

УДК 62-83:621.313

А. А. Бойко, д-р техн. наук,
А. В. Бибик,
Н. В. Акчебаш,
Н. А. Бойко

МЕТОД СТРУКТУРНОГО СИНТЕЗА АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ДВУХЗВЕННОГО ПРОМЫШЛЕННОГО МАНИПУЛЯТОРА

Предложен метод математического описания и исследования асинхронного электропривода двухзвеного манипулятора промышленного робота. Выполнен синтез структурной схемы двухкоординатного электропривода и выполнено описание ее элементов. Особое внимание уделено взаимному влиянию звеньев манипулятора, а так же настройке регуляторов скорости и положения системы управления. Приведены результаты функционирования манипулятора с предложенным двухкоординатным асинхронным электроприводом.

Ключевые слова: двухзвеноый манипулятор, промышленный робот, плечо, локоть, асинхронный электропривод, двухкоординатный электропривод, моделирование.

А. О. Бойко, д-р техн. наук,
А. В. Бібік,
Н. В. Акчебаш,
Н. А. Бойко

МЕТОД СТРУКТУРНОГО СИНТЕЗУ АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ДВОЛАНКОВОГО ПРОМИСЛОВОГО МАНИПУЛЯТОРУ

Запропоновано метод математичного опису і дослідження асинхронного електроприводу дволанкового маніпулятора промислового робота. Виконано синтез структурної схеми двухкоординатного електроприводу і виконано опис її елементів. Особливу увагу приділено взаємному впливу ланок маніпулятора, а так само налаштування регуляторів швидкості та положення системи управління. Наведені результати функціонування маніпулятора з запропонованим двухкоординатним асинхронним електроприводом.

Ключові слова: дволанковий маніпулятор, промисловий робот, плече, лікоть, асинхронний електропривод, двухкоординатный электропривод, моделювання.

A. A. Wojko, Sc.D.,
A. V. Bibik,
N. V. Akchebash,
N. A. Wojko

METHOD OF STRUCTURAL SYNTHESIS OF ASYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVE TWO-LINK INDUSTRIAL MANIPULATOR

The method of the mathematical description and study of the asynchronous electric drive two-link manipulator of an industrial robot. The synthesis of the structural scheme of two-axis actuator and the description of its elements. Special attention is given to mutual influence between the links of the manipulator, as well as the setting of speed controller and position control system. The results of the operation of the manipulator with the proposed two-axis induction electric drive.

Keywords: two-link manipulator, industrial robot, shoulder, elbow, induction motor drive, two-axis actuator, modeling.

Ведение. Начиная с шестидесятых годов прошлого столетия и по настоящее время, в мире, одной из тенденций развития промышленности является интенсификация производства, техническое переоснащение промышленных предприятий на новое высокопроизводительное технологическое оборудование. Практика показала, что далеко не все ручные технологические операции мож-

но рационально автоматизировать традиционными средствами автоматики, поэтому и возникла задача создания роботизированных промышленных манипуляторов (ПМ), которым принято называть устройство, состоящее из механизма с кинематической цепью, приводов и рабочего органа и предназначенное для имитации рабочих функций руки человека [1,2].

Легкая перенастраиваемость манипуляторов с помощью средств управления существенно отличает их от традиционных промышленных приспособлений и другой жесткой технологической оснастки, которую нужно заменять на новую при изменении изготавливаемого изделия [3].

При применении ПМ существенно экономится время и средство при смене продукции. В роботизированных технологических процессах резко уменьшается брак, улучшается качество продукции, так как исключаются человеческие усталость и невнимательность [4]. Применение промышленных манипуляторов существенно изменяет экономические показатели производства. Показатели экономической эффективности применения робототехнических систем на производстве не одинаковы и существенно зависят от вида производства, от организации и технологической подготовки участников и линий к применению робототехнических комплексов. Однако, необходимость применения ПМ возможна даже в тех случаях, когда нет экономического эффекта, например по социальным причинам - когда речь идет о работе во вредных условиях или тогда, когда нормальная работа производства нарушается из-за недостатка рабочей силы [5].

Целью работы является исследование асинхронного электропривода двухзвенного манипулятора промышленного робота.

Материалы исследования. В качестве предмета исследования представлен двухзвенный промышленный манипулятор потолочного крепления, состоящий из элемента «плечо» – 1 и элемента «локоть» – 2, аналогичный типу KAWASAKI KE610H, общий вид которого представлен на рис. 1,а. Схема рабочей зоны ПМ с указанием начальных и конечных положений звеньев приведена на рис. 1,б. Определяя особенности применения подобного манипулятора в отраслях промышленности можно отметить, что он может выступать как основное технологическое оборудование в сварочных и механосборочных операциях, в операциях клепки, окраски и нанесения покрытий, в работах по переноске, сортировке и укладке сырья или готовой продукции.

Для математического описания и последующего исследования предлагается использовать кинематическую схему манипулятора, (рис. 2) с указанием всех параметров, которые указаны в табл. 1.

Кинематические пары манипулятора (вращательные или поступательные) приводятся в движение при помощи электрических, гидравлических или пневматических приводов. Наиболее удобны в эксплуатации электроприводы (ЭП). Они не требуют промежуточного энергоносителя, не склонны к утечкам рабочего тела и не требуют специальных станций питания, легко регулируются по скорости и проще в цеховой эксплуатации.

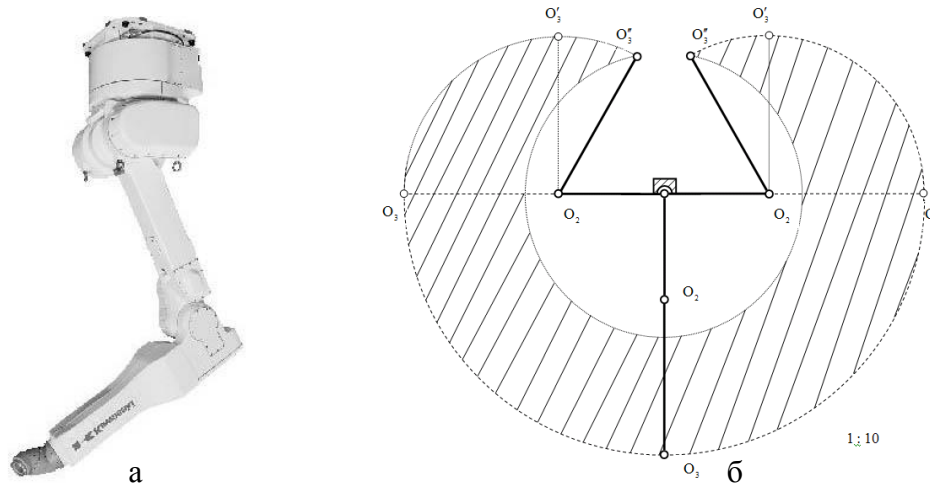


Рис. 1 – Общий вид манипулятора KAWASAKI KE610H – а и схема его рабочей зоны – б

Таблица 1 – Параметры промышленного манипулятора

Грузоподъемность и частота циклов		Конструктивные параметры				Задание на перемещение			Максимальные скорости и ускорения		
m_r , кг	N , 1/час	m_1 , кг	m_2 , кг	l_1 , м	l_2 , м	q_{31} , рад	q_{32} , рад	$\dot{q}_{\max 1}$, рад/с	$\dot{q}_{\max 2}$, рад/с	$\ddot{q}_{\max 1}$, рад/с ²	$\ddot{q}_{\max 2}$, рад/с ²
5,0	3000	100	48	0,32	0,48	0,4	1,3	2,0	5,0	10,0	50,0

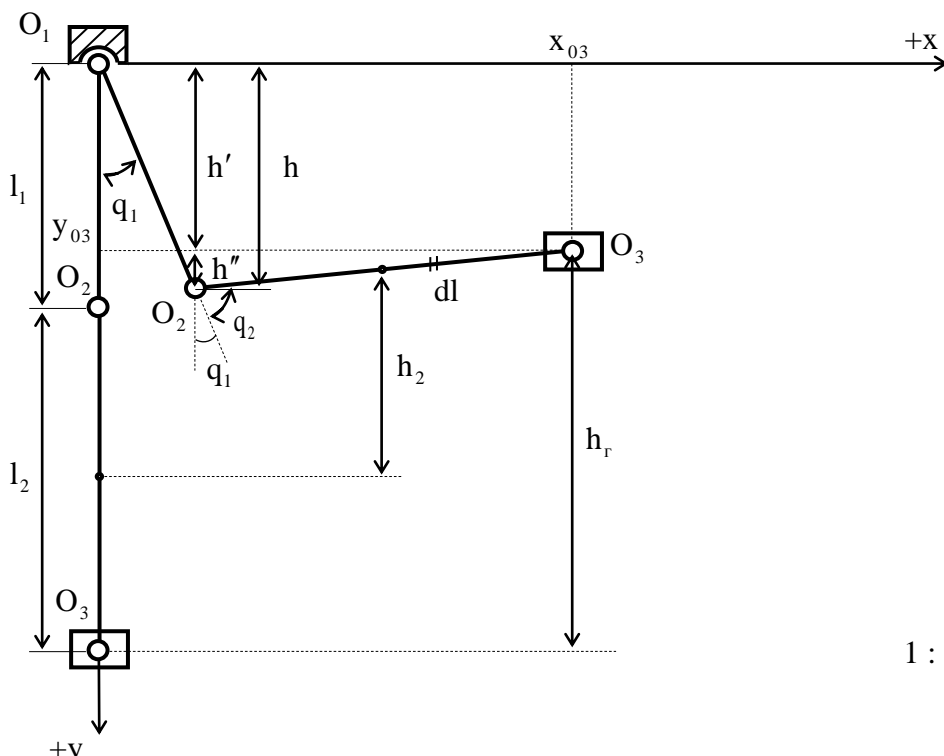


Рис. 2 – Кинематическая схема двухзвенного манипулятора

К электроприводам в робототехнике предъявляются специфические требования. Основные из них – это минимальный вес и габариты приводных двигателей, повышенные статические и динамические характеристики, легкость регулирования в большом диапазоне скоростей, реверсивность. И при этом требуются большой ресурс и плавность движений. Особенностью работы является взаимосвязанное групповое взаимодействие электроприводов всех координат манипулятора [6].

Перспективно применение регулируемых электроприводов переменного тока на базе асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором (АД). АД отличаются простотой конструкции, высокой надежностью, достаточно высоким КПД, достаточно-

малыми габаритными показателями [7]. Технические возможности современных асинхронных электроприводов (АЭП), как с частотным, так и с параметрическим управлением, дают основание утверждать, что они могут широко использоваться для промышленных манипуляторов (ПМ) робототехнических систем и комплексов [7]. Вместе с тем, синтез подобных электромеханических систем характеризуется сложностью, прежде всего, на стадии их математического описания и моделирования. Эта сложность состоит в том, что звенья манипулятора функционируют в общем комплексе как единая механическая многозвенная динамическая система, что обуславливает применение многокоординатных ЭП и затрудняет рассмотрение общих свойств этого исполнительного

устройства в целом. Трудоемкость усугубляется тем, что угловые координаты оказываются под знаками тригонометрических функций, и уравнения движения являются нелинейными [8]. Очевидно, что сложность всей системы уравнений динамики не позволяет решить задачу аналитически, поэтому приходится прибегать к математическому моделированию с применением современных средств вычислительной техники.

Расчетная структурная схема, предлагаемого двухкоординатного асинхронного электропривода с подчиненным регулированием, представлена на рис. 3. Система содержит внутренние контуры регулирования скорости и внешние контуры регулирования положения. На схеме показаны: РС₁, РС₂; РП₁, РП₂ – регуляторы скорости и положения, соответственно; СУ₁, СУ₂ – системы правления; ПП₁, ПП₂ – полупроводниковые преобразователи; АД₁₁, АД₂₁ – звенья, описывающие электрические части асинхронных двигателей (АД); F(φ₁), F(φ₂) – звенья, позволяющие формировать значения углов нагрузки АД на основании текущих значений скорости; F(s₁), F(s₂) – звенья, позволяющие формировать значения скольжения АД на основании текущих значений скорости, что необходимо для описания нелинейной зависимости параметров АД от изменения скольжения; ДС₁, ДС₂, ДП₁, ДП₂ – датчики скорости и положения на оси двигателей «плеча» и «локтя» манипулятора, соответственно; F₁[...], F₂[...] – функциональные элементы, описывающие взаимное влияние звеньев манипулятора; БП₁₁, БП₁₂, БП₁₃, БП₂₁, БП₂₂, БП₂₃ – звенья, позволяющие приводить механические параметры системы; БД – блоки деления. В АЭП применяется управление от задатчиков интенсивности с использованием регуляторов координат.

Полупроводниковые преобразователи представляются упрощенными моделями, имеющими на входах управляющие воздей-

ствия в виде напряжений управления u_{u1} , u_{u2} и возмущающие воздействия в виде текущих фаз токов нагрузки φ_1 , φ_2 [7]. На выходах ПП, при использовании частотных преобразователей – амплитуды первых гармоник напряжений и их частоты, согласно выбранному закону регулирования. В случае применения тиристорных преобразователей напряжения – частоты не изменяются, а напряжения рассчитываются в процессе моделирования на каждом расчетном шаге. Выходные параметры ПП являются входными для АД, на выходе, которых, в свою очередь, – угловые скорости. Асинхронные короткозамкнутые двигатели моделируются в осях α , β , 0 при обязательном условии учета нелинейности их параметров [9]. Уравнения динамики движения звеньев манипулятора составляются на основе уравнений Лагранжа второго рода или по принципу Даламбера.

В начале необходимо исследовать динамические качества каждого звена в отдельности, что позволяет подобрать хорошее сочетание конструктивных параметров АЭП каждого из звеньев. Однако ввиду взаимосвязанности движений всех звеньев манипулятора такого исследования недостаточно, чтобы судить о динамических свойствах системы в целом. Следует решить динамическую задачу с выявлением степени взаимовлияния движений звеньев манипулятора друг на друга.

Элементами структурной схемы, позволяющими учитывать взаимное влияние «плеча» и «локтя», являются функциональные звенья, обозначенные на рис. 2 – F₁[...] и F₂[...]. Эти элементы описываются математическими зависимостями, позволяющими формировать статический момент нагрузки «плеча» и «локтя» и суммарный момент инерции в зависимости от ускорений, скоростей и перемещений манипулятора в каждый из моментов рабочего цикла

$$M_{c1} = \frac{l_2^2 \cdot \varepsilon_2 \cdot m_2}{3} + l_2^2 \cdot \varepsilon_2 \cdot m_r + \frac{m_2 \cdot l_1 \cdot l_2 \cdot \cos(\varphi_2) \cdot \varepsilon_2}{2} + m_r \cdot l_1 \cdot l_2 \cdot \cos(\varphi_2) \cdot \varepsilon_2 - l_1 \cdot l_2 \cdot \omega_2 \cdot \sin(\varphi_2) \cdot (2 \cdot \omega_1 + \omega_2) \cdot \left(\frac{m_2}{2} + m_r \right) + g \cdot l_1 \cdot \sin \varphi_1 \cdot (m_r + m_2 + m_{d2}) + l_2 \cdot g \cdot \sin(\varphi_1 + \varphi_2) \cdot \left(m_r + \frac{m_2}{2} \right); \quad (1)$$

$$J_{\text{с1}} = \frac{l_1^2 \cdot m_1}{3} + l_1^2 \cdot m_2 + l_1^2 \cdot m_r + l_1^2 \cdot m_{\text{д2}} + \frac{l_2^2 \cdot m_2}{3} + l_2^2 \cdot m_r + m_2 \cdot l_1 \cdot l_2 \cdot \cos(\varphi_2) + 2 \cdot m_r \cdot l_1 \cdot l_2 \cdot \cos(\varphi_2); \quad (2)$$

$$M_{\text{с2}} = \frac{l_2 \cdot \varepsilon_1 \cdot m_2}{3} + l_2 \cdot \varepsilon_1 \cdot m_r + l_1 \cdot l_2 \cdot (\varepsilon_1 \cdot \cos \varphi_2 - \sin \varphi_2 \cdot \omega_1 \cdot \omega_2) \cdot \left(\frac{m_2}{2} + m_r \right) + l_1 \cdot l_2 \cdot \omega_1 \cdot (\omega_1 + \omega_2) \cdot \sin \varphi_2 \cdot \left(\frac{m_2}{2} + m_r \right) + m_r \cdot g \cdot l_2 \cdot \sin(\varphi_1 + \varphi_2) + \frac{l_2}{2} \cdot m_2 \cdot g \cdot \sin(\varphi_1 + \varphi_2); \quad (3)$$

$$J_{\text{с2}} = \frac{l_2^2 \cdot m_2}{3} + l_2^2 \cdot m_r. \quad (4)$$

где m_1 , m_2 , m_r , $m_{\text{д2}}$ – соответственно, масса “плеча”, “локтя”, груза и масса двигателя «локтя»; l_1 , l_2 – длина “плеча” и “локтя” манипулятора.

На выходе вышеописанных функциональных звеньев статические моменты и моменты инерции приведены к осям «плеча» и «локтя» манипулятора. Для математического согласования параметры $M_{\text{с1,2}}$ и $J_{\text{с1,2}}$ приведены к валам двигателей, а величины $(\varphi_1, \omega_1, \varepsilon_1, \varphi_2, \omega_2, \varepsilon_2)$ к осям манипулятора с помощью блоков приведения.

Звенья БП11 и БП21 описываются коэффициентами: $1/i_1$ и $1/i_2$ соответственно. БП12 и БП22 характеризуются коэффициентами $1/i_1^2$ и $1/i_2^2$. Звенья БП13 и БП23 описываются с помощью: $1/i_1^2 \eta_{1p}$ и $1/i_2^2 \eta_{2p}$,

где i_1 , i_2 – передаточные числа, а η_{1p}, η_{2p} – КПД редукторов первого и второго звеньев манипулятора соответственно.

В состав системы управления двухкоординатного АЭП входят задатчики сигналов управления, датчики обратных связей и регуляторы координат. Задатчики формируют сигналы управления в соответствии с заданной диаграммой перемещения каждого из звеньев манипулятора. Датчики скорости и положения описываются пропорциональными звеньями [10].

В представленной системе управления регуляторы скорости могут настраиваться как на модульный, так и на симметричный оптимум, в зависимости от требований показателей качества. При настройке на модульный оптимум применяются П – регуляторы, передаточная функция которых имеет вид [7]:

$$H_{\text{рсм}}(p) = K_{\text{рс}} = \frac{J_{\Sigma}}{K_m \cdot K_c \cdot 2 \cdot (T_n + T_{\text{ад}})}, \quad (5)$$

где K_m – коэффициент передачи АД по моменту; K_c – коэффициент усиления датчика скорости; T_n – постоянная времени преобразователя; $T_{\text{ад}}$ – эквивалентная постоянная времени асинхронного двигателя; J_{Σ} – суммарный момент инерции электропривода.

Настройка контура регулирования скорости на симметричный оптимум соответствует введению в контур, настроенный на модульный оптимум ПИ – звена с передаточной функцией:

$$\frac{4 \cdot (T_n + T_{\text{ад}})p + 1}{4 \cdot (T_n + T_{\text{ад}})p}. \quad (6)$$

Тогда передаточная функция регулятора скорости:

$$H_{\text{рсс}}(p) = \frac{4 \cdot (T_n + T_{\text{ад}})p + 1}{4 \cdot (T_n + T_{\text{ад}})p} \cdot K_{\text{рс}} = \frac{J_{\Sigma}}{2 \cdot K_m \cdot K_c \cdot (T_n + T_{\text{ад}})} + \frac{J_{\Sigma}}{8 \cdot (T_n + T_{\text{ад}}) \cdot K_m \cdot K_c \cdot (T_n + T_{\text{ад}})p}. \quad (7)$$

Контур положения в большинстве случаев настраиваются на модульный оптимум, а передаточная функция П – регуляторов положения имеет вид [7]:

$$H_{\text{рп}}(p) = \frac{K_c}{2 \cdot (T_n + T_{\text{ад}}) \cdot K_n \cdot A_n}, \quad (8)$$

где K_n – коэффициент усиления датчика положения, В/рад;

$A_n = 2$ – коэффициент соотношения постоянных времени в контуре положения, определяющий коэффициент демпфирования в системе.

Для исходного двухзвенного манипулятора ПР, расчет и описание ЭП которого, выполнено при помощи изложенного метода, графики перемещения звеньев приведены на рис. 4б.

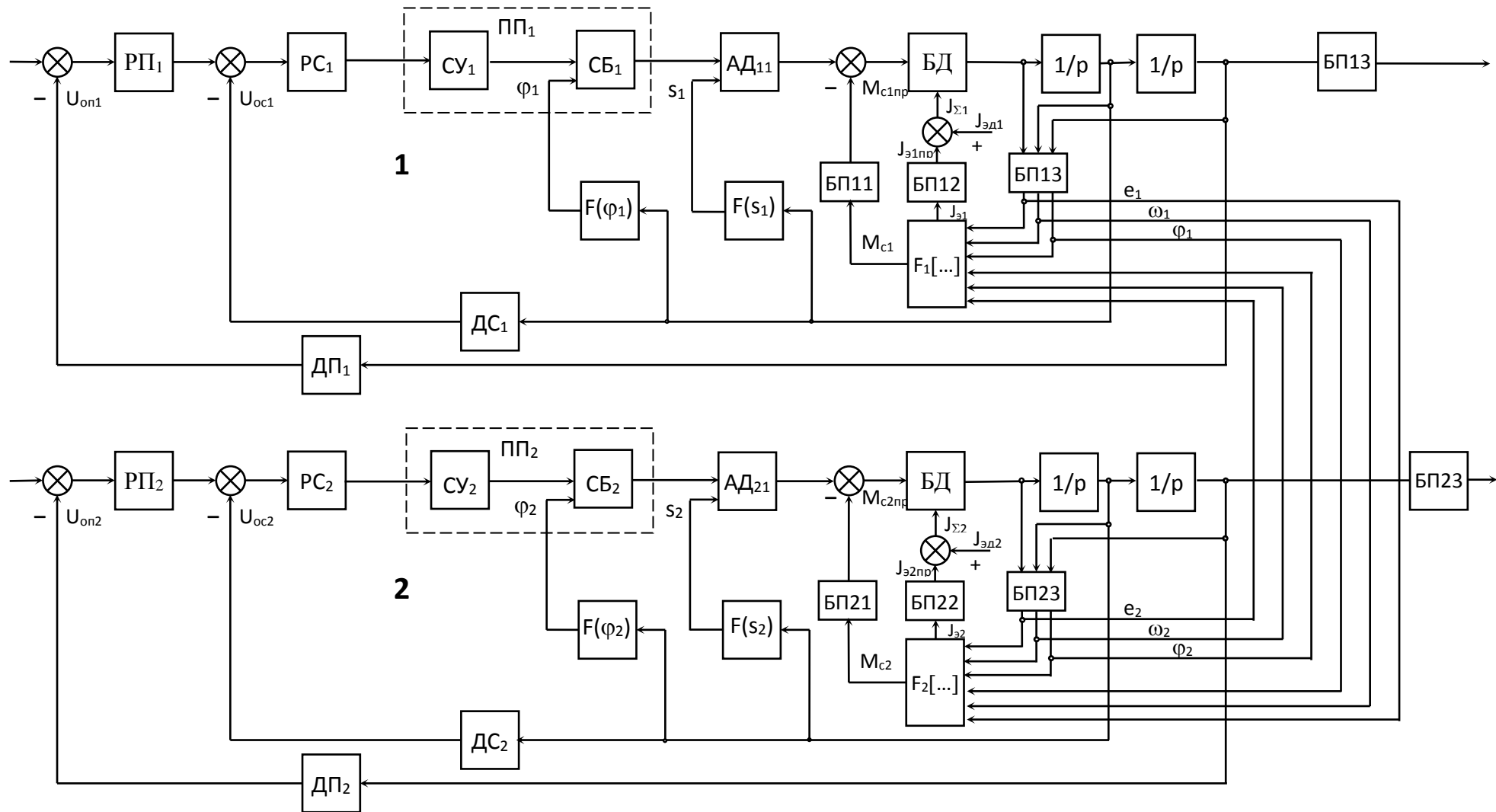


Рис. 3 – Структурная схема двухкоординатного асинхронного электропривода промышленного манипулятора ПР

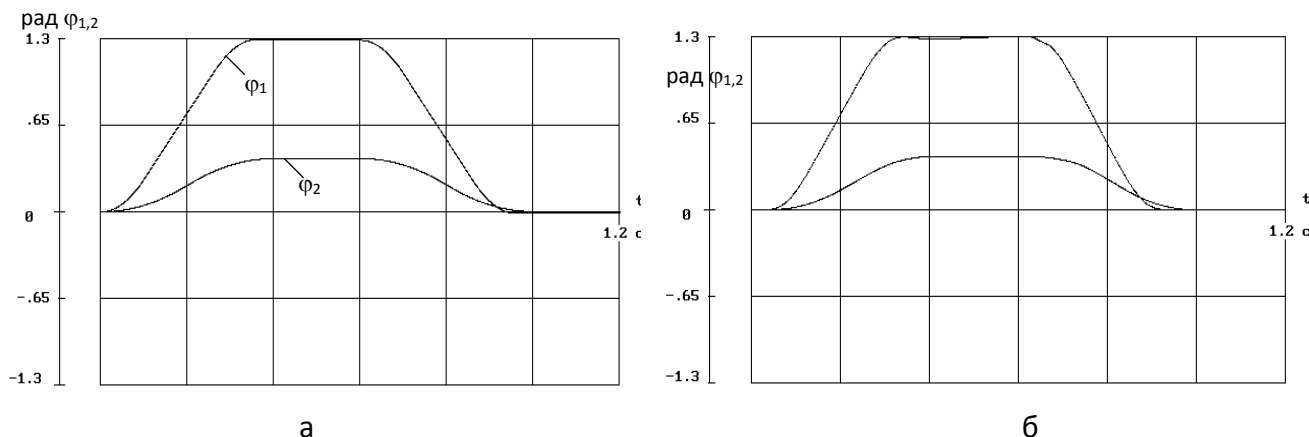


Рис. 4 – Графики перемещений звеньев манипулятора ПР

Выводы. Приведенный метод является универсальным. В соответствии с ним можно выполнить описание любого n-координатного асинхронного электропривода манипулятора ПР. Моделирование структурной схемы ЭП может быть выполнено как на основании разработанной пользователем программы, так и при помощи комплектов программных пакетов, например, Simulink.

Список использованной литературы:

1. Baumgartner E. T. An autonomous vision-based mobile robot [Text] / E. T. Baumgartner, S. B. Skaar // IEEE Transactions on Automatic Control. – 1994. – Vol. 39. – P. 315 – 324.
2. Gaulter P.E. A Spatially translating and Rotating Beam Finite Element for Modeling Flexible Manipulators [Текст] / P.E. Gaulter, W.L. Cleghorn // Mech. Mach. Theory. – 1992. – Vol. 27, No. 4. – P. 415 – 433.
3. King J.O. Composite Pseudolink End-Point Control of Flexible Manipulators [Текст] / J.O. King, V.G. Gourishankar, R.E. Rink // IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics. – 1990. – Vol. 20, No. 5. – P. 969. – 977.
4. Zuoliang L. Omnidirectional dynamic vision positioning for mobile robot [Text] / L. Zuoliang, Cao Sung J. Oh, Ernest L. Hall // Optical engineering: – 1986. – Vol. 25, No. 12. [Электронный ресурс] : Режим доступа: <http://opticalengineering.spiedigitallibrary.org/a>

rticle.aspx?articleid=1223025 (дата доступа 01.06.2014).

5. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин [Текст] / И. П. Копылов: – М.: Высш. шк. – 1994. – С. 248.
6. Бойко А. А. Методика математического моделирования электропривода ТПН-АД в трехфазных осях [Текст] / А. А. Бойко, Л. В. Мельникова, О. Б. Бабийчук // Электромашиностроения та електрообладнання. – К.: Техніка. – 2003. – Вып.61. – С. 24 – 28.
7. Бойко А. А. Моделирование системы ТПН-АД [Текст] / А. А. Бойко, А. А. Бересан // Математическое моделирование. – Днепропетровск: [ДДТУ]. – 2010. – С. 39 – 42.
8. Svinin M. M., Contribution to Inverse Kinematics of Flexible Robot Arms [Текст] / M. M. Svinin, Uchiyama M. // JSME International Journal, Series C. – 1994. – Vol. 37, No. 4. – P. 755 – 764.
9. Голубев Ю.Ф. Управляемое движение упругого манипулятора [Text] / Ю.Ф. Голубев, А.Е. Дитковский // Известия РАН. Теория и системы управления. – М.: – 2001. – Вып. 6 – С. 166 – 176.
10. Лукаш П.А. Основы нелинейной механики. [Текст] / П.А. Лукаш // М.: Стройиздат. – 1978. – С. 204.

Получено 05.02.2016

References

1. Baumgartner E. T. An autonomous vision-based mobile robot (1994) / E. T. Baumgartner, S. B. Skaar // *IEEE Transactions on Automatic Control*. – Vol. 39. (in English).

2. Gaulter P.E. A Spatially translating and Rotating Beam Finite Element for Modeling Flexible Manipulators / P.E. Gaulter, W.L. Cleghorn // (1992) *Mech. Mach. Theory*. – Vol. 27, No. 4. – pp. 415 – 433. (in English).

3. King J.O. Composite Pseudolink End-Point Control of Flexible Manipulators / J.O. King, V.G. Gourishankar, R.E. Rink // (1990) *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*. – Vol. 20, No. 5. – pp. 969. – 977 (in English)

4. Zuoliang L. Omnidirectional dynamic vision positioning for mobile robot / L. Zuoliang, Cao Sung J. Oh, Ernest L. Hall // (1986) *Optical engineering*. – Vol. 25, No. 12 [Электронный ресурс]: Режим доступа: <http://opticalengineering.spiedigitallibrary.org/article.aspx?articleid=1223025> (дата доступа 01.06.2014). (in English).

5. Kopyilov I.P. Matematicheskoe modelirovanie elektricheskikh mashin [Mathematical design of electric machines] (1994)/ I. P. Kopylov. – M.: Higher. Sch., – P. 248 (in Russian).

6. Boyko A. A. Metodika matematicheskogo modelirovaniya elektroprivoda TPN-AD v trehfaznykh osyakh [The technique of mathematical modelling of the electric drive WBC-AD in three-phase axes]. (2003) / A. A. Boyko, L. V. Melnikova, O. B. Babiychuk // *Electrical engineering and electrical equipment*. – K. : Machinery – No. 61. – pp. 24 – 28. (in Russian).

7. Boyko A. A. Modelirovanie sistemy TPN-AD [A modeling of the system TPH-AD] / A. A. Boiko, A. A. Beresan // (2010) *Mathematical modeling*. – Dnipropetrovsk: [DTU], – pp. 39 – 42. (in Russian).

8. Svinin M. M., Contribution to Inverse Kinematics of Flexible Robot Arms / M. M. Svinin, Uchiyama M. // (1994) *JSME International Journal, Series C*. – Vol. 37, No. 4. – pp. 755 – 764 (in English).

9. Golubev Yu.F. Upravlyaemoe dvizhenie uprugogo manipulyatora [Controlled motion of an elastic manipulator] / Yu.F. Golubev, A.E. Ditkovskiy (2001) // *Izvestiya an. Theory and control systems*. – M: – No. 6 – pp. 166 – 176. (in Russian).

10. Lukash P.A. Osnovy nelineynoy mehaniki [Fundamentals of nonlinear mechanics] / P.A. Lukash // (1978) M.: Stroyizdat – P.204. (in Russian).



Бойко
Андрей Александрович,
д.т.н., доцент, директор
института электромеханики
и энергоменеджмента
ОНПУ



Бойко
Надежда Анатольевна, ас.
кафедры электромеханических
систем с компьютерным
управлением
ОНПУ



Бибик
Артур Витальевич,
старший преподаватель
кафедры электромеханических
систем с компьютерным
управлением
ОНПУ



Акчебаш
Наталья Викторовна, ас.
кафедры электромеханических
систем с компьютерным
управлением
ОНПУ