

DOI:

ПРИМЕНЕНИЕ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМ В АДАПТИВНЫХ СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ КРУПНОМАСШТАБНЫМИ ПРОИЗВОДСТВАМИ

Зенькович М.В.,

*Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет),
Россия, г. Москва, Волоколамское шоссе, 4*

mvz04@yandex.ru

Древс Ю.Г.

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,

Россия, г. Москва, Каширское шоссе, 31

ydrevs@yandex.ru

Аннотация: В докладе рассматривается проблема применения цифровых двойников производственных систем в адаптивных системах управления крупномасштабными производствами. Предложена методология построения цифровых двойников производственных систем, основанная на применении адаптивных имитационных моделей. Имитационная модель строится на базе библиотеки математических моделей типовых элементарных производственных модулей (ТЭПМ), из которых посредством агрегирования последовательно создаются модели производственных систем более высоких уровней. Библиотека универсальных математических моделей ТЭПМ служит базой для их программной реализации. Предлагаются методы декомпозиции и агрегирования. Принципы декомпозиции позволяют представить их в виде совокупности производственных модулей (ПМ), которые, в свою очередь, подразделяются на группы. Для каждой из групп разработана математическая модель ТЭПМ, которая посредством изменения параметров настраивается на моделирование любого ПМ, входящего в данную группу. В качестве примера приводятся результаты системного анализа машиностроительных производственных систем. В результате проведенных работ построены математические модели ТЭПМ и универсальные алгоритмы их функционирования, на их основе разработана программная реализация цифровых двойников производственных систем крупномасштабного машиностроительного производства.

Ключевые слова: цифровой двойник, индустрия 4.0, имитационное моделирование, агрегативные системы, адаптивные системы управления крупномасштабными производствами, адаптивные модели.

Введение

Термин «цифровой двойник» на сегодняшний день является, по существу заменой понятия «имитационная модель, работающая в реальном масштабе времени» с некоторым расширением функций и возможностей. Впервые этот термин был предложен в 2002 г. М. Гривсом. Изначально термин употреблялся в контексте управления жизненным циклом изделий (product lifecycle management, PLM). Под цифровым двойником Гривс понимал информационную структуру, хранящуюся в цифровом виде, описывающую некоторую техническую систему, причем данная информационная структура должна существовать как самостоятельная сущность и обладать информационными связями с описываемой ею технической системой. Цифровое представление в идеале должно включать всю информацию, которая в потенциале может быть собрана о технической системе: проектную документацию, данные об условиях изготовления рассматриваемой технической системы, значения параметров, характеризующих ее актуальное техническое состояние, информационные массивы описывающие историю изменений параметров, характеризующих актуальное техническое состояние системы, от ее ввода в эксплуатацию до настоящего момента времени, и т.д. В последствии было предложено 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». Данное определение фактически является развитием представлений сложной системы в виде «цифровой модели» и «цифровой тени» [1].

Цифровая модель – это цифровое представление существующей или проектируемой технической системы, у которой отсутствуют автоматические информационные связи в режиме реального времени с объектом-оригиналом. Цифровое представление имеет в своем составе имитационные модели производственных систем, модели изготавливаемых единиц продукции и модели любых других технических систем и объектов, при условии, что все эти модели не имеют автоматических

информационных связей в режиме реального времени со своими объектами-оригиналами. Данные от объектов-оригиналов могут использоваться для совершенствования цифровых моделей в ходе их функционирования, однако ни один из процессов обмена данными не проходит в реальном времени, т.е. изменение состояния объекта-оригинала не влечет автоматического изменения состояния его цифрового представления и наоборот.

В «цифровой тени» существует односторонняя информационная связь, позволяющая в реальном времени передавать информацию от объекта-оригинала к его цифровому представлению. В результате этого вслед за изменением состояния объекта-оригинала автоматически происходит изменение состояния его цифрового представления. Однако, изменение состояния цифровой тени не влечет автоматического изменения состояния ее объекта-оригинала.

Цифровой двойник системы предполагает наличие особого вида информационных связей между объектом-оригиналом и его цифровым представлением. Эти связи позволяют в режиме реального времени передавать информацию от объекта-оригинала к его цифровому представлению и обратно. В результате, вслед за изменением состояния объекта-оригинала автоматически происходит изменение состояния его цифрового представления. Аналогично, в случае изменения состояния цифрового представления автоматически происходит изменение состояния объекта-оригинала. Таким образом, цифровой двойник может играть роль регулятора для своего объекта-оригинала. При этом кроме объекта-оригинала на состояние цифрового двойника могут оказывать влияние и другие объекты и системы, как виртуальные, так и реальные [1].

Фактически цифровые двойники систем являются адаптивными моделями, которые анализируют текущую ситуацию и формируют данные для перенастройки параметров системы в реальном времени. Согласно концепции «индустрия 4.0», цифровые двойники являются важными элементами современных систем управления крупномасштабными производствами. Они включают в свой состав алгоритмические описания процессов функционирования производственных систем, алгоритмы анализа текущего состояния производства, прогнозирования будущих состояний и синтеза управляющих воздействий, позволяющих 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. Кроме того, цифровое представление должно включать в свой состав всю информацию, которая может быть собрана о физической системе: проектную документацию, данные об условиях изготовления, значения параметров, характеризующих ее техническое состояние, информационные массивы, описывающие историю изменений этих параметров и т. д. Такая подробная информация позволяет решать задачи прогнозирования и оптимизации систем на любой стадии их жизненного цикла.

Наличие двусторонней связи цифрового двойника и физической системы в реальном времени предъявляет высокие требования к синхронизации этих процессов, которая обеспечивается посредством применения современных измерительных систем и средств обмена информацией.

1 Цифровые двойники и адаптивные цифровые двойники производственных систем

1.1 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 [2], [3], [4], [5], [6], [7]:

- управление производственными и технологическими процессами в режиме реального времени, в т.ч. решение задач оптимизации и планирования, идентификация аномалий в технологических процессах и др.;

- управление техническим обслуживанием и ремонтом оборудования, в т.ч. решение задач мониторинга и диагностики технического состояния, прогнозирования отказов, предсказательного обслуживания и др.

В области промышленной автоматизации одной из наиболее актуальных задач является адаптивное управление крупномасштабными производствами. В качестве одного из методов синтеза адаптивных систем управления крупномасштабными производствами, авторы доклада предлагают построение адаптивных систем управления на основе 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 своё состояние и структуру. Под изменением структуры понимается динамическое добавление (удаление) элементов, с соответствующим изменением операторов сопряжения. Операторы сопряжения элементов можно модифицировать на основе интеграции алгоритмов 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.

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 (т.е. производственной системы). Опираясь на результаты моделирования, полученные посредством цифровых двойников, система управления крупномасштабного производства синтезирует управляющие воздействия позволяющие реализовать наиболее предпочтительные, из множества допустимых, производственные стратегии.

1.2 Анализ методологий построения цифровых двойников производственных систем

В качестве моделей, применяемых для построения цифровых двойников, можно использовать следующие:

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

2) аналитические модели. Они строятся на основе принципов работы моделируемой производственной системы и отражают физические законы, лежащие в основе этих 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, основанных 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 для построения моделей. Построение адаптивных цифровых двойников производственных систем целесообразно осуществлять на базе адаптивных имитационных моделей. Применение адаптивных имитационных моделей хорошо себя зарекомендовало на этапах проектирования, модернизации и эксплуатации крупномасштабных производственных систем [8], [9].

2 Концепция построения адаптивных цифровых двойников производственных систем

2.1 Методы математического описания производственных процессов и систем

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

При формализованном описании производственных систем, прежде всего, необходимо выбрать «язык» для их формализованного описания. При выборе «языка» формализованного описания следует

учитывать тот факт, что одни производственные процессы достаточно хорошо описываются посредством непрерывных моделей, в тоже время другие – посредством дискретных, а третьи посредством непрерывно-дискретных моделей.

Для дискретных производственных процессов характерной особенностью является возможность расчленения производственного процесса на отдельные элементарные акты – операции; операции выполняются над дискретными сущностями: деталями, полуфабрикатами, узлами и т.д., из которых собирается изделие.

Класс производственных процессов, которые в дальнейшем будем называть непрерывными, лишен этих особенностей и характеризуется в некотором смысле противоположными свойствами. В непрерывных производственных процессах фигурируют компоненты сырья или исходных продуктов, которые в твердом, жидком или газообразном состоянии непрерывным потоком поступают к технологическим установкам или агрегатам; аналогичный вид имеют компоненты готовой продукции, выходящие из соответствующих технологических установок и агрегатов. Кроме того, непрерывные производственные процессы, строго говоря, не могут быть расчленены на отдельные производственные операции, а должны рассматриваться как постоянно действующие преобразования компонентов сырья в компоненты готовой продукции [10].

Непрерывно-дискретные производственные процессы характеризуются сочетанием особенностей непрерывных и дискретных производственных процессов. Невозможность представления непрерывно-дискретных процессов и систем чисто дискретными или чисто непрерывными моделями позволяет выделить их в отдельный класс, поведение которых описывается бесконечной последовательностью сменяющих друг друга длительных непрерывных и мгновенных дискретных поведений [10].

В задачах моделирования и анализа машиностроительных производств необходимо использовать математические модели, детально отражающие специфику поведения непрерывно-дискретных процессов и систем. В разное время предлагались различные математические модели непрерывно-дискретных систем: агрегативная система Н.П. Бусленко (1965 г.), непрерывно-дискретная система В.М. Глушкова (1973 г.), гибридная система (А. Пнуэли, Д. Харел, 1990 г.) и многие другие [10]. Предлагаемые различными авторами математические модели демонстрируют различные подходы к моделированию и анализу непрерывно-дискретных систем. В работе [10] приведено доказательство приводимости перечисленных выше математических моделей друг к другу, на основании чего сделан вывод о том, что эти три математические модели равнозначны по средствам описания элемента и системы и в этом смысле эквивалентны (имеется в виду формальная эквивалентность математических моделей, но не систем моделирования, использующих эти модели в качестве вычислительных моделей). Иными словами, перечисленные выше математические модели описывают один и тот же класс сложных систем и демонстрируют различные подходы к моделированию и анализу сложных непрерывно-дискретных систем.

Таким образом, для формализованного описания модулей машиностроительных производственных систем с одинаковым успехом можно применять все три перечисленных выше методологии построения математических моделей. В данной работе для реализации этой задачи был выбран подход Н.П. Бусленко. Среди достоинств данного подхода, обусловивших его выбор в качестве средства формализованного описания, выделим следующие:

- этот подход позволяет описывать поведение непрерывных, дискретных и непрерывно-дискретных; детерминированных и стохастических систем, т.е. является обобщенным (универсальным). При данном подходе состояние каждого агрегата описывается вектором, компоненты которого являются функциями времени. Зависимости от времени могут носить как непрерывный, так и дискретный характер;
- при агрегативном подходе сначала дается формальное определение объекта моделирования – агрегативной системы, которая является математической абстракцией, отображающей системный характер изучаемых объектов. Так, производственная система рассматривается как агрегативная система, состоящая из нескольких агрегативных подсистем, описывающих соответствующие им производственные участки производственной системы машиностроительного цеха. В свою очередь, каждая из агрегативных подсистем состоит из конечного числа агрегатов, описывающих производственные модули, входящие в состав описываемого подсистемой производственного участка;
- представление объекта моделирования в виде агрегативной системы является базой, на которой производится построение имитационной модели системы. Стандартная форма представления исследуемого объекта в виде агрегативной системы приводит к унификации не только

алгоритмов имитации, но и к возможности применять стандартные методы обработки и анализа результатов моделирования.

Теория агрегативных систем широко применяется для моделирования сложных систем различной природы. В частности одним из наиболее востребованных её приложений является моделирование производственных систем. Первые работы этого направления появились в конце 60-х годов (Н.П. Бусленко, И.Н. Коваленко и др.) эта тенденция сохраняется и до настоящего времени. В этих работах широко представлены математические модели различных производственных систем и агрегатов из которых они состоят, но отсутствуют попытки построения библиотек типовых универсальных агрегатов, как для отдельных отраслей промышленности, так и межотраслевых библиотек. Например, отдельные модели, описывающие производственные модули в виде агрегативных систем различной степени универсальности, представлены в работах Н.П. Бусленко, И.Н. Коваленко и др., однако в них отсутствует отраслевая комплексная системная классификация моделей производственных модулей.

2.2 Системный анализ производственных модулей, входящих в состав производственных участков машиностроительных цехов

Технологические процессы реализуются на производственных участках, каждый из которых состоит соответственно из конечного числа строго определенных производственных модулей (ПМ), позволяющих обеспечить имплементацию рассматриваемых технологических процессов. Следовательно, при моделировании производственных участков, прежде всего, необходимо сформулировать соответствующие перечни ПМ. Затем, требуется разработать циклограммы (алгоритмы) рассматриваемых процессов и провести их параметризацию. Тем самым будут определены минимально необходимые наборы модулей для цехов и участков. Основными задачами текущего этапа разработки цифрового двойника являются:

- выделение типовых (обобщенных) элементарных производственных модулей (ТЭПМ) машиностроительных цехов, на базе которых строятся производственные системы более высоких уровней. Выделение целесообразно проводить посредством декомпозиции производственной системы автоматизированного цеха машиностроительного предприятия;
- построение математических моделей ТЭПМ. На базе математической модели ТЭПМ, посредством изменения ее параметров, должны синтезироваться математические модели ПМ (из группы ПМ, для которых рассматриваемый ТЭПМ является типовым);
- выделение параметров, позволяющих производить синтез математических моделей ПМ на базе математических моделей ТЭПМ;
- построение универсальных алгоритмов функционирования математических моделей ТЭПМ;
- создание библиотеки математических моделей типовых (обобщенных) элементарных производственных модулей, из которых посредством агрегирования будет возможным создать математические модели производственных систем более высоких уровней.

Для решения этих задач целесообразно произвести системный анализ ПМ, входящих в состав производственных участков машиностроительных цехов.

Проведем декомпозицию производственных систем машиностроительных цехов по принципам общности назначения и функционирования ПМ. В результате можно предложить следующее разбиение ПМ, входящих в состав производственных участков машиностроительных цехов, на группы:

1. ПМ дискретного типа.

1.1. Транспортное устройство. К этой группе относятся устройства для транспортировки и проведения технологических операций с различными технологическими объектами (детальями, заготовками, материалами и др.). Оборудование этой группы используется для реализации одной из вспомогательных технологий – транспортировки, а также для реализации технологий по созданию полезного продукта.

1.2. Поточно-транспортное устройство на k мест.

К этой группе относятся поточно-транспортные устройства для транспортировки и проведения технологических операций с различными технологическими объектами (детальями, заготовками, материалами и др.), а также разнообразные конвейера и элеваторы. Важная отличительная особенность этой группы устройств – количество технологических объектов транспортируемых устройством всегда одинаково и равно k . Иными словами, если на вход устройства поступает объект, то одновременно другой объект покидает устройство на выходе. Оборудование этой группы используется для реализации одной из вспомогательных технологий – транспортировки, а также для реализации технологий по созданию полезного продукта.

1.3. Очередь на k мест. В отличие от устройств второй группы, устройства из данной группы являются классическими очередями: количество объектов в устройстве варьируется от 0 до k . К этой группе относятся: очереди, системы рольгангов, различные конвейера и пр. Оборудование этой группы используется для реализации одной из вспомогательных технологий – транспортировки, а также для реализации технологий по созданию полезного продукта.

1.4. Технологическая установка дискретного типа.

К этой группе относятся разнообразные технологические установки дискретного типа (смеситель дискретного типа/бункер для смеси, формовочная машина и др.), которые на основе одного или нескольких видов сырья (газообразного, жидкого или твердого) изготавливают один или несколько видов продукции (которые, в свою очередь могут являться сырьём для других видов агрегатов). Оборудование этой группы используется для реализации технологий по созданию полезного продукта: создание заготовок, образование форм и деталей и т.д.

2. ПМ непрерывного типа.

2.1. Технологическая установка непрерывного типа.

К этой группе относятся разнообразные технологические установки непрерывного типа (например, смеситель непрерывного типа), которые на основе одного или нескольких видов сырья (газообразного, жидкого или твердого (сыпучего)) изготавливают один или несколько видов продукции (которые, в свою очередь могут являться сырьём для других видов агрегатов). Оборудование этой группы используется для реализации технологий по созданию полезного продукта.

2.2. Ленточные транспортёры и трубопроводы.

К этой группе относятся различные устройства для транспортировки сыпучих, жидких и газообразных материалов. Используются для реализации одной из вспомогательных технологий – транспортировки.

3. ПМ непрерывно-дискретного типа.

3.1. Технологическая установка непрерывно-дискретного типа.

К этой группе относятся разнообразные технологические установки непрерывно-дискретного типа (как правило, с различным сочетанием типов (непрерывный, дискретный) входных и выходных сигналов), которые на основе одного или нескольких видов сырья (газообразного, жидкого или твердого) изготавливают один или несколько видов продукции (которые, в свою очередь могут являться сырьём для других видов агрегатов). Оборудование этой группы используется для реализации технологий по созданию полезного продукта: создание заготовок, образование форм и деталей и т.д.

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 производственные системы более высоких уровней.

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.

2.3 Пример описания типового элементарного производственного модуля

В качестве примера применения предлагаемого подхода рассмотрим описание ТЭПМ «Транспортное устройство».

Состояние системы опишем в виде вектора $\bar{z}(t) \in Z$ со следующими компонентами: $z_1(t)$ – время, оставшееся до окончания выполнения агрегатом текущей операции; $z_2(t)$ – момент начала выполнения агрегатом текущей операции; $z_3(t)$ – номер технологической позиции, на которую перемещается или на которой находится транспортное устройство; $z_4(t), \dots, z_{n+3}(t)$ – сведения о транспортируемом объекте.

Входной сигнал, поступающий в систему: Если на транспортное устройство поступает транспортируемый объект (например, деталь, отливка, форма, полуформа и т. п.), то будем считать, что в систему поступает входной сигнал $\bar{x}(t)$. Опишем его в виде n -мерного вектора, компоненты которого содержат сведения об этом объекте.

Управляющие сигналы, поступающие в систему: 1) Если транспортному устройству поступила команда переместится на новую позицию, то будем считать, что в систему поступил управляющий сигнал $\bar{g}(t)$. Опишем его в виде вектора со следующими компонентами: $g_1(t)$ – расстояние от текущей технологической позиции транспортного устройства до позиции, на которую необходимо его

переместить; $g_2(t)$ – идентификатор технологической позиции, на которую необходимо переместить транспортное устройство. 2) Если поступила команда произвести с объектом находящемся на транспортном устройстве технологическую операцию p -ого типа ($p \in [1, \dots, d]$, d – максимальное число технологических операций производимых с объектом на транспортном устройстве), то будем считать, что в систему поступил управляющий сигнал $\bar{g}^p(t)$. Опишем его в виде вектора со следующим компонентами: $g_1^p(t)$ – продолжительность технологической операции.

Рассмотрим операторы V, V', U, W, W^{p+3}, G и G^p , описывающие функционирование этого агрегата:

1) Пусть в момент времени $t = t_1$ на транспортное устройство поступает транспортируемый объект. Эта ситуация описывается с помощью оператора V , который можно записать следующим образом:

$$\begin{aligned} z_1(t_1 + 0) &= \tau + \gamma \\ z_2(t_1 + 0) &= t_1 \\ z_3(t_1 + 0) &= z_3(t_1) \\ z_j(t_1 + 0) &= x_k(t_1) + \xi_k(t_1), j = 4, \dots, n + 3; k = 1, \dots, n. \end{aligned}$$

где τ – время, необходимое для выполнения операции; γ – случайная величина (с заданным законом распределения), характеризующая дополнительное время, необходимое для выполнения операции (возникает главным образом из-за наличия простоев и поломок оборудования в системе); $\xi_k(t)$ – случайная величина (с заданным законом распределения), характеризующая возмущение внешней среды на входе агрегата. Для тех компонент $x_k(t)$ входного вектора $\bar{x}(t)$, для которых имеется физический смысл, задается соответствующее возмущение $\xi_k(t)$, если такого смысла нет или возмущение отсутствует, то $\xi_k(t) = 0$.

2) Пусть в момент времени $t = t_2$ транспортному устройству поступила команда переместиться на новую технологическую позицию. Эта ситуация описывается с помощью оператора V' , который можно записать следующим образом:

$$\begin{aligned} z_1(t_2 + 0) &= f(g_1(t_2)) + \gamma' \\ z_2(t_2 + 0) &= t_2 \\ z_3(t_2 + 0) &= g_2(t_2) \\ z_j(t_2 + 0) &= z_j(t_2), j = 4, \dots, n + 3. \end{aligned}$$

где $f(g_1(t_2))$ – определяется кинематическими характеристиками транспортного устройства и расстоянием между технологическими позициями; γ' – случайная величина (с заданным законом распределения), характеризующая дополнительное время, необходимое для выполнения операции (возникает главным образом из-за наличия простоев и поломок оборудования в системе).

3) Пусть в момент времени $t = t_3$ с транспортного устройства снимают транспортируемый объект. В этот момент $z(t)$ достигает $Z^{(Y)}$. Поэтому скачок состояний $z(t_3)$ определяется оператором W вида:

$$\begin{aligned} z_1(t_3 + 0) &= \tau' + \gamma'' \\ z_2(t_3 + 0) &= t_3 \\ z_3(t_3 + 0) &= z_3(t_3) \\ z_j(t_3 + 0) & \text{ – не определяются, } j = 4, \dots, n + 3. \end{aligned}$$

где τ' – время, необходимое для выполнения операции; γ'' – случайная величина (с заданным законом распределения), характеризующая дополнительное время, необходимое для выполнения операции (возникает главным образом из-за наличия простоев и поломок оборудования в системе).

4) Выходным сигналом этого агрегата будем считать сведения о транспортируемом объекте, снятом с транспортного устройства. Опишем его в виде n -мерного вектора $\bar{y}(t)$, компоненты которого содержат сведения об этом объекте.

Оператор G можно записать следующим образом:

$$y_i(t_3) = z_j(t_3) + \zeta_i(t_3), i = 1, \dots, n; j = 4, \dots, n + 3.$$

где $\zeta_i(t)$ – случайная величина (с заданным законом распределения), характеризующая возмущение внешней среды на выходе агрегата. Для тех компонент $y_i(t)$ выходного вектора $\bar{y}(t)$, для которых имеется физический смысл, задается соответствующее возмущение $\zeta_i(t)$, если такого смысла нет или возмущение отсутствует, то $\zeta_i(t) = 0$.

5) Пусть в момент времени $t = t_{p+3}, p \in [1, \dots, d]$ с объектом, находящимся на транспортном устройстве, производится технологическая операция p -ого типа (например, заливка, сверление, сборка и т.п.). В этот момент $z(t)$ достигает $Z^{(Y^{p+3})}$. Поэтому скачок состояний $z(t_{p+3})$ определяется оператором W^p :

$$\begin{aligned}
z_1(t_{p+3} + 0) &= g_1^p(t_{p+3}) + \gamma^p \\
z_2(t_{p+3} + 0) &= t_{p+3} \\
z_3(t_{p+3} + 0) &= z_3(t_{p+3}) \\
z_i(t_{p+3} + 0) &= f_{i-3}^p(z_i(t_{p+3})) + \eta_{i-3}^p(t_{p+3}), i = 4, \dots, n + 3.
\end{aligned}$$

где $f_i^p(z_i(t_{p+3}))$ – определяются характером технологической операции; γ^p – случайная величина (с заданным законом распределения), характеризующая дополнительное время, необходимое для выполнения операции (возникает главным образом из-за наличия простоев и поломок оборудования в системе); $\eta_i^p(t)$ – случайная величина (с заданным законом распределения), характеризующая отклонения от результатов выполнения технологической операции p -ого типа. Для тех компонент $z_k(t)$ вектора $\bar{z}(t)$, для которых имеется физический смысл, задается соответствующее отклонение $\eta_i^p(t)$, если такого смысла нет или отклонение отсутствует, то $\eta_i^p(t) = 0$.

6) Выходным сигналом этого агрегата будем считать сведения о потерях материалов образовавшихся при выполнении технологической операции p -ого типа с объектом находящимся на транспортном устройстве (например, при сверлении образуются отходы материалов, которые отправляются на переработку). Опишем его в виде вектора $\bar{y}^p(t)$ со следующими компонентами: $y_1^p(t), \dots, y_s^p(t)$ – сведения о потерях.

Оператор G^p можно записать следующим образом:

$$y_i^p(t_{p+3}) = \phi_i^p(z_4(t_{p+3}), \dots, z_{n+3}(t_{p+3}), t_{p+3}) + \zeta_i^p(t_{p+3}), i = 1, \dots, s.$$

где $\phi_i^p(\cdot)$ – определяются характером технологической операции; $\zeta_i^p(t)$ – случайная величина (с заданным законом распределения), характеризующая возмущение внешней среды на выходе агрегата. Для тех компонент $y_i^p(t)$ выходного вектора $\bar{y}^p(t)$, для которых имеется физический смысл, задается соответствующее возмущение $\zeta_i^p(t)$, если такого смысла нет или возмущение отсутствует, то $\zeta_i^p(t) = 0$.

7) В полуинтервалах $(t_j, t_{j+1}]$ между особыми моментами времени t_j и t_{j+1} к которым относятся моменты поступления в агрегат входных и управляющих сигналов, а также моменты выдачи выходных сигналов, состояния агрегата изменяются по закону, задаваемому оператором U , который можно записать следующим образом:

$$\begin{aligned}
z_1(t) &= z_1(t) - (t - z_2(t)), z_1(t) - (t - z_2(t)) > 0 \\
z_1(t) &= 0, z_1(t) - (t - z_2(t)) \leq 0 \\
z_i(t) &= z_i(t), i = 2, \dots, n + 3.
\end{aligned}$$

8) Универсальный агрегат для группы «Транспортное устройство».

8.1. Параметризация агрегата. Из изложенного выше, видно, что для построения агрегативного описания ПМ относящегося к группе «Транспортное устройство», требуется агрегату, описывающему ТЭПМ данной группы задать следующие группы параметров:

8.1.1. Входные, выходные и управляющие сигналы: $\bar{x}(t), \bar{y}(t), \{\bar{y}^p(t)\}, \bar{g}(t), \{\bar{g}^p(t)\}$.

8.1.2. Параметры, характеризующие транспортные и технологической операции агрегата: $f(g_1(t_2)), \{f_i^p(z_i(t_{p+3}))\}, \{\phi_i^p(z_4(t_{p+3}), \dots, z_{n+3}(t_{p+3}), t_{p+3})\}$.

8.1.3. Времена, необходимые для выполнения операций: τ, τ' .

8.1.4. Случайные величины, характеризующие различные нештатные ситуации в системе: $\gamma, \gamma', \gamma'', \{\gamma^p\}, \{\xi_k(t)\}, \{\zeta_i(t)\}, \{\zeta_i^p(t)\}, \{\eta_i^p(t)\}$.

8.2. Универсальный алгоритм функционирования данного агрегата определяется операторами: $V, V', U, W, \{W^{p+3}\}, G \text{ и } \{G^p\}$.

2.4 Программная реализация

При построении программной реализации использовался объектно-ориентированный подход, в качестве языка программирования был выбран C++. Все элементы адаптивных имитационных моделей описаны в виде классов в понимании языка C++. Разработана библиотека этих классов, что позволяет легко внедрять новые элементы в модель. В настоящее время, в библиотеке четыре класса, описывающих ТЭПМ дискретного типа; два класса, описывающих ТЭПМ непрерывного типа; один класс, описывающий ТЭПМ непрерывно-дискретного типа. Библиотека классов, описывающих ТЭПМ, постоянно расширяется, прогнозируемое число классов, описывающих ТЭПМ для машиностроительных производств, должно составить порядка двадцати. Все элементы библиотеки являются наследниками базового класса или наследниками наследников базового класса. Наследниками базового класса являются классы, описывающие группы устройств (выделенные выше),

такие как транспортное устройство, поточно-транспортная устройство и т.д. Наследниками классов, описывающих группы устройств, являются классы, описывающие устройства, входящие в состав производственных систем (такие как смеситель, металлорежущий станок, заливочная машина и т.д.). 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 алгоритм функционирования системы и моделировать любые нештатные ситуации. Новые элементы внедряются в структурную часть модели, не затрагивая уже отработанного алгоритма функционирования.

Выводы

В докладе рассмотрен вопрос применения цифровых двойников производственных систем в адаптивных системах управления крупномасштабными производствами. В качестве одного из методов синтеза адаптивных систем управления крупномасштабными производствами, авторы доклада предлагают построение адаптивных систем управления на основе адаптивных цифровых двойников. 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 элементов предлагается модифицировать на основе интеграции алгоритмов 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. 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 (т.е. производственной системы). Опираясь на результаты моделирования, полученные посредством цифровых двойников, система управления крупномасштабного производства синтезирует управляющие воздействия позволяющие реализовать наиболее предпочтительные, из множества допустимых, производственные стратегии. Предложена методология построения цифровых двойников производственных систем, основанная на применении адаптивных имитационных моделей. Применение адаптивных имитационных моделей хорошо себя зарекомендовало на этапах проектирования, модернизации и эксплуатации крупномасштабных производственных систем [8], [9]. Имитационная модель строится на базе библиотеки математических моделей ТЭПМ, из которых посредством агрегирования последовательно создаются модели производственных систем более высоких уровней. Библиотека универсальных математических моделей ТЭПМ служит базой для их программной реализации. Предлагаются методы декомпозиции и агрегирования. Приведены результаты системного анализа машиностроительных производственных систем. Принципы декомпозиции позволяют представить их в виде совокупности ПМ, которые, в свою очередь, подразделяются на группы. Для каждой из групп разработана математическая модель ТЭПМ, которая посредством изменения параметров настраивается на моделирование любого ПМ, входящего в данную группу. В результате проведенных работ построены математические модели ТЭПМ и универсальные алгоритмы их функционирования, на их основе разработана программная реализация цифровых двойников производственных систем крупномасштабного машиностроительного производства.

Литература

1. *Werner Kritzinger, Matthias Karner, Georg Traar, Jan Henjes, Wilfried Sihn.* Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification // IFAC-PapersOnLine, 51-11, 2018, pp. 1016–1022.
2. *Thomas H.-J. Uhlemann, Christoph Schock, Christian Lehmann, Stefan Freiberger, Rolf Steinhilper.* The Digital Twin. Demonstrating the Potential of Real Time Data Acquisition in Production Systems // Procedia Manufacturing, 9, 2017, pp. 113–120.

3. *Thomas H.-J. Uhlemann, Christian Lehmann, Rolf Steinhilper.* The Digital Twin. Realizing the Cyber-Physical Production System for Industry 4.0. // *Procedia. CIRP.* 61, 2017, pp. 335–340.
4. *Roland Rosen, Georg von Wichert, George Lo, Kurt D. Bettenhausen.* About The Importance of Autonomy and Digital Twins for the Future of Manufacturing // *IFAC-PapersOnLine*, 48(3), 2015, pp. 567–572.
5. *Jay Lee, Edzel Lapira, Behrad Bagheri, Hung-an Kao.* Recent advances and trends in predictive manufacturing systems in big data environment // *Manufacturing Letters*, 1(1), 2013, pp. 38–41.
6. *Gian Antonio Susto, Andrea Schirru, Simone Pampuri, Seán McLoone, Alessandro Beghi.* Machine learning for predictive maintenance: A multiple classifier approach // *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 11(3), 2015, pp. 812–820.
7. *Doriana M. D'Addona, A.M.M. Ullah, Matarazzo D. Sharif.* Tool-wear prediction and pattern-recognition using artificial neural network and DNA-based computing // *J.Intell.Manuf.*, 28(6), 2017, pp. 1285–1301.
8. *Mikhail V. Zenkovich, Yury G. Drevs.* An application of simulation for foundry plants investment projects estimation of efficiency // *International Journal of Mathematical Models and Methods in Applied Sciences*, Vol. 9, 2015, pp. 99–104.
9. *Mikhail V. Zenkovich, Yury G. Drevs.* A simulation based decision-making support approach for machine-building plants investment projects estimation of efficiency // *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, Vol. 81 Issue 3, 2015, pp. 405–412.
10. *Парийская Е.Ю.* Сравнительный анализ математических моделей и подходов к моделированию и анализу непрерывно-дискретных систем // *Дифференциальные уравнения и процессы управления*, №1. 1997.