

A. I. Laristov, Yu. T. Lyachek, Musaeed Abdulfattah Mohammed Obadi  
*Saint-Petersburg State Electrotechnical University «LETI»*

## DESIGN PROBLEMS OF ORGANIZATION OF WEB-ORIENTED VERSION OF TOPOLOGICAL DESIGN OF PRINTED CIRCUIT BOARDS

*Comparison of tracers of printed circuit boards, identified the main functions of the system topological router TopoR and identify the features of the organization of WEB-oriented version of CAD topological design of printed circuit boards on its basis*

**CAD, tracing circuit boards, cloud computing, WEB browser**

---

УДК 004.942

Ю. А. Кораблев, Д. М. Савельев, М. Ю. Шестопалов  
*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)*

## Виртуальный полигон исследования отказоустойчивых систем управления

*Описывается подход к исследованию отказоустойчивых систем управления (fault tolerant control systems), основанный на концепции виртуального полигона, содержащего комплекс эталонных (benchmark) моделей объектов управления, реализованного в среде Matlab/Simulink.*

### **Проблемно-ориентированная среда моделирования, отказоустойчивые системы управления, диагностика, реконфигурация регулятора, компьютерный эксперимент**

Возможности изучения поведения сложных технических систем экспериментальными методами в экстремальных ситуациях, вызванных отказами, сбоями, неисправностями, существенно ограничены. В связи с этим в настоящее время для указанных целей активно применяется компьютерное моделирование, одним из направлений которого является компьютерный эксперимент в реальном или близком к реальному масштабу времени.

Проведение такого эксперимента с использованием исключительно средств вычислительной техники на базе математического моделирования можно рассматривать как виртуальный эксперимент, стоимость которого намного ниже физического эксперимента, а спектр возможных условий его проведения несравненно шире, поскольку допускает исследование экстремальных и потенциально опасных в реальных условиях ситуаций. Однако проведение любого эксперимента (физического или математического) подразумевает организацию некой «лаборатории» или «полигона», в которых создаются все необходимые условия

для проведения такого эксперимента: внешние воздействия, окружающая среда, условия взаимодействия изучаемых объектов друг с другом, особенности поведения изучаемого объекта и т. д. Это естественным образом приводит к концепции «виртуального полигона» (ВП) как проблемно-ориентированной среды моделирования [1].

Процесс проектирования и разработки ВП требует учета особенностей методов компьютерного моделирования в конкретной предметной области. Более того, и применение такого рода вычислительных инструментов требует от исследователя большего знания особенностей современных вычислительных технологий, лучшего владения соответствующими программными средствами. Во многом этот факт становится препятствием на пути их внедрения и, как следствие, причиной снижения эффективности исследований в различных предметных областях.

Сильный разрыв между высоким уровнем технологий и низким уровнем их применения привел к появлению новой концепции использо-

вания подобного рода информационных технологий, в рамках которой пользователь ждет от вычислительной техники возможности работы в привычной для него среде исследователя в конкретной прикладной области без необходимости детальных знаний той или иной используемой в виртуальном полигоне технологии программирования. Этот новый взгляд изменил подход в области разработки программного обеспечения, перенеся упор на создание промежуточного программного обеспечения, отрывающего приложение пользователя от тех программных технологий, на которых оно выполняется. Однако, как правило, пользователю не запрещается доступ к этим низкоуровневым технологиям, если он обладает соответствующей квалификацией.

**Назначение, принципы организации и функциональные требования к виртуальному полигону.** Целью разработанного виртуального полигона является создание удобной среды проектирования отказоустойчивых систем управления [2], [3] технологическими системами и объектами на основе комплекса эталонных (benchmark) репрезентативных исследовательских моделей для экспериментальной проверки различных подходов к диагностике и обеспечению отказоустойчивого управления.

В качестве основы при реализации виртуального полигона (приложения «Исследовательский полигон» – ИП) взята среда проектирования Simulink [4], которая зарекомендовала себя как одна из самых удобных систем моделирования технических объектов различной сложности, благодаря возможности визуального программирования и обширной библиотеке компонентов.

«Исследовательский полигон» в соответствии с описанной выше концепцией является средой разработки отказоустойчивых систем как для профессионалов, хорошо знакомых с Simulink, так и для людей, обладающих скромными навыками работы в этой среде. Приложение с графическим интерфейсом благодаря автоматизации процесса работы с моделью и облегчению доступа к основным функциям с помощью меню упрощает пользователю взаимодействие со средой Simulink, загрузку, редактирование, моделирование и сохранение изменений в эталонных моделях. По причине тесной интеграции Simulink с пакетом Matlab [5], [6] графический интерфейс

создан при помощи одноименного языка программирования. Данное решение обеспечивает комфортную работу с моделью для неподготовленного пользователя, сохраняя при этом возможность непосредственной работы с моделью и средой Simulink, что важно для профессионала.

**Структурные требования к моделям виртуального полигона.** Проект «Исследовательский полигон» ориентирован на проектирование, в первую очередь, активных отказоустойчивых систем управления (СУ) динамическими объектами различного назначения. Поэтому приложение «Исследовательский полигон» рассчитано на работу с моделями, которые удовлетворяют структурным требованиям, характерным для активных отказоустойчивых систем. Данный набор требований определяет необходимость подготовки моделей для использования в виртуальном полигоне в форме структуры, которая получила название обобщенной или унифицированной. Основной ее отличительной чертой является наличие на верхнем уровне Simulink-модели блоков, представляющих в виде «черных ящиков» основные структурные элементы как классических СУ (исполнительный механизм, объект управления, датчики), так и характерных лишь для активных отказоустойчивых СУ (реконфигурируемый регулятор, модуль обнаружения и идентификации отказов, модуль реконфигурации).

Данное решение принято по ряду причин:

- такое представление привычно для разработчиков активных отказоустойчивых систем управления и не будет вызывать у них трудностей при восприятии, а создаст комфортные условия для работы, позволит использовать традиционную терминологию;

- повышается наглядность и облегчается анализ модели при ее регистрации в системе благодаря тому, что ее структура становится прозрачной. Облегчается решение задачи автоматического программного определения наличия блоков отказоустойчивой системы, отвечающих за те или иные функции, такие, как, например, диагностика или реконфигурирование.

Благодаря данному решению становится возможным реализовать графический интерфейс приложения проблемно-ориентированным. В зависимости от структуры модели, загруженной в систему, динамически изменяется состав меню приложения.

Состав меню зависит от того, какие блоки присутствуют в модели и какие возможности, соответственно, она предоставляет. Например,

если в модели присутствуют несколько блоков диагностики, то меню «Диагностика» будет содержать несколько подпунктов-методов диагностики, связанных с каждым из соответствующих блоков. Если же в модели блоки диагностики отсутствуют, то данное меню будет недоступно.

На практике приведение модели к «унифицированной» структуре для регистрации ее в исследовательском полигоне выглядит следующим образом.

Классическая СУ, как известно, представляет собой последовательную цепь из регулятора, исполнительного механизма (ИМ), получающего управляющие воздействия, объекта управления (ОУ) и набора датчиков, следящих за состоянием ОУ. Данная последовательная цепь корректируется с помощью механизма обратной связи. Этот же принцип был принят и при разработке архитектуры унифицированной структуры.

Для того чтобы модель соответствовала требованиям приложения ИП, в ней необходимо выделить вышеописанные классические элементы в отдельные блоки («subsystem» в терминологии Simulink), которые имеют определенное количество входов и выходов. Следует заметить, что не является обязательным наличие всех вышеперечисленных блоков – некоторые могут и отсутствовать.

Типовые элементы СУ должны иметь предопределенные названия: регулятор – «regulator», исполнительный механизм – «actuator», объект управления – «control object» и датчики –

«sensors». Регистр не имеет значения (например, название «Control Object» интерпретируется аналогично названию «control object»). Группа типовых блоков классической системы управления изображена на рис. 1.

Так как приложение ИП ориентировано на проектирование активных отказоустойчивых систем управления, то к указанным ранее типовым классическим элементам СУ в ИП могут быть добавлены:

- блок(и) моделирования отказов;
- блок диагностики отказов;
- блок компенсации отказов.

Названия блоков должны содержать в себе: для блока моделирования отказов – слово «failures», для блока диагностики – слово «detection», для блока компенсации – слово «compensation» (рис. 2).

В каждом из трех типов блоков можно включать или отключать определенную функциональность используя ручной переключатель (блок «manual switch» в терминологии Simulink), который передает в блок сигнал – ноль или единицу. Единица означает, что функциональность активна, ноль – отключена. При этом каждый входной порт блоков, к которым подключается ручной переключатель (для включения/отключения определенной функциональности), должен иметь в названии слово «status». В название ручного переключателя рекомендуется добавлять название функциональности. Пример подключения

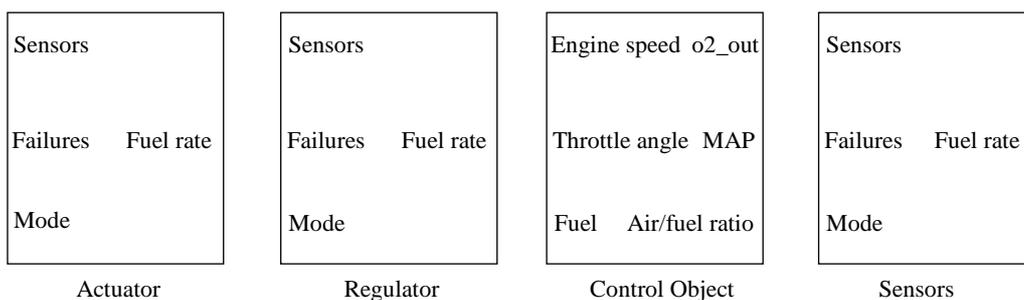


Рис. 1

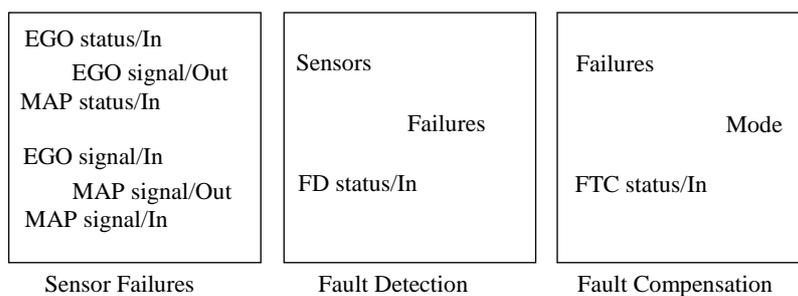


Рис. 2

ручного переключателя к блоку моделирования отказов изображен на рис. 3.

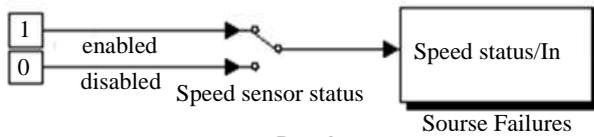


Рис. 3

Еще одним необходимым условием модели, диктуемым унифицированной структурой, является наличие в ней монитора (блока «score» в терминологии Simulink). Он должен иметь название «monitor». С его помощью в программе осуществляется наблюдение за сигналами, являющимися входными или выходными по отношению к блокам классической СУ: регулятору, ИМ, ОУ и датчикам.

Фрагмент унифицированной Simulink-схемы показан на рис. 4, где в окне полигона представ-

лен результат преобразования демонстрационного примера MATLAB-SIMULINK отказоустойчивой системы управления подачи топлива в бензиновый двигатель.

Именование блоков унифицированной структуры определенным образом необходимо для правильного построения динамической структуры меню, именование портов – чтобы установить, к каким из них подключена определенная функциональность, а не просто требуемый в системе, но сторонний, сигнал. Блоки не должны совпадать по названию с описанными ранее блоками.

**Функциональные возможности виртуального полигона.** Виртуальный полигон предоставляет исследователю возможность реализации следующих основных функций:

1. Регистрация эталонных (benchmark) моделей – это операция добавления сведений о модели в базу данных ИП, дающая право на дальнейшие

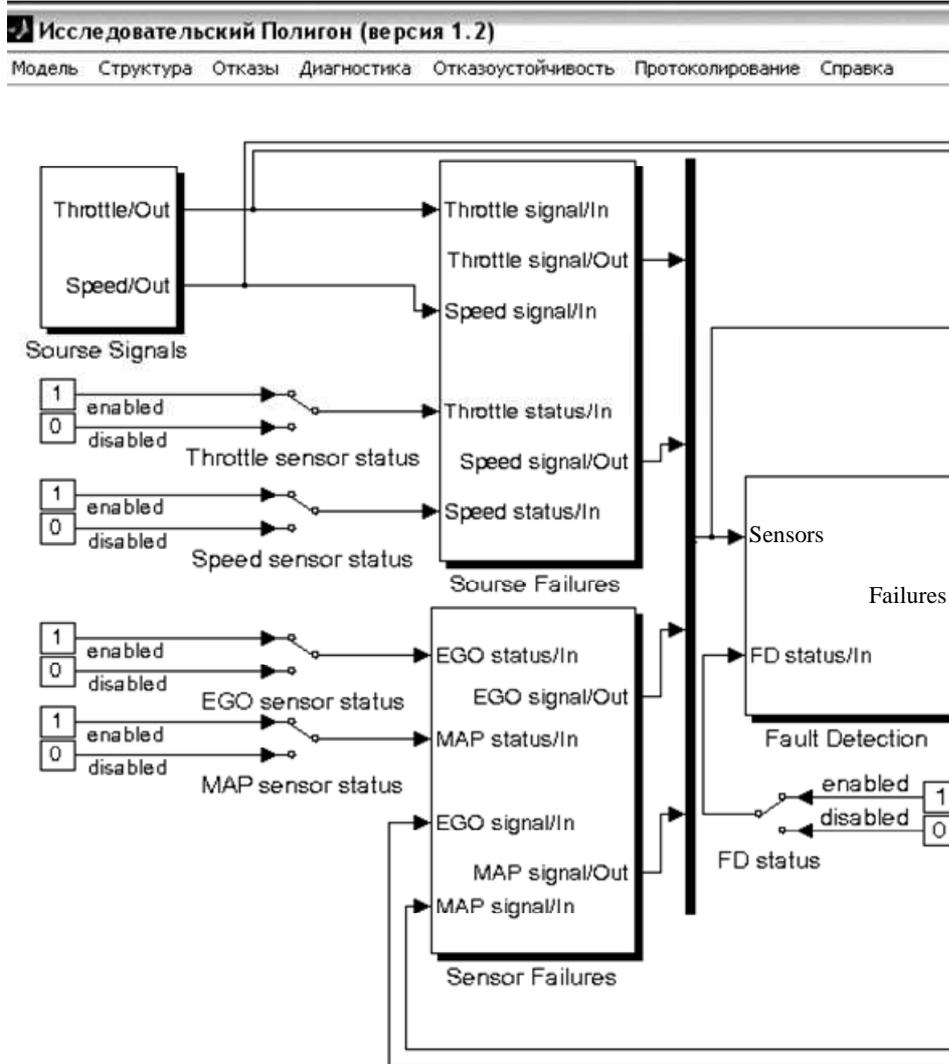


Рис. 4

действия с моделью в рамках приложения ИП. Регистрация осуществляется через пункт меню «Модель»→«Зарегистрировать (Новая...)».

2. Выбор эталонной модели – это операция открытия выбранной Simulink-модели и построения структуры меню, соответствующей требованиям по наблюдаемости входов/выходов в модели, наличию блоков отказов, диагностики или компенсации.

3. Включение/отключение каналов наблюдения. При работе с Simulink-моделью пользователь имеет возможность наблюдать значения входных и выходных каналов блоков с помощью блока score («монитор»). В приложении ИП на данное правило наложено функциональное ограничение: наблюдаемыми можно сделать входы и выходы только основных четырех типов блоков: регулятора, исполнительного механизма, объекта управления и блока датчиков. При наличии одного или нескольких из перечисленных блоков в Simulink-модели в меню «Структура» появляется соответствующий ему подпункт меню. На рис. 5 показан пример модели с блоком «Объект управления», где есть 3 входных и 3 выходных канала, последний из которых является наблюдаемым.



Рис. 5

4. Включение/отключение блоков отказов. При работе с Simulink-моделью в рамках приложения ИП пользователь имеет возможность активировать или выключать моделирование отказов в системе. Если в Simulink-модели присутствуют блоки, задачей которых является моделирование

отказов, то, в зависимости от количества моделируемых отказов, на входе данных блоков будет соответствующее количество входов от ручных переключателей (manual switch), активное состояние которых свидетельствует о включенном режиме моделирования отказа, а пассивное – об отсутствии моделирования отказа в модели. На рис. 6 показан пример модели с блоком «Sensor Failures» с двумя входами, соответствующими моделируемыми отказам.

Для того чтобы сделать отказ наблюдаемым/ненаблюдаемым, необходимо кликнуть на соответствующий ему подпункт меню. При этом рядом с его названием появится/исчезнет изображение «галочки», а текст всплывающей подсказки изменится на «наблюдаемый отказ»/«ненаблюдаемый отказ». В самой Simulink-модели изменится на противоположное (на верхнее/нижнее) положение ручного переключателя, отвечающего за активацию/деактивацию соответствующего отказа.

5. Включение/отключение блоков диагностики. При работе с Simulink-моделью в рамках приложения ИП пользователь имеет возможность активировать или выключать блоки диагностики отказов в системе. Если в Simulink-модели присутствуют блоки, задачей которых является диагностика отказов, то, в зависимости от количества способов диагностики, на входе данных блоков будет соответствующее количество входов от ручных переключателей (manual switch), активное состояние которых свидетельствует о включенном режиме соответствующего метода диагностирования отказов, а пассивное – о неприменении данного метода диагностики в модели. Логика изменений в меню и в Simulink-модели аналогична вышеописанной. Для того чтобы активировать/деактивировать использование метода диагностики отказов, необходимо кликнуть на соответствующий ему подпункт меню. При этом рядом с его названием появится/исчезнет изображение «галочки», а текст всплывающей подсказки изменится на «блок подключен»/«блок отключен».

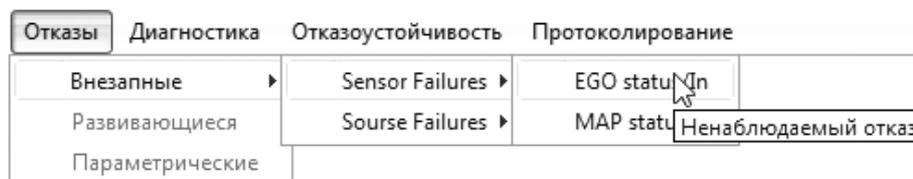


Рис. 6

В самой Simulink-модели также произойдут изменения – изменится на противоположное (на верхнее/нижнее) положение ручного переключателя, отвечающего за активацию соответствующего метода диагностики.

6. Включение/отключение блоков компенсации отказов. Пользователь имеет возможность аналогичным образом активировать или выключать блоки компенсации отказов в системе.

7. Закрытие модели – это операция закрытия окна Simulink-модели и удаления всех подпунктов меню, связанных с данной моделью. Для того чтобы закрыть модель, необходимо выбрать пункт меню «Модель»→«Выход» или нажать на стандартную пиктограмму windows-окна «Закрыть» в правой верхней части окна приложения ИП. Закрытие модели происходит без сохранения изменений, внесенных пользователем, поэтому необходимо сохранять сделанные в модели изменения.

8. Сохранение модели – это операция сохранения изменений в Simulink-модели. Для того чтобы сохранить модель, необходимо выбрать пункт меню «Модель»→«Сохранить» или нажать на

стандартную пиктограмму windows-окна «Сохранить» в левой верхней части окна приложения ИП.

9. Протоколирование хода и результатов проектирования. Так как «Полигон» является рабочим инструментом проектировщика систем управления, то необходимое условие успешной работы – запись всех промежуточных результатов исследований. Результатом могут быть как текстовые сообщения и информационные таблицы, так и различного вида графики, диаграммы, а также непосредственно схемы, создаваемые и изменяемые в среде Simulink. Все необходимые исследователю сведения последовательно протоколируются и отображаются графически в главном окне программы. В заключение работы протокол может быть сохранен в требуемом формате.

**Апробация виртуального полигона.** Для разработки виртуального полигона использовался MATLAB 7 Release R2013b (академическая лицензия № 867137). Программное обеспечение тестировалось на ряде известных benchmark-моделей, в том числе системы управления движением парама [7].

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Khaled N. Virtual Reality and Animation for MATLAB and Simulink Users: Visualization of Dynamic Models and Control Simulations. Springer, 2012.
2. Isermann R. Fault-Diagnosis Systems: An Introduction from Fault Detection to Fault Tolerance. Springer-Verlag, 2005.
3. Diagnosis and Fault-Tolerant Control / M. Blanke, M. Kinnaert, J. Lunze, M. Staroswiecki. Springer-Verlag, 2003.
4. Черных И. Simulink. Среда создания инженерных приложений. М.: Диалог-МИФИ, 2004.
5. Ануфриев И., Смирнов А., Смирнова Е. MATLAB 7.0. В подлиннике. СПб.: БХВ-Петербург, 2005.
6. Васильев В. В., Симак Л. А., Рыбникова А. М. Математическое и компьютерное моделирование процессов и систем в среде MATLAB/SIMULINK: учеб. пособие для студентов и аспирантов. Киев: НАН Украины, 2008.
7. Izadi-Zamanabadi R., Blanke M. A Ship Propulsion System as a Benchmark for Fault-Tolerant Control // Control Engineering Practice. 1999. Vol. 7. P. 227–239.

Yu. A. Korablev, D. M. Savelyev, M. Yu. Shestopalov  
Saint-Petersburg state electrotechnical university «LETI»

## VIRTUAL POLYGON FOR RESEARCHING FAULT TOLERANT CONTROL SYSTEMS

*The paper discusses an approach to research fault tolerant control systems based on usage of virtual polygon, that contains a lot of benchmark models to simulate control objects. Virtual polygon is realized in MATLAB/SIMULINK environment.*

**Domain oriented simulation environment, fault tolerant control systems, diagnostics, regulator with reconfiguration capability, computer experiment**