов регулятора, представляющего собой преобразователь управляющих воздействий, производится по формуле (2) статьи [20].

#### Программно-аппаратный комплекс регулирования вращения вокруг вертикальной оси мобильной платформы

Основой разрабатываемого программно-аппаратного комплекса является система управления движением мобильной платформы. Она включает в себя контроллер приводов колес, к аналоговым выходам которого подключены драйверы моторов левого и правого борта. К силовым выводам драйверов присоединены электромоторы с редукторами.

Исходная система управления дополняется целевыми датчиками вращения колес, сигнал с которых поступает на контроллер. Их применение позволит определять фактическую скорость

вращения колес и угол вращения каждого из них.

Для регистрации угла поворота мобильной платформы вокруг вертикальной оси и колебаний корпуса во время переходных процессов движения программно-аппаратный комплекс включает в себя трехосевой гироскоп и акселерометр, физически расположенный на оси вращения. Он подключается к дополнительному микроконтроллеру, предназначенному для обработки информации о процессе поворота вокруг вертикальной оси в ходе эксперимента и формирования задания контроллеру управления приводами колес. Через этот микроконтроллер также осуществляется передача информации от комплекса к компьютеру для записи и визуализации экспериментальных данных. Структурная схема разработанной системы приведена на рис. 5.

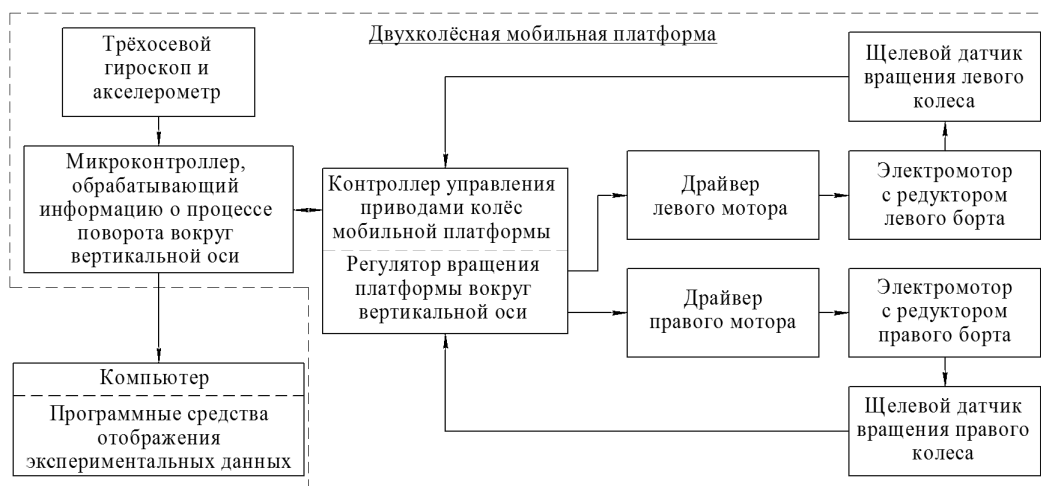


Рис. 5. Программно-аппаратный комплекс настройки регулятора мобильной платформы

Блок-схема алгоритма, реализующего преобразователь управляющих воздействий, приведена в статье [21].

#### Анализ результатов экспериментального сравнения исходной системы управления и преобразователя управляющих воздействий

Алгоритм проведения эксперимента прописан в основном цикле `loop( )` программы микроконтроллера, обрабатывающего информацию с трехосевого гироскопа и акселерометра. Он представляет собой последовательность повторяющихся действий, выполняемых в перерывах между процедурами обработки и передачи на компьютер данных от сенсора.

После подачи питания в систему и получения ей сигнала от компьютера о начале регистрации принимаемых данных запускается пятисекундный таймер ожидания стабилизации модуля гироскопа и акселерометра. По истечении заданного времени в памяти контроллера сохраняется текущее значение угла поворота мобильной платформы вокруг вертикальной оси  $Z$ , принадлежащего диапазону от 0 до 360 градусов. Далее система определяет целевое значение угла, который должен отличаться от текущего на предопределенную величину поворота – 180 градусов в данном эксперименте. Целевой угол также должен находиться в диапазоне  $[0;360]$  градусов – это сделано для того, чтобы упростить процесс дальнейшей обработки данных, так как, в случае выхода за один из пределов области значений, регистрируемая информация окажется у другого края диапазона.

Когда текущее и целевое значения определены, мобильная платформа начинает вращение до тех пор, пока они не станут равны. После этого платформа остановится на пять секунд и начнет выполнение этой последовательности

действий с начала. Таким образом, за один запуск всей системы можно зарегистрировать и сохранить данные нескольких переходных процессов для дальнейшего анализа. Конечные файлы имеют текстовый формат и содержат матрицу данных из двух столбцов – времени работы системы от ее включения в миллисекундах и значений угла вращения вокруг оси  $Z$ .

#### Заключение

В ходе выполнения работы была определена передаточная функция мобильной платформы и рассчитан преобразователь управляющих воздействий для нее. Разработан и экспериментально протестирован программно-аппаратный комплекс регистрации процесса вращения мобильной платформы вокруг вертикальной оси. Применение регулятора позволило уменьшить перерегулирование процесса поворота платформы с 9,6 до 0,6 %, а также привело к сокращению времени переходных процессов с 16,6 до 1,5 с. На основании полученных данных разрабатывается алгоритм корректировки коэффициентов регулятора по переходной характеристике.

Дальнейшим развитием работы является дополнение программно-аппаратного комплекса вторым трехосевым гироскопом и акселерометром, что позволит динамически вычислять мгновенный центр вращения. Проведение экспериментов с движением мобильной платформы по тестовой «змейке» с различной длиной полуволны даст данные об эффективности системы при различной скорости движения.

#### Библиографические ссылки

1. Lee K.S., Park Y.S. Residual vibration reduction for a flexible structure using a modified input shaping technique // *Robotica*. 2002. Vol. 20. P. 553-561.
2. Alikoc B., Vyhlidal T., Ergenc A.F. Closed-form smoothers and shapers with distributed delay for damped

oscillatory modes // *Iet Control Theory and Applications*. 2016. Vol. 10. No. 18. P. 2534-2542.

3. Singer N., Singhose W., Seering W. Comparison of filtering methods for reducing residual vibration // *European Journal of Control*. 1999. Vol. 5 No. 2-4. P. 208-218.

4. Chatlatanagulchai W., Nithi-uthai S., Intarawirat P. Intelligent Backstepping System to Increase Input Shaping Performance in Suppressing Residual Vibration of a Flexible-Joint Robot Manipulator // *Engineering Journal-Thailand*. 2017. Vol. 21. No. 5. P. 203-223.

5. Liang Z., Huang J., Zang Q. Using continuous function shaping to reduce vibration for flexible systems // *Proc. 32nd Chinese Control Conference*. Xian, 2013. P. 4276-4281.

6. Singhose W., Vaughan J. Reducing Vibration by Digital Filtering and Input Shaping // *Ieee Transactions on Control Systems Technology*. 2011. Vol. 19. No. 6. P. 1410-1420.

7. Dhanda A. Projected Phase-Plane Switching Curves for Vibration Reduction Filters With Negative Amplitudes // *Journal of Dynamic Systems Measurement and Control-Transactions of the Asme*. 2014. Vol. 136. No. 5. P. 9.

8. Cole M.O.T., Wongratanaphisan T. Optimal FIR Input Shaper Designs for Motion Control With Zero Residual Vibration // *Journal of Dynamic Systems Measurement and Control-Transactions of the Asme*. 2011. Vol. 133. No. 2. P. 9.

9. Cole M. O. T. A class of low-pass FIR input shaping filters achieving exact residual vibration cancellation // *Automatica*. 2012. Vol. 48. No. 9. P. 2377-2380.

10. Cole M. O. T., Wongratanaphisan T. A Direct Method of Adaptive FIR Input Shaping for Motion Control With Zero Residual Vibration // *Ieee-Asme Transactions on Mechatronics*. 2013. Vol. 18. No. 1. P. 316-327.

11. Pao L.Y. Multi-input shaping design for vibration reduction // *Automatica*. 1999. Vol. 35. No. 1. P. 81-89.

12. Peng D.W., Singh T., Milano M. Zero-phase velocity tracking of vibratory systems // *Control Engineering Practice*. 2015. Vol. 40. P. 93-101.

13. Sarafin P., Revak M., Chovanec M., Sevcik P. Self-tuning input shaper modelling // *2016 International Conference on Information and Digital Technologies (Idt)*. 2016. P. 271-273.

14. Singh T. Jerk limited input shapers // *Journal of Dynamic Systems Measurement and Control-Transactions of the Asme*. 2004. Vol. 126. No. 1. P. 215-219.

15. Singh T., Pole-Zero, Zero-Pole Canceling Input Shapers // *Journal of Dynamic Systems Measurement and Control-Transactions of the Asme*. 2012. Vol. 134. No. 1. P. 10.

16. Повышение качества переходных процессов при управлении поворотом быстроходной гусеничной машины / С. В. Абдулов, В. Б. Держанский, И. А. Тараторкин, А. И. Тараторкин, А. А. Волков // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение*. 2018. Т. 18. № 3. С. 21-29.

17. Держанский В. Б., Тараторкин И. А., Карпов Е. К. Применение shaping-фильтров в системе управ-

ления движением быстроходной гусеничной машины // *Известия Московского государственного технического университета МАМИ*. 2014. Т. 1. № 1 (19). С. 8-13.

18. Taratorkin I., Derzhanskii V., Taratorkin A. Improving the quality of transient response during automatic control of the turn of a tracked vehicle based on the implementation of structured input shapers // *MATEC Web of Conferences*. 2017. P. 06029.

19. Бесекерский В. А., Попов Е. П. Теория систем автоматического управления. Изд. 4-е, перераб. и доп. СПб. : Профессия, 2003. 752 с.

20. Карпов Е. К., Кузнецова Е. М. Программно-аппаратная реализация преобразователя управляющих воздействий на базе микроконтроллера АТ-МЕГА328Р // *Интеллектуальные системы в производстве*. 2018. № 4 (16). С. 95-102.

21. Карпов Е. К., Карпова И. Е. Применение преобразователя управляющих воздействий в системе с обратной связью // *Наука XXI века: технологии, управление, безопасность : сборник материалов I международной научно-практической конференции*. 2017. С. 220-226.

## References

1. Lee K.S., Park Y.S. (2002) Residual vibration reduction for a flexible structure using a modified input shaping technique. In *2002 Robotica*. (pp. 553-561).

2. Alikoc B., Vyhldal T., Ergenc A.F. (2016) Closed-form smoothers and shapers with distributed delay for damped oscillatory modes. In *Iet Control Theory and Applications*. (P. 2534-2542).

3. Singer N., Singhose W., Seering W. (1999) Comparison of filtering methods for reducing residual vibration. In *1999 European Journal of Control*. (pp. 208-218).

4. Chatlatanagulchai W., Nithi-uthai S., Intarawirat P. (2017) Intelligent Backstepping System to Increase Input Shaping Performance in Suppressing Residual Vibration of a Flexible-Joint Robot Manipulator. In *Engineering Journal-Thailand*. (P. 203-223).

5. Liang Z., Huang J., Zang Q. (2013) Using continuous function shaping to reduce vibration for flexible systems. In *32nd Chinese Control Conference*. (pp. 4276-4281).

6. Singhose W., Vaughan J. (2011) Reducing Vibration by Digital Filtering and Input Shaping. In *2011 Ieee Transactions on Control Systems Technology*. (pp. 1410-1420).

7. Dhanda A. Projected Phase-Plane Switching Curves for Vibration Reduction Filters With Negative Amplitudes. In *2014 Journal of Dynamic Systems Measurement and Control-Transactions of the Asme*. P. 9.

8. Cole M.O.T., Wongratanaphisan T. (2011) Optimal FIR Input Shaper Designs for Motion Control With Zero Residual Vibration. In *Journal of Dynamic Systems Measurement and Control-Transactions of the Asme* P. 9.

9. Cole M. O. T. (2012) A class of low-pass FIR input shaping filters achieving exact residual vibration cancellation. In *Automatica*. Pp. 2377-2380.
10. Cole M. O. T., Wongratanaphisan T. (2013) A Direct Method of Adaptive FIR Input Shaping for Motion Control With Zero Residual Vibration. In *Ieee-Asme Transactions on Mechatronics*. Pp. 316-327.
11. Pao L.Y. (1999) Multi-input shaping design for vibration reduction. In *Automatica*. Pp. 81-89.
12. Peng D.W., Singh T., Milano M. (2015) Zero-phase velocity tracking of vibratory systems. In *Control Engineering Practice*. Pp. 93-101.
13. Sarafin P., Revak M., Chovanec M., Sevcik P. (2016) Self-tuning input shaper modelling. In *2016 International Conference on Information and Digital Technologies (Idt)*. Pp. 271-273.
14. Singh T. (2004) Jerk limited input shapers. In *Journal of Dynamic Systems Measurement and Control-Transactions of the Asme*. Pp. 215-219.
15. Singh T. (2012) Pole-Zero, Zero-Pole Canceling Input Shapers. In *Journal of Dynamic Systems Measurement and Control-Transactions of the Asme*. P. 10.
16. Abdulov S.V., Derzhanskii V.B., Taratorkin I.A., Taratorkin A.I., Volkov A.A. [Improving the quality of transients when controlling the rotation of a high-speed tracked vehicle]. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gos. Universiteta. Mashinostroenie*, 2018, no. 18 (3). Pp. 21-29 (in Russ.).
17. Derzhanskii V.B., Taratorkin I.A., Karpov, E. K. [Using of shaping-filters in motion control system of high speed caterpillar machine]. *Izvestiya Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta MAMI*. 2014, no. 1 (19). Pp. 8-13 (in Russ.).
18. Taratorkin I., Derzhanskii V., Taratorkin A. (2017) Improving the quality of transient response during automatic control of the turn of a tracked vehicle based on the implementation of structured input shapers. In *MATEC Web of Conferences*. 2017. P. 06029.
19. Besekerskiy V.A., Popov E.P. (2003) *Teoriya sistem avtomaticheskogo upravleniya* [Theory of automatic control systems]. SPb: Profession (in Russ.).
20. Karpov E.K., Kuznetsova E.M. [Software and hardware implementation of the converter of control actions based on the microcontroller ATMEGA328P]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*, 2018. Vol. 16, no. 4. Pp. 95-102 (in Russ.).
21. Karpov E.K., Karpova I.E. [Application of the controller of action converter in the system with feedback]. *Nauka XXI veka: tekhnologii, upravlenie, bezopasnost'*. [Proc. Science of the XXI century: technology, management, security]. 2017. Pp. 220-226 (in Russ.).

\* \* \*

#### **Adjustment of the Two-wheeled Mobile Platform Rotative Movement Regulator**

*E. K. Karpov*, Kurgan State University

*E. M. Kuznetsova*, Kurgan State University

*The paper provides a brief description of two-wheeled mobile platform parameters. The transfer function type in the canonical form is determined for the studied platform and its coefficients are calculated. Comparison of the output characteristics of the mobile platform rotational motion and its mathematical model showed that with a sufficient degree of reliability the model can be used to calculate the coefficients and adjust the mobile platform regulator. The discrepancy between the experimental and calculated curve is caused by experimental errors. Complete suppression of oscillations and a slight delay at the transient response to the steady-state value output is due to unaccounted components of the transfer function when it is presented by the oscillatory link. Based on the experimental data, the control actions shaper coefficients are calculated as a control system automatic controller of the rotational motion control system of a two-wheeled mobile platform. Researches of principal possibilities of the developed algorithm realization on the microcontroller basis are carried out. The peculiarity of this algorithm is the absence of such solutions for microcontrollers operating systems, as well as the absence of standard libraries for programming such converters on microcontrollers or programmable logic controllers. The applied controller setting allows you to control the process of rotating the mobile platform around the vertical axis faster and more accurately, taking into account changes in the controlled object characteristics.*

**Keywords:** mobile platform, control object model, control actions shaper, microcontroller.

Получено: 21.03.19