

УДК 621.86/87

## ФОРМИРОВАНИЕ ТРАЕКТОРИИ ТОРМОЖЕНИЯ МАНИПУЛЯТОРА ПРИ НЕИСПРАВНОСТИ ПРИВОДА

© 2019 г. В. А. Карташев<sup>а,\*</sup>, В. В. Карташев<sup>а</sup>

<sup>а</sup>ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, Москва, Россия

\*e-mail: kart@list.ru

Поступила в редакцию 09.04.2019 г.

После доработки 06.05.2019 г.

Принята к публикации 20.05.2019 г.

При обнаружении неисправности оборудования система управления манипуляционным роботом отключает питание приводов и включает тормоза. Возникающее движение может существенно отличаться от программного в силу того, что существенно изменяется соотношение скоростей степеней подвижности. В работе предлагается формировать траекторию аварийного торможения за счет включения тормозов с некоторыми задержками. Аналитические оценки показывают, что это позволяет уменьшить отклонение от программной траектории почти на порядок.

DOI: 10.1134/S0002338819050068

**Введение.** Возникновение неисправности в приводе манипулятора делают невозможной реализацию заданного программного движения степени подвижности и может стать причиной непредсказуемого движения манипулятора. Для того, чтобы избежать опасных столкновений с предметами в рабочей зоне, манипулятор должен быть остановлен посредством выключения питания приводов и приведением в действие тормозов.

Проблема аварийного останова состоит в том, что скорости степеней подвижности изменяются независимо друг от друга, в результате чего манипулятор уводит от программной траектории. Один из способов уменьшить отклонение состоит в увеличении интенсивности торможения. Для этого помимо тормозов предлагается использовать двигатели, у которых с помощью реле закорочены обмотки [1]. Известен также способ использования двигателей для того, чтобы направить траекторию торможения в сторону программной траектории [2].

Недостаток обоих способов состоит в том, что они предполагают исправность оборудования робота. Кроме этого следует учитывать, что применение двигателей недостаточно для существенного изменения траектории так как интенсивность торможения тормозами существенно выше. Заметим, что отказы оборудования, которые являются существенными для обеспечения безопасности движения манипулятора, могут быть выявлены в масштабе реального времени. Решение этой задачи приведено в работе [3].

В [4] исследуется способ формирования траектории аварийного торможения, в котором отключение питания каждого привода осуществляется с некоторой задержкой. Перед началом торможения рассчитывают величины задержек с тем, чтобы минимизировать отклонение траектории торможения от программной. Получены аналитические оценки, показывающие, что отклонение можно уменьшить почти на порядок. Описание изменений в архитектуре системы управления, которые необходимо внести для того, чтобы воспользоваться предложенным способом, содержится в работе [5].

Предложенный алгоритм формирования траектории предполагает исправность всех приводов с тем, чтобы до момента начала активации аварийного торможения скорость движения каждой степени подвижности оставалась такой, которая соответствует движению по программной траектории. Это условие не позволяет применять алгоритм в случае отказа хотя бы одного привода в силу того, что после отключения питания скорость движения степени подвижности будет уменьшаться за счет трения в редукторе.

В настоящей работе рассматривается способ формирования траектории аварийного торможения при одновременном отключении питания всех приводов и включения тормозов каждой

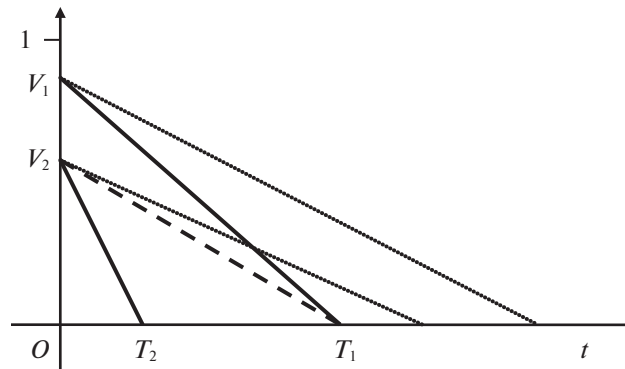


Рис. 1

степени подвижности с некоторой задержкой. Следует заметить, что штатные средства управления степенями подвижности, которыми располагают современные манипуляторы, такими возможностями управления не обладают. Предполагается, что в аппаратную часть системы управления манипуляционного робота внесены необходимые изменения, которые позволяют осуществлять включение тормозов с небольшими задержками.

**1. Оценка отклонения от программной траектории.** Для оценки отклонения траектории торможения от программной траектории воспользуемся методикой расчета, предложенной в работе [4].

Рассмотрим зависимость изменения скоростей движения двух произвольно выбранных степеней подвижности. Пусть в начале торможения мгновенные скорости равняются  $V_1$  и  $V_2$ . Значения  $V_1$  и  $V_2$  будем указывать в безразмерных величинах от максимальной величины для каждой степени подвижности. Таким образом, величина скорости не превышает 1. В силу постоянства сил трения в редукторах и тормозах с достаточной точностью можно считать, что скорости движения степеней подвижности уменьшаются линейно по времени.

На рис. 1 графики изменения скоростей при торможении силами трения в редукторе показаны точечной линией, при торможении тормозами — сплошной линией. Они имеют разный угол наклона в силу того, что интенсивность торможения степеней подвижности различна. Соответственно различны и длительности торможения степеней до полной остановки. Эти промежутки времени обозначены через  $T_1$  и  $T_2$ . Не ограничивая общности, будем считать, что  $T_1 > T_2$ . Величина 1 на рисунке обозначает максимальное значение скорости для каждой степени подвижности.

Пунктирной линией показан график изменения скорости второй степени подвижности, при котором торможение происходит вдоль касательной к программной траектории. Отклонением касательной траектории от программной можно пренебречь в силу того, что длительность аварийного торможения достаточно мала (доли секунды).

При штатном режиме аварийного торможения с использованием тормозов в точке останова отклонение манипулятора от программной траектории составит:

$$\int_0^{T_1} (L_1(V_2 T_1, t) - L_2(V_2 T_2 T_1, t)) dt = \frac{(T_1 - T_2)}{2} V_2. \quad (1.1)$$

Здесь  $L_1(V_2 T_1, t)$  — функция изменения во времени  $t$  скорости второй степени подвижности, если торможение происходит вдоль программной траектории (пунктирная линия, соединяющая точки  $(0, V_2)$  и  $(T_1, 0)$ );  $L_2(V_2 T_2 T_1, t)$  — функция изменения скорости второй степени подвижности при штатном торможении. Ее график — ломаная линия, проходящая через точки  $(0, V_2)$ ,  $(T_2, 0)$  и  $(T_1, 0)$ .

Величина интеграла численно равна площади треугольника  $V_2 T_2 T_1$ . В дальнейшем она обозначается через  $S(\Delta V_2 T_2 T_1)$ . Также с целью упрощения записи точка  $(0, V_i)$  представляется как  $V_i$ , точка  $(T_i, 0)$  — как  $T_i$ .

**2. Формирование траектории торможения.** При включении тормозов с некоторой задержкой график изменения скорости аварийного торможения представляет собой ломаную линию  $V_2 A T_3$  (рис. 2). Изменение скорости на временном интервале  $(0, T_A)$  соответствует торможению второй степени подвижности силами трения в редукторе в предположении, что его интенсивность

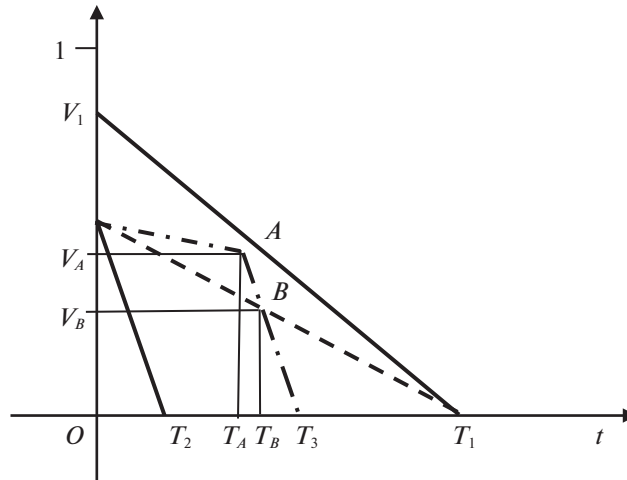


Рис. 2

меньше, чем требуется для движения по программной траектории. Если ускорение торможения за счет сил трения оказывается больше, то отрезок прямой  $V_2A$  пройдет ниже отрезка  $V_2, T_1$ . Этот случай рассмотрен в разд. 4.

В момент времени  $T_A$  включается тормоз, что приводит к увеличению интенсивности торможения и остановки степени подвижности в  $T_3$ . Заметим, что на интервале  $(T_A, T_3)$  наклон отрезка ломаной параллелен отрезку, проходящему через точки  $V_2$  и  $T_3$ , так как интенсивность торможения на этих участках одинакова.

Вплоть до момента времени  $T_B$  ( $B$  — точка пересечения отрезков  $V_2, T_1$  и  $A, T_3$ ) скорость второй степени подвижности больше, чем требуется для движения по программной траектории. Вследствие этого отклонение от программной траектории монотонно увеличивается. Наибольшей величины отклонение достигает в точке  $B$ . Оно численно равно площади треугольника  $V_2AB$ .

На временном интервале  $(T_B, T_1)$  скорость движения второй степени меньше, чем на программной траектории, и набранное на предыдущем интервале отклонение монотонно уменьшается. Остаточная величина отклонения  $S$  численно равна разности площадей  $S(\Delta T_3T_1B)$  и  $S(\Delta V_2AB)$ . Следовательно, вторая степень подвижности после остановки смещена от траектории на отрезок длиной  $S$ .

**3. Задача минимизации отклонения.** Рассмотрим задачу выбора момента начала включения тормозов  $T_A$ , при котором отклонение траектории торможения от программной минимально.

Наибольшей величины отклонения достигают в точках  $T_B$  и  $T_1$ . Поэтому задача минимизации может быть сформулирована следующим образом:

$$\max_{T_A}(S(\Delta V_2AB), S) \rightarrow \min.$$

Примем во внимание, что увеличение  $T_A$  приводит к увеличению  $S(\Delta V_2AB)$  и уменьшению  $S$ . Поэтому решение минимизационной задачи удовлетворяет условию  $S(\Delta V_2AB) = S$ . Учитывая, что

$$S = |S(\Delta T_3T_1B) - S(\Delta V_2AB)|,$$

величина задержки  $T_A$  должна быть такой, чтобы выполнялось равенство

$$2S(\Delta V_2AB(T_A)) = S(\Delta T_3T_1B(T_A)). \tag{3.1}$$

Разрешим это уравнение относительно  $T_A$ . Для абсолютных величин ускорений торможения второй степени подвижности введем следующие обозначения:  $w_{2p}$  — ускорение при движении по программной траектории,  $w_{2g}$  — за счет сил трения в редукторе,  $w_{2b}$  — с помощью тормозов. Тогда уравнения прямых, проходящих через точки  $V_2, T_1, T_3$  и описывающих в осях  $vOt$  изменения скоростей в разных режимах торможения, запишем как  $v = -w_{2p}t + V_2, v = -w_{2g}t + V_1, v = -w_{2b}(t - T_3)$ .

Непосредственно из рис. 2 находим векторы:

$$V_2A = (T_A, V_A - V_2) = (T_A, -w_{2g}T_A);$$

$$V_2B = (T_B, V_B - V_2) = (T_B, -w_{2p}T_B).$$

Откуда  $S(\Delta V_2AB) = 0.5|V_2A \times V_2B| = 0.5T_A T_B (w_{2p} - w_{2g})$ ;

$$S(\Delta T_3T_1B) = 0.5V_B(T_1 - T_3).$$

Принимая во внимание, что  $V_B = w_{1b}(T_1 - T_B)$ , получим

$$S(\Delta T_3T_1B) = 0.5w_{2b}(T_1 - T_3)(T_3 - T_B).$$

С учетом этого условие минимизации отклонения от программной траектории (3.1) принимает вид

$$2(w_{2p} - w_{2g})T_A T_B = w_{2g}(T_1 - T_3)(T_3 - T_B). \quad (3.2)$$

Точка  $A$  является точкой пересечения прямых  $V_2A$  и  $AT_3$ . Ее горизонтальная координата  $T_A$  удовлетворяет системе линейных уравнений:

$$\begin{cases} v = -w_{2t}t + V_2; \\ v = -w_{2g}(T - T_3). \end{cases}$$

Откуда

$$T_A = \frac{w_{2b}T_3 - V_2}{w_{2b} - w_{2g}} = \frac{w_{2b}(T_3 - T_2)}{w_{2b} - w_{2g}}. \quad (3.3)$$

Из подобия треугольников  $BT_1T_B$  и  $V_2T_1O$  имеем

$$\frac{BT_1}{V_2T_1} = \frac{VB}{V_2} = \frac{w_{2b}(T_3 - T_B)}{V_2} = \frac{T_3 - T_B}{T_2} = \frac{T_1T_B}{T_1O} = \frac{T_1 - T_B}{T_1}. \quad (3.4)$$

Аналогично из подобия треугольников  $BT_1T_3$  и  $V_2T_1T_2$ :

$$\frac{BT_1}{V_2T_1} = \frac{T_1T_3}{T_1T_2} = \frac{T_1 - T_3}{T_1 - T_2}.$$

Принимая во внимание (3.4), находим

$$T_3 - T_B = T_2 \frac{T_1 - T_3}{T_1 - T_2}; \quad (3.5)$$

$$T_B = T_1 \frac{T_3 - T_2}{T_1 - T_2}. \quad (3.6)$$

Теперь, используя выражения (3.3), (3.5) и (3.6), уравнение (3.2) после преобразований приведем к виду

$$2\left(1 - \frac{w_{2g}}{w_{2p}}\right)T_A^2 = (T_1 - T_3)^2 = \left(T_1 - T_2 - \left(1 - \frac{w_{2g}}{w_{2p}}\right)T_A\right)^2. \quad (3.7)$$

Полученное выражение имеет простую геометрическую интерпретацию. Все треугольники  $V_2AB$ , которые возникают при перемещении точки  $T_3$ , подобны друг другу. Поэтому площадь каждого из них пропорциональна квадрату длины отрезка  $T_A$  – параметра, который задает линейный размер треугольника (рис. 2).

Аналогично подобны друг другу все треугольники  $T_3T_1B$ . Их площадь пропорциональна квадрату длины отрезка  $T_1T_3$ , который мы видим в правой части уравнения (3.4).

Решение уравнения (3.7):

$$T_A = \frac{T_1 - T_2}{\sqrt{2(1 - w_{2g}/w_{2p}) + 1 - w_{2g}/w_{2b}}}. \quad (3.8)$$

Непосредственно из формулы (3.8) можно сделать вывод о том, что для вычисления задержки перед включением тормозов достаточно знать начальные скорости обеих степеней подвижности, интенсивности торможения за счет трения в редукторе и при применении тормозов.

Величина ускорения, при котором торможение происходит по программной траектории, определяется из формулы

$$w_{2p} = w_{1b} \frac{V_2}{V_1}. \quad (3.9)$$

**4. Исследование формулы для вычисления задержки.** В предположении, что трение в редукторе отсутствует или пренебрежимо мало, т.е.  $w_{2p} = 0$ , формула для вычисления задержки перед включением тормозов (3.8) приобретает вид аналогичной формулы из работы [4]:

$$T_A = \frac{T_1 - T_2}{\sqrt{2 + 1}}. \quad (3.10)$$

В этом смысле способ формирования траектории, рассмотренный в [4], является частным случаем способа управления, который исследуется в настоящей работе.

Дальнейшие упрощения связаны с учетом обстоятельства, что тормоза обеспечивают более интенсивное торможение, чем сила трения в редукторе ( $w_{2g} \ll w_{2b}$ ). Пренебрегая отношением  $w_{2g}/w_{2b}$  в (3.8.), получим

$$T_A = \frac{T_1 - T_2}{\sqrt{2(1 - w_{2g}/w_{2p}) + 1}}. \quad (3.11)$$

Правая часть выражения (3.10) – монотонная функция относительно ускорения торможения вдоль программной траектории  $w_{2п}$ . В свою очередь, согласно (3.9), оно является линейной функцией отношения начальных скоростей степеней подвижности. Отмеченная особенность упрощает исследование зависимости формулы (3.11) от начальных скоростей степеней подвижности.

Если начальные скорости соизмеримы ( $V_1 \sim V_2$ ), то, согласно (3.9), ускорение торможения вдоль программной траектории соизмеримо с ускорением, которое создается тормозом, что приводит к неравенству

$$w_{2g} \ll w_{2p} = w_{1b}V_2/V_1 \sim w_{1b}.$$

В итоге формула (3.8) приобретает вид

$$T_A \sim \frac{T_1 - T_2}{\sqrt{2 + 1}},$$

который совпадает с аналогичной формулой для случая формирования траектории торможения путем отключения приводов с некоторыми задержками.

Если  $V_2$  пренебрежимо мало по сравнению с  $V_1$ , то в силу этого мало  $w_{2p}$ . Формула (3.8) при этом теряет смысл. Это имеет место всегда, когда ускорение торможения силой трения в редукторе больше, чем ускорение торможения, которое необходимо для движения по программной траектории:  $w_{2g} > w_{2p}$ .

В этом случае уменьшить отклонение от программной траектории можно путем торможения второй степени подвижности только использованием сил трения редуктора, т.е. без включения тормоза (рис. 3). Для удобства сравнения рис. 2 и 3 интенсивность торможения силой трения в редукторе, которая определяет наклон штрихпунктирной линии, выбрана одинаковой.

Оценим величину отклонения от программной траектории в этом случае. Численно она равна площади треугольника  $V_2AT_1$ :

$$S(\Delta V_2AT_1) = 0.5V_2(T_1 - A) = 0.5(V_1/w_{1b} - V_2/w_{2g}).$$

Полученная зависимость является квадратичной функцией от величины начальной скорости  $V_2$ . Максимальное ее значение равно  $0.125w_{2g}V_1^2/w_{1b}^2$ . Эта величина пренебрежимо мала по сравнению с выбегом первой степени подвижности при торможении тормозами. Действительно, принимая во внимание, что выбег численно равен  $S(\Delta V_1OT_1)$ , в силу того, что  $w_{2g} \ll w_{1b}$ , имеем

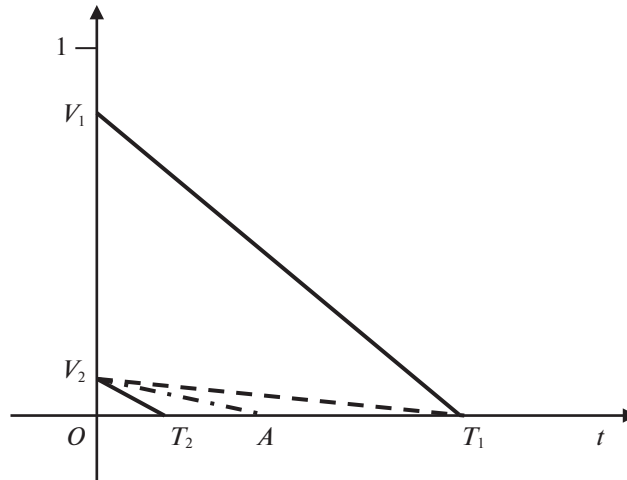


Рис. 3

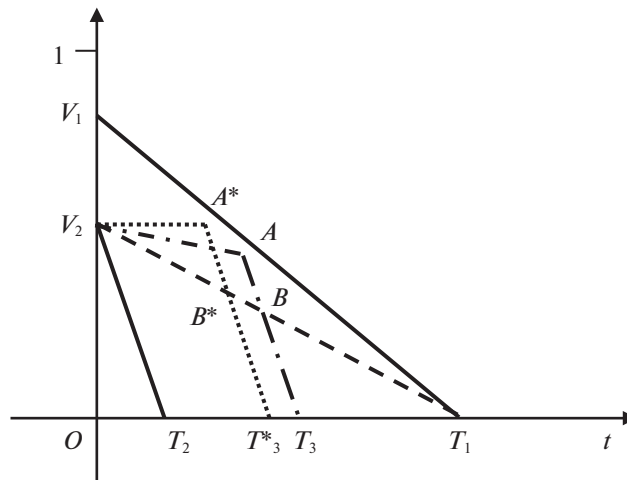


Рис. 4

$$\frac{S(\Delta V_1 O T_1)}{S(\Delta V_2 A T_1)} = \frac{w_{2g}}{4w_{1b}} \ll \frac{1}{4}$$

Полученное неравенство позволяет сделать вывод о том, что, если начальная скорость второй степени подвижности существенно меньше скорости первой степени подвижности, то для того, чтобы обеспечить малость отклонения траектории аварийного торможения от программной траектории, достаточно воспользоваться силами трения в редукторе, т.е. отключить питание приводов и привести в действие тормоз после полной остановки.

Заметим, что рассматриваемый способ формирования траектории, в котором питание приводов отключается сразу и на первом этапе торможение осуществляется за счет сил трения в редукторе, позволяет обеспечить меньшее отклонение от программной траектории, чем способ, в котором питание приводов отключается с некоторой задержкой.

Докажем это утверждение, используя рис. 4 для иллюстрации промежуточных заключений. На нем точечной линией показан график изменения скорости, когда питание привода отключается с задержкой. Излом графика в точке  $A^*$  соответствует включению тормоза;  $T_3^*$  – момент остановки степени подвижности 2,  $B^*$  – точка пересечения отрезков  $A^*T_3^*$  и  $V_2T_1$ .

Из критерия минимизации отклонения от программной траектории в обоих способах формирования траектории торможения следует одновременное выполнение условий:

$$\begin{cases} 2S(\Delta V_2 A^* B^*) = S(\Delta B^* T_1 T_3^*); \\ 2S(\Delta V_2 AB) = S(\Delta B T_1 T_3). \end{cases} \quad (3.12)$$

Площадь общей части  $\Delta V_2 A^* B^*$  и  $\Delta V_2 AB$  меньше  $S(\Delta V_2 A^* B^*)$ . Принимая во внимание критерий (3.12), а также подобие  $\Delta B T_1 T_3$  и  $\Delta B^* T_1 T_3^*$ , приходим к неравенству

$$S(\Delta B T_1 T_3) < S(\Delta B^* T_1 T_3^*), \quad (3.13)$$

из которого следует, что точка  $T_3$  всегда находится правее точки  $T_3^*$ :  $T_3 > T_3^*$ .

Отклонение от программной траектории в каждом из способов численно равно  $0.5 S(\Delta B T_1 T_3)$  и  $0.5 S(\Delta B^* T_1 T_3^*)$ . Таким образом, неравенство (3.13) доказывает справедливость сформулированного выше утверждения.

Следствием доказанного утверждения является вывод о предпочтительности выключения питания приводов сразу после обнаружения любой аварийной ситуации и использования описываемого способа формирования траектории с целью уменьшить отклонение траектории аварийного торможения от программной.

В заключение опишем алгоритм вычисления задержек для манипуляционного робота, имеющего  $n$  степеней подвижности. При переходе в режим аварийного торможения контроллер системы управления прогнозирует длительности торможения всех степеней подвижности:

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

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

Из вычисленных величин находим такую степень, длительность торможения которой наибольшая. Не ограничивая общности, будем считать, что она имеет номер 1. Затем для каждой степени подвижности  $i$  определяют ускорение  $w_{ip}$ , при котором манипулятор тормозится вдоль программной траектории:  $w_{ip} = V_i/T_1$ . Сравнивают найденную величину с ускорением  $w_{ig}$  торможения силами трения в редукторе. Если  $w_{ig} \geq w_{ip}$ , то тормоза следует включить только после остановки степени подвижности.

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

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

**Заключение.** При обнаружении неисправности хотя бы одного привода манипуляционного робота система безопасности должна немедленно отключить питание всех приводов. Для того, чтобы избежать неуправляемого движения на этапе остановки и связанного с этим ухода от программной траектории, предлагается формировать траекторию аварийного торможения путем включения тормозов с некоторыми задержками, предоставляя какое-то время тормозиться силами трения в редукторах.

Предложенный способ управления торможением схож с рассмотренным ранее в работе [4], в котором выключение каждого привода и одновременная активация тормоза степени подвижности осуществляются с некоторой задержкой. Полученные аналитические оценки показывают, что реализация такого способа формирования траектории позволяет рассчитывать на кратное уменьшение отклонения от программной траектории, чем по сравнению с одновременным отключением всех приводов.

В новом способе торможения все приводы отключаются сразу. В течение некоторого промежутка времени, своего для каждой степени подвижности, она тормозится силами трения в редукторе, и только затем приводится в действие тормоз. В настоящем исследовании показано, что

при таком способе формирования траектории торможения отклонения всегда оказываются меньшими, чем в способе, рассмотренном ранее.

Существенным преимуществом нового способа является также возможность одновременного отключения питания всех приводов, что позволяет применять его в случае отказа хотя бы одного из них.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Hofmann J., Schwarz R., Marx S.* Industrial Robot Having Redundant Emergency Brake Circuit. US8736219 – 2014-05-27.
2. *Ho S.J., Rak K.S.* Emergency Stop Method of Industrial Robot. Pat. KR20120045766 (A), 2012-05-09.
3. *Карташев В.А., Сафронов В.В.* Система автоматического контроля безопасности перемещений манипуляционного робота // Изв. РАН. ТиСУ. 2017. № 2. С. 162–167.
4. *Карташев В.А., Карташев В.В.* Способ формирования траектории аварийного торможения манипулятора // Изв. РАН. ТиСУ. 2018. № 4.
5. *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.