

# АДАПТИВНЫЕ ЦИФРОВЫЕ ДВОЙНИКИ В ЗАДАЧАХ УПРАВЛЕНИЯ ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНЫМИ ПРОИЗВОДСТВАМИ

**М.В. Зенькович**

*Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет)*  
Россия, 125993, Москва, Волоколамское шоссе, 4  
E-mail: mvz04@yandex.ru

**Ю.Г. Древец**

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*  
Россия, 115409, Москва, Каширское шоссе, 31  
E-mail: ydrevs@yandex.ru

**В.С. Иноземцева**

*Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет)*  
Россия, 125993, Москва, Волоколамское шоссе, 4  
E-mail: v.s.inozemtseva@mail.ru

**Ключевые слова:** цифровой двойник, индустрия 4.0, имитационное моделирование, машинное обучение, мультиагентные системы, адаптивные системы управления высокотехнологичными производствами, адаптивные модели.

**Аннотация:** Рассмотрено применение адаптивных цифровых двойников для решения задач адаптивного управления высокотехнологичными производствами. Под адаптивным цифровым двойником авторы доклада предлагают понимать цифровой двойник, который, реагируя на изменение параметров и состояния объекта-оригинала, а также на воздействия внешней среды, изменяет свое состояние и структуру. Под изменением структуры понимается динамическое добавление (удаление) элементов, с соответствующим изменением операторов сопряжения. Операторы сопряжения предлагается модифицировать на основе интеграции методов имитационного моделирования и машинного обучения. Предложена методология построения цифровых двойников производственных систем, основанная на применении адаптивных мультиагентных имитационных моделей. В результате проведенных работ разработана программная реализация адаптивного цифрового двойника производственной системы высокотехнологичного машиностроительного производства.

## 1. Введение

Цифровизация производств рассматривается в качестве одного из ведущих факторов позволяющих обеспечить повышение их эффективности [1]. Цифровые технологии, также известные, как технологии индустрии 4.0, обеспечивают сквозную интеграцию интеллектуальных компонент в производственной системе, позволяют осуществлять в режиме реального времени мониторинг и управление физическими и киберфизическими элементами производственных систем по всей инфраструктуре высокотехнологичного производства, т.о. обеспечивают тесную интеграцию и синхронизацию между физическими и «виртуальными» подсистемами

производственных систем [2, 3]. Согласно концепции, «индустрия 4.0» цифровые двойники являются важными элементами современных адаптивных систем управления высокотехнологичными производствами. Можно привести следующее определение цифрового двойника: «Цифровой двойник – интегрированная мультифизическая, мультимасштабная, вероятностная модель сложного промышленного изделия, использующая наилучшие, из доступных, методы и средства моделирования и визуализации, а также источники информации об актуальном техническом состоянии рассматриваемого изделия, для «зеркалирования» и наиболее адекватного представления изделия в цифровом пространстве» [1]. Т.о. термин «цифровой двойник» на сегодняшний день является, по существу заменой понятия «имитационная модель, работающая в реальном масштабе времени с некоторым расширением функций и возможностей». Фактически цифровые двойники систем являются адаптивными моделями, которые анализируют текущую ситуацию и формируют данные для перенастройки параметров системы в реальном времени. Они включают в свой состав алгоритмические описания процессов функционирования производственных систем, алгоритмы анализа текущего состояния производства, прогнозирования будущих состояний и синтеза управляющих воздействий. Синхронизация состояний цифрового двойника и реально существующей системы обеспечивается посредством применения современных измерительных систем, «умных» устройств, IoT, имитационных моделей, средств обработки и обмена информации в реальном времени [4].

## **2. Цифровые двойники и адаптивные цифровые двойники производственных систем**

### **2.1. Основные определения**

Цифровые двойники производственных систем позволяют решать широкий круг задач, связанных с моделированием и оптимизацией производственных систем, включая их логистические компоненты и детальную визуализацию производственных процессов как на микроуровне, так и на макроуровне. Анализ публикаций позволяет выделить следующий круг задач, решаемых посредством цифровых двойников производственных систем [1-4]:

- управление производственными и технологическими процессами в режиме реального времени, в т.ч. решение задач оптимизации и планирования, идентификации аномалий в технологических процессах и пр.;
- управление техническим обслуживанием и ремонтом оборудования, в т.ч. решение задач мониторинга и диагностики технического состояния, прогнозирования отказов, предсказательного обслуживания и пр.;
- обеспечение информационной безопасности и устойчивого функционирования киберфизических производственных систем.

В области промышленной автоматизации одной из наиболее актуальных задач является адаптивное управление высокотехнологичными производствами. В качестве одного из методов синтеза адаптивных систем управления высокотехнологичными производствами, авторы доклада предлагают построение адаптивных систем управления на основе адаптивных цифровых двойников. В работе [4] была предложена концепция разработки адаптивных цифровых двойников. Под адаптивным цифровым двойником будем понимать цифровой двойник, который, реагируя на изменение параметров и состояния объекта-оригинала, а также на воздействия внешней среды, изменяет свое состояние и структуру [4]. Под изменением структуры понимается динамическое добавление (удаление) элементов, с соответствующим изменением

операторов сопряжения. Операторы сопряжения элементов можно модифицировать на основе интеграции методов имитационного моделирования и машинного обучения. Особенно актуальна задача изменения структуры цифрового двойника для случая крупномасштабных производственных систем, где необходимо перераспределять ресурсы (технологическое оборудование, транспортные устройства и т.д.) между различными подсистемами производственной системы [4]. Адаптивные цифровые двойники могут быть особенно полезны при решении задач автоматизированной разработки и корректировки алгоритмов управления производственными системами, сравнительного анализа альтернативных конфигураций производственных систем, сравнительного анализа алгоритмов управления производственными системами. В режиме советчика на базе результатов проведенного сравнительного анализа адаптивная система управления выдает рекомендации по изменению структуры объекта-оригинала (производственной системы). Опираясь на результаты моделирования, полученные посредством цифровых двойников, система управления синтезирует управляющие воздействия позволяющие реализовать наиболее предпочтительные, из множества допустимых, производственные стратегии, под производственной стратегией в данном контексте понимается структурная и параметрическая реорганизация производственной системы с целью максимизации эффективности ее функционирования [4].

## **2.2. Анализ методологий построения цифровых двойников производственных систем**

При построении цифровых двойников можно использовать следующие классы математических моделей [4]:

1) модели основные на исторических данных о процессе/системе. Строятся на основе достаточно больших объемов исторических данных, описывающих поведение производственной системы на достаточно большом временном интервале. Основной инструментарий: методы машинного обучения, статистические методы;

2) аналитические модели. Строятся на основе принципов работы моделируемой производственной системы и отражают физические законы, лежащие в основе рассматриваемых принципов. Процессы функционирования элементов системы описываются посредством некоторых функциональных соотношений (алгебраических, дифференциальных, интегральных и т. д.);

3) имитационные модели. Модель производственной системы строится в виде некоторого алгоритма (совокупности алгоритмов), модели отдельных элементов системы могут быть представлены в виде имитационных моделей, аналитических моделей и моделей, основных на исторических данных. Имитационные модели – наиболее гибкая методология; она позволяет сочетать, при необходимости, элементы остальных подходов.

В отличие от моделирования на основе исторических данных, применение имитационного и аналитического подходов позволяет моделировать не только поведение системы, но и взаимодействие ее элементов, что может являться критичным, при решении задач анализа и прогнозирования состояния исследуемой производственной системы. Выбор подхода обуславливается предполагаемым классом решаемых задач и наличием необходимой исходной информации. Построение адаптивных цифровых двойников производственных систем целесообразно осуществлять на базе адаптивных имитационных моделей [4]. Применение адаптивных имитационных моделей хорошо себя зарекомендовало на этапах проектирования, модернизации и эксплуатации производственных систем [5, 6].

### **3. Концепция построения адаптивных цифровых двойников производственных систем**

#### **3.1. Системный анализ производственных модулей, входящих в состав производственных участков машиностроительных цехов**

Рассмотрим построение адаптивных цифровых двойников производственных систем на примере машиностроительного производства. Для построения адаптивных имитационных моделей, лежащих в основе адаптивных цифровых двойников необходимо выполнить формализованное описание типовых (обобщенных) элементарных производственных модулей (ТЭПМ) производственных систем. На базе формализованных описаний ТЭПМ необходимо создать их библиотеку. Библиотека должна содержать ТЭПМ, из которых посредством агрегирования создаются формализованные описания производственных систем более высоких уровней [4].

Технологические процессы реализуются на производственных участках, каждый из которых состоит из конечного числа строго определенных производственных модулей (ПМ), позволяющих обеспечить имплементацию рассматриваемых технологических процессов. Следовательно, при моделировании производственных систем, необходимо сформулировать соответствующие перечни ПМ. Затем, требуется разработать алгоритмы функционирования для рассматриваемых ПМ параметризацию. Тем самым будут определены минимально необходимые наборы модулей. Целесообразно произвести выделение ТЭПМ машиностроительных цехов, на базе которых возможно построение производственных систем более высоких уровней. Выделение целесообразно проводить посредством декомпозиции производственных систем машиностроительных предприятий.

Для решения этих задач целесообразно произвести системный анализ ПМ, входящих в состав производственных участков машиностроительных цехов. Проведем декомпозицию производственных систем по принципам общности назначения и функционирования ПМ. В результате можно предложить следующее разбиение ПМ, входящих в состав производственных участков, на группы: 1) ПМ дискретного типа: транспортное устройство; поточно-транспортное устройство на  $k$  мест; очередь на  $k$  мест; технологическая установка дискретного типа. 2) ПМ непрерывного типа: технологическая установка непрерывного типа; ленточные транспортеры и трубопроводы. 3) ПМ непрерывно-дискретного типа: технологическая установка непрерывно-дискретного типа. Математическое описание каждого ПМ, принадлежащего к каждой из групп ПМ, строится на основе описания ТЭПМ, который описывает общие для ПМ из этой группы свойства. На базе математических моделей ТЭПМ создается их библиотека. Библиотека должна содержать ТЭПМ, из которых посредством агрегирования создаются математические модели производственных систем более высоких уровней. Для математического описания ПМ воспользуемся теорией мультиагентных систем – опишем ПМ в виде агентов, а производственные системы в виде мультиагентных систем [6]. Заметим, что предлагаемая классификация не претендует на полноту, а является открытой, при необходимости пополняемой, библиотекой, т.к. в настоящий момент в машиностроительном производстве применяется достаточно большое число технологических процессов и постоянно появляются новые технологии и оборудование для их реализации.

#### **3.2. Программная реализация**

При программной реализации использовался объектно-ориентированный подход, в качестве языка программирования выбран C++. Все элементы адаптивных мультиагентных имитационных моделей описаны в виде классов в понимании языка C++. Разработана библиотека этих классов, что позволяет легко внедрять новые элементы в модель. Библиотека постоянно расширяется. Описание алгоритмов взаимодействия между элементами адаптивных моделей организовано на условно-событийном принципе. При необходимости изменения структуры адаптивной имитационной модели, модификация алгоритмов взаимодействия ее элементов осуществляется на основе интеграции методов имитационного моделирования (с применением агентного подхода) и машинного обучения. Такой подход к реализации позволяет легко модифицировать алгоритмы функционирования системы и моделировать любые нештатные ситуации. Новые элементы внедряются в структурную часть модели, не затрагивая уже отработанных алгоритмов функционирования.

## 4. Заключение

Рассмотрено применение адаптивных цифровых двойников производственных систем для решения задач адаптивного управления высокотехнологичными производствами. Под адаптивным цифровым двойником авторы доклада предлагают понимать цифровой двойник, который, реагируя на изменение параметров и состояния объекта-оригинала, а также на воздействия внешней среды, изменяет свое состояние и структуру. Под изменением структуры понимается динамическое добавление (удаление) элементов, с соответствующим изменением операторов сопряжения. Операторы сопряжения предлагается модифицировать на основе интеграции методов имитационного моделирования и машинного обучения. Предложена методология построения адаптивных цифровых двойников производственных систем, основанная на применении адаптивных мультиагентных имитационных моделей. В результате проведенных работ разработана программная реализация адаптивного цифрового двойника производственной системы машиностроительного производства.

## Список литературы

1. Kritzinger W., Karner M., Traar G., Henjes J., Sihn W. Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification // IFAC-PapersOnLine. 2018. Vol. 51, No. 11. P. 1016-1022.
2. Uhlemann T.H.-J., Lehmann C., Steinhilper R. The Digital Twin. Realizing the Cyber-Physical Production System for Industry 4.0 // Procedia. CIRP. 2017. Vol. 61. P. 335-340.
3. Negri E., Fumagalli L., Macchi M. A Review of the Roles of Digital Twin in CPS-based Production Systems // Procedia Manufacturing. 2017. Vol. 11. P. 939-948.
4. Зенькович М.В., Древш Ю.Г. Применение цифровых двойников производственных систем в адаптивных системах управления крупномасштабными производствами // Управление развитием крупномасштабных систем MLSD'2020. Труды тринадцатой международной конференции. Под общей редакцией С.Н. Васильева, А.Д. Цвиркуна. М.: ИПУ РАН, 2020. С. 1507-1516.
5. Zenkovich M.V., Drevs Y.G. A simulation based decision-making support approach for machine-building plants investment projects estimation of efficiency // Journal of Theoretical and Applied Information Technology. 2015. Vol. 81, No. 3. P. 405-412.
6. Zenkovich M.V., Drevs Y.G., Inozemtseva V.S., Shevchenko N.A. Industrial plants investment projects efficiency estimation based on simulation and artificial intelligence methods // Procedia Computer Science. 2021. Vol. 190. P. 852-862.