

УДК 004.942:004.4'24
doi:10.18720/SPBPU/2/id24-506

*Капырин Николай Игоревич*¹,
старший инженер;
*Юрин Егор Павлович*²,
специалист;
*Загорный Сергей Геннадьевич*³,
специалист

РАЗРАБОТКА МУЛЬТИДОМЕННЫХ СИСТЕМНЫХ МОДЕЛЕЙ В РОССИЙСКОЙ СРЕДЕ ДИНАМИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ENGEE

^{1,2,3} Россия, Москва, ООО «ЦИТМ «Экспонента»,
¹ nikolay.karygin@exponenta.ru, ² egor.yurin@exponenta.ru,
³ sergey.zagorniy@exponenta.ru

Аннотация. Создание мульти-доменных систем, в том числе кибер-физических, требует привлечения экспертов из разных областей, а также высокопроизводительной инженерной платформы для сотрудничества. В этой статье мы очертим общие контуры подходящей среды модельно-ориентированного проектирования, изучим, как все основные процессы реализованы технически в российской среде моделирования Engee, а также, в качестве демонстрации, разберем реализацию в Engee простой модели и ее системы управления.

Ключевые слова: Engee, модельно-ориентированное проектирование, мультидоменные системы, синтез систем управления.

*Nikolay I. Kapyrin*¹,
Senior Engineer;
*Egor P. Yurin*²,
Specialist;
*Sergei G. Zagorniy*³,
Specialist

DESIGNING MULTI-DOMAIN SYSTEM MODELS WITH ENGEE – THE RUSSIAN ENGINEERING PLATFORM FOR DYNAMIC SYSTEMS

^{1,2,3} ETMC Exponenta, Moscow, Russia,

¹ nikolay.kapyrin@exponenta.ru, ² egor.yurin@exponenta.ru,

³ sergey.zagorniy@exponenta.ru

Abstract. Creating multi-domain systems, cyber-physical ones included, naturally requires the participation of experts from different domains as well as a high-performance collaborative engineering environment. In this article we will outline the general contours of a suitable engineering environment for model-oriented design, we will also study how those processes are implemented in Engee, the Russian engineering environment, and then, for a demonstration, we will analyze the implementation of a model and its control system.

Keywords: Engee, model-based development, multi-domain systems, control synthesis.

Введение

В этой статье мы хотели бы взглянуть на проектирование мульти-доменных систем с точки зрения инструментария. Сперва, на примере опыта ЦИТМ Экспонента [1], мы обсудим принципы модельно-ориентированного проектирования, которые помогают в разработке больших мульти-доменных систем в области машиностроения, радаров, систем цифровой связи и т. д. Затем разберем, как те или иные аспекты реализованы в российской среде динамического моделирования Engee [2]. Чтобы проиллюстрировать эти соображения, мы покажем, как в Engee выстраивается процесс синтеза простой системы управления для модели, заданной мульти-доменным вычислительным графом.

1. Модельно-ориентированная разработка кибер-физических систем

Модельно-ориентированное проектирование (МОП) подразумевает систематический процесс использования моделей в течение всего проектирования с целью повышения качества разрабатываемых сложных технических систем.

Для мульти-доменных систем, в частности кибер-физических, очень полезны следующие преимущества, которые дает модельно-ориентированная методология:

– **ускоренное испытание** новых инженерных идей и подходов благодаря внятным интерфейсам и взаимозаменяемости моделей;

– **устранение технических этапов** реализации проекта, требующих вовлечения узкопрофильных специалистов (таких шагов как программирование, верификация, автоматизация вычислений и создание отчетности);

– **ведение сквозной нити трассируемости** от технического задания до каждого теста внутри программы;

– **упрощение создания высокоуровневых систем** в рамках проекта: предиктивное обслуживание, оптимизация функционирования, обнаружение ошибок, создание цифровых двойников.

При работе в инструментарии хорошего модельно-ориентированного окружения многие из аспектов разработки, составляющих приведенный список преимуществ МОП, являются тривиальными.

2. Черты инструмента для мульти-доменого МОП

Крупнейшие пакеты зарубежного происхождения, для замещения которых сейчас создаются российские аналоги, уже используются в тысячах проектах.

Инструменты MathWorks считаются промышленным стандартом во многих сферах инженерии, от искусственного интеллекта до тяжелого машиностроения, четыре десятка лет совершенствовали свою реализацию МОП методологии [3]. Компания IBM, автор инструментария Rational Solutions, излагает этот процесс в учебнике Harmony Process [4], который любая компания может изучить и воплотить в своей работе. МОП реализован в стандартах и квалификационных требованиях РФ: например, КТ-178 в авиации [5].

При выборе инструмента российского производства «ЦИТМ «Экспонента» учитывала его пригодность по множеству параметров, включая нижеследующие.

2.1. Возможность ускоренной реализации новых подсистем и моделей

В МОП-инструменте проект представлен в виде набора взаимосвязанных и взаимодействующих моделей, которые, при этом, часто имеют законченный характер и независимую ценность. Благодаря такой организации любой аспект модели – алгоритм, модель физического окружения, модели каналов цифровой связи и т. д. можно легко использовать в новом контексте без повторной разработки интерфейсов. Ускоренное испытание инженерных идей осуществляется благодаря созданию иерархически организованных моделей, состоящих из блоков в графической среде. Другим инструментом является создание *вариантных моделей*, которые переключают свое поведение согласно внешней переменной или по

выставленному вручную переключателю, что позволяет автоматически протестировать множество вариантов модели.

2.2. Возможность снижения количества технической работы

Одним из технических этапов, который проектировщики стремятся исключить, является программирование. При помощи генерации кода модели достаточно низкого уровня абстракции обычно переводят в код напрямую, в то время как высокоуровневые модели обычно требуется вручную подвергнуть дополнительному этапу декомпозиции.

2.3. Сквозная трасируемость и прослеживаемость данных

Матрицы трасируемости и сквозная прослеживаемость позволяют проверять качество проекта и допускать как можно меньше ошибок. Трасируемость обеспечивается благодаря помещению всех моделей в единое окружение и наличию команд для автоматизации анализа моделей и генерации отчетов.

Прослеживаемость переменных от технического задания и вплоть до кода достигается благодаря моделированию технического задания – через инструменты для структурирования документации или через ручную трансляцию функциональных требований в тесты, из документации в модели тестовой оснастки.

2.4. Возможность использования моделей в высокоуровневых приложениях

Наконец, инструментарий МОП не ограничивается средствами проектирования и исполнения моделей, но также включает высокоуровневые приложения, опирающиеся на разработанные модели. К моделям могут применяться рецепты из области машинного обучения (предиктивная аналитика), также модель может быть встроена в контур прогноза на основании накопленной предыстории (цифровой двойник).

Чтобы ускорить проектирование, нам нужно исключить затраты на низкоуровневые действия (установку инструментов, обмен файлами, необходимость обучать узкоспециализированных сотрудников) и желательно упростить методологию.

3. Мультидоменные модели в Engage

Каждый коллектив находит свой баланс кибернетических и физических, а также всех остальных аспектов моделирования, продиктованный инструментарием и устоявшимися практиками.

К тому же, каждый аспект модели можно представить в любом формализме: от программного кода (например, набор дифференциальных уравнений и их решатель), до высокоуровневых блоков (компрессоры, батареи, муфты и т. д.).

Всё это создаёт требования к гибкости инструмента моделирования и методологии.

В практике «ЦИТМ «Экспонента», инструмент МОП должен позволять на одном и том же холсте моделировать как минимум следующие виды моделей:

- **непрерывные направленные динамические модели** (с любым интегратором для разных подсистем),
- **дискретные модели**, в том числе многоскоростные (блоки с разной частотой дискретизации на одной модели),
- **ненаправленные модели** для моделирования любого домена физики,
- **конечные автоматы** для задания логики переключения состояний,
- **текстовый код** на любом языке – как самое гибкое средство автоматизации вычислений.

В качестве примера рассмотрим модель механической системы (см. рис. 1).

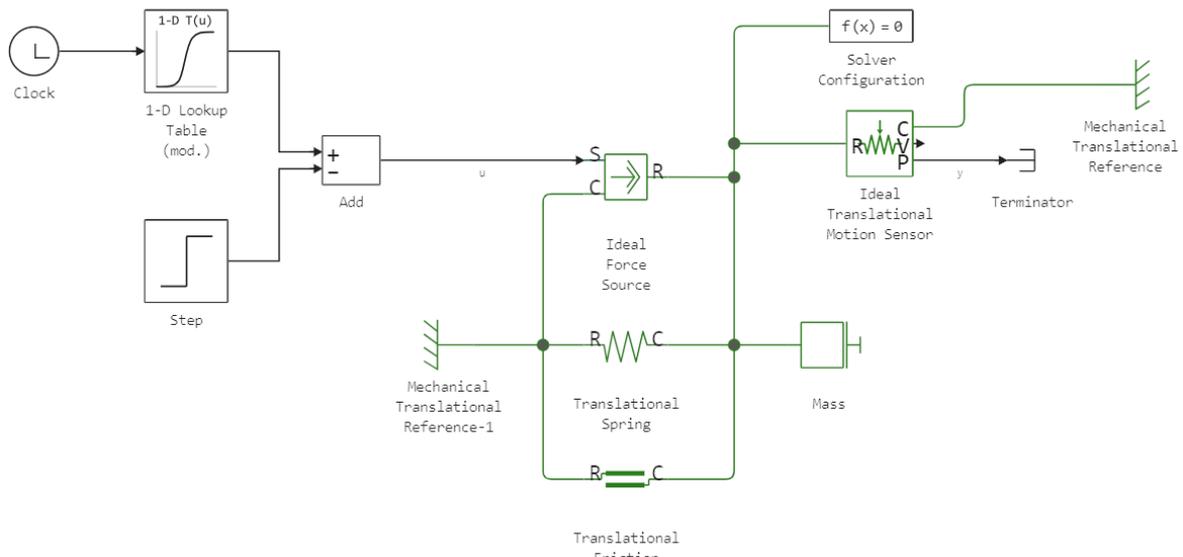


Рис. 1. Мультидоменная модель на холсте Engage

Эта модель создана в среде Engage [2]. В ней сочетаются блоки направленного моделирования (циклограмма входного сигнала, вывод графика), но между этими областями расположена модель физического явления, заданная «акаузальными» блоками. Граф вычисления этой части модели будет рассчитан в процессе моделирования и может передавать взаимодействия в разных направлениях. Такой тип моделей отличается от направленных блок-схем или систем уравнения, и, тем не менее, все модели могут быть расположены на одном холсте, каждый домен может иметь собственный алгоритм интегрирования и собственную частоту дискретизации, или же они могут быть унаследованы от глобальных настроек модели.

Линеаризация этой модели на основе данных симуляции осуществляется командой «subspaceid», результат идентификации показан на рис. 2.

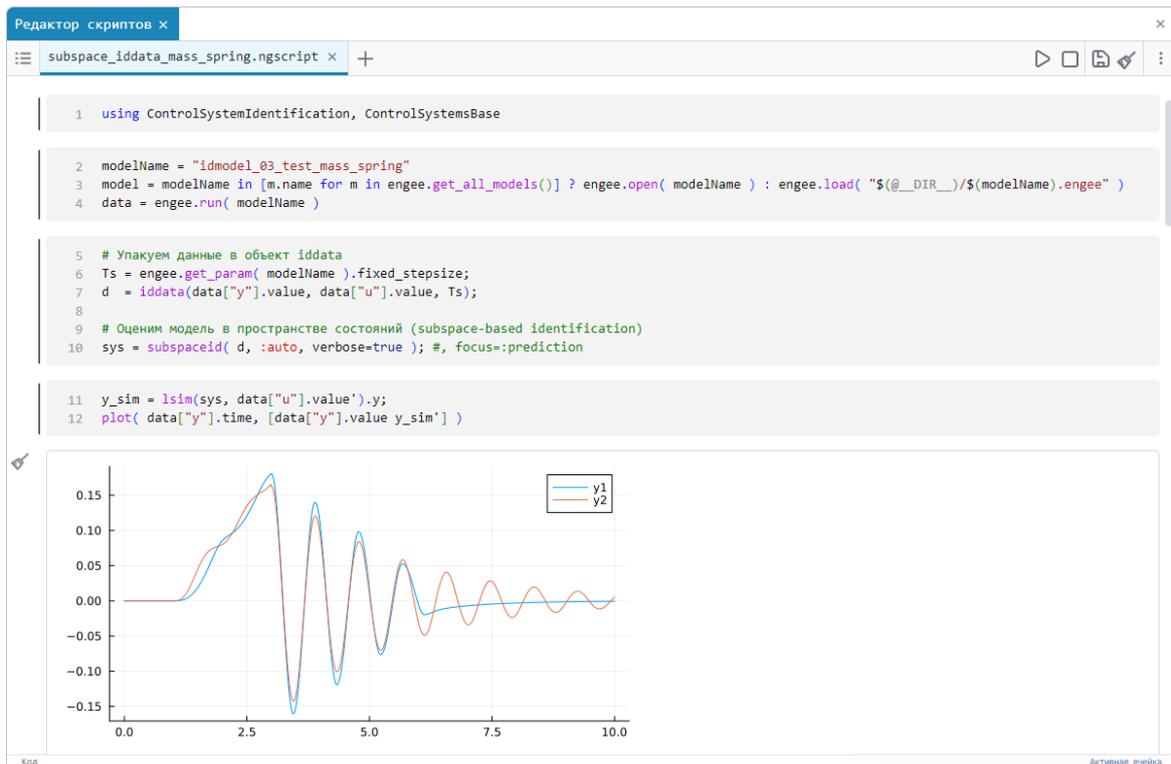


Рис. 2. Встроенный редактор скриптов Engage позволяет линеаризовать мульти-доменные модели

Когда у нас есть линеаризованная система, мы можем снова воспользоваться инструментами автоматизации (командная строка, редактор скриптов). Пример такого результата показан на рисунке 3.

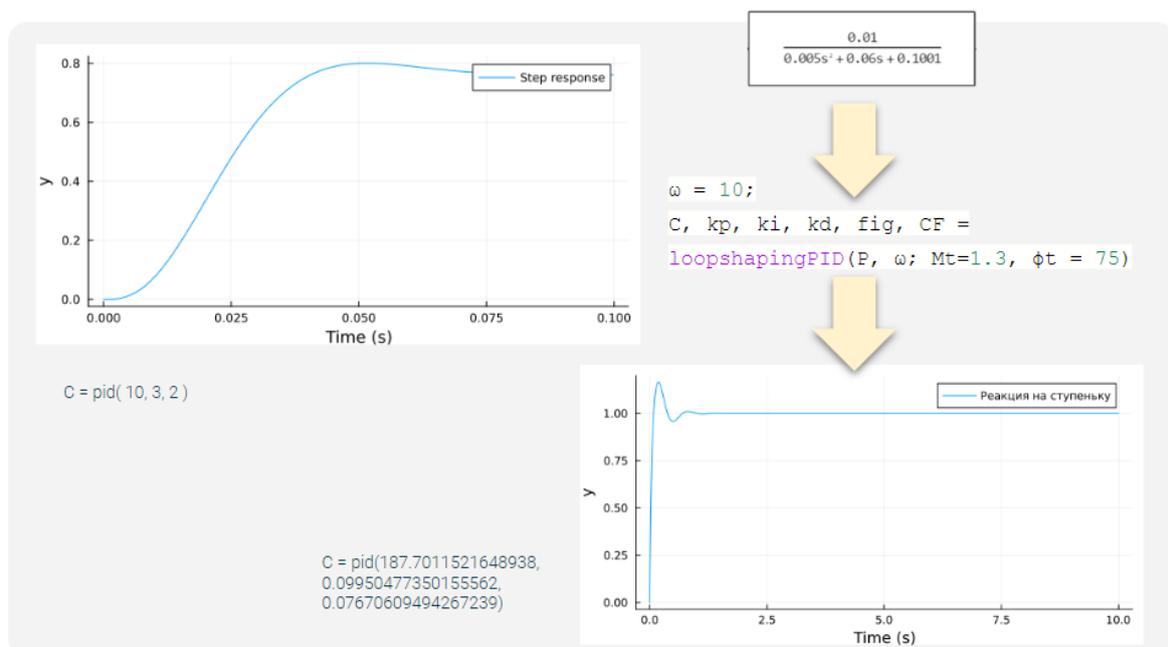


Рис. 3. Результат оптимизации PID регулятора для передаточной функции, полученной после линеаризации

При помощи команд встроенных библиотек Engee, например «loopshapingPID», мы можем задать ориентиры для синтеза оптимального регулятора. А команда «s_code» позволяет сгенерировать код на языке Си и перенести его на контроллер, тем самым осуществив первый шаг в сторону полунатурного моделирования системы.

Сравнительно более медленным способом идентификации параметров регулятора является запуск модели в цикле с подбором параметров по сетке или в ходе градиентного спуска.

Заключение

Мы продемонстрировали, как модельно-ориентированное окружение Engee позволяет работать с кибер-физическими системами: создание мульти-доменной модели, декомпозиция до линейной формы (через линеаризацию на основе данных), синтез регулятора, который можно поместить на холст и получить новую модель со стабильными характеристиками.

Сотрудники и клиенты «ЦИТМ «Экспонента» следят за тем, как Engee становится стандартизованным языком общения между инженерами, а платформа продолжает оставаться наиболее удобной самодостаточной инженерной средой для модельно-ориентированного проектирования на российском рынке.

Благодаря систематическому ведению каждого проекта согласно МОП компания продолжает предоставлять заказчикам свою многолетнюю экспертизу в ходе реализации самых сложных технических проектов, включая моделирование приборов, устройств и изделий, их физического окружения, перенос программ на встраиваемое оборудование и сложное иерархическое тестирование.

Список литературы

1. Портал компании ЦИТМ Экспонента [Электронный ресурс] // Главная страница портала. – URL: <https://exponenta.ru/> (дата обращения: 01.06.2024).

2. Российская среда динамического моделирования Engee [Электронный ресурс] // Личный кабинет пользователя Engee. – URL: <https://www.engee.com> (дата обращения: 01.06.2024).

3. Модельно-ориентированное проектирование. Систематическое использование моделей во всех процессах разработки [Электронный ресурс] // Сайт компании MathWorks. – URL: <https://www.mathworks.com/solutions/model-based-design.html> (дата обращения: 01.06.2024).

4. Процесс внедрения МОП от компании IBM (учебник Harmony) // Сайт компании IBM. – URL: <https://www.ibm.com/docs/en/engineering-lifecycle-management-suite/design-rhapsody/10.0?topic=secsyscontroller-harmony-process> (дата обращения: 01.06.2024).

5. Практический опыт реализации подходов программной и системной инженерии для управления требованиями при разработке программного обеспечения в авиационной отрасли / И. В. Ковернинский [и др.] // Труды Института системного программирования РАН. – 2016. – Т. 28. – №. 2. – С. 173–180.