

М.А. Поляков, Т.Ю. Ларионова

**ТЕОРЕТИКО-МНОЖЕСТВЕННАЯ МОДЕЛЬ  
ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ УДАЛЕННОЙ  
ЛАБОРАТОРИИ ДЛЯ ОБУЧЕНИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЮ  
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ**

*Аннотация. Удаленная лаборатория рассматривается как система интегрирующая частные системы, которые реализуют отдельные аспекты педагогических сценариев удаленного обучения проектированию. Эти системы детализированы до уровня объекта управления, управляющего блока, их связей между собой и с внешней средой. Показана иерархичность частных систем.*

*Ключевые слова: удаленная лаборатория, теоретико-множественная модель, интегрированная система, педагогический сценарий обучения.*

**Постановка проблемы**

Сфера применения удаленных лабораторий (англ.- remote laboratory (RL)) [1,2] в процессе инженерного образования непрерывно расширяется. Наряду с дисциплинами, изучающими принципы работы и методы расчета технических устройств, перспективно использовать RL в дисциплинах изучающих принципы проектирования этих устройств и систем на их основе, включая синтез структуры этих систем. При этом в RL для обучения проектированию используются специфичные педагогические сценарии, реализация которых усложняет структуру и увеличивает трудоемкость создания этих лабораторий. Отсутствие в доступной авторам литературе моделей типовой функциональной структуры RL затрудняет ее декомпозицию на подсистемы для упрощения процесса проектирования лаборатории. Поэтому разработка моделей функциональной структуры RL представляет актуальную научно-техническую задачу.

### Анализ последних достижений и публикаций

В настоящей работе для решения этой задачи предлагается использовать теоретико-множественную модель интегрированной контроллерной системы управления [3,4]. В соответствии с этой моделью исходная проектируемая система (DS0) содержащая объект управления (англ. - control object (CO)) и управляющее устройство (англ. - control unit (CU)) декомпозируется на  $n$  подсистем включающие как части CO, так и части CU исходной системы  $DS0=\{DS11, DS12,..DS1n\}$ . При этом возможна ситуация, когда часть CU исходной системы не входит ни в одну из этих подсистем и образует новые системы следующего уровня. Как правило, в области перекрытия двух систем относящихся к различным уровням находятся CU системы более низкого уровня, которые являются CO системы более высокого уровня. Процесс декомпозиции продолжается до тех пор, пока множество элементов CU не входящее ни в одну из систем не окажется пустым. В частном случае, на каждом уровне декомпозиции может находиться одна система.

Модель становится более содержательной, если ввести в нее множество внешних связей систем входящих в интегрированную систему. Тогда  $j$ -я подсистема  $i$ -го уровня описывается  $S_{ij}=\{X_{ij}, Y_{ij}\}$ , где  $X_{ij}$  - входы, а  $Y_{ij}$  - выходы системы. Обозначив через  $X$  множество входов ( $X=\bigcap X_{ij}$ ), а через  $Y$  - множество выходов всех систем ( $Y=\bigcap Y_{ij}$ ), получим множество связей  $S$  как отображение  $S:X*Y$ . Выделим в этом множестве входные  $C_i$ , выходные  $C_o$  связи системы с внешней средой и внутренние связи  $C_o$  между входами и выходами элементов. При этом выполняется  $S=C_i \cap C_o \cap C_s$ .

Дальнейшая детализация модели связана с выделением в локальных системах CO и CU, декомпозицией  $CU_{ij}$  на управляющие ( $CM_{ij}$ ) и операционные ( $OM_{ij}$ ) автоматы с детализацией соединений между введенными элементами, разделением  $OM_{ij}$  на входные ( $OM_{ij}$ ), выходные ( $OMO_{ij}$ ) автоматы, заданием  $CM_{ij}$  кортежем его входов ( $CMX_{ij}$ ), выходов ( $CMY_{ij}$ ), состояний ( $S_{ij}$ ), включая начальное состояние ( $S_{ij0}$ ), функций выходов ( $\mu_{ij}$ ) и переходов ( $\lambda_{ij}$ ):

$$DS_{ij}=\{CO_{ij}, CU_{ij}, C_{iij}, C_{oij}, C_{cij}\}, \quad (1)$$

$$CU_{ij}=\{CM_{ij}, OM_{ij}\}, \quad (2)$$

$$OM_{ij}=\{OM_{ij}, OMO_{ij}\}, \quad (3)$$

$$CM_{ij}=\{CMX_{ij}, CMY_{ij}, S_{ij}, S_{ij0}, \mu_{ij}, \lambda_{ij}\}. \quad (4)$$

Совокупность моделей (1)-(4) для всех возможных  $j$  будет описывать проектируемую систему на  $i$ -м уровне декомпозиции.

#### **Изложение основного материала**

Выделим локальные системы в удаленной лаборатории предназначенной для изучения систем управления электромеханическими устройствами основываясь на цели применения RL, педагогических сценариях и применяемых моделях СО.

Цель - дистанционно научить проектированию программно реализуемых алгоритмов управления для систем с электромеханическими устройствами. Педагогические сценарии предусматривают постепенное усложнение задач проектирования: переход от проектирования фрагментов алгоритма управления к проектированию всего алгоритма. При этом постепенно усложняется СО - от исправного, работающего в нормальном режиме сценарии предлагают проектирование алгоритма управления СО с развивающимися неисправностями, учитывающего в реальном времени более интенсивный поток событий управления СО, динамические изменения параметров внешних воздействий на систему и стохастический характер поведения СО.

Исходя из сценария использования, RL должна содержать модели следующих видов: физические, виртуальные и визуальные.

Физическая модель СО содержит электромеханику по функциям схожую с реальным объектом, но отличающуюся по параметрам. Например, реальный лифт имеет грузоподъемность полтонны, а модель - полкилограмма. Соответственно отличаются и параметры электромеханики.

Виртуальные модели содержат арифметические и (или) логические выражения описывающие поведение СО как конечного автомата, логического узла, системы содержащей блоки с передаточными функциями и др.

Визуальная модель представляет собой видеоизображение СО или набор графических элементов на экране дисплея, атрибуты, расположение и внешний вид которых отображают состояние и поведение физической и(или) виртуальной модели СО. Только визуальные модели доступны для наблюдения студенту в удаленном браузере. Пример визуальной модели бака с жидкостью - графический объект контура бака, степень (уровень) заливки которого пропорциональна

значению соответствующего программного счетчика из виртуальной модели.

При таком определении виртуальные модели являются СУ для визуальных моделей, и каждая такая пара образует локальную систему. Такие СУ могут быть реализованы программно в среде операционной системы (ОС) персонального компьютера. Физическая модель СО требует физического СУ, например, в виде промышленного контроллера или платы управления, содержащей микропроцессор и периферию сопряжения с физической моделью СО. Визуальная модель физического СО образует систему с реальными аппаратными средствами - WEB камерой и электромеханикой ее перемещения.

На основании введенных определений декомпозируем проектируемую RL на следующие системы:

1. **Физического СО**  $DS_1 = \{CO_1, CU_1\}$ , где  $CO_1$  - физическая модель объекта управления,  $CU_1$  - устройство управления электромеханикой физической модели объекта управления. С точки зрения  $CU_1$ , объект  $CO_1$  представляет собой набор датчиков и исполнительных механизмов. Выходы датчиков  $O_{CO_1}$   $CO_1$  являются входами  $I_{1CU_1}$ , а входы  $I_{CO_1}$  исполнительных механизмов соединены с выходами  $O_{1CU_1}$ . Так как RL эксплуатируется, как правило, только в удаленном режиме, то среди выходов  $CO_1$  могут отсутствовать сигналы кнопок и других органов управления, которые используются во время эксплуатации реального объекта. Кроме того, в составе электромеханики модели  $CO_1$  отсутствуют элементы, предназначенные для использования в аварийном, нештатном режиме реального объекта. Они могут моделироваться в виртуальных моделях других систем. Электромеханика физической модели проектируемого объекта это объект управления со стороны RL, но одновременно - устройство управления со стороны механической части этого объекта.

Устройство  $CU_1$  обрабатывает информацию  $I_{1CU_1}$ , теги событий управления студента  $I_{2CU_3}$  и формирует сигналы управления  $O_{1CU_1}$  физической моделью  $CO_1$ , теги датчиков и состояний физической модели  $O_{2CU_1}$  для использования другими системами.

2. **Видеоизображения СО**  $DS_2 = \{CO_2, CU_2\}$ , где:  $CO_2$  - средства видеонаблюдения;  $CU_2$  - устройство управления средствами видеонаблюдения. В средствах  $CO_2$  выделим источник видеоизображения и устройство изменения точки, ракурса съемки и освещенности объек-

та. Не смотря на то, что сложность этих устройств соизмерима или даже превышает сложность проектируемой системы, в RL используются стандартные технические решения. Поэтому, в данной работе система  $DS_2$  не детализируется. Внешние связи  $DS_2$ :  $O_{CU2}$  - выход видеоизображения WEB - камеры, который поступает на вход  $I_{1CO3}$  системы  $DS_3$ ;  $I_{CU2}$  - входы управления точкой, ракурсом съемки и освещенностью объекта, которые поступают с выходов  $O_{1CU3}$  системы  $DS_3$ .

**3. Визуального исправного СО**  $DS_3 = \{ CO_3, CU_3 \}$ , где -  $CO_3$  - визуальная модель исправного;  $CU_3$  - виртуальная модель визуального исправного СО. Модель  $CO_3$  представляет собой один или несколько графических экранов, каждый из которых соответствует определенному взгляду на проектируемую систему, например вид спереди, вид изнутри и т.п. Экраны содержат видеоизображение физического СО или графические объекты (ГО) и виртуальные органы управления (ВОУ) проектируемым объектом и видеоизображением физической модели объекта.

Как уже отмечалось, видеоизображение формируется сигналом со входа  $I_{1CO3}$ . Выходы  $O_{1CO3}$  - это значения сигналов от ВОУ. Они поступают на входы  $I_{2CU3}$ , где трансформируются в теги событий управления студента  $O_{3CU3}$  для воздействий на работу спроектированной им системы. Выходы  $O_{2CO3}$  - это значения сигналов от ВОУ видеоизображением. Они поступают на входы  $I_{3CU3}$  где трансформируются в теги событий управления студента  $O_{1CU3}$  видеоизображением физической модели ОУ.

ГО соответствуют видимым частям физической модели. Атрибуты ГО, такие как координаты на экране, угол поворота, цвет, ширина, процент заливки фигуры и другие, изменяются в зависимости от значений тегов управления, поступающих на входы  $I_{2CO3}$  с выходов  $O_{2CU3}$ .

В системе  $DS_3$  модель  $CU_3$  выступает в качестве управляющего блока для модели  $CO_3$ . В функции  $CU_3$  входит формирование значений тегов управления ГО  $CO_3$  в функции времени, событий управления студента, значений тегов датчиков и состояний физической модели СО.

**4. Визуального скрытого СО**  $DS_4 = \{ CO_4, CU_4 \}$ , где  $CO_4$  - визуальная модель скрытого СО;  $CU_4$  - виртуальная модель визуального скрытого СО. По своей структуре модель  $CO_4$  повторяет модель  $CO_3$ ,

отличия заключаются в ее ГО, которые соответствуют скрытым элементам объекта управления, т. е. элементам, которые активны в нестандартных, аварийных или вспомогательных режимах работы объекта управления. Примером таких элементов может служить тормоз пассажирского лифта, который должен сработать при обрыве троса.

Модель  $CO_4$  имеет только входы тегов управления ГО  $I_{CO_4}$ , которые поступают с выходов  $O_{1CO_4}$  блока  $CU_4$ . Блок  $CU_4$  формирует значения этих тегов в зависимости от значений тегов исполнительных механизмов скрытой части виртуального объекта управления.

**5. Визуализации внешних факторов СО**  $DS_5=\{CO_5, CU_5\}$ , где  $CO_5$  - визуальная модель внешних факторов СО;  $CU_5$  - виртуальная модель визуализации внешних факторов СО. Элементы модели  $CO_5$  представляют собой ГО, которые отображают текущие значения или динамику изменения во времени (тренды) тегов внешних факторов. Например, параметров сети питания, температуры окружающей среды, тока нагрузки и другие. Элементы модели  $CU_5$  представляют расчетно-графическую модель динамики внешних факторов СО. Входами этой модели являются теги параметров внешних факторов, а выходами - теги управления ГО модели  $CO_5$ , теги потока сгенерированных событий управления. Например, при исследовании пропускной способности системы пассажирского лифта может быть сгенерирован поток событий вызовов лифта.

**6. Визуализации технического состояния СО**  $DS_6=\{CO_6, CU_6\}$ , где  $CO_6$  - визуальная модель технического состояния СО;  $CU_6$  - виртуальная модель визуализации технического состояния СО. Если в качестве модели технического состояния принята автоматная модель, то элементами  $CO_6$  будут ГО графа, который визуализирует текущее состояние этого автомата - его вершины, действия и дуги. Теги управления ГО  $CO_6$  формируются расчетно-графической моделью  $CU_6$ , которая, в свою очередь, управляется тегами сценариев изменения технического состояния СО.

На втором уровне декомпозиции виртуальные модели систем  $DS_3$ - $DS_6$  дополняются устройствами управления и образуют системы  $DS_7$ - $DS_{10}$ :

**1. Виртуальная модель исправного СО**  $DS_7=\{CO_7, CU_7\}$ , где объектом  $CO_7$  управления системы  $DS_7$  является устройство  $CU_3$  управления системы  $DS_3$ . ( $CO_7=CU_3$ ), а  $CU_7$  - устройство управления вирту-

альной моделью исправной (функционирующей в штатном режиме) проектируемой системы. Модель  $CU_7$  представляет собой управляющий автомат, который формирует теги исполнительных механизмов виртуального СО исходя из значений тегов состояний физической и визуальной моделей СО, тегов событий управления СО, тегов управления режимами моделирования виртуального СО. Примерами тегов управления режимами могут служить масштаб модельного времени, синхронизация поведения физической и виртуальной моделей, учет событий скрытой части СО и выбор источника событий управления. Структура автомата  $CU_7$  определяется студентом путем разработки и ввода описания алгоритма управления СО.

**2. Виртуальная модель скрытого СО**  $DS_8=\{CO_8, CU_8\}$ , где объект управления  $CO_8=CU_4$ ;  $CU_8$  - устройство управления виртуальной моделью скрытой части проектируемой системы. Модель  $CU_8$  представляет собой управляющий автомат аналогичный модели  $CU_7$ .

**3. Виртуальная модель внешних факторов СО**  $DS_9=\{CO_9, CU_9\}$ , где объект управления  $CO_9=CU_5$ ;  $CU_9$  - устройство управления виртуальной моделью внешних факторов проектируемой системы. Модель  $CU_9$  - автомат управляющий сценариями изменения внешних факторов СО путем формирования значений тегов параметров внешних факторов. Например сценариями изменения нагрузки СО, интенсивности использования СО.

**4. Виртуальная модель технического состояния СО**  $DS_{10}=\{CO_{10}, CU_{10}\}$ , где объект управления  $CO_{10}=CU_6$ ;  $CU_{10}$  - устройство управления виртуальной моделью технического состояния проектируемой системы. Модель  $CU_{10}$  - автомат, который инициирует события возникновения дефектов в СО и изменяет интенсивность их развития. Например, событие параметрического отказа системы охлаждения изменяет техническое состояние СО.

На третьем уровне декомпозиции  $CU$  системы  $DS_1-DS_{10}$  образуют **систему управления режимами RL**  $DS_{11}=\{CO_{11}, CU_{11}\}$ , где объект управления  $CO_{11}$  логически объединяет несколько устройств управления систем второго уровня декомпозиции  $CO_{11}=CU_1 \cap CU_2 \cap CU_7 \cap CU_8 \cap CU_9 \cap CU_{10}$ ;  $CU_{11}$  - устройство управления режимами RL. Модель  $CU_{11}$  - автомат, который управляет запуском и остановкой автоматов входящих в  $CO_{11}$ , изменяет состав их состояний, входов и выходов и тем

самым реализует различные педагогические сценарии использования RL.

Проведенная декомпозиция системы RL позволяет определить состав и внешние связи ее элементов и создает предпосылки для их раздельного проектирования.

### **Выводы**

1. Функциональная структура удаленной лаборатории для обучения проектированию систем управления существенно сложнее структуры систем управления в той предметной области, в которой происходит обучение. Кроме задач управления объектом, эта лаборатория решает задачи проектирования алгоритмов управления, реализации различных моделей объектов управления, педагогических сценариев обучения, обмена в режиме реального времени информацией с удаленным исполнителем лабораторной работы, управления режимами работы лаборатории и другие.

2. Рассмотрение функциональных элементов удаленной лаборатории в координатах "объект управления - управляющее устройство" показало, что отдельные элементы выполняют функции объекта управления в одной локальной системе и управляющего устройства в другой. Теоретико-множественные модели локальных систем описывают удаленную лабораторию как интегрированную систему управления.

3. Предложенные теоретико-множественные модели позволяют специфицировать внешние и внутренние связи проектируемых функциональных элементов. Их предполагается использовать при проектировании удаленной лаборатории в Запорожском национальном техническом университете в рамках работ по международной программы "Темпус" по созданию обучающих курсов для дистанционного инженерного образования по направлению «Электромеханика» базирующихся на удаленной инженерии и виртуальных инструментариях.



**ЛИТЕРАТУРА**

1. K. Henke and H.-D. Wuttke: “Web-based educational tool access”, IASTED International Conference Computers and Advanced Technology in Education – CATE 2003, Rhodes, Greece, June 30 - July 2, 2003.
2. K. Henke, St. Ostendorff and H.-D. Wuttke: “A Flexible and Scalable Infrastructure for Remote Laboratories - Robustness in Remote Engineering Laboratories”, The Impact of Virtual, Remote and Real Logistics Labs - ImViReLL2012, Bremen, February 28 – March 02, 2012.
3. Поляков М.А. Теоретико - множественная модель интегрированной контроллерной системы управления /М.А. Поляков// Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць.- Випуск 4.- Дніпропетровськ, 2009.-С. 131-137.
4. Поляков М.А. Теоретико- множественные модели элементов и структур интегрированных контроллерных систем управления /М.А. Поляков // Системні технології.- Регіональний міжвузівський збірник наукових праць.- Випуск 2 .- Дніпропетровськ, 2012. - С. 75-81.