

В. А. Карташев, проф., вед. науч. сотр., kart@list.ru, В. В. Карташев, мл. науч. сотр.,
ФИЦ Институт прикладной математики им. М. В. Келдыша РАН

Управление траекторией торможения манипулятора с неисправным приводом методом задержек включения тормозов

Исследование движения робота в нештатных ситуациях является важным новым направлением робототехники. Его практическая значимость состоит в учете на этапе проектирования комплексов и разработке управления ими отказов и случаев некорректной работы оборудования в целях минимизации возможного ущерба.

При возникновении аварийной ситуации система управления манипуляционного робота автоматически останавливает манипулятор, отключая приводы и активируя тормоза. Аварийное торможение манипулятора является неуправляемым и может привести к существенным отклонениям от программной траектории. Непредсказуемость вектора отклонения чревата столкновениями с оборудованием, находящимися в рабочей зоне робота.

В работе рассматривается устройство, позволяющее формировать траекторию аварийного торможения методом задержек включения тормозов. Устройство обеспечивает включение тормозов каждой степени подвижности независимо друг от друга. Задержки рассчитываются таким образом, чтобы минимизировать отклонение траектории торможения от программной траектории.

Дано теоретическое решение математической задачи минимизации отклонения от программной траектории. Решение сведено к конечным формулам, зависящим от скоростей в шарнирах робота в момент активации аварийного торможения и интенсивности замедления тормозом каждой степени подвижности.

Приводится сравнение предлагаемого способа формирования траектории аварийного торможения с описанным ранее, в котором приводы степеней подвижности отключаются с рассчитанными задержками и затем включаются тормоза. Достоинством такого способа является уменьшение амплитуды отклонения на порядок.

В предложенном способе все приводы отключаются одновременно, и на первом этапе торможения происходит только за счет сил трения в редукторах. По истечении некоторого рассчитанного в начале торможения интервала времени, своего для каждой степени подвижности, включаются тормоза. Аналитические оценки показывают, что во всех случаях такой способ обеспечивает меньшие отклонения от программной траектории. Кроме того, он применим даже в случае возникновения неисправности хотя бы одного из приводов.

Ключевые слова: манипуляционный робот, аварийное торможение, формирование траектории торможения

Введение

Проблеме обеспечения устойчивости работы при отказах оборудования традиционно уделяется достаточно много внимания разработчиками сложных аппаратов [1, 2], технологических процессов [3] и систем управления ими. Для этой цели применяются различные методы повышения отказоустойчивости аппаратуры [1] и алгоритмы прогнозирования отказов [2].

Направление, связанное с разработкой управления роботом в нештатных ситуациях, возникло сравнительно недавно. Его практическая значимость состоит в учете на этапе проектирования возможных отказов и некорректной работы оборудования в целях минимизации ущерба [4], определении границ возможных нагрузок [5], разработке алгоритмов своевременного выявления отказов и реакции на них систем управления [6].

При обнаружении нештатной ситуации система управления останавливает манипулятор путем отключения приводов и приведения в действие тормозов. Такой способ аварийного торможения используют все современные манипуляционные роботы [7, 8].

Примером нештатной ситуации является возникновение неисправности в приводе манипулятора. Это может стать причиной непредсказуемого отклонения от программной траектории в силу того, что оказывается невозможной реализация заданного движения степени подвижности. Применение аварийного останова позволяет уменьшить вероятность опасных столкновений с предметами в рабочей зоне.

Известная проблема аварийного останова состоит в том, что скорости степеней подвижности изменяются независимо друг от друга, в результате чего манипулятор уводит от программ-

ной траектории. Отклонение можно уменьшить за счет увеличения интенсивности торможения. Для этого в дополнение к тормозам можно использовать двигатели с закороченными на время торможения с помощью реле обмотками [9], создавать дополнительный тормозной момент двигателями [10] и корректировать траекторию торможения в сторону программной траектории с помощью двигателей [11] путем перехода на программу управления торможением в управляющем контроллере.

Следует также учитывать, что интенсивность торможения с применением тормозов существенно больше, чем за счет торможения двигателями, поэтому использование двигателей не способно существенно увеличить эффективность торможения и уменьшить отклонение от программной траектории. Кроме этого, применимость всех рассмотренных способов ограничена случаями полностью исправного оборудования робота. При неисправности хотя бы одного датчика положения применить его нельзя. Необходимо принять также во внимание, что отказы оборудования, которые являются существенными для обеспечения безопасности движения манипулятора, могут быть выявлены в масштабе реального времени. Решение этой задачи приведено в работе [6].

В статье [12] описан способ формирования траектории аварийного торможения, в котором приводы отключаются с некоторой задержкой. Задержки вычисляются перед началом торможения с тем, чтобы минимизировать отклонения траектории торможения от программной. Полученные оценки показывают, что таким способом амплитуда отклонения может быть уменьшена почти на порядок. В работах [13, 14] описано устройство и способ его подключения к системе управления, которое делает возможным реализацию способа.

Рассматриваемый алгоритм формирования траектории предполагает исправность всех приводов. Это условие не позволяет применять его в случае отказа хотя бы одного привода в силу того, что после отключения питания скорость движения степени подвижности не будет постоянной и станет уменьшаться за счет трения в редукторе.

В данной работе рассматривается способ формирования траектории аварийного торможения, в котором все приводы выключаются одновременно, а каждый тормоз приводится в действие с некоторой задержкой.

Постановка задачи

В современных манипуляционных роботах электромагнитные тормоза включаются одновременно при выключении их шины питания. Техническая реализация предлагаемого способа управления траекторией торможения предполагает, что система управления может включить тормоз любой степени подвижности независимо от других. Эта возможность может быть достигнута путем подключения к системе управления рассматриваемого ниже устройства. Оно обеспечивает включение тормозов в требуемой последовательности и с необходимыми задержками.

Устройство управления аварийным торможением

На рис. 1 показана структурная схема рассматриваемого устройства и подключение его к системе управления манипуляционного робота. На рис. 1 обозначены: 1 — манипулятор, $11i$ — тормоз i -й степени подвижности манипулятора, $12i$ — двигатель, $13i$ — датчик положения, $14i$ — электронная схема включения/выключения тормоза, $15i$ — ее устройство управления, 2 — система управления роботом, 21 — управляющая ЭВМ системы управления роботом, 22 — устройство включения/выключения тормозов по сигналам управляющей

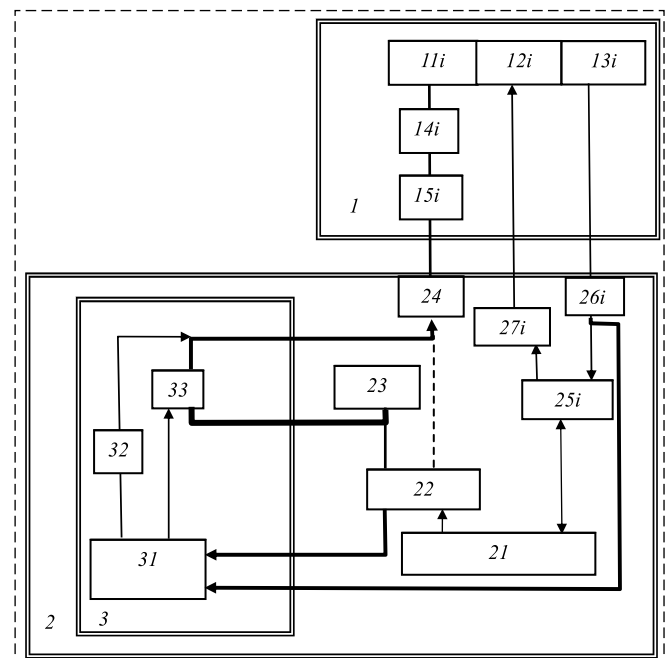


Рис. 1
Fig. 1

ЭВМ, 23 — блок питания тормозов, 24 — разъем управления тормозами, 25*i* — контроллер *i*-й степени подвижности манипулятора, 26*i* — разъем сигналов от датчиков положения манипулятора, 27*i* — блок управления двигателем от сигналов контроллера, 3 — устройство управления задержками включения тормозов, 31 — контроллер устройства, 32 — передатчик сигнала включения/выключения тормозов по линии питания, 33 — устройство включения/выключения питания тормозов.

Соединения, которые в системе управления должны быть исключены, отмечены на схеме штриховой линией, те, которые должны быть установлены при подключении, отмечены утолщенной линией.

Устройство работает следующим образом. При необходимости аварийно остановить манипулятор контроллер робота 21 с помощью блока 22 штатно включает все тормоза путем снятия напряжения, поступающего на них от источника питания 23. В результате на выходе блока 22 оказывается низкий уровень напряжения. Напряжение на шине питания подается на информационный вход контроллера 31.

При появлении низкого уровня на входе контроллер рассчитывает моменты времени, в которые должны быть включены тормоза каждой степени подвижности. Они зависят от текущих скоростей степеней, которые вычисляются по показаниям датчиков положения 13*i*. Показания датчиков поступают в стойку управления через входы 27*i*. При движении манипулятора по программной траектории текущие скорости степеней подвижности совпадают с программными скоростями.

При наступлении момента включения тормоза очередной степени подвижности *i* контроллер 31 с помощью устройства 32 передает по линии питания тормозов команду о включении тормоза контроллеру 15*i*, который выполняет ее посредством блока 14*i*. После включения тормозов последней степени подвижности контроллер 31 с помощью блока 33 одновременно отключает линию питания тормозов, что гарантирует их включение даже при отказе блоков 14*i* и 15*i*.

Из приведенного описания работы подключаемого устройства можно сделать вывод, что его контроллер позволяет включать тормоза каждой степени подвижности независимо от других. В результате оказывается возможным формировать траекторию манипулятора по

средством выбора моментов начала торможения каждой степени подвижности с использованием тормозов, в том числе и для того, чтобы обеспечить близость траектории торможения к программной траектории.

Опишем алгоритм вычисления задержек для манипуляционного робота, имеющего *n* степеней подвижности.

Алгоритм вычисления задержек

При переходе в режим аварийного торможения контроллер рассматриваемого устройства прогнозирует длительности торможения всех степеней подвижности:

$$T_i = \frac{V_i}{w_{ib}}, i = \overline{1, n}.$$

Здесь V_i — текущие скорости, которые вычисляются контроллером по показаниям датчиков положения; w_{ib} — ускорения торможения степеней подвижности за счет тормозов.

На основе вычисленных величин контроллер находит такую степень, длительность торможения которой наибольшая. Не ограничивая общности, будем считать, что она имеет номер 1. Затем для каждой степени подвижности *i* контроллер определяет ускорения w_{ip} , при которых обеспечивается торможение манипулятора вдоль программной траектории: $w_{ip} = V_i/T_1$, и сравнивает найденную величину с ускорением w_{ig} торможения силами трения в редукторе. Если $w_{ig} \geq w_{ip}$, то тормоз степени подвижности *i* включается только после ее полной остановки.

Если $w_{ig} < w_{ip}$, то контроллер приводит в действие тормоза с задержкой T_{id} :

$$T_{id} = \frac{T_i - T_1}{\sqrt{2(1 - w_{ig}/w_{ip})} + 1 - w_{ig}/w_{ib}}, i = \overline{1, n}. \quad (1)$$

Решение задачи минимизации отклонения от программной траектории

Опишем кратко решение задачи минимизации отклонения от программной траектории. Для этого рассмотрим рис. 2. На нем приняты следующие обозначения: O — момент отключения питания приводов; 1 — индекс степени подвижности с наибольшей длительностью торможения; изменение ее скорости дается линией $V_1 T_1$; V_1 — скорость в начале аварийного

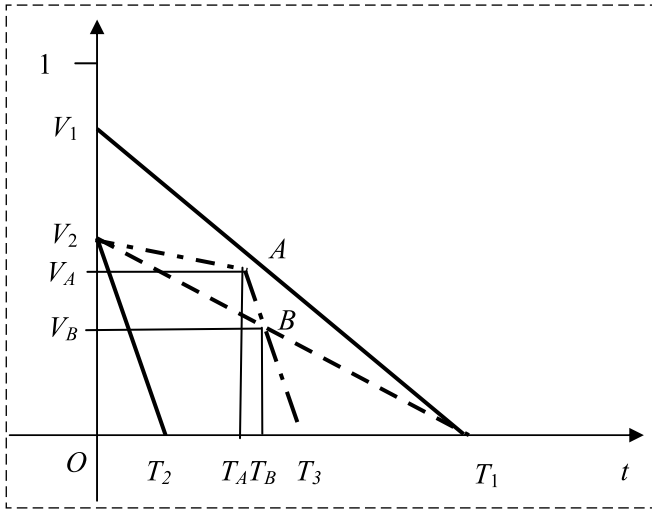


Рис. 2
Fig. 2

торможения; T_1 — длительность торможения тормозом; V_2, T_2 — те же величины для второй степени подвижности; значения скоростей каждой степени подвижности изображаются в относительных единицах к их максимальным значениям; 1 на вертикальной оси означает максимальную скорость.

Штриховой линией обозначено изменение скорости второй степени подвижности при ее движении по программной траектории. Нетрудно показать, что в точке останова отклонение второй степени подвижности от программной траектории пропорционально площади треугольника $V_1T_1T_2$, которую обозначим $S\Delta V_1T_1T_2$.

Штрихпунктирная линия показывает изменение скорости второй степени подвижности, когда траектория торможения формируется с помощью предлагаемого алгоритма. До момента времени T_A торможение происходит за счет трения в редукторе. Рис. 2 соответствует случаю, при котором ускорение торможения силами трения редуктора второй степени подвижности w_{2g} меньше, чем ускорение w_{2p} , необходимое для движения по программной траектории.

Затем включается тормоз, и степень подвижности останавливается в момент времени T_3 . На интервале OT_B (точка B — точка пересечения отрезков V_2T_1 и AT_3) вторая степень подвижности движется с опережением по отношению к программной траектории. На интервале T_BT_1 скорость второй степени меньше, чем требуется для движения по программной траектории.

В момент времени T_B отклонение от программной траектории пропорционально $S\Delta V_2AB$, после остановки — пропорционально $|S\Delta V_2AB -$

$S\Delta BT_1T_3|$. Максимальное отклонение равно $\max(S\Delta V_2AB, |S\Delta V_2AB - S\Delta BT_1T_3|)$.

Минимальным отклонение будет при выполнении условия

$$S\Delta V_2AB(T_A) = |S\Delta V_2AB(T_A) - S\Delta BT_1T_3(T_A)|,$$

которое равносильно условию $2S\Delta V_2AB(T_A) = S\Delta BT_1T_3(T_A)$.

Аналитическое решение этого уравнения приводит к формуле (1).

Случай малого значения начальной скорости

При малом значении начальной скорости второй степени подвижности ускорение w_{2p} движения вдоль программной траектории может оказаться настолько малым, что оно окажется меньше замедления трением в редукторе w_{2g} (рис. 3). В этом случае до полной остановки торможение должно обеспечиваться силами трения в редукторе и только затем следует включить тормоз.

При оценке отклонения от программной траектории следует иметь в виду, что ускорение торможения за счет трения в редукторе кратно меньше, чем ускорение w_{2b} при использовании электромагнитного тормоза. Рассматриваемый случай имеет место только в том случае, когда ускорение торможения по программной траектории w_{2p} достаточно мало. Нетрудно показать, что отклонение от программной траектории, пропорциональное $S\Delta V_2AT_1$, удовлетворяет соотношению

$$\frac{S(\Delta V_2AT_1)}{S(\Delta V_1OT_1)} = \frac{w_{2g}}{4w_{1b}} \ll \frac{1}{4}.$$

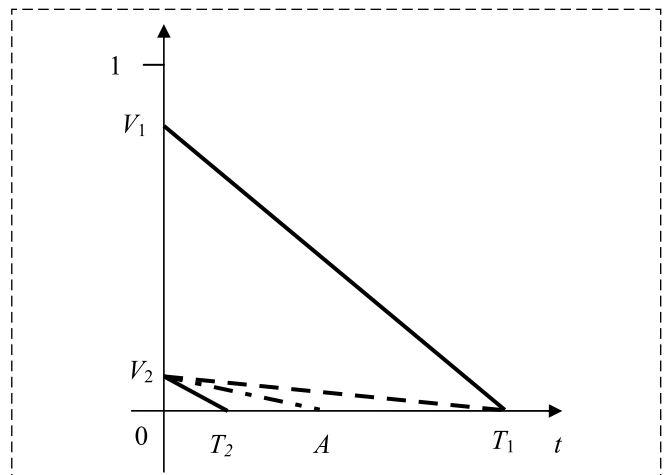


Рис. 3
Fig. 3

Из приведенного неравенства следует, что отклонение пренебрежимо мало по сравнению с выбегом манипулятора при торможении $S\Delta V_1 OT_1$.

Сравнение способов формирования траектории

Важным свойством рассматриваемого способа формирования траектории (в нем питание приводов отключается сразу, и на первом этапе торможение осуществляется за счет сил трения в редукторе) является тот факт, что он позволяет обеспечить меньшее отклонение от программной траектории, чем предложенный ранее способ, основанный на задержке отключения приводов. Справедливость сформулированного свойства основана на следующих соображениях.

Пусть T_A — решение задачи минимизации отклонения для рассматриваемого алгоритма. Следовательно, для него выполнено условие

$$2S\Delta V_2 AB(T_A) = S\Delta BT_1 T_3(T_A).$$

В рассмотренном ранее алгоритме после активации аварийного режима торможения до момента отключения приводов (т. е. в течение десятых долей секунды) скорость степени подвижности практически не меняется. На интервале OT_A ее график дается горизонтальной линией, проходящей через точку OV_2 .

Если в момент времени T_A включить тормоз, то график изменения скорости окажется на прямой AT_A . Обозначим A^* точку пересечения горизонтальной линии и прямой AT_A ; $A^* = (T_A, V_2)$. Нетрудно установить, что

$$S\Delta V_2 A^* B(T_A) > S\Delta V_2 AB(T_A) \\ \text{и } 2S\Delta V_2 A^* B(T_A) > S\Delta BT_1 T_3(T_A).$$

Из этих неравенств следует, что наименьшее отклонение для предложенного ранее алгоритма достигается при включении тормоза в момент времени $T_A^* < T_A$, т. е. несколько раньше, чем в рассматриваемом алгоритме. В этом случае верно неравенство $S\Delta BT_1 T_3(T_A^*) > S\Delta V_2 AB(T_A)$, которое означает, что отклонение от программной траектории в прежнем алгоритме, пропорциональное $S\Delta BT_1 T_3(T_A^*)$, больше, чем в новом.

Доказанное свойство показывает, что одновременное отключение питания всех приводов позволяет сформировать траекторию аварий-

ного торможения с меньшим отклонением от программной траектории, чем рассмотренный ранее способ, в котором приводы отключаются с некоторыми задержками.

Заключение

При обнаружении неисправности система безопасности манипуляционного робота должна немедленно его остановить. Для того чтобы избежать неуправляемого движения на этапе торможения и связанного с этим ухода от программной траектории, предлагается формировать траекторию аварийного торможения путем включения тормозов с некоторыми задержками, предоставляя возможность какое-то время тормозиться силами трения в редукторах.

Предложенный способ управления торможением схож с рассмотренным ранее в работе [12], в котором выключение каждого привода и одновременная активация тормоза степени подвижности осуществляются с некоторой задержкой. При этом удается кратно уменьшить отклонение от программной траектории. В настоящем исследовании показано, что в предложенном новом способе формирования траектории торможения отклонения во всех случаях оказываются меньшими, чем в исходном.

Существенным преимуществом нового способа является также тот факт, что в момент возникновения опасности происходит одновременное отключение питания всех приводов. Это отличие позволяет применять его даже в случае отказа хотя бы одного из приводов.

Список литературы

1. Заведеев А. И. Построение бортовой системы управления космическим аппаратом повышенной отказоустойчивости с применением адаптивной логики в алгоритмах диагностики и контроля // Мехатроника, автоматизация, управление. 2018. Т. 19, № 10. С. 664—672.
2. Большаков А. А., Кулик А. А., Сергушов И. В., Скрипаль Е. Н. Метод прогнозирования авиационного происшествия летательного аппарата // Мехатроника, автоматизация, управление. 2018. Т. 19, № 6. С. 416—423.
3. Щербаков М. А., Кушников В. А. Модели и алгоритмы системы управления аварийными ситуациями при производстве стекла // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2011. № 2 (55). С. 196—199.
4. Резчиков А. Ф., Кушников В. А., Иващенко В. А., Фоминых Д. С., Богомолов А. С., Филимонок Л. Ю. Минимизация ущерба от нарушения технологического процесса в сварочных роботизированных технологических комплексах // Мехатроника, автоматизация, управление. 2017. Т. 18, № 5. С. 328—332.

5. **Кодяков А. С., Павлюк Н. А., Будков В. Ю.** Исследование устойчивости конструкции антропоморфного робота Антарес при воздействии внешней нагрузки // *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2017. Т. 18, № 5. С. 321–327.

6. **Карташев В. А., Сафронов В. В.** Система автоматического контроля безопасности перемещений манипуляционного робота // *Изв. РАН. ТИСУ*. 2017. № 2. С. 162–167.

7. **User manual of UR3/CB3 robot.** СПб.: Universal Robots, 2015. 147 с

8. **KUKA Robots KR 5 arc Specification.** Augsburg, KUKA Roboter GmbH, 2011. 67 p.

9. **Ho S. J., Rak K. S.** Emergency Stop Method of Industrial Robot. Pat. KR20120045766 (A), 2012-05-09.

10. **Hofmann J., Schwarz R., Marx S.** Industrial Robot Having Redundant Emergency Brake Circuit. US8736219 — 2014-05-27.

11. **Bosga S.** A Robot with at least two Separate Brake Devices and a Method of Controlling such a Robot. Pat. WO 2008037799.

12. **Карташев В. А., Карташев В. В.** Способ формирования траектории аварийного торможения манипулятора // *Изв. РАН. ТИСУ*. 2018. № 4. С. 162–168.

13. **Карташев В. А., Карташев В. В.** Формирование траектории аварийного торможения манипулятора методом последовательного отключения приводов // *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2018. Т. 19, № 8. С. 536–541.

14. **Карташев В. А., Карташев В. В.** Устройство управления аварийным торможением манипулятора. Патент РФ № 2 658589.

Emergency Braking Trajectory Control for Manipulator in the Case of Driver Failure

V. A. Kartashev, kart@list.ru, V. V. Kartashev, vsevolod.kartashev@gmail.com,
FRC Keldysh Institute for Applied Mathematics RAS, Russia, 125047, Moscow

Corresponding author: **Kartashev Vladimir A.** Full Professor, Doctor of Math., Leading Research Fellow,
FRC Keldysh Institute for Applied Mathematics RAS, 125047, Moscow, Russian Federation,
e-mail: kart@list.ru

Accepted on September 02, 2019

Abstract

In emergency situation robot control system stops the manipulator by shutting down drivers and activating brakes. This mode is used in all cases of equipment failure detection or while alarm button is pressed on control panel. Emergency braking is uncontrolled motion. As result manipulator movement deviates from program trajectory as the relations between velocities in joints differ significantly. This creates danger of collisions with objects in robot work space. The paper describes device that can be connected to control system. Connection needs insignificant changing in hardware architecture of robot control system. Device consists of controller and individual electronic schemes that are able to activate brakes of each degree of freedom regardless from other one. This feature allows to design braking trajectory by activating brakes in specific sequence and calculated delays. Mathematical solution for deviation minimization problem of braking trajectory from program one is presented. The solution is reduced to mathematical formulas which depend of the temporary velocities and values of braking decelerations in manipulator joints. The considered way of control differs from similar one described earlier by that in emergency situation drivers turn off immediately. On the first stage manipulator brakes by friction forces in gear boxes. Theoretical evaluations show that in all cases this reduces deviations from program trajectory. Additionally the new way can be used even if fault takes place at least one of drivers.

Keywords: manipulation robot, emergency braking, braking trajectory designing

For citation:

Kartashev V. A., Kartashev V. V. Emergency Braking Trajectory Control for Manipulator in the Case of Driver Failure, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2020, vol. 21, no. 1, pp. 28–33.

DOI: 10.17587/mau.21.28-33

References

1. **Zavedeev A. I.** *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2018, vol. 19, no. 10, pp. 664–672 (in Russian).

2. **Bolshakov A. A., Kulik A. A., Sergushov I. V., Scripal E. N.** *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2018, vol. 19, no. 6, pp. 416–423 (in Russian).

3. **Scherbakov M. A., Kushnikov V. A.** *Vestnik of Saratov University*, 2011, no. 2, pp. 196–199 (in Russian).

4. **Rezchikov A. F., Kushnikov V. A., Ivaschenko V. A., Fominikh D. S., Bogomolov A. S., Filimonyuk L. Y.** *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2017, vol. 18, no. 5, pp. 328–332 (in Russian).

5. **Kodyakov A. S., Pavliuk N. A., Budkov V. Y.** *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2017, vol. 18, no. 5, pp. 321–327 (in Russian).

6. **Kartashev V. A., Safronov V. V.** *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 2017, vol. 56, no. 2, pp. 328–333.

7. **User manual of UR3/CB3 robot- C-II.** *Universal Robots*, 2015, 147 p.

8. **KUKA Robots KR 5 arc Specification.** Augsburg, KUKA Roboter GmbH, 2011, 67 p.

9. **Ho S. J., Rak K. S.** Emergency Stop Method of Industrial Robot, Pat. KR20120045766 (A), 2012-05-09.

10. **Hofmann J., Schwarz R., Marx S.** Industrial Robot Having Redundant Emergency Brake Circuit, US8736219 — 2014-05-27.10.

11. **Bosga S.** A Robot with at least two Separate Brake Devices and a Method of Controlling such a Robot, Pat. WO 2008037799.

12. **Kartashev V. A., Kartashev V. V.** *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 2018, vol. 57, no. 4, pp. 666 (in Russian).

13. **Kartashev V. A., Kartashev V. V.** *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2018, vol.19, no. 8, pp. 536–541 (in Russian).

14. **Kartashev V. A., Kartashev V. V.** Device for manipulator emergency braking, Pat. RF2658589 (in Russian).