

Моделирование промышленного манипулятора на базе ПЛК Siemens и шаговых двигателей Festo

П.Е. Ганин¹, А.И. Кобрин¹

¹Национальный исследовательский университет МЭИ, Красноказарменная 14, Москва, Россия, 111250

Аннотация. В работе рассматривается построение имитационной модели промышленного манипулятора с тремя последовательно соединенными звеньями. Построение имитационной модели выполнялось в среде Matlab Simulink. Рассматривается моделирование механической части, системы управления и виртуальной среды. Построена архитектура системы управления на основе разработанной модели и программируемом логическом контроллере Siemens. В качестве исполнительных устройств применяются шаговые электрические приводы фирмы Festo. Продемонстрирована возможность применения имитационного моделирования для подбора и расчета параметров исполнительных устройств и настройки элементов системы управления. Проведен сравнительный анализ модели с экспериментальной установкой, построенной на кафедре Управления и Информатики Московского Энергетического Института.

1. Введение

В различных областях автоматизации широкое распространение получили многозвенные пространственные механизмы – манипуляционные роботы. Наиболее ярким примером является промышленная робототехника, направленная на автоматизацию производственных процессов. В процессе проектирования, производства и внедрения манипуляторов приходится сталкиваться с решением различных задач: выбор методов управления роботом, построение траектории движения рабочего органа и контроль состояния исполнительных механизмов. Для решения этих задач необходимо строить численно-аналитические модели, позволяющие оценить кинематику и динамику проектируемых роботов.

В зависимости от условий эксплуатации, назначения манипулятора и решаемых им задач применяют различные типы исполнительных механизмов. Можно выделить три группы устройств: электрические, гидравлические и пневматические. Электрические приводы находят самое широкое применение в робототехнике благодаря своим положительным качествам: простота эксплуатации, высокая энергоэффективность при требуемых динамических показателях и удобство построения СУ. Большинство современных манипуляторов строится на базе электрических исполнительных механизмов. Применяются различные типы электродвигателей, каждый из которых имеет свои достоинства и недостатки.

Для осуществления вращения звеньев манипулятора возможно применение следующих двигателей:

- Асинхронный двигатель с редуктором [1, 2]: обладает высокой надежностью и длительным сроком службы, однако обеспечивает невысокую точность позиционирования и требует применения дорогостоящих частотных преобразователей.
- Мотор-редуктор постоянного тока [3, 4, 5]: наименьшая стоимость и простота эксплуатации при невысоких динамических показателях точности и наименьшем сроком службы.
- Шаговый двигатель [6, 7, 8]: имеет большой ресурс работы и может применяться при высокоточном позиционировании, однако требует специальной системы управления.

Среди данных типов двигателей наибольшее распространение получили асинхронные приводы, так как они обладают наилучшими показателями при работе с большими нагрузками и не требуют сложных систем управления. Однако в настоящее время при возрастании требований к точности позиционирования и при работе на меньших нагрузках применяют шаговые приводы.

В работе в качестве исполнительных устройств были выбраны шаговые электрические двигатели Festo EMMS-ST. Данный тип двигателей снабжается встроенными датчиками поворота (инкрементальный энкодер) для реализации замкнутого контура. Двигатели применяются совместно с цилиндрической зубчатой планетарной передачей для обеспечения требуемых скоростей вращения звеньев манипулятора. Также данный тип электропривода является более безопасным (так как питание обеспечивается источником на 48 [В]) и экономичным в сравнении с асинхронными приводами. Прямое управление двигателями осуществляет сервоконтроллер Festo CMMS-ST обрабатывающий информацию, получаемую напрямую с двигателя и его датчика положения. Таким образом отсутствует необходимость обеспечивать согласованное управление током в обмотках привода. В сравнении с другими типами электрических приводов, они обладают некоторыми преимуществами:

- высокая точность, имеющая прямую зависимость от величины шага;
- отсутствие накопления ошибки от шага к шагу;
- пониженная инерционность при перемещениях;
- удобство применения в системах с цифровым управлением.

2. Модель манипулятора в среде Matlab Simulink

Рассматривается конструкция манипуляционного робота с тремя последовательно соединенными звеньями, осуществляющими вращение в одной плоскости, т.н. манипулятор типа хобот (или рука). Выполнено построение математической модели, позволяющее оценить работу системы управления и осуществить расчеты для подбора оборудования. Для задачи имитационного моделирования манипулятора и его систем используется программный продукт Matlab. С использованием программного расширения Simulink можно построить модель, которая будет отражать все кинематические и динамические свойства проектируемого манипулятора. Для моделирования механических систем используется пакет расширения Simulink SimMechanics. Данное программное расширение предоставляет возможности для построения визуализации механической системы в процессе моделирования. Помимо использования простых графических примитивов Matlab (упрощенного отображения в виде аппроксимирующих многоугольников или эквивалентных эллипсоидов), есть возможности по построению модели в среде виртуальной реальности.

Вся имитационная модель манипуляционного робота разделена на три основных блока:

- механическая модель;
- модель системы управления;
- модель виртуальной реальности.

2.1. Модель механической части

Блок механической модели отражает конструкцию манипулятора, все физические и механические параметры звеньев и сочленений. Для задания параметров среды моделирования в блоке «Окружение виртуальной машины (*Machine Environment*)» осуществляется задание следующих параметров:

- вектор гравитации: $\vec{g} = [0 \ 0 \ (-9,81)]$ [$\text{м}/\text{с}^2$];
- точность вычислений: 10^{-6} [м], 10^{-3} [$^\circ$];
- метод анализа модели: прямой динамический анализ.

Построение механической модели выполняется последовательно с указанием элементов конструкции и типов связей между ними от неподвижного основания к захвату в соответствии с механической структурой манипулятора. Построение начинается с неподвижного блока «Земля» (*Ground*) указывающего начальную точку для глобальной (мировой) системы координат модели. Далее через блок сочленения (вращение (*Revolute*)) к «Земле» подключается блок «Основание», представляющий твердое тело с заданными свойствами, такими как: масса, момент инерции координаты центра тяжести (*CG*), форма тела, цветовая информация и др. Порты блока *CS1* и *CS4* используются для подключения пользовательских систем координат с заданным сдвигом. Параметры блоков определяются из среды CAD, в которой выполнялось построение 3D-модели. В качестве материала звеньев в расчетах применяется алюминиевый профиль (АД31 ГОСТ 4784-97). Далее к «Основанию» подключаются последующие звенья, вплоть до «Захвата» с соответствующими степенями подвижности (вращение и перемещение (*Prismatic*)). К центру масс каждого блока элемента конструкции подключены датчики (*Body Sensor*) измеряющие положение, в виде матриц вращения (*R*) и перемещения (*P*) относительно абсолютной системы координат. К каждому подвижному сочленению конструкции подключаются блоки датчиков (*Joint Sensors*) и активаторов (*Joint Actuators*). Сенсоры передают в модель управления данные о скорости и перемещении, а также используются для построения графиков приводных моментов сил в соответствующих координатных плоскостях. Активаторы выполняют относительное перемещение звеньев на основе данных получаемых из модели управления.

2.2. Модель системы управления

Данный блок осуществляет управление механической и виртуальной моделью. Позволяет осуществлять моделирование переходных процессов приводной системы манипулятора. Также в задачи данного блока входят чтение и преобразование данных от физической модели. Внешний вид блока представлен в приложении А (рисунок А1).

Управление виртуальной моделью может осуществляться в двух режимах: ручном и автоматическом. При ручном управлении осуществляется непосредственное задание координат в «Блоке ручного управления» содержащего тестовые наборы данных. В случае автоматического управления данные передаются посредством OPC-сервера непосредственно с электрических приводов, либо от виртуальной модели. Каждому приводу системы соответствует пользовательский блок «Сервоконтроллера и шагового привода» обменивающийся данными с механической моделью и получающий координаты от регулятора на базе модели ПЛК. Схема блока представлена в приложении А на рисунке А2. В соответствии с проведенными расчетами, и исходя из условий моделирования, для каждого блока сервопривода указываются следующие параметры:

- зона нечувствительности;
- коэффициент усиления ПФ сервоконтроллера K_{servo} ;
- коэффициент усиления ПФ обратной связи сервоконтроллера Kos_{servo} ;
- задержка преобразования сигнала управления сервоконтроллера;
- постоянная времени ПФ сервоконтроллера T_{servo} ;
- постоянная времени ПФ шагового привода T_{sh} ;
- эpsilon ПФ шагового привода Eps .

Регулирование координат выполняет программируемый контроллер, схема модели которого представлена в приложении А на рисунке А3. Модель ПЛК включает входной и выходной аналоговый каскад преобразования сигналов, и регулятор координат на базе дискретного ПИД-регулятора. Исходя из условий моделирования, и основываясь на технических характеристиках наиболее распространенных промышленных контроллеров Siemens для данного блока модели указываются следующие параметры:

- зона нечувствительности входного и выходного модуля;
- задержка преобразования сигнала входного и выходного модуля;
- частота дискретизации АЦП;

- коэффициент усиления пропорциональной, интегральной и дифференциальной составляющих: K_p , K_i и K_d соответственно;
- постоянные времени интегрирования T_i и дифференцирования T_d .

2.3. Модель виртуальной реальности

С использованием данного блока осуществляется визуализация процесса моделирования и обеспечивается наглядное представление движения виртуальной 3D-модели манипулятора в пространстве. Блок состоит из трёх типовых элементов: метки ссылок передающие сигналы, операторы матрицы поворота (*RotationMatrix2VR*) и блока виртуальной реальности (*VR Sink*). Построение модели происходит в блоке *VR Sink* на основе данных получаемых от ранее рассмотренных основных блоков модели (механической части в *SimMechanics* и системы управления). В параметрах объекта *VR Sink* указывается используемый файл виртуального мира и задаются входы соответствующих элементов модели виртуальной среды, используемые для передачи данных построения.

Создание виртуального мира может осуществляться с использованием специализированных программных продуктов. Для пакета расширения *Matlab Simulink Virtual Reality* существует встроенный редактор виртуального мира *VRealm*. Построение модели в нем осуществляется, используя язык *VRML (Virtual Reality Modeling Language)*.

3. Архитектура системы управления манипулятором на основе модели

Для подтверждения достоверности имитационной модели, и сопоставления результатов математического и физического моделирования, была разработана экспериментальная установка промышленного манипулятора. Для этих целей была разработана архитектура системы управления. В работе предлагается иерархическая структура системы управления, которая обеспечивает взаимосвязанное функционирование всех элементов. Архитектура СУ является децентрализованной и обеспечивает возможность интегрироваться в производственную систему на различных уровнях и с использованием современных промышленных стандартов связи. На рисунке 1 представлена структура иерархии системы управления кинематически избыточным многозвенным манипулятором на основе шаговых электрических двигателей. Структура разрабатывалась с учетом возможности осуществления унифицированного построения, т.е. адаптируемой и масштабируемой для различных конструкций манипуляционных роботов.

На рисунке 1 обозначены: 1 – шаговые электрические двигатели с оптическими инкрементальными энкодерами; 2 – захват с датчиками усилия; 3 – сервоконтроллеры шаговых приводов; 4 – контроллер захвата; 5 – процессорный модуль ПЛК; 6 – аналоговые модули расширения; 7 – Ethernet модуль; 8 – модуль расширения RS232; 9 – ПК (или одноплатный компьютер); 10 – встроенный (внешний) OPC-сервер.

Архитектура СУ (рис. 4.3) включает 4 уровня:

- 1-ый уровень – шаговые электрические двигатели, снабженные встроенными датчиками положения (оптическими инкрементальными энкодерами) и рабочий орган манипулятора (захват) с набором датчиков контроля усилия.
- 2-ой уровень – сервоконтроллеры двигателей: непосредственно управляют током в обмотках двигателей, отслеживают их состояние. Присутствует возможность организации прямого управления исполнительными механизмами через промышленные интерфейсы связи (CAN, Serial RS232/RS485) минуя верхние уровни, с учетом требуемых характеристик работы.
- 3-ий уровень – программируемый логический контроллер: состоит из основного процессорного блока и дополнительных модулей расширения. Контроллер комплектуется периферийными аналоговыми модулями для управления приводами манипулятора и набором коммуникационных модулей связи. ПЛК выступает в роли устройства управления исполнительными механизмами, содержит требуемые законы управления.
- 4-ый уровень – вычислительный центр (одноплатный ПК) с OPC-сервером: выполняет функции расчета координат, в том числе планирование траектории, так же OPC-сервер служит связующим звеном для интеграции в общую промышленную систему.

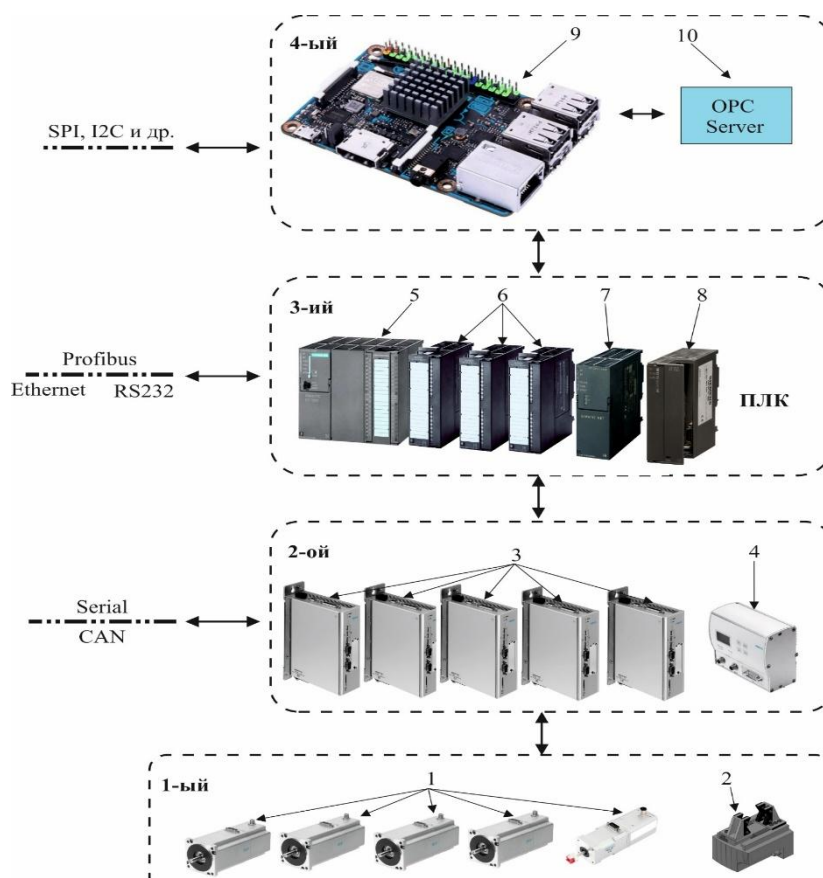


Рисунок 1. Структура иерархии системы управления.

На рисунке 2 представлена функциональная схема работы системы управления кинематически избыточным многозвенным манипулятором с указанием передаваемых данных по линиям связи. Используются следующие обозначения: $P_{огр}$ – ограничения работы для манипулятора; $P_{мех}$ – механические параметры манипулятора; $P_{срк}$ – параметры работы сервоконтроллеров; $P_{кин}$ – параметры кинематических алгоритмов; $P_{рег}$ – параметры работы регулятора координат ПЛК; $(P_{дв1} \dots P_{двn})$ – текущие параметры работы каждого двигателя; $(x, y, z)_{ж}$ и $(x, y, z)_{т}$ – желаемые и текущие координаты рабочего органа манипулятора; $(\omega_0 \dots \omega_n)_р$ и $(\omega_0 \dots \omega_n)_{т}$ – рассчитанные (задание управления) и текущие скорости вращения приводов системы; $(Q_0 \dots Q_n)_р$ – рассчитанные углы поворота звеньев; n – количество звеньев.

При создании СУ задаются следующие параметры:

- ограничения работы манипулятора для ПЛК $P_{огр}$ включающие данные о минимально и максимально допустимых углах поворота звеньев, угловых скоростях и ускорениях приводной системы каждого из звеньев

$$\begin{aligned} & \min(Q_0 \dots Q_n), \max(Q_0 \dots Q_n), \\ & \min(\omega_0 \dots \omega_n), \max(\omega_0 \dots \omega_n), \\ & \min(\dot{\omega}_0 \dots \dot{\omega}_n), \max(\dot{\omega}_0 \dots \dot{\omega}_n); \end{aligned}$$

- используемые для описания механической структуры имитационной модели манипулятора $P_{мех}$ включающие: количество звеньев и их длины $(L_0 \dots L_n)$, типы сопряжений определяющие степени подвижности звеньев, инерционные параметры и др.

Имитационная модель используется для формирования параметров работы элементов системы управления кинематически избыточным манипулятором. На выходе имитационной модели формируются следующие параметры:

- $P_{кин}$ используются для кинематических алгоритмов и содержат: информацию об установленной аналитической зависимости для конкретной механической структуры манипулятора.

- $P_{рег}$ для регулятора координат реализованного с использованием ПЛК. В зависимости от выбранного типа регулятора могут передаваться различные параметры, ранее рассмотренные в п.2.2.
- $P_{срк}$ для сервоконтроллеров, обеспечивающих контроль отработки заданных координат.

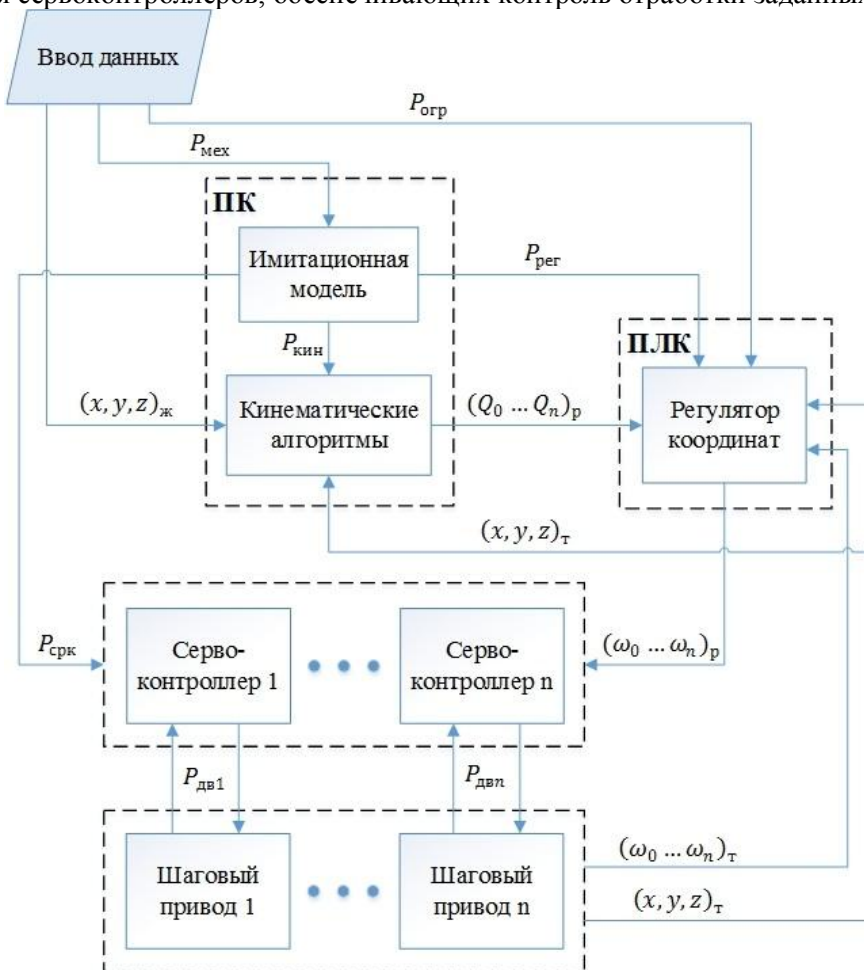


Рисунок 2. Функциональная схема системы управления приводами.

Для заданных желаемых координат положения рабочего органа многозвенного манипулятора $(x, y, z)_ж$ с использованием разработанных алгоритмов ОЗК осуществляется расчёт требуемых углов поворота звеньев $(Q_0 \dots Q_n)_р$. Далее эти данные поступают на ПЛК где реализован дискретный регулятор координат управляющий скоростью вращения приводов $(\omega_0 \dots \omega_n)_р$. На ПЛК реализуется требуемое количество регуляторов для каждого из приводов звеньев. Поступающие сигналы управления от ПЛК распределяются на соответствующие сервоконтроллеры которые обеспечивают непосредственное управление приводами. Между сервоконтроллером и приводом осуществляется непрерывный обмен данными ($P_{дв1} \dots P_{двn}$) о текущем и требуемом токе и напряжении в обмотках, включающий также информацию с оптического инкрементального энкодера о положении приводов $(Q_0 \dots Q_n)_т$ и их скоростях $(\omega_0 \dots \omega_n)_т$. Информация о текущем положении и скоростях приводов поступает на ПЛК реализуя тем самым контур обратной связи для регуляторов. А также текущее положение пересчитывается с использованием алгоритмов прямой кинематики для контроля текущего положения рабочего органа манипулятора:

$$(x, y, z)_т = f_{ПРК}[(Q_0 \dots Q_n)_р].$$

4. Результаты экспериментальных исследований

На основе выбранных исполнительных механизмов и в соответствии с их техническими характеристиками осуществляется корректировка модели манипуляционного робота,

представленной. Технические характеристики шаговых двигателей и сервоконтроллеров представлены в [9, 10]. С учетом характеристик приводов, подобранных исполнительных элементов и редукторов выполняется пересчет передаточных функций для каждого привода. После проводился эксперимент по перемещению рабочего органа манипуляционного робота из одной точки в другую при отсутствии полезной нагрузки, т.е. только под действием собственного нагружения конструкции.

В качестве примера на рисунке 3 представлены результаты моделирования и сравнение их с данными полученными на экспериментальной установке манипулятора. На основе полученных данных составлена таблица 1. Как можно заметить, присутствует некоторое расхождение данных моделирования и эксперимента. Это обусловлено наличием не учитываемых в модели динамических сил взаимного влияния звеньев и сил трения в сочленениях. Однако стоит отметить что характер изменения угловой скорости приводов при проведении эксперимента соответствует результатам моделирования.

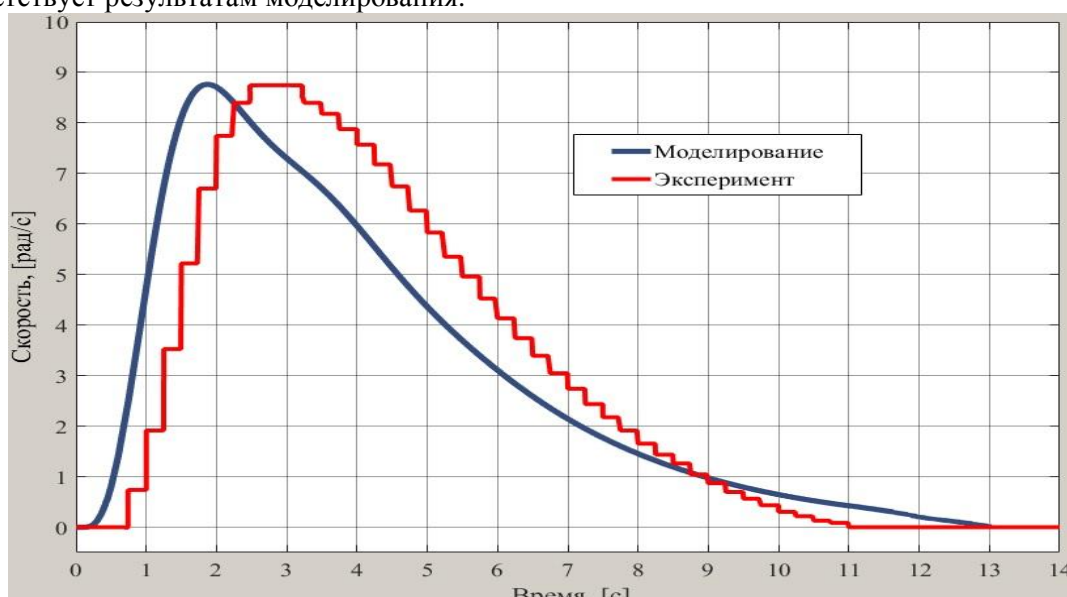


Рисунок 3. Угловая скорость привода второго звена.

Таблица 1. Сравнение данных эксперимента и моделирования.

	Результаты моделирования	Экспериментальные данные	Отличие данных эксперимента от моделирования
Продолжительность перемещения, [с]			
Основание:	17,46	17,29	-0,17 (0,97%)
1-е звено:	17,25	15,68	-1,57 (9,10%)
2-е звено:	12,78	11,02	-1,76 (13,77%)
3-е звено:	10,08	8,57	-1,51 (14,98%)
Наибольшая скорость в процессе перемещения, [рад/с]			
Основание:	12,82	12,41	-0,41 (3,2%)
1-е звено:	8,897	8,792	-0,11 (1,18%)
2-е звено:	8,763	8,692	-0,07 (0,81%)
3-е звено:	8,803	8,744	-0,06 (0,67%)

Приложение А

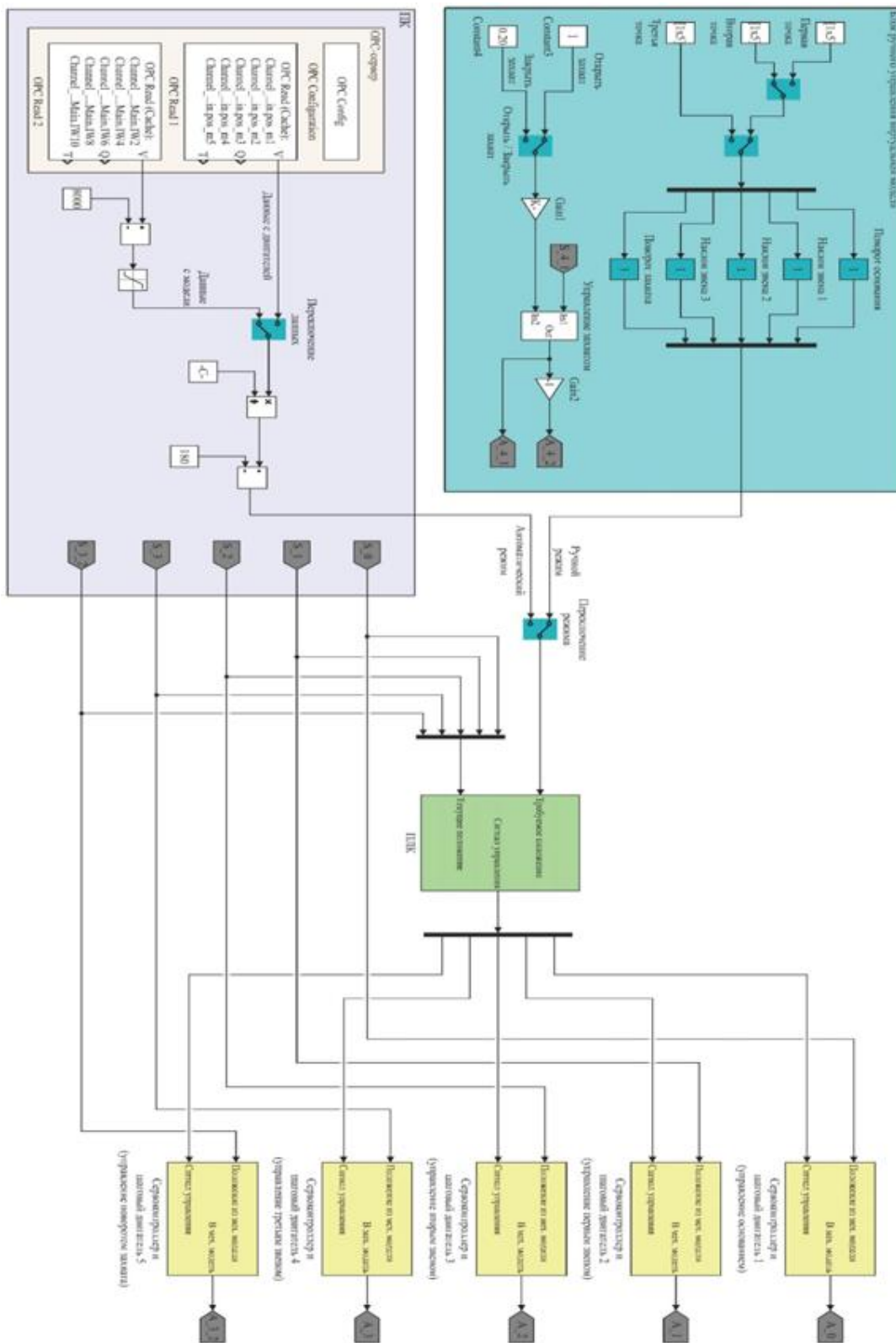


Рисунок А1. Функциональная схема СУ приводами.

5. Литература

- [1] Marzi, H. Using AC motors in robotics // International Journal of Advanced Robotic Systems. – 2007. – Vol. 3(4). – P. 365-370.
- [2] Макаров, А.М. Системы управления автоматизированным электроприводом переменного тока: учеб. пособие / А.М. Макаров, А.С. Сергеев, Е.Г. Крылов, Ю.П. Сердобинцев – Волгоград: ВолГГУ, 2016. – 192 с.
- [3] Batra, D. Axis controlled movement of robot using brushless DC motor drive / D. Batra, S. Sharma, R. Ratan // Indian Journal of Science and Technology. – 2009. – Vol. 4(2). – P. 36-39. DOI:10.17485/ijst/2009/v2i4/29428.
- [4] Saini, D. Control of 2-DOF robotic manipulator using brushless DC motor to track the motion of object in a plane / D. Saini, P. Gaur // IEEE 5th India International Conference on Power Electronics (IICPE). – 2012. – Vol. 3. – P. 1-4. DOI:10.1109/IICPE.2012.6450482.
- [5] Won, S. D-C motor driven robotic manipulator control / S. Won, D. Lim, D. Chyung // 24th IEEE Conference on Decision and Control. – 1985. – P. 330-333. DOI: 10.1109/CDC.1985.268859.
- [6] Antipin, A. Application of the drive systems through the stepper motors in the process equipment, manipulators and pushers without feedback / A. Antipin, V. Frizen, P. Sannikov, M.S. Volhin // 20th International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies (SIELA), 2018. – P. 1-4. DOI:10.1109/SIELA.2018.8447169.
- [7] Aranjó, B. Stepper motor drives for robotic applications / B. Aranjó, P.K. Soori, P. Talukder // IEEE International Power Engineering and Optimization Conference. – 2012. – P. 361-366. DOI: 10.1109/PEOCO.2012.6230890.
- [8] Zein, E. Study of stepper motor performance in a five-axis robot / E. Zein, A. Din, M. El-Farmawy // Third International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC). – 2000. – Vol. 2. – P. 823-831. DOI: 10.1109/IPEMC.2000.884611.
- [9] Festo AG & Co. Технические характеристики сервоконтроллера Festo CMMS-ST [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.festo.com.cn/net/SupportPortal> (17.12.2019).
- [10] Festo AG & Co. Технические характеристики шагового привода Festo EMMS-ST [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.festo.com/cat/> (17.12.2019).

Modeling an industrial manipulator based on Siemens PLC and Festo stepper motors

P.E. Ganin¹, A.I. Kobrin¹

¹National Research University MPEI, Krasnokazarmennaya street 14, Moscow, Russia, 111250

Abstract. In this paper we consider the construction of a simulation model of an industrial manipulator with three series-connected links. The simulation process of the model was carried out in the environment of Matlab Simulink. The modeling of the mechanical part, control system and virtual environment is considered. The architecture of the control system is built on the basis of the developed model and the Siemens programmable logic controller. Festo stepper electric drives are used as actuators for manipulator links. The possibility of modeling application for selection and calculation of device parameters and adjustment of control system elements is demonstrated. A comparative analysis of the model with an experimental stand built at the Department of Control and Informatics of the Moscow Power Engineering Institute is carried out.