

В. А. Карташев, д-р физ.-мат. наук, вед. научн. сотр., kart@list.ru,

В. В. Карташев, канд. физ.-мат. наук, мл. научн. сотр.,

ФИЦ Институт прикладной математики им. М. В. Келдыша РАН

Формирование траектории аварийного торможения манипулятора методом последовательного отключения приводов

При возникновении аварийной ситуации или нажатии на пульте управления соответствующей кнопки система управления экстренно останавливает манипулятор путем отключения приводов и включения тормозов, если степени подвижности оснащены ими. Возникающее в результате этого движение манипулятора является неуправляемым и может привести к значительным отклонениям от программной траектории.

В работе рассматривается устройство управления аварийным торможением, которое, будучи подключенным к системе управления, обеспечивает выключение питания приводов степеней подвижности независимо друг от друга. Эта возможность позволяет формировать траекторию торможения путем отключения питания приводов в требуемой последовательности и с заранее вычисленными задержками.

В работе описывается алгоритм вычисления задержек контроллером устройства, при которых обеспечивается близость траектории аварийного торможения к программной траектории, что способствует уменьшению вероятности возникновения опасных ситуаций, связанных со столкновением робота с объектами, расположенными в его рабочей зоне.

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

Введение

При обнаружении нештатной ситуации или нажатии персоналом кнопки аварийной остановки система управления роботом-манипулятором тормозит его путем отключения приводов. При этом автоматически вводятся в действие тормоза, если степени подвижности оснащены ими. Рассмотренный способ торможения манипулятора называется аварийным остановом [1].

Аварийное торможение манипулятора является неуправляемым [2, 3] и может привести к значительным отклонениям от программной траектории. В целях уменьшения отклонения применяют устройства, которые создают дополнительные тормозные усилия в двигателе. Например, в устройстве аварийного торможения, описываемом в патенте US8736219 [4], предлагается оснастить каждый привод дополнительным реле, которое по сигналу аварийного торможения отключает питание привода и закорачивает обмотки электродвигателя. Возникающая противоЭДС создает достаточно большой тормозной момент, в результате чего двигатель тормозится быстрее, чем при отключении питания.

Тормозное ускорение противоЭДС двигателя кратно меньше, чем тормозов, поэтому рассматриваемое усовершенствование функции аварийного торможения не приводит к существен-

ному уменьшению тормозного пути. Кроме того, по-прежнему торможение осуществляется в неуправляемом режиме, что может привести к опасному отклонению от программной траектории.

В заявке на патент [5] рассматривается контроллер, к которому подключены индивидуальные для каждой степени подвижности средства включения/выключения питания соответствующего привода. При этом предполагается наличие оперативной связи контроллера с компонентами, работа которых направлена на управление.

Заметим, что в промышленных манипуляционных роботах система управления не предназначена для взаимодействия с внешними устройствами на аппаратном уровне. По этой причине обсуждаемый способ усовершенствования управления манипулятором, в том числе и аварийного торможения, невозможен без доработки аппаратного и, главное, программного обеспечения системы управления, так как штатные средства управления роботом на это не рассчитаны. Вопрос о способе выполнения аварийного торможения в цитируемой работе не рассматривается.

Постановка задачи

В настоящей работе предлагается формировать траекторию аварийного торможения путем

отключения питания привода каждой степени подвижности не одновременно со всеми, а с заранее рассчитанной задержкой. Значения задержек вычисляются системой управления движением после поступления сигнала об аварийной остановке с таким расчетом, чтобы траектория торможения манипулятора оказалась близка к программной. Это позволяет на всем участке торможения исключить столкновение с объектами, которые находятся в рабочей зоне.

Техническая реализация предлагаемого способа управления траекторией торможения [6, 7] предполагает, что система управления может отключить привод любой степени подвижности независимо от других. Для этого предлагается оснастить систему управления робота устройством, которое делает возможным выключение питания приводов в требуемой последовательности и с необходимыми задержками.

Устройство управления аварийным торможением

На рис. 1 показана структурная схема такого устройства и подключение его к системе управления манипуляционным роботом. На рис. 1 обозначены: 1 — рассматриваемое устройство; 2_{*i*} — индивидуальные средства — реле или ана-

логичная схема включения/выключения питания привода степени подвижности $i = 1, \dots, n$ по сигналам 3_{*i*} от контроллера 4, предназначенного для определения момента начала торможения для каждой степени подвижности; 5 — электронная схема привода; 6 — вход напряжения питания приводов; 7 — входы датчиков положения исполнительных устройств манипулятора, подключенные к общему контроллеру устройства; 8 — вход сигнала включения аварийного торможения; 9_{*i*} — выход напряжения питания приводов; 10 — система управления роботом; 11_{*i*} — двигатель степени подвижности; 12_{*i*} — датчик положения степени подвижности; 13_{*i*} — контроллер следящей системы степени подвижности; 14 — реле или аналогичная электронная схема выключения питания приводов и включения тормозов робота; 15 — контроллер исполнения рабочей программы робота; 16 — блок питания; 17_{*i*} — выходы управляющего напряжения тормоза степени подвижности; 18_{*i*} — тормоз. Если манипулятор не оснащен тормозами, то блоки 17_{*i*} и 18_{*i*} отсутствуют, как и их связи с другими блоками схемы. Соединения, которые в системе управления должны быть исключены, отмечены на схеме штриховыми линиями. Соединения, которые должны быть установлены при подключении, отмечены утолщенными линиями.

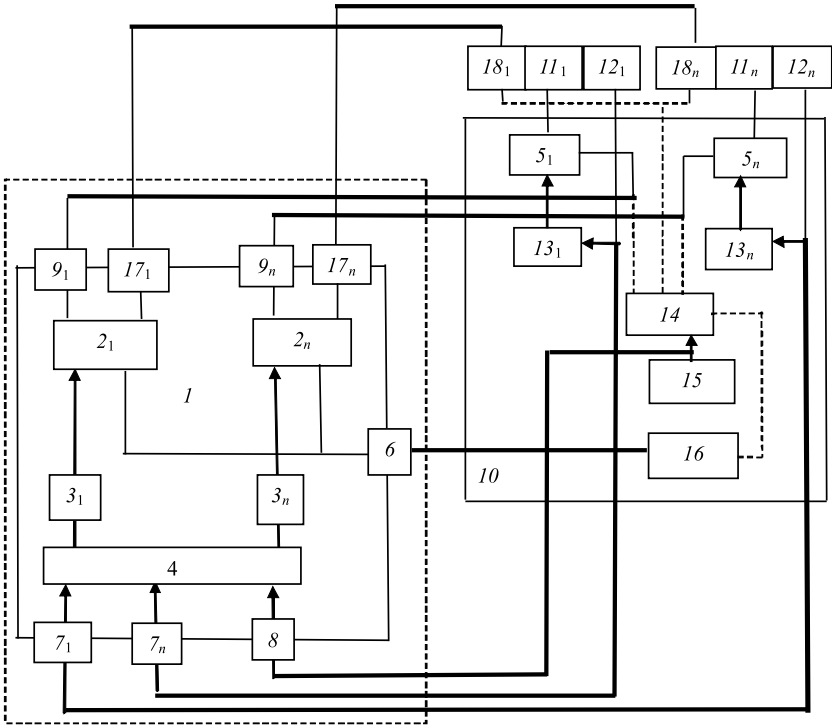


Рис. 1

Рассмотрим работу устройства. При переходе к аварийному торможению контроллер робота 15 вырабатывает сигнал, по которому до подключения предлагаемого устройства реле 14 системы управления штатно отключало питание электронных схем приводов 5. При подключенном устройстве этот сигнал поступает через вход 8 в контроллер 4 и запускает функцию управления аварийным торможением.

После этого контроллер 4 выполняет расчеты моментов времени, в которые должны быть выключено питание каждого привода и включен тормоз его двигателя. В них учитываются текущие скорости степеней подвижности. Они вычисляются по показаниям датчиков положения 12_{*i*}, которые поступают через входы 7. Заметим, что при движении манипулятора

по программной траектории значения текущих скоростей степеней подвижности совпадают с программными скоростями.

При наступлении момента торможения очередной степени подвижности i контроллер 4 через соответствующую линию 3_i переводит реле 2_i в состояние, которое прерывает подачу питания приводов i (выход 9_г) через вход 6 источника питания 16. Двигатели 11_i выключаются, и одновременно включаются тормоза (выход 17_г). В результате степень подвижности i останавливается.

Приведенное описание работы подключаемого устройства показывает, что его контроллер позволяет включать торможение каждой степени подвижности независимо от других. Таким образом, появляется возможность формирования траектории аварийного торможения манипулятора посредством выбора моментов начала торможения каждой степени подвижности. Воспользуемся этим для того, чтобы обеспечить близость траектории торможения к программной траектории.

Алгоритм вычисления задержек

В момент поступления сигнала об аварийном торможении контроллер рассматриваемого устройства оценивает длительности интервалов времени T_i , в течение которых каждая степень подвижности остановится, используя формулу

$$T_i = \frac{v_i}{w_i},$$

где i — номер степени подвижности; v_i — скорость степени подвижности в начале торможения; w_i — ускорение торможения. В этой формуле скорость v_i является известной величиной. Она вычисляется контроллером по показаниям датчиков положения степеней подвижности.

Для того чтобы определить w_i , достаточно выполнить эксперимент по аварийному торможению и записать изменения координат степеней подвижности во времени. Ускорение при торможении w_i степени подвижности i вычисляется по формуле

$$w_i = 2 \frac{D_i}{t_i^2},$$

в которой D_i — выбег степени подвижности; t_i — длительность торможения до полной остановки.

После вычисления длительностей торможения степеней подвижности контроллер находит из них такую, которая тормозится дольше всех. В дальнейшем она обозначается $T_{\max}$, номер этой степени — $i0$.

Торможение остальных степеней подвижности осуществляется с некоторой задержкой, которая вычисляется с учетом условия минимизации отклонения расчетной траектории манипулятора от программной. Задача минимизации может быть решена численно с помощью известных методов вычислительной математики.

При некоторых естественных допущениях можно получить аналитическое решение задачи и использовать его для построения управления. Предположим, что при торможении координаты степени подвижности изменяются линейно, т. е. ускорение торможения постоянно. Заметим, что эта модель с точностью, достаточной в практических применениях, описывает изменение координат в степенях подвижности в реальном движении.

Решение задачи минимизации для рассматриваемой модели представлено на рис. 2.

Приняты следующие обозначения: O — момент отключения питания степени подвижности с наибольшей длительностью торможения, ее номер обозначается через $i0$; длительность торможения $T_{\max}$; v_i — скорость степени подвижности i в начале аварийного торможения; $T_{i \text{ торм}}$ — вычисляемый момент начала торможения степени подвижности с номером i ;

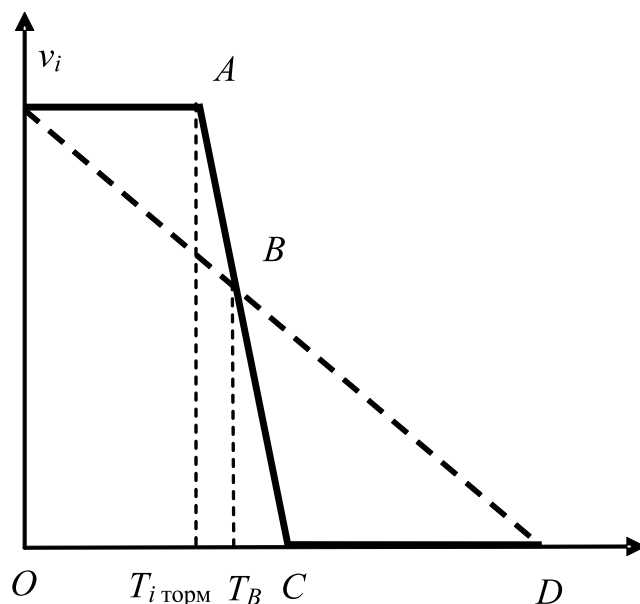


Рис. 2

A — скорость степени подвижности в момент срабатывания тормоза; C — момент окончания торможения; D — момент окончания движения, если торможение происходит по программной траектории; B — точка пересечения прямых AC и $v_i D$; T_B — момент времени, в который это происходит.

Штриховой линией показан график изменения скорости движения степени подвижности, если торможение осуществляется вдоль программной траектории. Сплошной линией показано изменение скорости для формируемой траектории торможения, при котором торможение начинается с задержкой $[OT_{i \text{ торм}}]$ относительно начала фактического торможения степени $i0$. На участке $[T_{i \text{ торм}}C]$ степень подвижности тормозится за счет сил трения в редукторе и работы тормозов.

На участке $[OT_B]$ фактическая скорость движения степени подвижности больше программной. Отклонение (опережение), которое в связи с этим возникает, численно равняется площади треугольника $\Delta v_i AB$:

$$\int_0^{T_B} (L(v_i AB, t) - L(T_B D, t)) dt = S_{\Delta v_i AB}.$$

Здесь $L(v_i AB, t)$ — функция, график которой изображается ломаной линией $v_i AB$, $L(T_B D, t)$ — функция, график которой изображается прямой $T_B D$.

На участке $[T_B D]$ фактическая скорость движения степени подвижности меньше программной. Отклонение (отставание), которое в связи с этим возникает, численно равняется $S_{\Delta BCD}$. Суммарное отклонение численно равно разности $S_{\Delta v_i AB} - S_{\Delta BCD}$.

Таким образом, наименьшее отклонение от программной траектории достигается при выполнении равенства $S_{\Delta v_i AB} = |S_{\Delta v_i AB} - S_{\Delta BCD}|$, которое эквивалентно условию $2S_{\Delta v_i AB} = S_{\Delta BCD}$. Принимая во внимание подобие $\Delta v_i AB$ и ΔBCD , получаем, что наименьшее отклонение достигается при выполнении следующего соотношения: $CD = \sqrt{2} OT_{i \text{ торм}}$.

Учитывая, что $T_B C = v_i / w_i$ и $OD = T_{\text{max}}$, после преобразований получим

$$T_{i \text{ торм}} = \frac{T_{\text{max}} - \frac{v_i}{w_i}}{1 + \sqrt{2}}.$$

Учет задержек срабатывания тормозов

Срабатывание электромагнитных приводов тормозов происходит с некоторой временной задержкой. Обозначим a_i — промежуток времени, в течение которого срабатывает тормоз i -й степени подвижности. Достаточно часто значение задержки срабатывания тормоза приводится производителем в списке характеристик электродвигателя.

Задержки a_i достаточно просто определяют в эксперименте по аварийному торможению. Включению тормоза соответствует момент, когда скорость изменения координат начинает интенсивно замедляться. Задержка в срабатывании тормоза a_i равна промежутку времени между моментом выдачи сигнала на торможение и фактическим началом торможения.

Если все a_i известны, то задержки отключения питания приводов для каждой степени подвижности даются формулой

$$T_{i \text{ торм}} = \frac{T_{\text{max}} - \frac{v_i}{w_i}}{1 + \sqrt{2}} + a_{i0} - a_i. \quad (1)$$

Заметим, что в случаях, когда задержка a_i в срабатывании тормоза некоторой степени подвижности $i0$, может оказаться, что первым должен выключаться привод с номером i . Этой ситуации соответствует случай $T_{i \text{ торм}} < 0$.

Результаты экспериментов

Аналитические оценки показывают, что по сравнению с одновременным выключением питания приводов управление началом торможения позволяет в несколько раз уменьшить отклонение траектории торможения от программной траектории. Этот вывод подтвержден в экспериментах, проведенных с манипуляционным роботом РМ-01 [8]. Робот имеет антропоморфную кинематическую схему с шестью управляемыми степенями подвижности. Конструктивно манипулятор является копией известного манипулятора PUMA-560.

Результаты одного из экспериментов приведены в таблице. Манипулятору задается перемещение в заданную позицию. Во время исполнения движения нажимают кнопку аварийного торможения. При нажатии кнопки

Номер степени подвижности	Текущая скорость, измеренная по датчику положения v_i , рад/с	Ускорение торможения w_i , рад/с ²	Задержка срабатывания тормоза a_i , с	Длительность торможения степени подвижности $T_i = v_i/w_i$, с	Длительность торможения степени подвижности $i0$, которая тормозится дольше других, $T_{\max}$, с	Задержка начала торможения, вычисленная по формуле (1), с
1	-1,1	3,2	0,1	0,32	0,47, $i0 = 3$	0,1
2	0,6	3,2	0,1	0,19		0,2
3	1,5	3,2	0,1	0,47		0
4	-2,1	8,1	0,06	0,24		0,2
5	-1,7	8,1	0,06	0,21		0,18
6	0,5	8,1	0,06	0,06		0,33

микроконтроллер, управляющий роботом, вычисляет значение задержек начала торможения для каждой из степеней подвижности по формуле (1).

Для этого с помощью датчиков положения определяются текущие скорости движения степеней подвижности v_i (столбец 2) и с учетом известной интенсивности их торможения w_i (столбец 3) прогнозируются интервалы времени, в течение которых каждая из степеней подвижности остановится: $T_i = v_i/w_i$ (столбец 5). Затем контроллер находит степень подвижности, которая тормозится дольше других (ее время торможения $T_{\max}$, в данном случае это третья степень подвижности). Используя полученные данные, контроллер вычисляет задержки в обесточивании приводов (столбец 7), при которых обеспечивается минимизация отклонения траектории торможения от программной траектории.

Закончив вычисления, контроллер отключает питание приводов степеней подвижности в последовательности возрастания величин $T_{i \text{ торм}}$. В рассмотренном примере первой будет выключена третья степень подвижности, для которой длительность торможения максимальна. Отключение питания остальных степеней подвижности осуществляется с вычисленными задержками. Например, питание первой степени подвижности отключается через 0,1 с после третьей, так как

$$\begin{aligned} & \frac{T_{\max} - \frac{v_i}{w_i}}{\sqrt{2}} + a_{i0} - a_i = \\ & = \frac{0,47 - 1,1/3,2}{1,4} + 0,1 - 0,1 \approx 0,1 \text{ с.} \end{aligned}$$

Согласно последнему столбцу таблицы степени подвижности должны отключаться в следующей последовательности: третья, первая — через 0,1 с, пятая — через 0,18 с, вторая и четвертая — через 0,2 с, шестая — через 0,33 с.

Непосредственные измерения показали, что в описанном эксперименте применение заявленного способа управления аварийным торможением приводит к уменьшению более чем в четыре раза отклонения от программной траектории, в результате чего оно не превышает 30 мм.

Заключение

В работе рассмотрено устройство, которое подключается к манипуляционному роботу с целью обеспечить возможность выключения приводов независимо друг от друга. Предложен алгоритм вычисления задержек в выключении приводов, который позволяет формировать траекторию аварийного торможения манипулятора таким образом, чтобы обеспечить близость ее к программной траектории. Аналитические оценки показывают, что таким образом можно уменьшить отклонение от программной траектории в несколько раз. Результаты экспериментов подтверждают аналитические оценки.

Список литературы

1. **Emergency stop** /Robot AppStore. Robopedia // <http://www.robotappstore.com/Robopedia/Emergency%20Stop> (дата обращения 27.02.2018).
2. **Руководство** пользователя робота UR3/CB3 — С.-П., Universal Robots, 2015. 147 с.
3. **KUKA Robots KR 5 arc Specification**. Augsburg -KUKA Roboter GmbH, 2011. 67 p.
4. **Hofmann J., Schwarz R., Marx S.** Industrial robot having redundant emergency brake circuit // Pat US8736219, 27.05.2014.
5. **A Robot With At Least Two Separate Brake Devices And A Method Of Controlling Such A Robot** // ABB RESEARCH LTD. Patent Application WO 2008037799, 23.04.2008, 25 p.
6. **Карташев В. А., Карташев В. В.** Устройство управления аварийным торможением манипулятора // Заявка на патент РФ № 2017105573/28(009978).
7. **Карташев В. А., Карташев В. В.** Способ управления аварийным торможением манипулятора // Заявка на патент РФ № 2017105570/02(009975).
8. **Промышленный** робот РМ-01. Руководство по аппаратной части. Минск: НПО "Гранат", 1987. 127 с.

Designing of Manipulator Emergency Bracking Trajectory by Sequential Drivers Shutdown Method

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

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

Accepted on April 27, 2018

The problem of emergency braking security is solved by using different means of robot stopping. They include soft deceleration as well as emergency stopping with shutdown of manipulator drivers and brakes activating. This mode is used in all cases of equipment fault detection or while alarm bottom is pressed on control panel. During braking phase the manipulator motion is uncontrollable what can lead to great deviations from program trajectory. The problem of emergency breaking is complicated enough because appropriate solution should take into account that some robot sensors and drivers are invalid. The paper describes device which can be connected to robot control system. It consists of controller and individual electronic schemes that are able to turn off power supply of each degree of freedom regardless from other one. This feature allows to design braking trajectory by turning off drivers in specific sequence and calculated delays. Connection the device to control system needs insignificant changing in hardware architecture of robot control system. Mathematical solution of deviation minimization problem for braking trajectory from program one is presented. It bases on suggestion that braking forces are constant in all braking interval. If this condition take place then solution can be became as mathematical formulas which includes the temporary velocities in manipulator joints, braking acceleration and response time of brakes.

Theoretical evaluations show that in common case deviations can be reduced in a few times. Experiments on robot-manipulator confirm these conclusions. The small deviations between braking and program trajectories exclude collisions of manipulator with the objects in robot workspace.

Keywords: manipulation robot, emergency braking, braking trajectory designing

For citation:

Kartashev V. A., Kartashev V. V. Designing of Manipulator Emergency Bracking Trajectory by Sequential Drivers Shutdown Method, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2018, vol. 19, no. 8, pp. 536—541.

DOI: 10.17587/mau.19.536-541

References

1. **Emergency stop** / Robot AppStore. Robopedia, available at: <http://www.robotappstore.com/Robopedia/Emergency%20Stop>
2. **User manual** of UR3/CB3 robot, Saint-Petersburg, Universal Robots, 2015, 147 p.
3. **KUKA Robots KR 5 arc** Specification. Augsburg, KUKA Roboter GmbH, 2011, 67 p.

4. **Hofmann J., Schwarz R., Marx S.** Industrial robot having redundant emergency brake circuit, Pat US8736219, 27.05.2014.

5. **A Robot With At Least Two Separate Brake Devices And A Method Of Controlling Such A Robot**, ABB RESEARCH LTD., Patent Application WO 2008037799, 23.04.2008, 25 p.

6. **Kartashev V. A., Kartashev V. V.** *Ustroystvo upravleniya aviarnym tormozheniem manipulatora* (Manipulator Emergency Braking Control Device), Patent application RF № 2017105573/28(009978) B2 (in Russian).

7. **Kartashev V. A., Kartashev V. V.** *Sposob upravleniya aviarnym tormozheniem manipulatora* (The Mean of Manipulator Emergency Braking), Patent application RF № 2017105570/02(009975) B2 (in Russian).

8. **Promyshlennyy robot RM-01.** *Rukovodstvo po apparatnoi chasti* (Industrial Robot RM-01. Hardware manual), NPO Granat, 1987, 127 p. (in Russian).

VIII Всероссийская конференция "Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем" (серия "МЭС")

пройдет 03—07 октября 2018 г.
в Зеленограде

МЭС-2018

Организатор конференции — Институт проблем проектирования в микроэлектронике Российской академии наук (ИППМ РАН). Среди учредителей конференции — ФАНО России, Правительство Москвы, Префектура Зеленоградского АО г. Москвы, РАН, РФФИ, ФИЦ ИУ РАН, Концерн "Вера", МИЭТ, ЮФУ. Труды конференции входят в список ВАК. Как и прежде, конференция "МЭС" этого года посвящена актуальным вопросам автоматизации проектирования микроэлектронных схем, систем на кристалле, IP-блоков и новой элементной базы.

Более подробную информацию о конференции можно получить на WEB-сайте
<http://www.mes-conference.ru>.