

Инструментальные средства разработки моделей технических комплексов

С.Е. Базаева¹, Я.А. Зотов²

¹ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН, Москва, Россия, bazaeva@niisi.msk.ru;

²ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН, Москва, Россия, zotov@niisi.ras.ru

Аннотация. В статье рассматриваются различные способы разработки моделей технических комплексов и анализируются достоинства и недостатки применяемых методов моделирования. На основе проведенного исследования авторами предлагается подход к созданию инструментальной среды моделирования, который позволяет конструировать стенды для широкого круга технологических процессов в различных областях применения, функционирующие в режиме реального времени. Инструментальные средства, используемые при моделировании, включают программное обеспечение и вычислительную аппаратуру.

Ключевые слова: технический комплекс, стенд полунатурного моделирования

1. Технический комплекс и его компоненты

Современный технический комплекс – это искусственно созданный объект, предназначенный для удовлетворения определенной потребности и существующий как процесс взаимодействия с компонентами окружающей среды, в результате которого производится желаемый результат. Технический комплекс (ТК) имеет сложную структурно-функциональную организацию и управляется с помощью автоматизированной системы управления. Элементами технического комплекса являются технологические процессы.

Технологический процесс – это часть производственного процесса, содержащая целенаправленные действия по изменению и/или определению состояния предмета труда [1]. В зависимости от области применения технического комплекса и свойств предмета труда технологический процесс (ТП) может быть промышленным, вычислительным, измерительным и т. п. Данные процессы функционально и логически связаны между собой, и за счет этого работа комплекса в целом направлена на достижение определенного результата. Как правило, технологические процессы в составе ТК образуют иерархию – более «сложный» ТП можно представить как совокупность последовательно или параллельно исполняемых более «простых».

Невозможно представить себе функционирование современного ТК без использования автоматизированной системы управления (АСУ). Автоматизированная система управления ТК – это совокупность аппаратных и программных средств, а также персонала, предназначенная для управления различными технологическими процессами в рамках технического комплекса. Каждый ТП с точки зрения АСУ является объектом

управления.

Физически в составе ТК может быть задействовано различное оборудование, средства контроля и управления (в том числе, вычислительная техника и программное обеспечение), возможно, окружающая среда (например, при добыче полезных ископаемых), а также обслуживающий персонал.

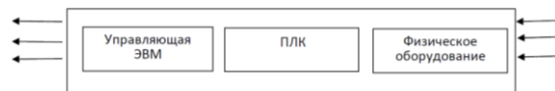


Рис. 1. Пример структуры технического комплекса

Примерами ТК могут служить: комплекс по добыче и транспортировке нефти, атомная электростанция, система управления летательным аппаратом, интернет-магазин со складом товаров и службой доставки, система видеонаблюдения вокзала и привокзальной территории и т. п. Таким образом, современный технический комплекс – это многоуровневая динамическая система, состоящая из взаимодействующих различных сущностей.

В простейшем случае технический комплекс состоит из ЭВМ, управляющей подключенным физическим оборудованием (датчиками, исполнительными устройствами, индикаторами и пр.).

Более сложная конфигурация может включать управляющую ЭВМ (возможно, со SCADA-системой), дополнительную ЭВМ для обеспечения интерфейса с физическим оборудованием (например, программируемый логический контроллер, ПЛК) и внешние устройства (рис. 1). Программное обеспечение всех используемых ЭВМ также входит в состав технического комплекса.

Большие технические комплексы обычно включают несколько подсистем, каждая из которых реализует определенную функцию в составе

комплекса и имеет структуру, аналогичную показанной на рис. 1.

2. Модель технического комплекса

Моделирование является неотъемлемой частью жизненного цикла современного технического комплекса, включая этапы проектирования, исследования, модификации и штатной эксплуатации.

Под моделью технического комплекса будем подразумевать такой объект, который способен замещать данный комплекс за счет обеспечения важных (с точки зрения решаемых задач) характеристик и свойств оригинала [2].

Классификация моделей, а также место и роль модели на всех этапах жизненного цикла объекта-оригинала определены государственными стандартами Российской Федерации, в том числе:

- ГОСТ Р 57700.22–2020 «Компьютерные модели и моделирование. Классификация» [3];
- ГОСТ Р 57700.37–2021 «Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения» [4];
- ГОСТ 16504–81 «Система государственных испытаний продукции. Испытания и контроль качества продукции. Основные термины и определения» [5].

Важнейшим качеством модели, обеспечивающим достоверность результатов моделирования, является адекватность поведения модели поведению объекта-оригинала (с учетом условий задачи, решаемой при моделировании).

Например, если программное обеспечение объекта-оригинала в штатном режиме должно работать с определенной скоростью (гарантировать время реакции на событие, соответствие реальному времени и т.п.), необходимо обеспечить соответствующие условия и в процессе моделирования.

При создании модели важно также учитывать экономический аспект – затраты не должны радикально увеличивать бюджет объекта-оригинала; напротив, модель должна способствовать экономии средств, особенно при использовании ее в качестве прообраза на этапе проектирования и на этапе испытаний.

Еще один существенный момент связан с процедурами верификации и валидации модели. Необходимо разрабатывать данные процедуры параллельно с созданием модели; в противном случае достоверность результатов моделирования будет вызывать сомнения.

3. Методы моделирования

Основными методами моделирования являются:

- физическое моделирование;
- математическое моделирование;
- полунатурное моделирование.

При физическом моделировании для каждого объекта-оригинала создается уникальная модель, например, модель самолета для исследования характеристик в аэродинамической трубе или полноразмерная модель кузова автомобиля из пластилина, чтобы визуально оценить дизайн. Изготовление сложных физических моделей требует значительных затрат (а в большинстве случаев создание такой модели невозможно), поэтому, несмотря на определенные преимущества, данный метод имеет очень ограниченную область применения.

Метод математического моделирования имеет большую историю, применяется очень широко и в настоящее время подразумевает использование ЭВМ [6]. Данный метод требует формализации поведения объекта-оригинала, например, представления в виде системы уравнений. Тогда, указав начальные условия, можно выполнить расчет и узнать, каким будет состояние объекта-оригинала в заданный момент времени. Однако современные технические комплексы настолько сложны по составу и функциональным связям, что с трудом поддаются формализации, поэтому на практике математическое моделирование чаще всего выполняется на уровне отдельного технологического процесса.

Математическая модель с высокой степенью детализации, требующая большого объема вычислений, обычно функционирует в масштабированном модельном времени, отличающемся от реального, что также необходимо учитывать при анализе результатов ее использования.

Потребность в моделировании технических комплексов со сложными структурными и функциональными связями привела к развитию отдельной ветви математического моделирования – методу имитационного моделирования.

В случае имитационного моделирования структура модели соответствует структуре компонентов (подсистем) объекта-оригинала. Способы формализации компонентов могут учитывать их особенности и быть различными для разных компонентов, например, вместо системы уравнений задействуют наборы данных, полученных экспериментальным путем в ходе других исследований или полученных для аналогичного объекта. Время может быть масштабированным.

Метод имитационного моделирования предполагает проведение множества экспериментов,

в результате которых получается статистическая оценка параметров моделируемого объекта. Функциональные связи внутри имитационной модели реализуют с помощью передачи данных между моделями подсистем. Более детальное отражение характеристик и свойств объекта-оригинала, достигаемое методом имитационного моделирования по сравнению с «чисто математическим» методом, повышает адекватность модели оригиналу.

Полунатурное моделирование – это следующий шаг по совершенствованию модели в плане соответствия объекту-оригиналу. Метод полунатурного моделирования предполагает частичное использование реальной аппаратуры в составе модели (моделирующего комплекса). Включение штатных компонентов объекта-оригинала в состав модели освобождает от необходимости детализации математической модели и одновременно обеспечивает более полное соответствие оригиналу – ведь согласно словам, которые приписывают Норберту Винеру, наиболее совершенной моделью кота является такой же кот, а лучше – он сам.

В случае полунатурного моделирования технического комплекса под реальной аппаратурой прежде всего подразумеваются штатные ЭВМ, входящие в состав технического комплекса и оснащенные штатным программным обеспечением, а также (при технической возможности) прочие электронные/электрические компоненты объекта-оригинала: интерфейсные устройства, периферийные электронные устройства, пульта, индикаторы и т.п.

Данный метод широко применяется, например, при создании тренажеров для обучения операторов: обучаемое лицо использует штатный пульт управления, а математическая модель в реальном масштабе времени обеспечивает функционирование пульта с учетом действий оператора.

Метод полунатурного моделирования с использованием штатной вычислительной аппаратуры позволяет также добиться функционирования программного обеспечения объекта-оригинала в штатном режиме, что повышает качество результатов моделирования.

Пример структуры моделирующего комплекса показан на рис. 2. Здесь имитационная полунатурная модель ТК повторяет структуру объекта-оригинала (рис. 1) – в модели представлена штатная вычислительная аппаратура (в технически допустимом объеме) и соответствующее программное обеспечение. Модель технического комплекса также включает ЭВМ, на которой работают математические модели компонентов объекта-оригинала, не представленных натурно.



Рис. 2. Структура полунатурной имитационной модели технического комплекса

Заметим, что некоторые элементы физического оборудования в модели, представленной на рис. 2, могут присутствовать натурно – к их числу относятся, например, световые индикаторы и другие аналогичные «несложные» устройства, если они являются просто выходными по отношению к ПЛК.

Другие устройства, которым для функционирования в составе модели все-таки необходима имитация входных и выходных данных, после технической доработки могут сохранить штатный интерфейс с ПЛК; тогда математическое моделирование для них будет происходить на более низком уровне.

Сохранение штатных интерфейсов в возможно полном объеме особенно важно при работе с объектами, функционирование которых требует планирования времени на уровне сотых долей секунды, поскольку математическое моделирование процессов на столь детальном уровне чрезвычайно затруднено или невозможно.

4. Стенд для полунатурного моделирования технического комплекса

Совокупность всех вычислительных средств, дополнительной аппаратуры и программного обеспечения, используемая при моделировании функционирования технического комплекса, образует стенд технического комплекса [7].

Стенд, на котором работает имитационная полунатурная модель технического комплекса, включает:

- штатное программное обеспечение и вычислительную аппаратуру объекта-оригинала (частично, в объеме, допустимом с технической точки зрения);
- математические модели компонентов объекта-оригинала, не представленных натурно, и ЭВМ, на которых исполняются эти математические модели;
- аппаратуру, имитирующую функционирование физических устройств объекта-оригинала (например, разрывные коробки на кабелях для передачи данных, генераторы сигналов (в том числе помех для беспроводной связи), пульта, индикаторы и т.п.); наличие и способы использования данной аппаратуры, а также соответствующего программного обеспечения зависят от решаемой задачи;
- инструментальную программно-аппаратную

среду для разработки, исследования и эксплуатации модели и ЭВМ, на которой функционирует данная среда;

- базу данных для результатов моделирования и ЭВМ, на которой функционирует база данных.

Логическая схема стенда для полунатурного моделирования работы технологического процесса показана на рис. 3. В состав стенда включены штатные ЭВМ объекта-оригинала с функционирующим на них штатным программным обеспечением. Эти ЭВМ связаны с базой данных, в которую помещается информация о функционировании штатных элементов стенда. Такая возможность накопления рабочих данных может присутствовать и в составе объекта-оригинала. Тогда накопление данных о функционировании модели и стенда (получаемых от инструментальной среды и средств имитации физического оборудования) следует производить либо в единой (штатной) базе данных, либо в другой базе данных, специально предназначенной для этих целей. Выбор варианта использования базы данных зависит от конкретного случая применения.

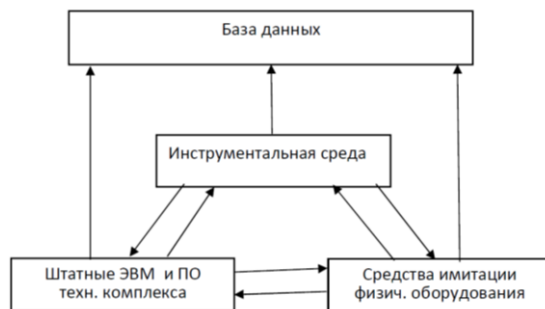


Рис. 3. Логическая схема стенда для моделирования работы технологического процесса

Средства имитации физического оборудования потенциально способны выполнять двусторонний обмен данными со штатным оборудованием, включенным в состав стенда. Роль средств имитации физического оборудования состоит в том, чтобы «подыграть» штатному оборудованию и ПО.

Состав, назначение и алгоритм функционирования средств имитации зависит от конкретной решаемой задачи и технических возможностей.

Средства имитации физического оборудования включают математические модели устройств объекта-оригинала, не представленных на стенде натурно, а также штатные устройства, адаптированные для стенда, с (частично) сохраненным штатным интерфейсом и специальные устройства для управления процессом моделирования. Примерами адаптированных устройств могут служить световые индикаторы, экраны для визуализации, пульта управления,

микропроцессорные блоки, подключенные к промышленному интернету вещей, и прочие подобные устройства, специальные устройства — это, например, разрывные коробки, имитирующие отказ при передаче данных, имитаторы помех беспроводной связи. Данные о функционировании средств имитации физического оборудования могут быть в случае необходимости заархивированы и сохранены в базе данных.

Инструментальная программно-аппаратная среда предназначена для разработки, исследования и эксплуатации модели. Инструментальная среда может работать в двух режимах: в технологическом режиме и в режиме моделирования.

В технологическом режиме выполняется настройка параметров программ, имитирующих работу устройств, не представленных на стенде натурно, а также прочих аппаратно-программных параметров стенда: начальных условий, режимов передачи данных, протоколирования, отображения информации и т.п.

В режиме моделирования инструментальная среда служит для запуска/остановки модели, накопления данных и оперативного воздействия на ход моделирования, например, для имитации аварийных ситуаций.

5. Инструментальные среды для разработки моделей технических комплексов

Имитационное моделирование имеет большую историю и в настоящее время является одним из самых распространенных инструментов исследования сложных систем, поэтому на рынке программного обеспечения присутствует более сотни продуктов, реализующих методы имитационного моделирования [8].

Разработками первого поколения (1950-е гг.) были модели на языках высокого уровня FORTRAN и ALGOL без какой-либо специальной поддержки. Затем в 1960–1965 гг. появились языки моделирования GPSS (язык транзактов), SIMULA (язык процессов), SIMSCRIPT (язык событий) и прочие. Наконец, в настоящее время имитационное моделирование стало доступным не только высококвалифицированным программистам и разработчикам, но и более широкому кругу пользователей за счет автоматизации этапов построения модели и активного применения мультимедийных технологий, включая трехмерную графику и анимацию. Современные системы включают также возможности планирования экспериментов, управления моделированием, анализа результатов и поиска оптимальных решений, имеют средства технологической поддержки распределенного имитационного моделирования в сетях ЭВМ.

Среди широко применяемых программных продуктов можно выделить два основных варианта систем: специализированные компьютерные среды имитационного моделирования (например, AnyLogic, GPSS World) и стандартные математические системы, в которые включены средства имитационного моделирования (например, системы Matlab, Mathcad, Mathematica с пакетом Simulink). Также встречаются системы, ориентированные на отдельные виды имитационного моделирования (агентное, динамическое, дискретно-событийное моделирование) или на конкретные области применения (технологические процессы химического производства, конструирование в машиностроении и т.д.).

Развитые имитационные среды не требуют программирования в виде последовательности команд – пользователи формируют с помощью графического интерфейса модель из библиотечных модулей, и/или заполняют специальные формы. Во многих случаях среда разработки обеспечивает также возможность визуализации процесса имитации.

В отличие от систем имитационного моделирования, ориентированных на математические модели, среда полунатурного моделирования сама по себе не допускает широкого «универсального» применения, поскольку она должна включать определенный набор реальной аппаратуры для исследования конкретного объекта-образца.

Расширение области применения среды полунатурного моделирования происходит за счет обеспечения доступности большого набора аппаратных интерфейсов, охватывающего достаточно широкий круг задач. Для формирования библиотек математических моделей задействуют многофункциональные среды математического моделирования, например Matlab с пакетом Simulink. Примером такой среды является комплекс полунатурного моделирования КПМ Ритм [9].

По мере увеличения числа разработок, связанных с задачей имитационного моделирования (как для полунатурных, так и для чисто математических реализаций), возникла задача обеспечения повторного использования компонентов и их интероперабельности. Для решения этой проблемы предлагается технология HLA (High Level Architecture), оформленная в виде стандарта IEEE1516 [10, 11]. Данная технология представляет собой совокупность методик, соглашений и алгоритмов, которые позволяют задействовать при разработке новой среды созданные ранее имитационные модели и системы, а также обеспечивают возможность их функционирования на

различных аппаратных конфигурациях. Технология HLA является стандартом, применяемым при решении задач имитационного моделирования в США.

6. Реализация стенда полунатурного моделирования

Рассмотрим более подробно процесс создания и функционирования стенда полунатурного моделирования на основе штатной вычислительной аппаратуры объекта-оригинала. Логическая схема стенда показана на рис. 3.

Данный стенд предполагается использовать для проведения исследований функционирования технического комплекса (рис. 1) методом имитационного полунатурного моделирования.

Состав реальной аппаратуры, включаемой в состав стенда, определяется техническими возможностями. Для примера используем базовый вариант, структура которого показана на рис. 4.

Стенд включает два штатных вычислителя – ЭВМ, на которой функционирует SCADA-система, управляющая работой технического комплекса, и ПЛК, который в штатном режиме обеспечивает интерфейс с периферийными устройствами объекта-оригинала. Предположим, что база данных, накапливающая информацию о функционировании объекта-оригинала и стенда, включена в состав управляющей ЭВМ. Вынесение этой базы на дополнительный компьютер не добавит существенных сложностей в работу стенда.

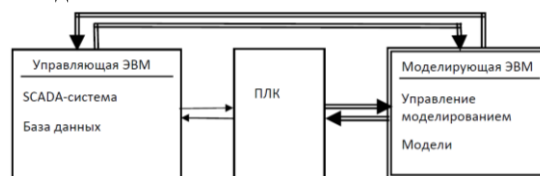


Рис. 4. Структура стенда полунатурного моделирования

При конструировании стенда полунатурного моделирования основная задача состоит в сохранении максимально возможного числа компонентов и характеристик объекта-оригинала. На рис. 4 сплошными линиями черного цвета показаны элементы и интерфейсы, присутствующие в штатном варианте, двойными линиями – элементы и интерфейсы, требуемые для функционирования стенда (нештатные).

Адекватность модели объекту-оригиналу является одним из ключевых условий успеха процесса моделирования, и с этой точки зрения стенд полунатурного моделирования дает следующие преимущества: во-первых, структура модели соответствует структуре компонентов объекта-оригинала, что облегчает построение и понимание процесса моделирования; во-вторых,

такая модель обеспечивает более детальное отражение характеристик и свойств объекта-оригинала за счет включения реальной аппаратуры, функционирующей в штатном режиме; в-третьих, данную модель можно использовать для отладки штатного программного обеспечения. Этот подход к моделированию технического комплекса особенно удобен и разработан «с нуля», поскольку позволяет исследовать и изменять алгоритм работы комплекса в условиях, близких к реальным.

Проанализируем более детально принципы построения стенда полунатурного моделирования для технического комплекса и требования к вычислительной аппаратуре и программному обеспечению технического комплекса и стенда.

6.1. Штатное программное обеспечение и вычислительная аппаратура объекта-оригинала

Выбор вычислительной аппаратуры, применяемой в составе технического комплекса, играет решающую роль в успехе проекта на всех этапах разработки и внедрения. Особенное внимание должно быть уделено выбору аппаратного и программного обеспечения для объектов критической инфраструктуры.

Главными критериями при выборе являются:

- отечественное производство аппаратуры и программного обеспечения;
- полнота и качество программного обеспечения;
- соответствие аппаратуры условиям штатного применения;
- широкая номенклатура интерфейсов;
- информационная и функциональная безопасность аппаратуры и программного обеспечения.

Всем перечисленным выше требованиям удовлетворяет программно-аппаратная платформа «Багет». Семейство ЭВМ «Багет» включает различные конфигурации аппаратуры, настраиваемые согласно требованиям заказчика. Программное обеспечение позволяет вести разработки с использованием метода кросс-компиляции, что повышает кибербезопасность вычислительных средств, в том числе, в составе объектов критической инфраструктуры.

При создании программно-аппаратной платформы «Багет» были использованы различные стандарты, касающиеся программного обеспечения, что повышает интероперабельность разработок, проводимых на основе данной платформы.

Программно-аппаратная платформа «Багет» является полностью отечественной разработкой.

6.2. Инструментальная среда моделирования

Инструментальная среда моделирования предназначена для разработки, исследования и эксплуатации моделей технических комплексов.

Инструментальная среда моделирования должна быть построена на следующих принципах:

- полнота функциональных возможностей для решения задачи полунатурного моделирования;
- соответствие современным методам создания, развития и сопровождения аппаратно-программных комплексов;
- обеспечение кибербезопасности.

Полнота функциональных возможностей требуется для того, чтобы создать комфортные условия для разработки модели и обеспечить сопровождение объекта-оригинала с помощью моделирующего комплекса на протяжении всего жизненного цикла, включая этапы разработки и исследования (принцип «цифрового двойника» [12]).

Функциональные возможности инструментальной среды включают: удобный пользовательский интерфейс, полноценное протоколирование, управление экспериментом, обработку данных, полученных в результате эксперимента, средства валидации и верификации моделей.

Необходимо реализовать как минимум два уровня пользовательского интерфейса – интерфейс инженера-проектировщика и разработчика модели и интерфейс инженера-исследователя, который использует комплекс для проведения экспериментов.

Следует уделить большое внимание средствам конфигурирования и настройки и обеспечить возможность выбора аппаратных и программных компонентов, включенных в эксперимент, установку начальных значений, установку единого времени на ЭВМ комплекса, настройку циклограммы работы, спецификацию параметров, накапливаемых во время работы комплекса.

Управление экспериментом включает запуск и остановку работы комплекса, средства визуального наблюдения за его функционированием, контроль процесса моделирования с точки зрения безопасности, возможность моделирования нештатных ситуаций и сбоев, которые могут возникнуть на объекте-оригинале.

Необходимы также средства обработки данных, полученных в результате эксперимента, включая визуализацию и статистический анализ.

Современные методы создания и развития программного обеспечения нацелены на обеспечение продолжительного существования инструментальной среды в быстро меняющихся

условиях [13]. Для этого необходимо использование стандартов, в том числе, стандарта HLA, средств модификации и масштабирования (расширение доступного набора интерфейсов, адаптация к новой аппаратуре и т.п.).

Необходимо также обеспечить совместимость по форматам данных с существующими внешними системами, реализующими дополнительный функционал, например, графическое представление информации, обработку big data, математические методы.

Описанный подход к разработке инструментальных средств моделирования позволит реализовать на широкий спектр задач моделирования в различных областях применения, а также задач создания цифровых двойников и обеспечение работы с интернетом вещей (включая специфические интерфейсы RFID, NFC и облачные технологии).

Кибербезопасность инструментальной среды и моделирующего комплекса в целом основана на использовании доверенных программно-аппаратных средств разработки и стандартных приемов обеспечения информационной и функциональной безопасности (авторизация, установка и контроль прав доступа, разграничение доступа, протоколирование выполняемых действий и событий и т. п.).

6.3. Математические модели компонентов объекта-оригинала

Математические модели элементов объекта-оригинала используются в случае, когда элемент физически не представлен на стенде.

Математические модели исполняются на дополнительных ЭВМ, которые не входят в состав штатной вычислительной аппаратуры объекта-оригинала (моделирующих ЭВМ, см. рис. 4). Это позволяет минимизировать влияние процесса моделирования на штатную циклограмму и создать на стенде условия функционирования штатных ЭВМ, максимально приближенные к реальным режимам эксплуатации.

Математические модели могут быть созданы с использованием различных способов формализации, например, в виде решения системы уравнений или в виде числового ряда, полученного в результате дополнительных исследований, статистических наблюдений или иными способами.

В целях расширения области применения моделирующего комплекса необходимо создавать библиотеки моделей, предназначенных для решения различных задач, а также обеспечить условия для использования ранее разработанных моделей за счет внедрения стандарта HLA.

Математические модели, имитирующие работу устройств ввода-вывода (датчиков, управляющих механизмов и прочей аппаратуры), при

взаимодействии со штатной аппаратурой должны использовать протоколы передачи данных, предусмотренные для объекта-оригинала.

Инструментальная среда моделирования должна обеспечить конфигурирование совокупности математических моделей, используемых для отдельного эксперимента, настройку параметров моделирования и возможность масштабирования модели, например, увеличение числа каналов передачи данных. Необходимо также предусмотреть способы расширения стенда за счет включения дополнительных моделирующих ЭВМ.

Для того, чтобы обеспечить функционирование стенда в целом, требуется программа, управляющая процессом моделирования (программа-диспетчер). Диспетчер входит в состав инструментальной среды моделирования и инициирует запуск программ, реализующих математические модели, в соответствии с заданной циклограммой.

Для накопления данных о функционировании математических моделей следует использовать базу данных. В зависимости от временных характеристик объекта-оригинала и технических возможностей база данных может функционировать на отдельной ЭВМ, на моделирующей ЭВМ или штатной ЭВМ объекта-оригинала. Необходимо обеспечить возможность конфигурирования стенда для различных вариантов использования базы данных.

Для обеспечения визуального контроля процесса моделирования необходимо предусмотреть возможность настройки изображения, выводимого на экран монитора моделирующей ЭВМ (перечень контролируемых параметров, частота вывода, связь с программой-диспетчером и управление экспериментом).

6.4. Имитирующая аппаратура и программное обеспечение

Имитирующая аппаратура в составе стенда представлена либо натурными фрагментами объекта-оригинала (например, пульт управления оператора), либо устройствами, имитирующими внешние условия (помехи, поломки датчиков, обрывы кабеля и т.п.). Необходимо также предусмотреть возможность использования/имитации устройств промышленного интернета вещей.

Наличие имитирующей аппаратуры и соответствующего программного обеспечения в составе стенда зависит от технических возможностей и сути задач, решаемых с помощью стенда. Например, наличие штатного пульта оператора обязательно для стенда-тренажера.

Имитация внешних воздействий входит в состав средств управления экспериментом и позволяет тестировать работоспособность АСУ объекта-оригинала в случае нештатных ситуаций.

Для управления процессом моделирования отказов/сбоев/помех необходимо предусмотреть аппаратный и программный интерфейс, допускающий как ручное, так и автоматическое вмешательство в алгоритм работы стенда.

Запуск программ, имитирующих нарушение передачи данных между моделирующей ЭВМ и штатной ЭВМ, может быть либо включен в циклограмму функционирования моделирующей ЭВМ, либо выполнен вручную оператором стенда. Аналогично выполняется включение/отключение имитации помех при передаче данных.

Конфигурирование средств управления экспериментом должно выполняться через экран монитора моделирующей ЭВМ.

6.5. Аппаратура стенда полунатурного моделирования

Принципы удобства использования и гибкости конфигурации, описанные выше для программного обеспечения, также касаются аппаратуры стенда.

Необходимо предусмотреть удобные с точки зрения конструкции способы подключения, широкий набор интерфейсов, способы и средства изменения конфигурации.

7. Заключение

Несмотря на богатую историю и широкую область применения методов математического и имитационного моделирования, следует признать, что в современных условиях полунатурное моделирование, особенно для многоуровневых многокомпонентных динамических систем, завоевывает популярность и авторитет за счет использования штатного вычислительного оборудования и программного обеспечения.

Это направление моделирования активно развивается, поскольку возможности современной аппаратуры и программного обеспечения при использовании в составе стендов обеспечивают значительную экономию средств на этапах

проектирования, прототипирования и испытаний.

Применение стендов для проведения экспериментов, обучения персонала и отработки нестандартных ситуаций повышает надежность объекта-оригинала. Стенды полунатурного моделирования могут также служить основой для создания цифровых двойников, что особенно важно при работе с объектами критической инфраструктуры.

Методы математического моделирования не утратили своей роли, но кажутся более подходящими для детального моделирования процессов, не связанных напрямую с вычислительными средствами, например, для моделирования отдельных химических реакций, природных явлений, процессов в биологии и т.п.

Недостатком большинства реализуемых в настоящее время стендов полунатурного моделирования и систем разработки, применяемых для этого, является их уникальность и невозможность использования в других проектах. Поэтому основными тенденциями в области полунатурного моделирования в настоящее время должны стать автоматизация процесса моделирования, расширение сферы применения методов моделирования и обеспечение совместимости и повторного использования программного обеспечения за счет применения стандартов.

Продуманная параметризация системы разработки в сочетании с удобными средствами конфигурирования и настройки позволит создать программно-аппаратный «каркас», пригодный для решения широкого круга задач.

Публикация выполнена в рамках государственного задания по проведению фундаментальных исследований по теме «Исследование и реализация программной платформы для перспективных многоядерных процессоров» (FNEF-2022-002).

Tools for Developing Models of Technical Complexes

Svetlana Bazaeva, Yaroslav Zotov

Abstract. The article discusses various ways of developing models of technical complexes and analyzes the advantages and disadvantages of the applied modeling methods. On the basis of the study, the authors propose an approach to creating a modeling tool environment that allows design HIL-simulation stands for a wide range of technological processes in various application areas, operating in real time. The tools used in modeling include software and hardware.

Keywords: technical complex, HIL-simulation stand

Литература

1. ГОСТ 3.1109-82 «ЕСТД. Термины и определения основных понятий»
2. Мальков М.В., Олейник А.Г., Федоров А.М. Моделирование технологических процессов: методы и опыт // Труды Кольского научного центра РАН, 2010. № 3. С.93–101
3. ГОСТ Р 57700.22–2020 «Компьютерные модели и моделирование. Классификация»
4. ГОСТ Р 57700.37–2021 «Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения»
5. ГОСТ 16504–81 «Система государственных испытаний продукции. Испытания и контроль качества продукции. Основные термины и определения»
6. Шеннон, Р. Имитационное моделирование систем – искусство и наука / Р. Шеннон. – М.: Мир, 1978. – 418 с.
7. Балашов В.В., Бахмуров А.Г., Волканов Д.Ю., Смелянский Р.Л., Чистолинов М.В., Ющенко Н.В. Стенд полунатурного моделирования для разработки встроенных вычислительных систем реального времени // Сборник докладов Четвертой всероссийской научно-практической конференции «Имитационное моделирование. Теория и практика» (ИММОД-2009). – Санкт-Петербург, 2009. – С. 215–219.
8. Девятков, В.В. Методология и технология имитационных исследований сложных систем: современное состояние и перспективы развития: монография / В.В. Девятков – М.: Вузовский учебник: ИНФРА-М, 2013. – 448 с.
9. КПМ Ритм [Электронный ресурс] // Режим доступа: kpm-ritm.ru (Дата обращения: 25.11.2022)
10. 1516-2010 – IEEE Standard for Modeling and Simulation (M&S) High Level Architecture (HLA) – Framework and Rules [Электронный ресурс] // Режим доступа: <https://standards.ieee.org/ieee/1516/3744/> (Дата обращения: 25.11.2022)
11. Беляев С.А., Матросов В.В. Опыт создания среды имитационного моделирования // I-methods. 2018. Т. 10. № 3. С. 14–22.
12. Гапанович Д.А., Тарасова В.А., Сухомлин В.А., Куприяновский В.П. Анализ подходов архитектурного проектирования цифровых двойников // International Journal of Open Information Technologies, 2022. Vol. 10. № 4. С. 71–81.
13. Девятков В.В. Современные системы автоматизации имитационных исследований – разработка, развитие и применение. // Сборник докладов Седьмой всероссийской научно-практической конференции «Имитационное моделирование. Теория и практика» (ИММОД-2015). Труды конференции. Ин-т проблем упр. Им. В.А. Трапезникова РАН; под общ. Ред. С.Н. Васильева, Р.М. Юсупова. 2015. С. 25–33. В.Б. Бетелин. Системы автоматизации труда программиста. М., Наука, 1990.