РАЗРАБОТКА ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА РОБОТИЗИРОВАННОГО МАНИПУЛЯТОРА

Лавров М.Р., аспирант
Московский университет СИНЕРГИЯ, г. Москва, Россия
Курасов Д.А., к.т.н., доцент
Тюменский государственный университет, г. Тюмень, Россия

Аннотация. В статье рассматривается процесс разработки цифрового двойника робототизированного манипулятора. Представлены основные этапы моделирования: от построения 3D-модели до интеграции с физическим устройством и сенсорными системами. Описаны области применения цифровых двойников, а также их преимущества в контексте повышения надёжности и гибкости робототехнических систем. Особое внимание уделяется математическому описанию кинематики, визуализации рабочих сценариев и реализации обратной связи в реальном времени.

Ключевые слова: цифровой двойник, роботизированный манипулятор, 3D-моделирование, симуляция, ROS, мехатроника.

Современная промышленность стремится к цифровизации, и одним из ключевых инструментов в этом процессе является цифровой двойник – виртуальная копия физического объекта, позволяющая моделировать, анализировать и оптимизировать его работу в реальном времени. Роботизированные манипуляторы, широко применяемые в производстве, логистике и медицине, могут значительно повысить свою эффективность благодаря цифровым двойникам. Такой подход открывает возможности для виртуального тестирования, прогнозирования отказов, оптимизации управления и удалённого мониторинга.

Разработка цифрового двойника включает несколько этапов. Первый – создание точной 3D-модели манипулятора в CAD-системах (SolidWorks, Autodesk Inventor), учитывающей кинематику и массогабаритные характери-

стики. Далее строится математическая модель на основе уравнений динамики (Лагранжа, Ньютона-Эйлера), которая описывает движение, нагрузки и работу приводов. Для симуляции применяются MATLAB/Simulink, ROS или специализированные среды (Gazebo).

Важным этапом является интеграция с реальным оборудованием через промышленные интерфейсы (OPC UA, EtherCAT), что позволяет цифровому двойнику получать данные с датчиков (энкодеры, тензодатчики) и корректировать модель в режиме реального времени. Дополнительно используются технологии искусственного интеллекта (машинное обучение для прогноза отказов, цифровые тени для адаптации к изменяющимся условиям), что повышает точность и гибкость системы.

Внедрение цифрового двойника даёт значительные преимущества: снижение затрат на испытания, увеличение срока службы оборудования за счёт прогнозирования износа, быструю адаптацию к новым задачам и удалённое управление через облачные платформы. Примеры успешного применения включают автопром (тестирование сборочных роботов), авиацию (обслуживание самолётов) и медицину (тренировка хирургических роботов). Пример разработки цифрового двойника представлен на рисунке 1.

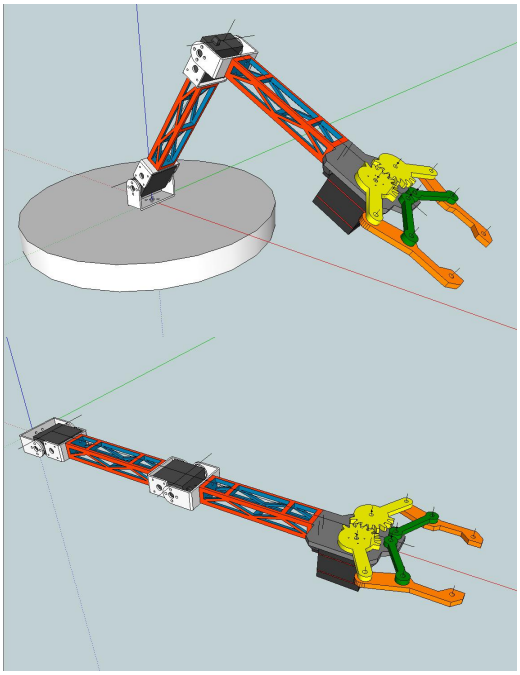

Рисунок 1 – пример проектирования цифрового двойника манипулятора

Несмотря на значительные перспективы технологии цифровых двойников, её практическая реализация сталкивается с комплексом взаимосвязанных проблем. Наиболее существенной является высокая сложность моделирования, особенно для многозвенных манипуляторов с несколькими степенями свободы. Точное воспроизведение динамики таких систем требует решения сложных систем дифференциальных уравнений, учитывающих нелинейные эффекты (трение в шарнирах, люфты механизмов, вибрационные воздействия), что существенно увеличивает вычислительную нагрузку и требует применения специализированного программного обеспечения.

Не менее острой проблемой является интеграция цифровых двойников с реальным оборудованием. Отсутствие единых промышленных стандартов приводит к необходимости разработки индивидуальных решений для каждого производителя оборудования, а задержки передачи данных по промышленным сетям могут достигать критических значений для систем реального времени. Особенно это актуально для прецизионных операций, где даже минимальные временные задержки могут существенно влиять на точность позиционирования.

Для преодоления этих проблем предлагаются следующие решения:

1. Разработка унифицированных стандартов обмена данными между оборудованием различных производителей
2. Использование edge-вычислений для предварительной обработки данных непосредственно на оборудовании
3. Оптимизация математических моделей с применением методов машинного обучения
4. Создание модульных систем, позволяющих постепенно наращивать функциональность цифрового двойника

Особое внимание следует уделить вопросам кибербезопасности, так как цифровые двойники становятся потенциальной мишенью для кибератак. Решение этих проблем требует комплексного подхода, включающего как технические, так и организационные меры защиты.

Таким образом, цифровой двойник роботизированного манипулятора – это мощный инструмент, объединяющий моделирование, IoT и ИИ. Его использование сокращает время разработки, повышает надёжность и открывает новые возможности для автоматизации. В перспективе такие системы станут стандартом для управления сложными robotic-комплексами.

Литература

1. Григорьев С.Н., Михеев Г.М. Цифровые двойники в машиностроении. - М.: Машиностроение, 2021. - 256 с.
2. Иванов А.А., Петров В.К., Сидоров Д.Е. Применение цифровых двойников для моделирования роботизированных манипуляторов // Вестник машиностроения. - 2022. - Т. 15, №4. - С. 45-52. - doi.org/10.21177/1998-4502-2022-15-4-45-52.
3. Кузнецов Р.О. Разработка методов цифрового моделирования промышленных роботов: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. - СПб., 2020. - 24 с.
4. Цифровые технологии в робототехнике / Под ред. В.П. Смирнова. - М.: Наука, 2019. - 312 с.
5. Патент №2745678 РФ. Способ управления роботизированным манипулятором с использованием цифрового двойника / А.С. Волков, Д.И. Новиков. - Заявка №2020135678 от 10.11.2020; опубл. 15.03.2021, Бюл. №8.
6. Белов А.Н. Оптимизация работы промышленных роботов // Современные проблемы машиностроения: Труды IX Международной научной конференции. - М.: МГТУ, 2021. - Т. 2. - С. 134-138.