

УДК 519.816

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЦИФРОВЫЕ ДВОЙНИКИ

*Б.Я. Лихтциндер, П.А. Ольберг**

Поволжский государственный университет
телекоммуникаций и информатики
Россия, 443100, г. Самара, ул. Льва Толстого, 23

E-mail: lixt@psuti.ru, polinaolberg@gmail.com

Аннотация. Рассматриваются различные виды моделирования и понятие «цифровой двойник», а также примеры их концепции и реализации. Отмечено, что компьютерное моделирование позволяет не только получить прогноз, но и определить, какие управляющие воздействия на систему приведут к благоприятному развитию событий между компонентами модели, являющимися отражением реальных связей. В качестве примера рассмотрен процесс обслуживания аккумуляторных батарей элементов беспроводных сенсорных сетей с помощью дронов. Показано, что цифровое моделирование позволяет произвести оптимизацию последовательности обслуживания с привязкой ко времени, обеспечивая минимизацию полетного времени и безусловное отсутствие полной разрядки аккумулятора любого из сенсорных элементов. В таком случае модель взаимодействует с моделируемой сетью, постоянно получая от нее актуальную информацию о состоянии, что свойственно «цифровым двойникам». Цифровые двойники могут отображать не только характеристики отдельных устройств, но и характеристики процессов. Современные производственные процессы весьма сложны и распределены в пространстве и во времени. Поэтому модели таких процессов должны учитывать распределенный характер объектов моделирования. Также проводится анализ взаимодействия цифровой модели с объектом моделирования, представляющим производственный процесс. Показано, что взаимодействие происходит через средства интеграции, обеспечивающие сопряжение модели и объекта моделирования.

Ключевые слова: цифровой двойник, цифровое моделирование, компьютерное моделирование, цифровая модель, среда моделирования, моделируемая сеть, система управления, прогнозирование

Введение

Все начинается с некоторого обобщенного понятия. Мы называем его «демиург», многие его называют «космос». В математике это понятие может быть отождествлено с понятием бесконечности. В рамках этого понятия выделим некоторые его составляющие, которые назовем объектами, – это могут быть скопления галактик или электроны. Не уходя в теорию относительности и параллельные миры, мы можем сказать, что каждый объект существует во времени и пространстве. Эти понятия характеризуют границы существования объекта. Каждому объекту присуще некоторое внутреннее состояние, от которого зависят его

* Лихтциндер Борис Яковлевич, профессор кафедры «Мультисервисные сети и информационная безопасность», доктор технических наук, профессор.
Ольберг Полина, студент.

свойства. Свойства можно рассматривать как некоторые проявления состояния объекта по отношению к внешней среде. С другой стороны, внешняя среда всегда оказывает на объект определенные воздействия, приводящие к изменению состояния объекта и, следовательно, изменению его свойств. Для описания состояний и свойств объекта мы часто создаем модель. Модель является другим объектом, однако к ней предъявляются требования: она должна быть адекватной, реализуемой и полезной. Модель практически никогда не отражает все свойства и все состояния объекта, она учитывает лишь те свойства и состояния, которые подлежат рассмотрению. Было бы неразумно рассматривать поведение человека в трамвае на молекулярном уровне. Адекватность модели всегда рассматривается по отношению к тем состояниям и тем свойствам, которые подлежат рассмотрению. Многие объекты способны изменять свои состояния не только в результате внешних воздействий, но также и в результате внутренних воздействий, которые происходят между частями, составляющими рассматриваемый объект. Объект, изменяющий свои состояния при отсутствии внешних воздействий, назовем свободным объектом, а процесс изменения состояний такого объекта назовем свободным процессом. Это аналогия свободным движениям в переходных процессах электротехнических систем. Внутренние воздействия в объекте почти всегда зависят от состояния объекта, в то время как внешние воздействия могут не зависеть от состояния объекта и в частном случае могут вообще отсутствовать. Такой объект назовем изолированным. Для реализуемости модели количество свойств, принадлежащих объекту, с точки зрения моделирования должно быть ограничено и конечным. Что же касается числа состояний, то для аналоговых объектов это совсем необязательно, однако если мы хотим сделать цифровую модель, то придется сделать конечным и число моделируемых состояний. Каждое состояние объекта характеризуется определенными значениями некоторой группы параметров. При моделировании должно рассматриваться некоторое конечное число параметров, характеризующих состояние объекта. Указанные параметры изменяются во времени и пространстве и, следовательно, изменение состояния объектов также происходит во времени и пространстве. Совокупность значений параметров, характеризующая состояние объектов в данный момент времени, определяет мгновенное состояние объекта. Внешние воздействия на объект в данный момент времени назовем мгновенным внешним воздействием. Совокупность мгновенных внешних воздействий и мгновенного состояния объекта определяют мгновенную ситуацию, в которой находится объект. Если изменение параметров, характеризующих состояние объекта и изменение внешних воздействий, носит непрерывный характер, то изменение ситуации также происходит непрерывно. Подмножество состояний объекта, для которых значения всех параметров, характеризующих его состояние, находятся в пределах заданных ограничений, назовем дискретным состоянием объекта, а подмножество ситуаций, для которых значения всех внутренних параметров и внешних воздействий находятся в пределах заданных ограничений, назовем дискретной ситуацией, в которой находится объект. Таким образом, каждая модель дискретной ситуации, в которой находится объект, может быть охарактеризована перечнем ограничений, в которых находятся параметры, характеризующие внутреннее состояние объекта, и перечнем параметров, характеризующих внешнее воздействие, а также перечнем ограничений на указанные параметры. Изменения параметров внутри заданных пределов не изменяет дискретную ситуацию, в которой находится объект. Выход хотя бы одного из параметров за рассматриваемые предельные зна-

чения и переход к другим предельным значениям приводят к изменению дискретной ситуации. Введение понятия дискретного состояния и дискретной ситуации позволяет значительно сократить объем информации, необходимой для их описания. С точки зрения моделирования главное состоит в том, что подобная дискретизация позволяет перейти от моделирования во времени к событийному моделированию. Событийное моделирование всегда значительно сокращает объемы требуемых вычислительных ресурсов.

Два или несколько объектов могут оказывать взаимные воздействия друг на друга. В этом случае они образуют более сложный объект, который мы назовем системой объектов. Число состояний системы равно произведению чисел соответствующих состояний каждого из объектов. Каналы, по которым объекты оказывают взаимные влияния, называют связями. В общем случае два объекта связаны двусторонними связями, однако связи могут быть и односторонними, если воздействием между объектами, т. е. воздействием одного объекта на другой, можно пренебречь.

Один и тот же объект может обладать различными видами энергии (тепловая энергия электромагнитных колебаний, механическая энергия). Существует великое множество различных форм проявления энергии, однако все они являются средством взаимодействия объектов. Объекты могут обмениваться информацией, носителями которой также являются различные формы энергии. Таким образом, мы можем говорить об информационно-энергетических воздействиях. Совокупность информационно-энергетических воздействий образует информационно-энергетическое поле, которое может излучаться или восприниматься объектом. Именно информационно-энергетическое поле является источником воздействий, причем энергетическое поле является носителем информационного поля. Все объекты, образующие систему, связаны между собой информационно-энергетическими связями, и чем эти связи прочнее, тем устойчивее становится система по отношению к внешним воздействиям. Если система состоит из большого числа равновеликих и равнозначных объектов, то связи между ними становятся достаточно слабыми, поскольку каждый объект оказывает на другой объект весьма незначительно влияние. Примером такой системы может служить рой комаров, в котором каждый комар совершает свое собственное, практически независимое от других комаров движение. Более устойчивой в указанном смысле окажется система, образующая рой пчел, следующий за своей маткой. Сила инстинкта заставляет пчел следовать за своей маткой, не давая рою разлетаться даже при достаточно сильном ветре. Другой моделью системы является, например, наша Солнечная система, где силы тяготения удерживают планеты от их схода со своих орбит. В системах, в которых объектами взаимоотношений являются люди, также действуют свои определенные информационно-энергетические связи.

Имитационное моделирование

Имитационное моделирование – это разработка и выполнение на компьютере программной системы, отражающей структуру и функционирование (поведение) моделируемого объекта или явления во времени [11]. Такую программную систему называют имитационной моделью этого объекта или явления. Объекты и сущности имитационной модели представляют объекты и сущности реального мира, а связи структурных единиц объекта моделирования отражаются в интерфейсных связях соответствующих объектов модели. Таким образом, *имитационная модель* – это упрощенное подобие реальной системы, либо существующей,

либо той, которую предполагается создать в будущем. Имитационная модель обычно представляется компьютерной программой, выполнение программы можно считать имитацией поведения исходной системы во времени.

В [10] сформулированы этапы имитационного моделирования.

Сначала разработчик модели должен определить, какие задачи будут решаться с ее помощью, т. е. моделированию в любой его форме должна предшествовать *формулировка цели моделирования*. От цели зависит то, какие процессы в реальной системе следует выделить и отразить в модели, а от каких процессов абстрагироваться, какие характеристики этих процессов учитывать, а какие – нет, какие соотношения между переменными и параметрами модели должны быть отражены в модели.

Следующий этап можно охарактеризовать как создание *концептуальной (содержательной)* модели. На нем происходит *структуризация* модели, т. е. выделение отдельных подсистем, определение элементарных компонентов модели и их связей на каждом уровне иерархии. В имитационном моделировании структура модели отражает структуру реального объекта моделирования на некотором уровне абстракции. Следующий этап – это *калибровка, или идентификация* модели, т. е. сбор данных и проведение измерений тех характеристик в реальной системе, которые должны быть введены в модель в виде значений параметров и распределений случайных величин.

Далее необходимо выполнить *проверку правильности* модели (ее *валидацию*), которая состоит в том, что выход модели проверяется на нескольких тестовых режимах, в которых характеристики поведения реальной системы известны либо очевидны.

Последним этапом работы с моделью является *компьютерный эксперимент*, т. е. собственно то, ради чего и создавалась модель. В простейшем случае компьютерный эксперимент – это запуск на исполнение модели при различных значениях ее существенных параметров (факторов) и наблюдение ее поведения с регистрацией характеристик поведения. Этот вид использования модели называется прогнозом, или экспериментом типа «*что будет, если...*».

Прогнозирование

Важнейшими этапами любого цикла управления являются формирование управляющего воздействия и контроль за результатами этих воздействий. Первый этап выполняется на основе выработки и принятия решений, второй нужен для завершения цикла управления и перехода к следующей итерации. Условием успешности выполнения указанных этапов является наличие актуальной информации о параметрах состояния управляемой системы, взаимодействующих систем и условиях их взаимодействия. В простейшем случае указанная информация получается путем периодического контроля параметров управляемой системы с последующим сравнением с требуемыми значениями указанных параметров и выработкой очередного управляющего воздействия. Вследствие инерционности управляемой системы, а также ее распределенности в пространстве информация о ее параметрах может поступать с запаздыванием, что приводит к ухудшению качества процесса управления.

Для решения проблемы необходимо иметь возможность прогнозирования изменений состояния системы на некоторый период времени, обеспечивающий опережение принятия решения, то есть создать некоторую опережающую обратную связь. Основа такой связи – прогнозирование состояния системы на некото-

рый период времени, опережающий ее текущее положение с учетом реализации управляющих воздействий [1 – 3]. Иногда прогнозирование разделяют на активное и пассивное. Первое обеспечивает оценку возможных последствий принимаемых решений, то есть дает ответ на вопрос «что будет, если сделать то-то». Второе оценивает возможное состояние системы через некоторое время, если условия ее функционирования останутся неизменными, то есть отвечает на вопрос «что будет, если ничего не предпринимать». Для управления динамическими системами целесообразно использовать активное прогнозирование. Однако для систем с высоким уровнем собственной инерционности, а также для распределенных в пространстве систем реализация управления на основе активного прогнозирования затруднена тем, что информация поступает с большим запаздыванием и к моменту поступления может стать неактуальной.

Цифровые двойники

Активный прогноз поведения системы можно осуществить с помощью моделирования.

Компьютерное моделирование позволяет не только получить прогноз, но и определить, какие управляющие воздействия на систему приведут к благоприятному развитию событий между компонентами модели, являющимися отражением реальных связей [4]. То есть компьютерная модель может быть частью системы управления объектом. Для этого вычислительные процессы в модели должны проходить быстрее, чем происходят изменения объекта в реальном времени.

С повышением динамичности управляемых систем, развитием скоростных компьютерных сетей и методов работы с большими массивами информации Big Data [5] такая возможность появилась. Подобные модели получили название «цифровые двойники» [6, 7].

В промышленных и научных источниках определения «цифрового двойника» отличаются. Согласно некоторым из них, цифровой двойник является интегрированной моделью уже построенного продукта, которая призвана содержать информацию обо всех дефектах изделия и регулярно обновляться в процессе физического использования [5]. Другим распространенным определением является цифровая модель, полученная на основании информации от датчиков, установленных на физическом объекте, которая позволяет симулировать поведение объекта в реальном мире [4]. Однако, по нашему мнению, важным отличием цифрового двойника от обычной модели является наличие интерфейсных связей, аналогичных тем, с помощью которых моделируемый объект общается с внешним миром. Если поведение таких объектов носит непрерывный характер, результаты цифрового моделирования должны быть преобразованы в аналоговую форму. Результаты моделирования могут передаваться объекту через оператора. В этом случае оператор оказывается включенным в цепь управления. Параметры поведения объекта, полученные в результате управляющих воздействий, преобразуются в цифровую форму и поступают на входы цифровой модели. После завершения очередного этапа моделирования полученные цифровые результаты преобразуются в аналоговую форму и поступают на входы объекта управления в виде управляющих воздействий. Процесс циклически повторяется до достижения желаемого состояния управляемого объекта.

На рис. 1 представлена обобщенная схема применения модели в виде цифрового двойника в системе управления. В быстродействующую цифровую мо-

дель, отражающую ситуацию объекта моделирования, вводятся исходные управляющие данные. Полученные результаты моделирования анализируются, изменяются и вновь поступают на вход модели. Таким образом осуществляется активное прогнозирование и получение оптимального решения, которое через средства сопряжения формирует управляющие воздействия, поступающие на объект управления с цифрового двойника в системе управления.

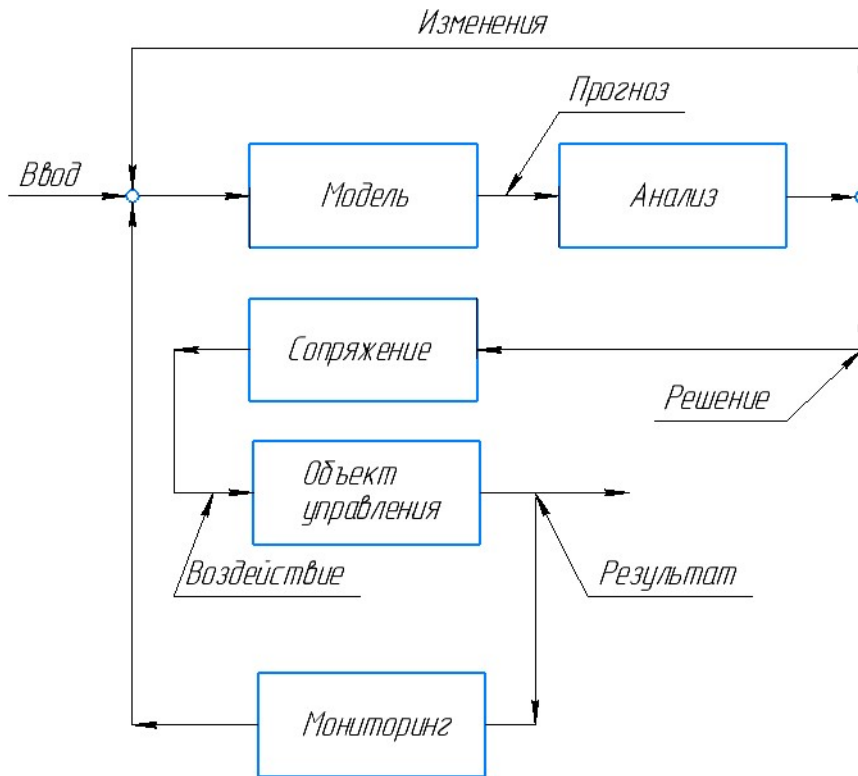


Рис. 1.Обобщенная схема применения модели в виде цифрового двойника

Производится постоянный мониторинг результатов указанных воздействий. Данные мониторинга вновь вводятся в модель, и цикл управления повторяется. Быстродействие модели обеспечивает возможность выполнения «обратной» задачи моделирования и получение оптимального решения в реальном масштабе времени. В качестве средств сопряжения модели с объектом управления может выступать оператор. Наличие цифрового двойника обеспечивает получение оператором оптимального решения при выборе управляющих воздействий.

Применяемый при создании цифровых двойников математический аппарат зависит от сложности объекта и степени формализуемости задачи.

Различают два вида моделей, применяемых при создании цифровых двойников: это модели временных рядов и модели предметной области [3].

1. Модели временных рядов – это такие модели, которые обеспечивают поиск зависимостей будущих значений состояний объекта от истории изменения этих состояний и построение прогноза по этим зависимостям. Эти модели универсальны для различных предметных областей и не зависят от физической природы переменных данного ряда.

2. Модели предметной области используют законы данной предметной области. В них используются математические, логические и вероятностные свойства, присущие конкретной предметной области. Среди моделей предметной области особо следует выделить системы, использующие агентное моделирование.

Ниже мы рассмотрим некоторые примеры реализации концепции цифровых двойников.

Цифровые двойники производственных процессов

Цифровые двойники могут отображать не только характеристики отдельных устройств, но и характеристики процессов. Современные производственные процессы весьма сложны и распределены в пространстве и во времени. Поэтому модели таких процессов должны учитывать распределенный характер объектов моделирования.

Рис. 2 отображает взаимодействие цифровой модели с объектом моделирования, представляющей производственный процесс. Взаимодействие происходит через средства интеграции, обеспечивающие сопряжение модели и объекта моделирования. Датчики, распределенные по всему производственному процессу, создают данные, характеризующие прохождение процесса в реальном мире.

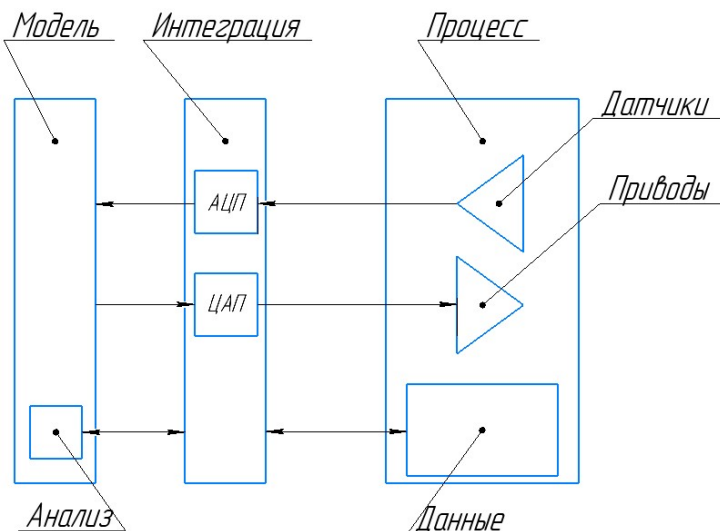


Рис. 2. Взаимодействие цифровой модели с процессом

Аналоговые сигналы от датчиков цифруются с помощью аналого-цифрового преобразователей, включенных в состав средств интеграции. Средства интеграции передают данные в цифровую модель, получают цифровые результаты моделирования и при необходимости преобразуют их в аналоговую форму для передачи исполнительным механизмам (приводам) производственного процесса. Средства моделирования включают анализ результатов моделирования и производственных данных. Результаты анализа обеспечивают своевременное внесение изменений в модель и при необходимости внесение изменений в производственный процесс. Приложение цифрового двойника постоянно анализирует входящие потоки данных. С течением времени анализ может выявить неприемлемые тенденции в фактических характеристиках производственного процесса в кон-

кретном измерении по сравнению с идеальным диапазоном допустимых характеристик. Такое сравнительное понимание может вызвать рассмотрение и возможное изменение некоторых аспектов производственного процесса в физическом мире [5].

Цифровая модель запаздывания видеотрафика

Этот цифровой двойник использует модель первого типа.

Чаще всего технологии потокового вещания используют адаптивную потоковую передачу данных, основанную на HTTP (англ. HAS). Потоковая передача видеотрафика является наиболее значимым сервисом при оказании операторами связи услуг Интернет-TV и YouTube [8, 9].

Имеется множество различных методов управления видеотрафиком. Как правило, все они основаны на буферизации принимаемого видеопотока перед его воспроизведением.

Принимаемые пакеты буферизируются в специальной буферной памяти, из которой непрерывно извлекаются и поступают на воспроизведение в реальном масштабе времени. Основная цель управления состоит в поддержании постоянным в буферной памяти некоторого объема пакетов, который обеспечивает непрерывное воспроизведение в течение заданного интервала времени.

Случайный характер изменения загрузки сети приводит к случайному процессу изменения задержек пакетов видеотрафика и необходимости управления размерами буфера на приемной стороне. Качество регулирования размеров буфера может быть повышено, если в системе управления постоянно учитывать указанные задержки и осуществлять их прогнозирование. Реализация процесса введения сигнала опережения поясняется на рис. 3. Для определения задержек трафика в сети в нее периодически поступают тестирующие пакеты от тестера (в качестве тестирующих могут быть использованы сигналы запроса пакетов). Пакеты, пройдя по сети до сервера и возвратившись обратно, обеспечивают определение круговых задержек сети.

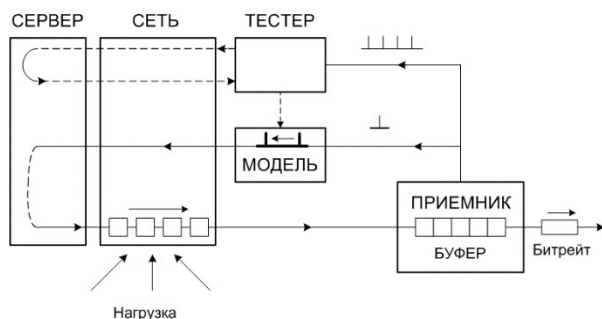


Рис. 3. Введение прогноза в цепь обратной связи

Получаемая информация обрабатывается, и в результате обработки формируется модель процесса запаздывания. На основании полученной модели производится прогнозирование запаздывания на расчетный момент подачи команды запроса очередного блока видеотрафика. Команда запроса подается с опережением (по отношению к расчетной) на величину спрогнозированного запаздывания. В качестве модели процесса изменения задержек в сети могут быть выбраны

вейвлеты или разностные интерполяционные формулы (например, формула Ньютона). Практика показала, что вполне можно ограничиться разностями третьего порядка.

Подзарядка аккумуляторов беспроводных сенсорных сетей (БСС)

Еще одним примером является процесс управления беспилотным летательным аппаратом при зарядке аккумуляторов (БСС). Техническое обслуживание и энергообеспечение элементов БСС представляют особые трудности для пространственно удаленных узлов сети. Эти элементы обычно питаются от автономных источников электроэнергии, нуждающихся в периодической подзарядке [12, 13].

Перспективной технологией подзарядки аккумуляторных батарей, позволяющей значительно увеличить срок службы элементов БСС, в настоящее время является способ подзарядки аккумуляторных батарей в сенсорных сетях при помощи беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) [14]. Рассматриваемый способ основан на концепции цифровых двойников.

В качестве цифрового двойника здесь выступает показанная на рис. 4 цифровая модель беспроводной сети.

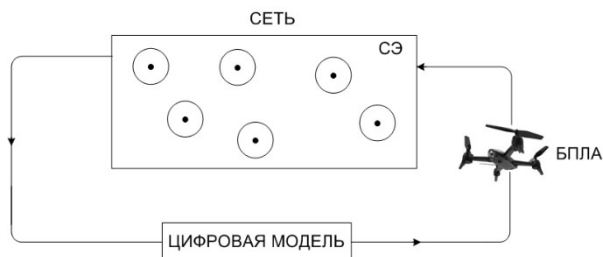


Рис. 4. Замена аккумуляторов сенсорных элементов БСС с помощью БПЛА

Рассмотрим процесс замены аккумуляторных батарей, реализующий этот способ. Имеется сеть сенсорных элементов (СЭ) с перезаряжаемыми аккумуляторными батареями. Аккумуляторы заменяются путем доставки и замены на стационарной станции сенсорных узлов с помощью БПЛА. Необходимо определить последовательность замены аккумуляторов с тем, чтобы в процессе замены ни один из аккумуляторов не успевал полностью разрядиться и при этом время, затраченное БПЛА в работе (коэффициент загрузки БПЛА), было минимальным.

На центральной базе всегда имеются готовые для замены СЭ с заряженными аккумуляторами. На центральной базе имеется поступающая по сети информация о степени зарядки аккумуляторов всех СЭ.

Перед началом полетов производится моделирование всего полного цикла обслуживания.

1. Текущие значения уровня заряда аккумуляторов располагаются в порядке их возрастания и выбирается элемент с минимальным значением.

2. Моделируется полное время полета и обслуживания указанного элемента, а его степень заряженности на модели устанавливается максимальной.

3. Моделируется процесс разрядки аккумуляторов всех остальных СЭ в течение времени полного полета (с возвратом) БПЛА и обслуживания сенсорного

устройства. Затем происходит переход к пункту 1, и процесс повторяется до окончания моделирования подзарядки аккумуляторов всех СЭ.

После окончания цикла моделирования выбирается СЭ с минимальным уровнем остаточного заряда и определяется остаточное время, в течение которого данный СЭ способен работать (все остальные элементы имеют большие остаточные времена). Если из времени прохождения полного цикла вычесть остаточное время, то получим гарантированное допустимое время ожидания полета с начала процесса моделирования. В течение указанного времени БПЛА может находиться на базе. Указанное время ожидания является гарантированным нижним пределом, поскольку при моделировании использовались максимально допустимые скорости разрядки аккумуляторов. БПЛА не производит полет и продолжает ожидать. После окончания промежутка времени ожидания в модель вновь поступают из сети все необходимые данные о состоянии СЭ и цикл моделирования повторяется. Так происходит итерационное повторение циклов моделирования до тех пор, пока разность результатов, полученных между соседними циклами, не достигнет установленного предела. После окончания моделирования становится известным номер СЭ, который требуется обслужить в первую очередь, и такой элемент обслуживается БПЛА.

После окончания обслуживания указанного СЭ процесс моделирования повторяется сначала и циклически обслуживаются все СЭ.

Высокая скорость цифрового моделирования позволяет произвести оптимизацию последовательности обслуживания сенсорных элементов СЭ с ее привязкой ко времени, обеспечивая минимизацию полетного времени и безусловное отсутствие полной разрядки аккумулятора любого из сенсорных элементов. При этом модель взаимодействует с моделируемой сетью, постоянно получая от нее актуальную информацию о состоянии, что свойственно цифровым двойникам.

Заключение

Цифровое моделирование является мощным орудием изучения свойств действующих или проектируемых объектов. Если процессы в действующей модели протекают быстрее, чем в реальном объекте, то, снабдив модель интерфейсными средствами, с помощью которых моделируемый объект взаимодействует с внешней средой, мы получаем цифровое устройство со свойствами, адекватными моделируемому объекту. Такая модель может быть встроена в реальную систему и называется цифровым двойником. Если быстродействие цифрового двойника выше, чем быстродействие моделируемого объекта, то появляется возможность прогнозирования протекающих в объекте процессов и использования результатов прогнозирования в системах автоматического управления этими процессами. Более расширенное понимание цифрового двойника вкладывается в среду моделирования производственных процессов. Указанная среда должна содержать помимо средств непосредственного моделирования также и средства анализа результатов воздействия на объект управления, реализующие обратную связь.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Тиханьчев О.В., Саятин О.В.* Оперативное прогнозирование развития обстановки как основа успешного управления применением войск (сил) // Военная мысль. 2015. № 4. С. 3–7.
2. *Новиков Д.А., Чхартшвили А.Г.* Активный прогноз. М.: ИПУ РАН, 2002. 101 с.

3. *Тиханычев О.В.* Прогнозирование при управлении динамическими системами // Программные продукты и системы. Т. 30. № 1. 2017. С. 40–44.
4. Википедия, Цифровой двойник [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Цифровой_двойник
5. *Гончаров А.С., Саклаков В.М.* Цифровой двойник: обзор существующих решений и перспективы развития технологии // Материалы Всероссийской научно-практической конференции «Информационно-телекоммуникационные системы и технологии». 2018. С. 24–26.
6. *Reid J., Rhodes D.* Digital system models: An investigation of the nontechnical challenges and research needs, Conference on Systems Engineering Research, Systems Engineering Advancement Research Initiative, Massachusetts Institute of Technology, 2016.
7. *Grieves M.* Origins of the Digital Twin Concept, Springer, Montreal (2016). Pp. 226–242. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.26367.61609>. enterprises.
8. *Akhshabi S., Anantakrishnan L., Dovrolis C., Begen Ali C.* What happens when HTTP adaptive streaming players compete for bandwidth. In Proc. ACM Workshop on Network and Operating System Support for Digital Audio and Video (NOSSDAV'12), Toronto, Ontario, Canada, 2012.
9. *Akhshabi S., Anantakrishnan L., Dovrolis C., Begen Ali C.* Server-based traffic shaping for stabilizing oscillating adaptive streaming players // In Proc. ACM Workshop on Network and Operating System Support for Digital Audio and Video (NOSSDAV'13), 2013.
10. *Боев В.Д.* Компьютерное моделирование. Пособие для практических занятий, курсового и дипломного проектирования в AnyLogic7. СПб.: ВАС, 2014. 432 с.
11. *Коровин А.М.* Моделирование систем: учебное пособие к лабораторным работам. Челябинск: ЮрГУ, 2010. 47 с.
12. *Scrosati B., Neat R.J.* Lithium polymer batteries, in: Applications of Electroactive Polymers, Springer, 1993. Pp. 182–222.
13. Nickel metal hydride battery. <http://www.batteryspace.com/nimhpacks24-48v.aspx>
14. *Лухтциндер Б.Я., Маслов О.Н.* Способ подзарядки аккумуляторов в беспроводной сенсорной сети. Описание изобретения по Патенту № 2730478 от 24.08.2020.

Статья поступила в редакцию 11 ноября 2022 г.

MODELING AND DIGITAL TWIN

B.Ya. Lichtsinder, P.A. Olberg*

Volga State University Telecommunications and Informatics
23, L. Tolstogo st., Samara, 443100, Russian Federation

E-mail: lixt@psuti.ru, polinaolberg@gmail.com

Abstract. *This article considers various types of modeling and the concept of "digital double", as well as their examples of the concept of implementation. For example, computer simulations not only provide a prediction, but also identify which control effects on the system will lead to favorable developments between the link components of the model. In this case, digital simulation allows to optimize the service sequence of sensor elements SE with its time-bound, ensuring minimization of flight time and unconditional absence of complete battery discharge of any of the sensor elements. In this case, the model interacts with the network being modeled, constantly receiving from it up-to-date information about the state, which is characteristic of «digital duplicates». Digital doubles can display not only the characteristics of individual devices, but also process characteristics. Modern production processes are very complex and distributed in space and time. Models of such processes should therefore consider the distributed nature of the modelling objects. The interaction of the digital model with the model object representing the production process is also analyzed. The interaction takes place through integration tools that link the model with the model object.*

Keywords: *digital double, digital modeling, computer modeling, digital model, modelling environment, simulated network, control system, forecasting*

REFERENCES

1. *Tihannichev O.V., Sayapin O.V.* Operational forecasting of the development of the situation as the basis of successful management of the use of troops (forces) // Military thought. 2015. 4. Pp. 3–7.
2. *Novikov D.A., Chkhartishvili A.G.* Active prognosis. M.: Publishing House ISU RAS, 2002. 101 p.
3. *Tihannichev O.V.* Forecasting in the management of dynamic systems // Software products and systems. T. 30. 2017. Pp. 40–44.
4. Wikipedia, Digital Duplicate [Electronic Resource]. Access Mode: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Cifrovo_@CAP_FIRST\\$double](https://ru.wikipedia.org/wiki/Cifrovo_@CAP_FIRST$double)
5. *Potcharov A.S., Saklakov V.M.* Digital Double: a review of existing solutions and prospects of technology development. elibrary.ru (2018). Article in the collection of works of the All-Russian scientific and practical conference.
6. *Reid J., Rhodes D.* Digital system models: An investigation of the nontechnical challenges and research needs, Conference on Systems Engineering Research, Systems Engineering Advancement Research Initiative, Massachusetts Institute of Technology, 2016.
7. *Grieves M.* Origins of the Digital Twin Concept. Springer, Montreal (2016). Pp. 226–242. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.26367.61609>. enterprises.
8. *Akhshabi S., Anantakrishnan L., Dovrolis C., Begen Ali C.* What happens when HTTP adaptive streaming players compete for bandwidth. In Proc. ACM Workshop on Network and Operating System Support for Digital Audio and Video (NOSSDAV'12), Toronto, Ontario, Canada, 2012.

* *Boris Ya. Lichtsinder (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.
Polina A. Olberg, Student.*

9. *Akhshabi S., Anantakrishnan L., Dovrolis C., Begeen Ali C.* Server-based traffic shaping for stabilizing oscillating adaptive streaming players. In Proc. ACM Workshop on Network and Operating System Support for Digital Audio and Video (NOSSDAV'13), 2013].
10. *Boev V.D.* Computer modeling: Handbook for practical training, coursework and diploma design in AnyLogic7. St. Petersburg: VAS, 2014. 432 p.
11. *Korovin A.M.* Systems Modeling: a textbook for laboratory work Chelyabinsk: Yurgu Publishing Center, 2010. 47 p.
12. *Skrosati B., Careful R.J.* Lithium Polymer Batteries, in: Applications of Electroactive Polymers, Springer, 1993. Pp. 182–222.
13. Nickel-metal hydride battery. <http://www.batteryspace.com/nimhpacks24-48v.aspx>
14. *Lichtsinder B.Ya., Maslov O.N.* A method of recharging batteries in a wireless sensor network. Description of the invention according to Patent No. 2730478 dated 08/24/2020.