

## КИНЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЗВЕНА ПОДВИЖНОСТИ ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА МАНИПУЛЯЦИОННОГО РОБОТА

**А. Шраим**

Кафедра кибернетики и мехатроники  
Российский университет дружбы народов  
*ул. Миклухо-Маклая, д. 6, Москва, Россия, 117198*

**А.А. Внуков**

Департамент прикладной математики  
Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»  
*ул. Таллинская, д. 34, Москва, Россия, 123458*

В статье рассматривается кинематическая схема звена подвижности манипулятора с электромеханическим преобразователем, математическая модель и расчетная схема двухмассовой модели звена подвижности промышленного робота с двумя вращающимися инерционными элементами, связанными этим упругим звеном. Математические соотношения регулятора позволяют учесть изменение угловой скорости вращения АД на расчетном участке торможения, точность остановки исполнительного механизма, время переходных процессов при разработке модели реального объекта, представляемого в виде двухмассовой математической модели. Уравнения двухмассовой математической модели могут быть использованы для упрощения моделирования в случае приведения двухмассовой модели к эквивалентной одномассовой модели для математического моделирования режима динамического торможения частотно-регулируемого электропривода манипуляционного робота. Полученные уравнения используются для моделирования возможности эксплуатации частотно-регулируемого привода асинхронного двигателя без перегрева обмоток.

**Ключевые слова:** промышленный робот, частотно-регулируемый электропривод, асинхронный электродвигатель, двухтоковое динамическое торможение, регулятор, моделирование, точность

Для проведения математического моделирования режима динамического торможения частотно-регулируемого привода промышленного робота (ПР) необходимо сформировать упрощенные математические модели звеньев подвижности робота как двух массовые механические системы для осуществления возможности проведения расчетов.

Проведенный анализ литературных источников показал, что в исследованиях следует использовать упрощенные математические модели звеньев подвижности робота. В [1] представлены основные разделы робототехники: кинематика и динамика исполнительных механизмов, управление приводами, сенсорные системы, программирование роботов на проблемно-ориентированных языках. В [2] излагаются кинематика, динамика, системы управления промышленных мани-

пуляционных роботов Puma, способы планирования траектории движения манипулятора, повышения точности, улучшения динамических характеристик за счет систем технического зрения, средств адаптации и элементов искусственного интеллекта. В книге [3] дается определение и место интеллектуальных систем в задачах обработки информации и управления, рассмотрены научные и философские аспекты теории интеллектуальных систем. В [4] метод разработки интеллектуальных систем применен при реализации цифрового управления электроприводом в режиме электродинамического торможения в подсистеме управления скоростью вращения вентилятора для охлаждения асинхронного двигателя (АД) мехатронной системы, моделировании работоспособности нечеткого контроллера в среде MATLAB и Simulink, подтвердившее возможность эксплуатации частотно-регулируемого привода АД без перегрева обмоток. Ранее в [5] разработана структурная схема системы интеллектуального управления моделирования в среде MATLAB и Simulink и рекомендации принципа нечеткого управления для эксплуатации частотно регулируемого привода АД без перегрева обмоток в режимах близких к номинальной эксплуатации. В [6] рассмотрены методы частотного регулирования частоты вращения асинхронных короткозамкнутых двигателей тиристорными преобразователями частоты, исследуются физические явления в двигателях и преобразователях частоты при управлении, оптимальные законы управления напряжением и частотой. В [7] рассмотрены теория, проектирование и исследование механизмов, машин, пространственных механизмов, колебания в машинах, схем гидравлических и пневматических механизмов, манипуляторов и промышленных роботов, систем управления. Работа [8] посвящена методам построения динамических моделей механизмов с учетом упругости звеньев, исследованы колебательные процессы. В [9] описаны элементная база, структуры схем систем управления тиристорными электроприводами постоянного тока, методика расчета параметров, применение микропроцессорной техники; методы автоматизированного проектирования систем управления. Описание [10] пакета расширения MATLAB содержит инструменты для проектирования систем нечеткой логики, создания экспертных систем с нечеткой логикой, кластеризации нечеткими алгоритмами, разработки нечетких нейросетей. Графический интерфейс, функции командной строки, блоки для построения систем нечеткой логики в Simulink, функции пакета используют открытый язык MATLAB для контроля исполнения алгоритмов, изменения исходного кода, создания своих функций и процедур. Инструменты модельно-ориентированного проектирования MATLAB и Simulink применяются в разработке систем повышенной надежности в промышленной автоматизации, машиностроении, мехатронных системах производственных комплексов.

Позиционный привод манипуляционного промышленного робота, технологического оборудования мехатронных систем производственных комплексов состоит из частотно-регулируемого асинхронного электродвигателя, усилительно-преобразовательного устройства с микропроцессорным управлением и информационными каналами, и должен иметь высокие требования к ряду технических показателей.

### Кинематическая схема звена подвижности промышленного робота

Показателями частотно-регулируемого электропривода являются: точность позиционирования захвата манипулятора и производительность мехатронной системы, достигаемые повышенной скоростью перемещения захвата и быстротой протекания переходных процессов в режиме «разгон-торможение» исполнительных механизмов манипулятора или мехатронной системы технологического комплекса. Взаимное влияние погрешности позиционирования захвата мехатронной системы и процесса торможения манипулятора учитывают при решении задачи поиска оптимального закона для изменения динамических характеристик ускорения, скорости разгона-торможения кинематических сборных узлов исполнительных механизмов от времени или перемещения. В общем случае скорости вращения и перемещения захвата и звеньев робота даже с механизмами с постоянным передаточным отношением редуктора во вращательных и линейных степенях свободы с приводами типа шестерня-шестерня или шестерня-рейка являются неравномерными. Они определяются соотношением сил приводного движения и сопротивления, наличием пульсирующего момента вращения на валу механической части электропривода в зоне низких скоростей [6] функционирования исполнительных механизмов звеньев. Это проявляется в частотно-регулируемых электроприводах с автономным инвертором напряжения (АИН) и трехфазным асинхронным двигателем АД. На рисунке 1 представлена кинематическая схема звена подвижности манипулятора с исполнительным механизмом (ИМ), электромотором, муфтой, редуктором, реечной парой.

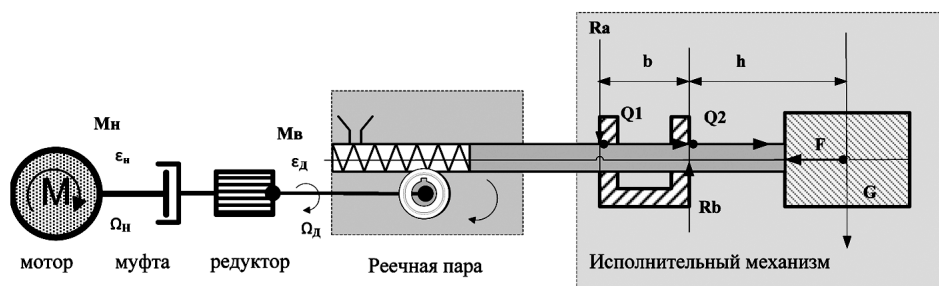


Рис. 1. Кинематическая схема звена подвижности манипулятора

Передача движения на приводной исполнительный механизм звена робота осуществляется от двигателя через механизм муфт, редуктор, на выходе которого получается требуемая частота вращения, и реечной пары для преобразования вращательного движения в поступательное перемещение линейной степени свободы мехатронной системы.

### Двухмассовая модель звена подвижности ПР с электромеханическим преобразователем

Все подвижные звенья манипулятора, технологической машины [7] способны накапливать и отдавать кинетическую энергию, определяемую приведенным к входному звену (валу электромеханического преобразователя) моментом инер-

ции  $J_n$ . Значение  $J_n$  определяется постоянной составляющей  $J'_n$  исполнительного механизма с постоянным передаточным отношением кинематических функций и переменной составляющей  $J''_n$  звеньев исполнительного механизма, совершающих сложное пространственное, возвратно-поступательное или плоско-параллельное движение при работе исполнительного механизма манипуляционного робота. Поиск закона изменения угловой скорости ротора электродвигателя от угла поворота вала [6; 7] по изменению динамической нагруженности и энергозатрат на процесс «разгона-торможения» технологической машины сложен и не формализован для реализации в конкретных системах управления. Теоретические и экспериментальные исследования [7; 8] динамических процессов в исполнительных механизмах технологического оборудования манипуляционных роботов, станочных систем металлообработки с электромеханическими преобразователями подтверждают необходимость учета времени переходных процессов и других основных показателей в модели реального объекта в форме идеализированной двухмассовой математической модели:

$$\begin{bmatrix} i'_{1\alpha} \\ i'_{2\alpha} \\ i'_{1\beta} \\ i'_{2\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -cr_1 & dr'_2 & \Omega_1 dL_{12} & \Omega_1 dL_2 \\ dr_1 & -br'_2 & -\Omega_1 bL_{12} & -\Omega_1 bL_2 \\ -\Omega_1 dL_{12} & -\Omega_1 dL_2 & -cr_1 & dr'_2 \\ \Omega_1 bL_{12} & \Omega_1 bL_2 & dr_1 & -br'_2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_{1\alpha} \\ i_{2\alpha} \\ i_{1\beta} \\ i_{2\beta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c & 0 \\ -d & 0 \\ 0 & c \\ 0 & -d \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} u_{1\alpha} \\ u_{2\beta} \end{bmatrix};$$

$$J_1 \cdot \Omega'_1 = \frac{3}{2} \cdot p \cdot L_{12} \cdot (i_{1\beta} i_{2\alpha} - i_{1\alpha} i_{2\beta}) - M_{12} - M_{C1};$$

$$J_2 \cdot \Omega'_2 = M_{12} - M_{C2}; \quad (2.1.1)$$

$$M_{12} = c_{12} \cdot (\varphi_1 - \varphi_2) + \beta_{12} \cdot (\Omega_1 - \Omega_2);$$

$$\varphi'_1 = \Omega_1; \quad \varphi'_2 = \Omega_2;$$

$$\Delta\alpha' = k_S \cdot \Omega_2,$$

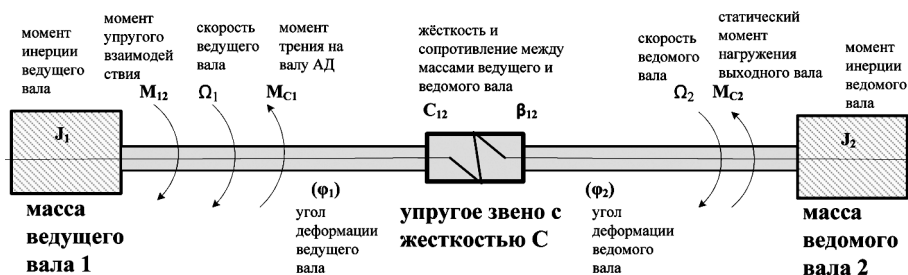
где  $u_{1\alpha} = U_H \cdot \gamma \cdot \cos(\alpha \cdot t)$ ;  $u_{2\beta} = U_H \cdot \gamma \cdot \sin(\alpha \cdot t)$ ;

$L_1 = L_{12} + L_{\sigma 1}$ ;  $L_2 = L_{12} + L_{\sigma 2}$ ;

$b = \frac{L_1}{L_1 L_2 - L_{12}^2}$ ;  $c = \frac{L_2}{L_1 L_2 - L_{12}^2}$ ;  $d = \frac{L_{12}}{L_1 L_2 - L_{12}^2}$ ;

$r_1, r'_2$  — активное сопротивление ротора и статора соответственно;  $L_{\sigma 1}, L_{\sigma 2}, L_{12}$  — индуктивности рассеяния обмоток статора и ротора и взаимная индуктивность;  $p$  — число пар полюсов статора АД;  $U_H, \gamma, \alpha$  — амплитудное и относительные значения, частота входного напряжения;  $c_{12}, \beta_{12}$  — коэффициент жесткости и сопротивления между массами ведущего и ведомого вала;  $\Delta\alpha, k_S$  — перемещение и коэффициент пересчета (усиления) выходного звена по пути;  $M_{12}$  — момент упругого взаимодействия;  $M_{C1}, M_{C2}$  — момент трения на валу АД и статический момент нагружения выходного вала;  $J_1, J_2$  — моменты инерции ведущего и ведомого валов ИМ;  $\varphi_1, \varphi_2$  — углы деформации,  $\varepsilon_H, \Omega_2$  — скорости ведущего и ведомого валов ИМ.

На рисунке 2 имеется схема расчета двухмассовой модели звена подвижности ПР с электромеханическим преобразователем с двумя вращающимися инерционными элементами  $J_1$  и  $J_2$ , связанными упругим звеном с жесткостью  $C$ .



**Рис. 2.** Двухмассовая модель звена подвижности ИМ ПР с электромеханическим преобразователем

Нагрузка на приводной вал АД ИМ промышленного робота станочной системы обусловлена величиной  $M_C^П$  определяется силами технологического сопротивления нагружения и трения, типом технологического механизма. Динамическая нагруженность ПР, машины-автомата станочной системы зависит от сил движущих ( $M_D^П$ ) и сопротивления ( $M_C^П$ ), от функции  $J_П = J(\varphi)$ , выражающей приведенный к валу момент инерции ИМ от угла поворота вала  $\varphi$ . Для работы ИМ имеет значение зависимость между изменением скорости  $\Omega$  и массово-геометрическими характеристиками ИМ манипулятора, ведущими к неравномерности вращения приводного вала [7; 8]. В низкочастотном диапазоне изменений выходного напряжения  $U_H$  АИН питания электромеханического преобразователя нечетные гармонические составляющие тока могут влиять на режим формирования пульсирующего момента вращения на валу АД и привести к неравномерности движения звеньев ИМ и схвата ПР [6]. Неточности модели влияют на собственную динамику функционирования электромеханического преобразователя, показатели точности позиционирования рабочего органа (РО) в режиме динамического торможения.

### Коррекция угловой скорости вращения АД на участке торможения

Специальные режимы работы АИН для формирования выходной частоты тока фаз статора синусоидальной формы от 0,1 Гц и выше часто снижают неравномерности скорости вращения вала АД. Синусоидальные формы токов фаз статора АД в широком диапазоне позволяют регулировать тормозной момент на валу АД привода ПР, применяя принцип частотного управления [9] в сочетании с двухтоковым динамическим торможением. Для приводной системы с датчиком положения рассогласование по пути и скорости двигателя в режиме торможения можно определить соотношением

$$\Delta\alpha = J_П \cdot \frac{\Omega_0^2 \cdot K_S}{2M_T} = b \cdot \Omega_0^2, \tag{2.1.2}$$

где  $\Omega_0$  — начальная скорость торможения;  $K_S$  — коэффициент пропорциональности между углом поворота вала двигателя и перемещением.

Характеристика регулятора положения, задающая связь  $U_{3C} = f(U_{\Delta\alpha})$ , где  $U_{\Delta\alpha}$  — рассогласование по напряжению и заданной скоростью, запишется:

$$U_{3C} = K_{ДС} \cdot \sqrt{\frac{U_{\Delta\alpha}}{b \cdot K_{ИП}}}, \quad (2.1.3)$$

где  $K_{ДС}$ ,  $K_{ИП}$  — коэффициенты передачи датчиков скорости и положения.

Зависимость  $\Omega(\Delta\alpha)$  на рис. 3 демонстрирует диаграмму изменения скорости перемещения рабочего органа (РО) от выбора вида торможения и формул (2.1.1), (2.1.2), (2.1.3). До точки 1 отрезка пути «а» РО движется с равномерной скоростью, от 1 до 2 точки участка «b» происходит плавное частотное торможение привода с продолжением на участке «с» до точки 3. Далее по показанию датчика положения РО постоянно корректируется скорость перемещения РО на сумме участков d и e или для тех же участков применяется равнозамедленный закон перемещения РО. При перемещении РО по верхней кривой необходимо дополнительное подтормаживание при двухтоковом динамическом торможении АД и возможны динамические удары в приводной системе ПР. При равнозамедленном торможении с предварительным контролем точки позиционирования РО по показанию датчика положения целесообразно тормозить РО по нижней кривой для исключения динамических ударов. Режим системы управления трудно реализуем при высоком быстродействии ЦСП, возможен на ПЛИС архитектуры логика+память+процессор.

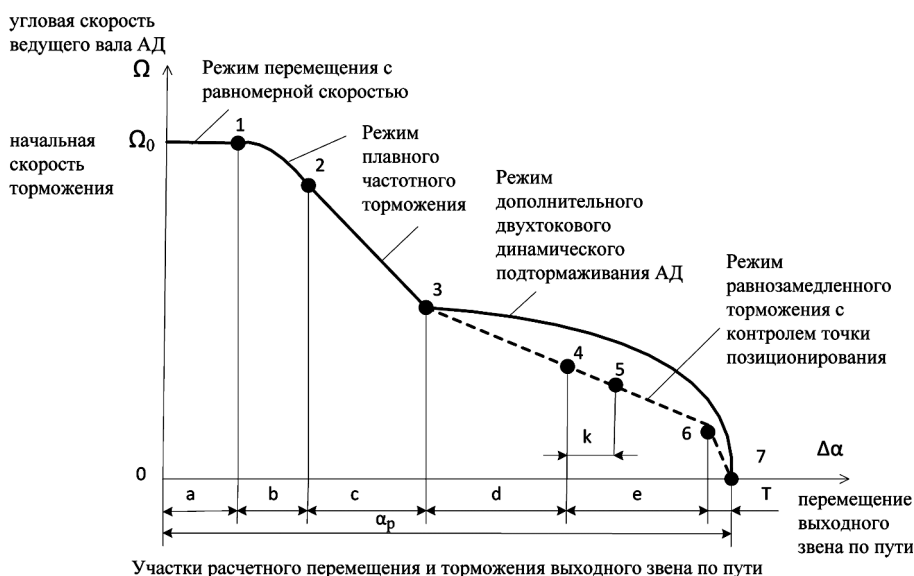


Рис. 3. Диаграмма коррекции угловой скорости вращения АД на участке расчета торможения

### Особенности режима двухтокового динамического торможения АД

Тормозной момент на валу при питании статора постоянным током возникает из-за индуктирования ЭДС и появления тока ротора в проводниках обмотки ротора при пересечении неподвижного в пространстве поля постоянного тока

статора. Ток ротора взаимодействует с магнитным потоком статора, создает на валу тормозной момент и снижает скорость вращения ротора. В двигательном режиме вращающееся поле увлекает за собой ротор, аналогично при динамическом торможении вращающийся ротор старается приобрести одинаковую скорость с полем статора.

Двухтоковый принцип торможения АД в сочетании с частотным управлением и подмагничиванием обмоток статора постоянным током от отдельного управляемого источника основан на совмещении торможений противовключением и динамического, что достигается одновременным введением в двигатель переменного и постоянного токов.

Двухтоковый электродинамический принцип торможения частотно-регулируемого привода ПР или мехатронной системы с трехфазным асинхронным короткозамкнутым двигателем применяется по движению точки 1 (рис. 4) на механической характеристике двигательного режима (Д) в точке установившейся скорости движения ИМ, когда момент нагружения МН равен статическому моменту М<sub>С</sub>, т.е. М<sub>Н</sub> = М<sub>С</sub>, а скорость вращения вала АД составляет  $\Omega_B = \Omega_H$ . Режим торможения начинается с плавного понижения напряжения  $U_1$  и  $f_1$  согласно принятому закону  $U_1/f_1 = \text{const}$  для исключения динамических ударов в приводной системе электропривода и ИМ.

Принимая скорость вращения вала  $\Omega_B = \Omega_H$  (рис. 4), конец участка «а» тормозного пути  $\alpha$  будет началом «мягкого» торможения электропривода от точки 1 до точки 2 при частотном управлении на участке «б» тормозного пути  $\alpha$ , а скорость вращения АД от  $\Omega_0 = \Omega_H$  от точки 1 до точки 2 (рис. 4) будет изменяться с сохранением момента М<sub>Н</sub> (рис. 4).

В точке 2 механической характеристики  $\Omega = f(M)$  (см. рис. 3), (см. рис. 4) включается режим динамического торможения АД, формирующий пульсирующий постоянный ток в обмотках статора АД. Состояние АД соответствует двухтоковому торможению с плавным формированием тормозного момента  $-M_{T1}$ , снижению скорости между точками 2 и 4 (рис. 4) и участку «с» расчетного пути  $\alpha$  (см. рис. 3). На участке характеристики 2—3—4 (рис. 4) имеют место плавные переходы изменения скорости, определяемые постоянной времени нарастания постоянного тока в обмотке управления. Далее изменение скорости реализуется при постоянном тормозном моменте  $-M_{T1}$  с постоянным ускорением торможения  $-\varepsilon_T$  от точки 4 до 4' (рис. 4), что соответствует плавному равномерному перемещению рабочего органа (точки 3—4) нижней кривой на рис. 3. На участке изменения скорости (точки 4—5) характеристики  $\Omega = f(M)$  (рис. 4) меняется режим работы АИН и на «ползучей» скорости развивается момент вращения на валу АД с уменьшением тормозного момента при уменьшении тока подмагничивания  $I_{\Gamma}$ . АД работает под активным моментом на валу, снижая скорость между точками 5 и 7 (рис. 4). На двигательном режиме АД (точки 7—8) скорость снижается до полной остановки приводной системы ПР при программном формировании вектора магнитного поля статора путем изменения алгоритма работы АИН с отставанием на 1—2 электрических градуса от вектора магнитного потока поля ротора.

Совместное применение частотного принципа торможения со снижением по пропорциональному закону  $U_m/f_m = \text{const}$  частоты и напряжения питания АД и двухтокового динамического торможения с регулированием постоянного тока в обмотках статора является существенной особенностью режима.



Рис. 4. Механические характеристики асинхронного трехфазного электродвигателя: Д — двигательный режим, Т — тормозной режим работы АД

Постоянство тормозного момента и, как следствие, ускорения торможения участка 4—4' (см. рис. 4) можно обеспечить регулированием величины постоянной составляющей тока статора в зависимости от текущих значений частоты  $f$  и напряжения  $U$  питания АД от АИН, угловой скорости вращения ротора  $\Omega$  и момента на валу АД по закону участка 7—8.

Двухтоковый принцип торможения АД обеспечивает постоянным ускорением с точной остановкой позиционного привода ПР в заданной точке.

\*\*\*

При моделировании в MATLAB и Simulink частотно-регулируемого привода по схеме АИН — АД получены результаты:

— принцип двухтокового динамического торможения АД проверен с достаточным приближением к реальным характеристикам электропривода с частотным



управлением на заданных значениях величин структурной схемы и математической модели схемы АИН — АД;

— достаточный диапазон изменения угловой скорости ведущего вала АД  $\Omega$  участка 4—4' характеристики  $\Omega = f(-M_T)$  при изменении тормозного момента в пределах до 10% от установленного при торможении позволяет тормозить привод ПР или МС с постоянным ускорением торможения без ударов в кинематической схеме передаточного механизма;

— на участке 4'—7 происходит плавное снижение скорости исполнительного механизма ПР или МС при переводе АД из тормозного в двигательный режим с формированием на участке зоны ползучей скорости.

### ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Шахинпур М.* Курс робототехники / под ред. С.Л. Зинкевича. М.: Мир, 1990. 380 с.
- [2] *Фу К., Гонсалес Р., Ли К.* Робототехника / под ред. В.Г. Градецкого. М.: Мир, 1989. 620 с.
- [3] *Пупков К.А., Коньков В.Г.* Интеллектуальные системы. М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. 194 с.
- [4] *Шраим Л.М.А., Внуков А.А.* Применение метода интеллектуального управления для режима динамического торможения частотно-управляемого электропривода мехатронной системы // Вестник РУДН. Серия «Инженерные исследования». 2014. № 1. С. 59—61.
- [5] *Шраим Л.М.А., Внуков А.А.* Интеллектуальное цифровое управление динамическим торможением электропривода промышленного робота // Вестник РУДН. Серия «Инженерные исследования». 2013. № 1. С. 70—80.
- [6] *Булгаков А.А.* Частотное управление асинхронными двигателями. М.: Энергоиздат, 1982.
- [7] *Левитский Н.И.* Теория механизмов и машин. М.: Наука, 1979.
- [8] *Вульфсон И.И.* Методы решения задач динамики механизмов с учетом упругости звеньев: учеб. пособие. Л.: ЛПИ, 1982.
- [9] *Перельмутер В.М., Сидоренко В.А.* Системы управления тиристорными электроприводами постоянного тока. М.: Энергоатомиздат, 1988. 304 с.
- [10] Fuzzy Logic toolbox for MatLab.

## THE KINEMATIC MODEL OF LINK MOBILITY FREQUENCY-CONTROLLED ELECTRIC DRIVE OF THE MANIPULATION ROBOT

**A. Shraim**

Cybernetics and Mechatronics Department  
Peoples' Friendship University of Russia  
*Miklukho-Maklaya str., 6, Moscow, Russia, 117198*

**A.A. Vnukov**

Department of Applied Mathematics  
National Research University Higher School of Economics  
*Tallinskaya str., 34, Moscow, Russia, 123458*

The article considers the kinematics of the level of mobility of the manipulator with an electromechanical transducer, the mathematical model and the design scheme of the two-mass model of mobility managers of the industrial robot with two rotating inertia-communicable elements bound

by the elastic element. Mathematical relationships allow the regulator to take into account the angular speed of rotation of the asynchronous engine on the current site of the braking, stopping accuracy actuator transients develop a model of a real object, represented in the form of a two-mass mathematical model. The equations of the two-mass mathematical model can be used for a simplified version of the simulation, when the two-mass model is reduced to an equivalent one-mass model for mathematical modeling of the dynamic braking mode variable frequency drive manipulation robot. The received equations are used to model the possibility of operation of a variable frequency-controlled induction motor without overheating the windings.

**Key words:** industrial robot, VFD, induction motor, two-current dynamic brake control, modeling, accuracy

## REFERENCES

- [1] Shahinpur M. Kurs of robototehinics / for red. S.M. Zikevicha. M.: «Mir», 1990. 380 p. [Shahinpur M. Kurs robototehiniki / pod red. S.M. Zikevicha. M.: «Mir», 1990. 380 s.]
- [2] Fu K., Gonsales R., Li K. Robototehnika / for red. V.G. Gradeckogo. M.: «Mir». 1989. 620 p. [Fu K., Gonsales R., Li K. Robototehnika / pod red. V.G. Gradeckogo. M.: «Mir». 1989. 620 s.]
- [3] Pupkov K.A., Konkov V.G. Intellectual system. M.: Pub. MGTU im. N.E. Baumana, 2003. 194. [Pupkov K.A., Konkov V.G. Itellektualnye cictemy. M.: Izdatelstvo MGTU im. N.E. Baumana, 2003. 194.]
- [4] Shraim L.M.A., Vnukov A.A. Intellectualization mathematical model of dynamic braking of frequency-menagementic electric mechatronic systems // Bulletin of Peoples' Friendship University of Russia. Series "ENGINEERING RESEARCHES". M.: Pub. PFUR, 2014. № 1. S. 59—61. [Shraim L.M.A., Vnukov A.A. Primenenie metoda itellektualnogo upravleniya slay reshima dinamicheskogo tormosheniya chatotno-upravlyaemogo elektroprivoda mehatronnoy cictemy // Vestnik Rossiyskogo universiteta drushby narodov. Seriya «Inshnerye issledovaniya» Nauchye shurnal. M.: Izdatelstvo FGBOU VPO RUDN, 2014. № 1. S. 59—61.]
- [5] Shraim L.M.A., Vnukov A.A. Intelligent digital control of dynamic braking of industrial robots // Bulletin of Peoples' Friendship University of Russia. Series "ENGINEERING RESEARCHES". M.: Pub. PFUR, 2013. № 1. S. 70—80. [Shraim L.M.A., Vnukov A.A. Itellektualnoe cifrovoe upravlenie dinamicheskim tormosheniem elektroprivoda promyshlennogo robota // Vestnik Rossiyskogo universiteta drushby narodov. Seriya «Inshnerye issledovaniya» Nauchye shurnal. M.: Izdatelstvo FGBOU VPO RUDN, 2013. № 1. S. 70—80.]
- [6] Bulgakov A.A. Chastotnoe upravlenie assinhronnymi dvigatelyami. M.: Energoatomizdat, 1982. [Bulgakov A.A. Chastotnoe upravlenie assinhronnymi dvigatelyami. M.: Energoatomizdat, 1982.]
- [7] Levitskiy N.I. Theory mehanismov and mashin. M.: Nauka. Glav. red. fiz.-mat. literatury, 1979.
- [8] Vulfson I.I. Metody resheniya zadach dinamiki mehanizmov s echetom uprugosti zvenev: ucheb. posobie. L.: LPI, 1982. [Vulfson I.I. Metody resheniya zadach dinamiki mehanizmov s echetom uprugosti zvenev: ucheb. posobie. L.: LPI, 1982.]
- [9] Perelmutter V.M., Sidorenko V.A. Sistemy upravleniya tiristornymi elektroprivodami postpyannogo toka. M.: Energoatomizdat, 1988. 304 s. [Perelmutter V.M., Sidorenko V.A. Sistemy upravleniya tiristornymi elektroprivodami postpyannogo toka. M.: Energoatomizdat, 1988. 304 s.]
- [10] Fuzzy Logic toolbox for MatLab.