

Черный С. П., Савельев Д. О., Сбитнев Н. Р., Саяпина П. О.
S. P. Cherniy, D. O. Savelyev, N. R. Sbitnev, P. O. Sayapina

ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ СЛОЖНЫМИ ОБЪЕКТАМИ, ТРЕБУЮЩИМИ УЧЁТА ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

FEATURES OF MODELING CONTROL SYSTEMS FOR COMPLEX OBJECTS REQUIRING CONSIDERATION OF GEOMETRIC PARAMETERS

Черный Сергей Петрович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: kepapu@knastu.ru.

Sergej P. Cherniy – PhD in in Engineering, Associate Professor, Head of the Electric Drive and Automation of Industrial Installations Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: kepapu@knastu.ru.

Савельев Дмитрий Олегович – старший преподаватель кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок», руководитель Центра робототехники Ресурсного центра Технопарка Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: kepapu@knastu.ru.

Dmitriy O. Savelyev – Senior Lecturer, Electric Drive and Automation of Industrial Installations Department, Head of the Center for Robotics of the Resource Center of the Technopark, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: kepapu@knastu.ru.

Сбитнев Никита Романович – студент Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: epapu@knastu.ru.

Nikita R. Sbitnev – Student, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: epapu@knastu.ru.

Саяпина Полина Олеговна – аспирант кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: kepapu@knastu.ru.

Polina O. Sayapina – Graduate Student, Electric Drive and Automation of Industrial Installations Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: kepapu@knastu.ru.

Аннотация. В представленной работе рассматривается один из возможных подходов к моделированию системы управления объектом с интеграцией его физических свойств и геометрических параметров. В качестве рассматриваемой системы, требующей учёта её кинематики и физических свойств, используется типовая модель с дельта-кинематикой – платформа Стюарта, выполненная на основе пакета программ 3D-моделирования. При создании параметрической модели используются библиотеки, которые позволяют импортировать векторные модели трёхмерного объекта для их последующего использования в общей имитационной модели. Показаны особенности такого подхода для воссоздания реальных условий функционирования объекта в имитационной модели, а также влияние на точность его функционирования при использовании трёхмерной модели кинематики.

Summary. In the present paper, one of the possible approaches to modeling an object control system with the integration of its physical properties and geometric parameters is considered. As the system under consideration, requiring consideration of its kinematics and physical properties, a typical model with delta kinematics is used - the Stewart platform, made on the basis of a 3D modeling software package. When creating a parametric model, libraries are used that allow you to import vector models of a three-dimensional object for their subsequent use in a general simulation model. The features of this approach for recreating the real conditions of an object's functioning in a simulation model are shown, as well as the effect on the accuracy of its functioning when using a three-dimensional kinematics model.

Ключевые слова: платформа Стюарта, имитационное моделирование, кинематика, система управления.

Key words: Stewart platform, simulation modeling, kinematics, control system.

УДК 681.5.017:681.521

Введение. Использование имитационных моделей даёт возможность в большинстве случаев заменить реальные объекты в эксперименте виртуальными, тем самым избежав финансовых и временных затрат на создание прототипов. С увеличением вычислительных мощностей появляются новые методы, программное обеспечение, которые позволяют существенно повысить интерпретируемость и качество имитационных моделей, что в конечном итоге даёт возможность снизить количество допущений, повысить качество математического описания технологического объекта и увеличить размерность его модели.

Зачастую при реализации имитационной модели системы управления технологическим объектом определённую трудность со стороны специализированного программного обеспечения вызывает формирование параметрической модели его геометрии и кинематики. Для снижения ошибки и повышения адекватности имитации физической модели такого объекта необходимо отдельно посредством САД-системы выполнить проектирование её геометрической модели, поскольку интеграция имитационной модели и 3D-модели, отражающей геометрические параметры с кинематическими связями, позволит существенно приблизить формализуемый технологический объект к его реальному физическому состоянию. Такая форма интегрированной имитационной модели представляется актуальной для таких сложных технологических процессов, как робототехнические комплексы. По своей структуре такие объекты представляют собой сложные специфические объекты, которые имеют многокоординатную систему управления. Вместе с тем САД-системы хорошо отражают кинематику, и для снижения количества допущений целесообразно включать элементы трёхмерных моделей в общую структуру имитационной модели объекта регулирования. В настоящее время проектирование таких систем становится всё более трудозатратным с точки зрения автоматизации ввиду усложнения конструкции мехатронных узлов и учёта сложности взаимосвязей внутри реализуемых технологических циклов.

Модели и методы. Для формализации математической модели системы управления робототехнического комплекса [1] с реализацией физических свойств объекта рассмотрим типовую модель платформы Стюарта с шестью степенями свободы [2], представленную на рис. 1, которой присущ целый набор специфических свойств объекта. Такие платформы применяются во многих областях – от 3D-принтеров, где необходимо быстрое действие, до калибровки бортовых систем и стыковки космических модулей, где необходима точность позиционирования. Платформа Стюарта представляет собой один из типовых конструктивных объектов с хорошо исследованными физическими и механическими свойствами и является технологическим объектом с дельта-кинематикой. Реализация модели такого объекта при помощи САД-системы возможна с высокой степенью точности. Приведённая ниже обобщённая модель отражает основные конструктивные элементы её кинематики [3].

Для интеграции физического объекта с его параметрами необходимо импортировать векторную модель трёхмерного объекта, созданного в любой САД-системе, в структуру имитационной модели. Такой подход позволит интегрировать в исследуемую имитационную модель системы набор тел со своей специфической физикой процессов.

Для реализации рассматриваемого объекта необходимо выделить несколько базовых элементов, из которых будет состоять модель. В их число входят: две плоскости (неподвижная 1 и подвижная 2), тяги 3 и серводвигатели 4 (см. рис. 1). Поскольку основным управляющим элементом платформы Стюарта являются серводвигатели, которые управляют положением подвижной платформы [4], их реализация в качестве трёхмерной модели будет иметь наибольшее влияние на точность проведения численного эксперимента на имитационной модели. В качестве примера рас-

смотрим существующие серводвигатели DYNAMIXEL AX-12A, внешний вид которых представлен на рис. 2.

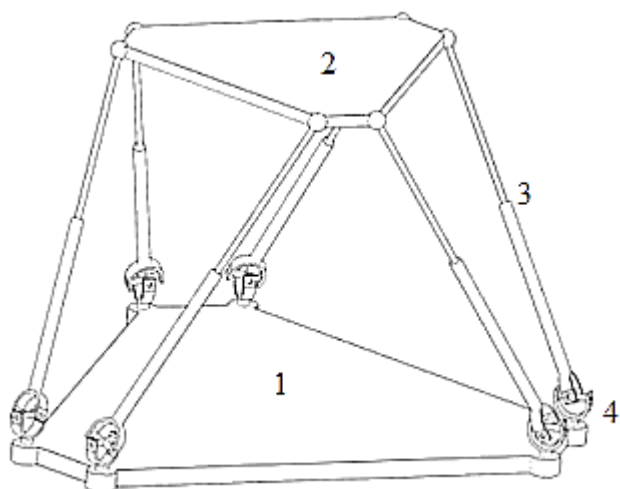


Рис. 1. Обобщённая модель платформы Стюарта



Рис. 2. Внешний вид серводвигателя DYNAMIXEL AX-12A

3D-модель рассматриваемого серводвигателя с учётом его геометрических параметров, представленная на рис. 3, была спроектирована в CAD-системе Компас-3D.

При построении параметрической модели платформы Стюарта необходимо учитывать различные кинематические особенности её элементов для воссоздания условий реального объекта, например шарнирные соединения между подвижной платформой и рычагами, установленными на серводвигателях.

После создания всех основных физических компонентов платформы Стюарта в CAD-системе каждый элемент необходимо импортировать в программу симуляции. При этом необходимо указать массу и плотность каждого компонента модели, а также точно позиционировать их положение в системе координат. Кроме того, элементы должны быть правильно скомпонованы, указаны все возможные соединения между ними с учётом возможных характеристик движения. Итоговая модель с учётом всех особенностей представлена на рис. 4.

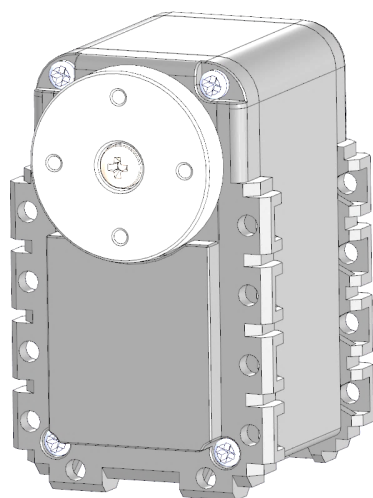


Рис. 3. Трёхмерная модель серводвигателя

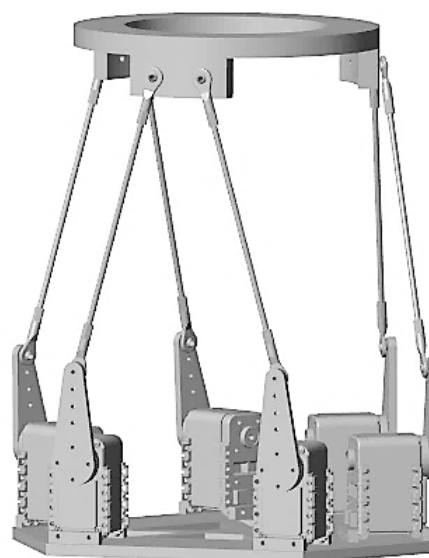


Рис. 4. Визуализация имитационной модели платформы Стюарта

Для проверки работоспособности модели, представленной на рис. 4, необходимо задать ей произвольную траекторию и убедиться, что все соединения и кинематические взаимосвязи обеспечивают реализацию движения по такой заданной траектории. На рис. 5 приведена тестовая имитационная модель, позволяющая изменять положение подвижной части платформы относительно её неподвижной составляющей путём изменения положения валов серводвигателей.

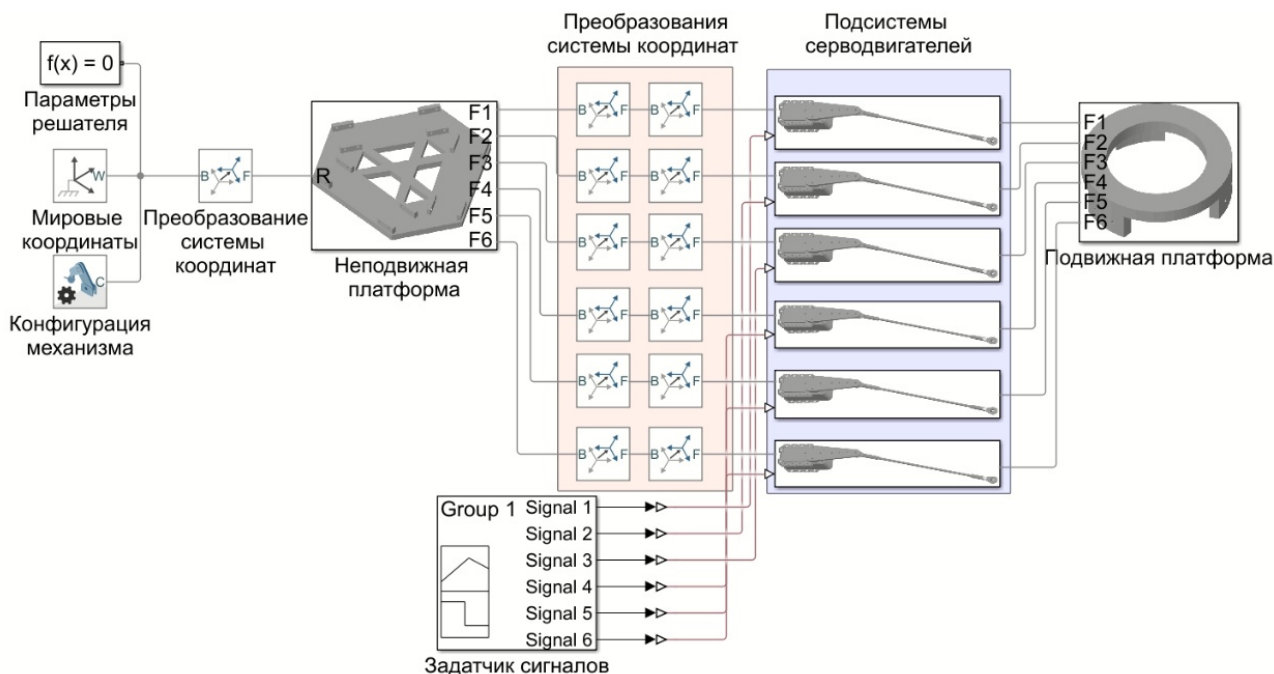


Рис. 5. Имитационная модель платформы Стюарта

На имитационной модели платформы Стюарта, представленной на рис. 5, приведены сгруппированные подсистемы, определяющие кинематику и физические свойства элементов, входящих в состав объекта. Подвижная и неподвижная платформы, а также модели корпусов серводвигателей, валов, плеч и опорных тяг представляют собой твёрдые тела, объединяющие в своём составе такие параметры, как геометрическая форма, масса, инерция, а также параметры системы координат. Звено «Мировые координаты» даёт возможность изменения начальных значений ортогональной системы координат, являющейся основным параметром для размещения трёхмерного объекта. В блоке «Параметры решателя» задаётся метод приближённого вычисления для решения системы дифференциальных уравнений, описывающих проектируемый объект. Звено «Конфигурация механизма» содержит набор основных физических законов, позволяющих формализовать поведение части платформы Стюарта в пространстве. Каждое звено «Преобразование системы координат» позволяет задать однородную матрицу для преобразования одной системы координат в другую для последовательно соединённых звеньев с целью задания движения объекта в целом. Для интерпретирования сигналов управления в описанной системе регулирования используется «Задатчик сигналов», позволяющий генерировать набор непрерывных сигналов, которые представляют собой углы поворота серводвигателей (выходные порты блока Signal 1-6).

На рис. 6 изображена подсистема серводвигателя, имеющая в своём составе кинематические взаимосвязи между статической и подвижной частями платформы [6]. Блок «Шарнирное соединение» имитирует движение кинематической пары с одной степенью свободы.

Представленный на рис. 6 блок «Сферическое соединение» обеспечивает три степени свободы между кинематической парой и может задавать произвольное трёхмерное вращение по отношению к опорному механизму.

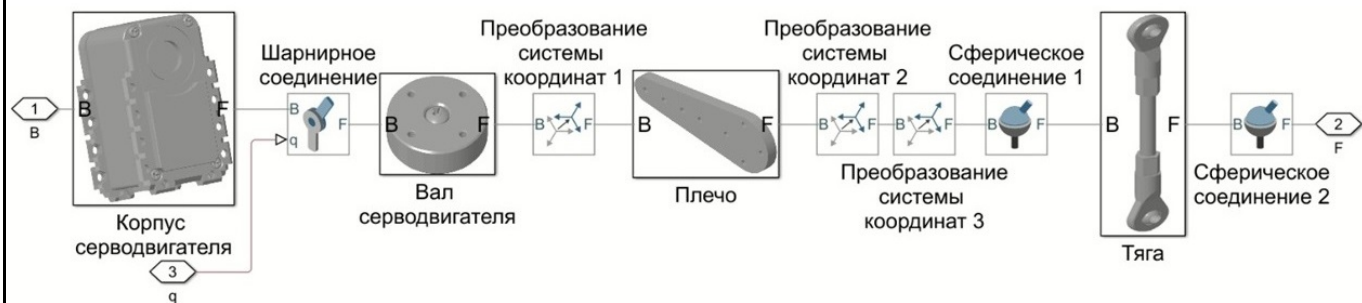


Рис. 6. Модель подсистемы серводвигателей

Для проверки работоспособности системы в качестве задающего сигнала отклонения вала каждого из серводвигателей была установлена произвольная трапецевидная форма управляющего сигнала (см. рис. 7).

На рис. 7 показаны задающие сигналы управления серводвигателями, которые должны работать попарно с заданной очередностью, на каждую точку подвижной опоры, наклоняя и возвращая её положение в исходную позицию. Сигналы управления чётными серводвигателями (2, 4, 6) имеют отрицательное значение, что определяет поворот вала в противоположном направлении, отличном от нечётных серводвигателей (1, 3, 5).

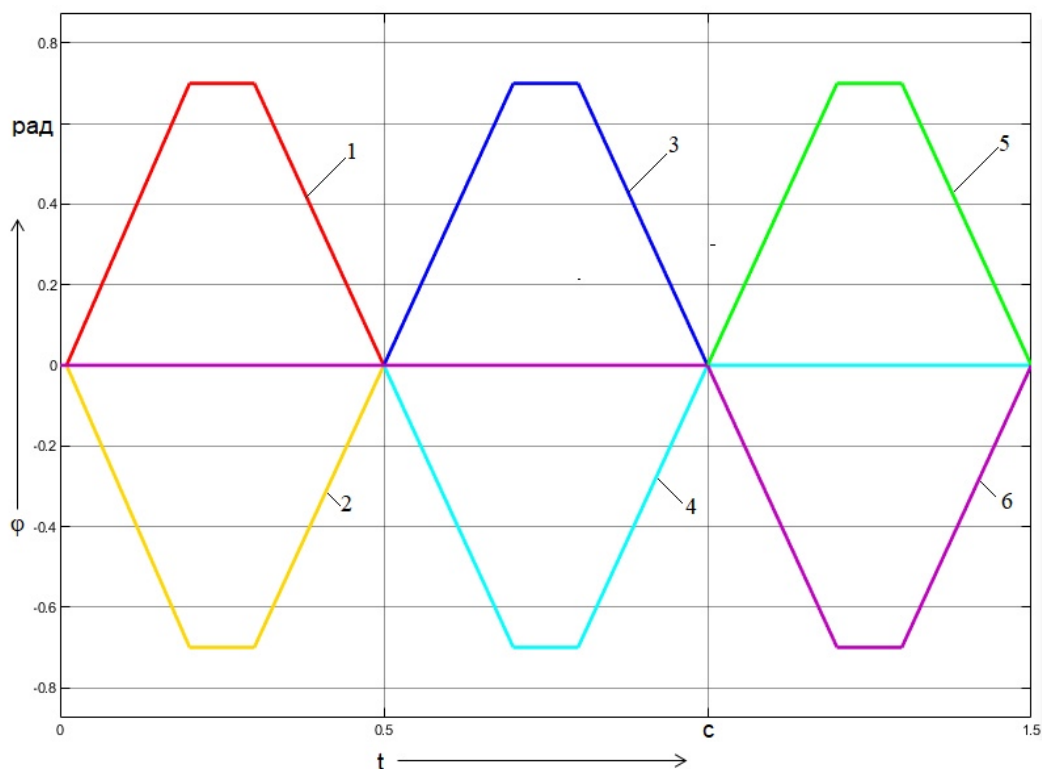


Рис. 7. Задающие сигналы управления серводвигателями

На рис. 8 представлена реакция системы на подачу задающего воздействия в виде набора сигналов трапецевидной формы.

Как видно из рис. 8, переходные процессы исполнительных устройств отличаются от задающих сигналов управления серводвигателями плавностью протекания процессов, что обусловлено физическими свойствами объекта управления и нелинейностью протекающих процессов [5].

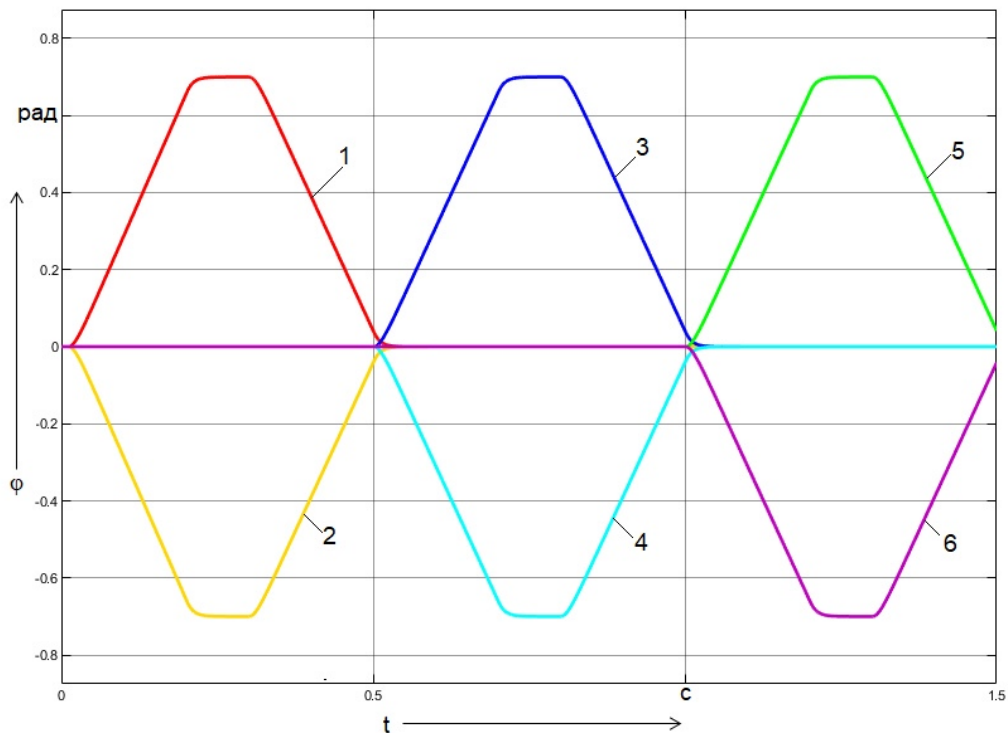


Рис. 8. Переходные процессы изменения положения серводвигателей

На рис. 9 представлены результаты моделирования платформы Стюарта с использованием CAD-системы, которая иллюстрирует отклонение рабочей зоны подвижной части платформы от исходного положения.

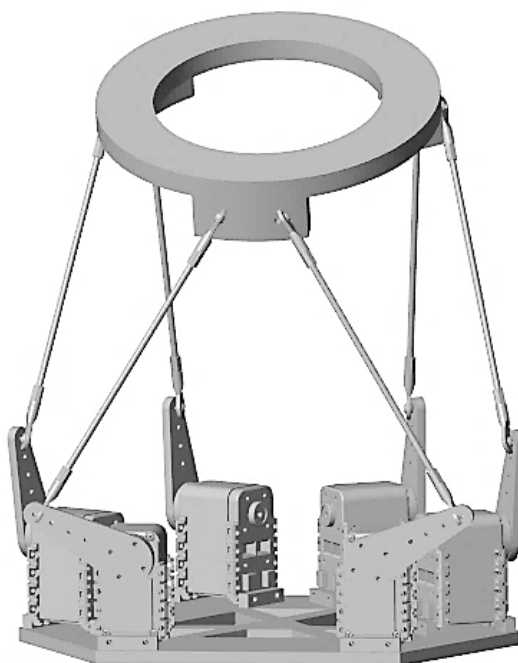


Рис. 9. Визуализация позиционирования платформы Стюарта с произвольным наклоном

Заключение. Визуализация объекта в имитационной модели является важным инструментом для анализа и синтеза системы управления, которая обеспечивает более точное описание не только процессов регулирования, но и физических свойств, что позволяет существенно миними-

зировать ряд ограничений и допущений при описании объекта регулирования. Кроме того, использование трёхмерной модели позволяет проводить эксперименты и исследования, которые могут быть невозможны на реальных объектах из-за их высокой стоимости или опасности.

В данном примере с параллельным манипулятором была рассмотрена имитационная модель объекта без расчёта и настройки системы управления, которые необходимы в дальнейшем для описания поведения объекта управления. К таким расчётам можно отнести определение параметров серводвигателей, компенсацию сопутствующих нелинейных элементов, математический расчёт обратной задачи кинематики для нахождения углов поворота сервоприводов и другие расчёты. В примере использованы упрощённые элементы. Пример демонстрирует интеграцию в имитационную модель объекта с заданными геометрическими параметрами и физическими свойствами, что даёт возможность наглядно судить о работоспособности системы и адекватности её поведения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Gorkavyu A. I., Gorkavyu M. A., Melnichenko M. A., Berkh A. V. Improving the Functioning of the Cybernetic Control System of the Mechatronic Module of the Robotic Complex // Informatics and Cybernetics in Intelligent Systems. Vol. 228, p. 702, 2021.
2. Слоущ, А. В. Об управлении движением пространственной платформы с несколькими степенями подвижности / А. В. Слоущ, Х. М. Альван // Теория механизмов и машин. – 2003. – Т. 1. – № 1 (1). – С. 63-69.
3. Цифровые технологии обучения на симуляторах / К. С. Шоланов, В. С. Ешпанов, Ж. С. Артыкбаев, М. В. Сарсембай // Педагогика, психология, общество: актуальные вопросы: сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. – Чебоксары: Издательский дом «Среда», 2020. – С. 156-160.
4. Турлапов, В. Е. Анализ положений платформ Стюарта, основанный на варианте структуры, разрешимом в радикалах / В. Е. Турлапов // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2005. – № 1 (6). – С. 54-59.
5. Савельев, Д. О. Повышение точности компенсации нелинейных элементов систем управления / Д. О. Савельев, С. П. Черный, В. А. Соловьев // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2020. – Т. 63. – № 3. – С. 213-221.
6. Лапиков, А. Л. Решение прямой задачи кинематики для платформы Гью Стюарта с использованием аналитического уравнения плоскости / А. Л. Лапиков, В. Н. Пащенко // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н. Э. Баумана. – 2014. – № 4. – С. 124-134.