

УДК 519.876.5:004.94

РЕАЛИЗАЦИЯ СИСТЕМНОЙ ПАРАДИГМЫ В ЯЗЫКЕ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ UML2 SP

В.И. Гурьянов (Чебоксары)

Введение

В нашем докладе [1] был предложен профиль UML для имитационного моделирования, названный UML2 SP (UML 2.x Scientific Profile) и предназначенный для поддержки методологии SSP (Simulation with Scientific Profile). Эта методология является адаптацией методологии Unified Process (UP) [2] для разработки программ-симуляторов. В наших публикациях описание методологии SSP обычно дается в форме адаптированного варианта методологии UP. Полная формальная спецификация профиля UML2 SP и методологии SSP представлена на ресурсе <https://github.com/vgurianov/uml-sp>. Тем не менее, мы многократно отмечали тот факт, что SSP имеет много общего с системным подходом. Знание подобных связей позволяет выйти за рамки формализма SSP и использовать многообразные подходы, предложенные в системных исследованиях. Это особенно важно в моделях высокой сложности, где требуется комплексное (системное) моделирование.

Цель данной работы заключается в том, чтобы изложить системный подход в терминах SSP. Задача сводится к тому, чтобы сопоставить понятия и методы SSP с понятиями и методами системного подхода. Необходимость обоснования такой связи обусловлено тем, что UML2 SP – это, преимущественно, визуальный язык, а SSP работает с паттернами проектирования. Основу системного подхода составляют принципы. Сопоставление принципов системного анализа с паттернами проектирования – это далеко не простая задача, и чисто интуитивные суждения могут быть ошибочными.

Системный подход применим к знанию как к системе, в частности, к такой форме знания как модель [3, 4]. Тем самым системная парадигма обладает свойством саморефлексии и может быть охарактеризована как самодостаточная. Применение системного подхода к объекту «модель» предопределяет структуру последующего изложения. Поэтому мы будем придерживаться следующей структуры статьи.

Отдельно выделим общую теорию систем (ОТС), назначение которой заключается в поиске общих принципов системного описания. Вторым аспектом системной парадигмы выступает системный подход как таковой. Сначала мы определим базовые составляющие эпистемологии модели – концепции. Далее рассмотрим два основных раздела системного подхода: концепции системного анализа и концепции синтеза систем. Есть еще третий аспект системной парадигмы – жизненный цикл системной модели (ЖЦ). Мы не будем его подвергнуть разбору, т.к. этот вопрос всесторонне рассмотрен в UP.

В заключение сделаем выводы и дадим рекомендации.

1. Общая теория систем

Понятие системы мы будем понимать в смысле «интуитивного» определения, как это дано у Л. фон Берталанфи [5]. Выделение системы из окружающего мира зависит от целей и задач моделирования, поскольку один и тот же объект можно рассматривать с разных точек зрения. Цель и задачи моделирования позволяют вычленив основную функцию системы. Объект, предмет, цели и задачи системного исследования в SSP описывает Use-Case Model.

Определим критерий выделения системы. Фрагмент реальности будем интерпретировать как систему, если выполняется **принцип эмерджентности**. Если же

фрагмент реальности может быть факторизован [4, 6], то такое выделение системы, скорее всего, является ошибочным.

По нашему мнению в основу морфизма систем следует положить паттерн, который мы назвали «Simulator», рис.1. Мы его рассматриваем как ядро симуляции, а архитектурный паттерн для программ-симуляторов может быть любым, например, MVC. Данный паттерн позволяет построить модели систем в широком диапазоне: от моделей социологии до моделей квантовой механики.

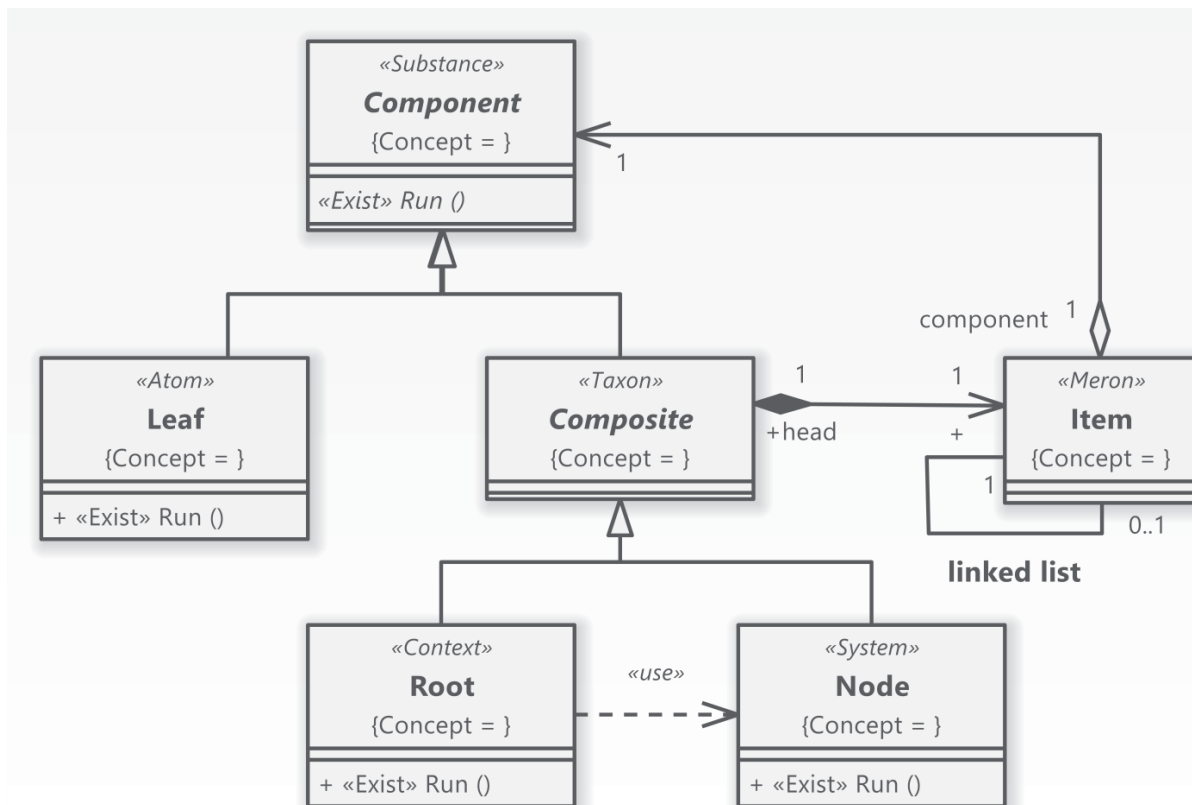


Рис.1. Паттерн «Simulator»

Фреймы (концептуальные классы), их атрибуты и операции имеют стереотипы «...», которые, в свою очередь, определяют помеченные значения. Обязательным является назначение концептов из словаря предметной области. Остальные помеченные значения определяются по необходимости.

Паттерн состоит из двух паттернов проектирования – «Composite» и «Bridge» [7]. Данный паттерн может быть модифицирован любым допустимым способом в зависимости от потребностей моделирования, в т.ч. можно добавить необходимое количество подсистем «System». Допустимые модификации – любые модификации, которые не нарушают логику паттернов «Composite» и «Bridge».

Дальнейшее изложение строится на раскрытие предметной семантики этих паттернов.

2. Системный подход

Для обозначения элементов концептуальной модели мы считаем допустимым использование как термина «концептуальный класс», так и термина «фрейм для представления знаний» [8].

Концептуальную модель мы будем рассматривать как знание об объекте моделирования. Основу составляют фреймы для представления знаний, которые определяют концепты. Ассоциации фреймов определяют концепции. Концепции могут быть как элементарными, так и составными. Тем самым для концептуальной модели

единицей знания будет концепция. По мнению Джейсон Мак-Колм Смита каждой концепции соответствует некий паттерн и обратно [9]. Смит выделяет высокоуровневые паттерны, такие как «Composite», паттерны среднего уровня и элементарные паттерны. Как мы увидим в дальнейшем, системные концепции – это, как правило, высокоуровневые паттерны. Паттерны среднего уровня описывают законы и закономерности конкретной предметной области и могут быть сконструированы из элементарных паттернов.

Системный подход предполагает выполнение двух процессов: системный анализ и синтез систем. Системный анализ выполняется сверху вниз, а синтез системы снизу вверх.

2.1. Системный анализ

Системный анализ – это процедура декомпозиция системы на подсистемы. Вычислительная семантика UP – Analysis Model [2].

В системных исследованиях этот раздел обычно называется системным анализом или декомпозицией [4, 11]. Формулируется в виде принципов или аспектов [6]. Далее мы рассмотрим основные принципы системного анализа в формулировке на языке UML2 SP.

Принцип иерархичности. Все системы, как правило, построены по иерархическому принципу: изучаемая система является подсистемой более высокого уровня, и, в свою очередь, состоит из подсистем.

Для декомпозиции мы используем паттерн проектирования «Composite» [7]. Паттерн «Composite» с привязкой к стереотипам UML2 SP показан на рис. 2.

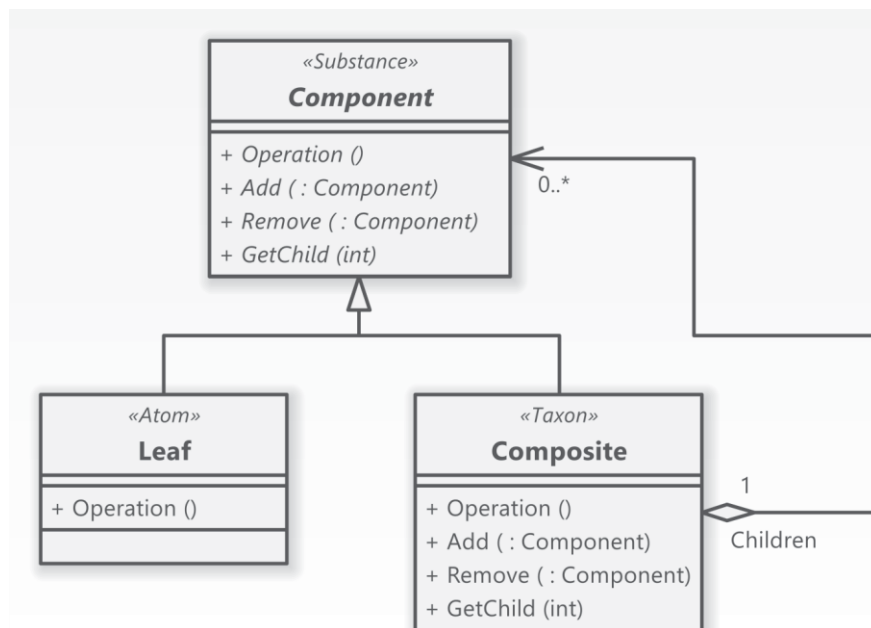


Рис.2. Паттерн «Composite»

Напомним, что паттерн «Composite» позволяет работать с листовыми и составными объектами единообразным образом через интерфейс класса Component.

Стереотип «Atom» определяется как конечный шаг декомпозиции. Согласно определению стереотипа «Atom» этот фрейм рассматривается как «черный ящик», т.е. важны входы и выходы, а внутреннее строение определяется разработчиком модели по собственному усмотрению.

Напротив, фрейм, помеченный стереотипом «Taxon», определяет внутреннее строение системы и должен отражать строение изучаемого объекта.

Классификация систем. Как видно из диаграммы рис.2 паттерн «Composite» никак не определяет способ хранения Потомков. В паттерне «Simulator» мы вводим специальную структуру данных, которая играет роль контейнера. Такая ассоциация описывается паттерном «Bridge» [7], рис.3.

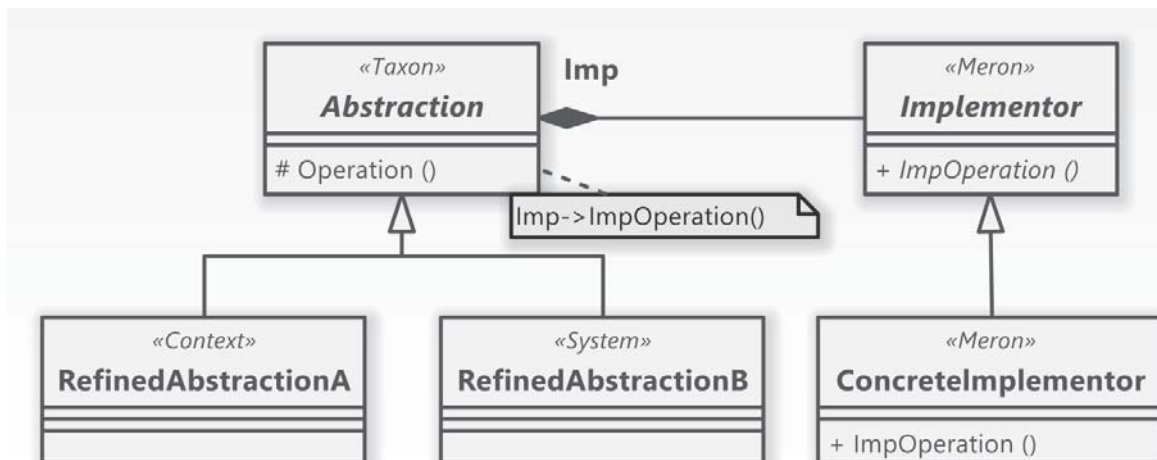


Рис.3. Паттерн «Bridge»

Напомним, вычислительная семантика «Bridge» заключается в том, что абстракция ничего не знает о реализации, что позволяет строить две независимые иерархии наследования. В паттерне «Simulator» показана упрощенная версия паттерна «Bridge».

За основу предметной семантики взята теория классификации, базирующаяся на идее двойственности таксономии и мерономии. Данная теория классификации разработана в работах С.В. Мейена и Ю.А. Шрейдера [10]. Мейен предложил термин «мерон» (от греческого «мерос» – часть) для обозначения частей архитипа системы. Архетип системы – это контейнер для объектов и определяет пространство системы фрейма Composite. В паттерне «Simulator» (рис.1) показан простейший архетип – связанный список. Для математического описания используется теория категорий. Обозначим через $\mathcal{C}$ категорию множества таксонов, где объекты категории – таксоны T , а морфизмы – отображения вложения таксонов. Через $\mathcal{R}$ обозначим категорию архетипов, где в качестве морфизмов выступают гомоморфизмы. Тогда классификацию можно определить как функтор $\mathcal{Z}: \mathcal{C} \rightarrow \mathcal{R}$ категории таксонов в категорию архетипов.

Таксон является основой таксономии систем, входящих в данную модель. Мерон также может образовывать иерархию и, тем самым, определяет мерономию. В целом данная конструкция представляет собой классификацию систем, входящих в модель. Это особенно хорошо видно, если рассмотреть не одну модель, а некоторый класс моделей. Например, таким образом можно построить классификацию систем для моделей, изучаемых в теории массового обслуживания.

Рассмотрим теперь ассоциацию фреймов со стереотипами «Context» и «System», и связанные с этим системные концепции.

Принцип множественности описаний. Всякую систему минимально требуются описать с трех точек зрения:

- присущих системе внешних свойств;
- внутреннего строения и отношений компонент;
- понимания данной системы как подсистемы системы более высокого уровня.

Со стороны «Context» определим **принцип коммуникативности** (системно-коммуникационный аспект). Фрейм со стереотипом «Context» определяет границу системы (граничные условия) для системы. Этот принцип рассматривает объект

изучения как открытую систему. Важность этого принципа подчеркивает Л. фон Берталанфи [5]. Конструктор фрейма со стереотипом «Context» также определяет начальные условия для системы.

Со стороны «System» определим три принципа системного анализа.

Принцип историчности (системно-исторический аспект). Конструктор фрейма со стереотипом «System» определяет историю системы, но определяет историю схематично, в данном случае важен конечный результат. Как получен этот конечный результат – несущественно, это на усмотрение разработчика модели.

Принцип целостности (системно-интегративный аспект) Концепция системности, которая является центральным принципом системной парадигмы, реализуется фреймами со стереотипом «System». Неважно, какие связи в системе, важно как они обеспечивают выполнение основной функции. Между элементами могут быть сильные связи, которые нас не интересуют. Связи, которые обеспечивают функциональность, могут быть слабыми.

Системно-компонентный аспект. Компоненты системы подчиняются основной функции системы, некоторые свойства компонент могут подавляться.

2.2. Синтез систем

Вычислительная семантика – Design Model. На этом этапе определяются концепты атрибутов и операций. Выполняется снизу вверх, от атомарных объектов к контексту.

Этот раздел системного подхода развит в меньшей мере, чем системный анализ. Это видно хотя бы по многообразию терминов: агрегация [4, 11, 12], синтез систем [12], композиция [13] и др. Агрегация – это представление модели как целого, за основу берутся результаты системного анализа. Сложность агрегации существенно возрастает, когда рассматриваются действительно сложные системы, такие как экология [14]. Мы будем придерживаться подхода, иногда называемого конструированием агрегатов-структур [4, 11, 12].

В данной работе мы хотим предложить метод, который можно назвать методом экспликации. Суть предлагаемого метода заключается в том, чтобы дать объяснение тем эффектам, которые порождаются операциями фреймов, а затем формализовать это объяснение посредством диаграмм взаимодействия. По нашему мнению этот метод в большей мере соответствует философии имитационного моделирования.

Введем сначала понятие «игрушечной» модели. В технике такие модели широко используются и называются принципиальными схемами. Они объясняют принцип действия устройства. Их характерная особенность заключается в том, что они содержат те и только те элементы, которые необходимы для объяснения изучаемого явления. Несмотря на названия, такие модели представляют собой абстракции высокого уровня: они, как правило, сильно отличаются от соответствующих интуитивных визуальных образов.

Экспликация – метод раскрытия сущности того или иного предмета, или явления, посредством других предметов и явлений. Несмотря на критику, признанная теория научного объяснения – это дедуктивно-номологическая модель (DN-модель) Гемпеля [15]. Представляет собой научный ответ на вопрос «Почему...?». DN-модель является дедуктивной структурой, такой, что истинность ее посылок влечет за собой истинность ее заключения согласно законам логики.

Предпосылки (explanans) это начальные, конкретные условия $C_1, C_2, \dots, C_n$ и общие законы $L_1, L_2, \dots, L_n$. Предпосылки должны быть истинными или в высшей степени подтвержденными, и должны содержать, по крайней мере, один универсальный закон.

Явление *E* (explanandum) – это явление (событие, закон или теория), которое необходимо объяснить

Если explanandum является дедуктивным следствием explanans, то явление считается научно объясненным.

Покажем, как это работает на примере. Пусть автомобиль перемещается из пункта *A* в пункт *B*. Почему автомобиль оказался в пункте *B*?

Рассмотрим «игрушечную» модель из трех ячеек Item. Пусть автомобиль первоначально находится в пункте *A*.

Explanans. Автомобиль в пункте *A* (C_1), три ячейки пространства(C_2).

Общие законы – законы Ньютона. Поскольку сила трения компенсируется тягой двигателя, достаточно закона инерции (L_1). Для симуляции движения по инерции можно использовать алгоритм перекладывания.

Explanandum: получим автомобиль в ячейке *B*, дважды применив алгоритм перекладывания.

Тем самым мы определили протокол обмена сообщениями, формализуем его посредством диаграммы коммуникаций (рис.4). Этим мы определим операцию Move. Эта операция используется в операции Run фрейма Node (рис.1).

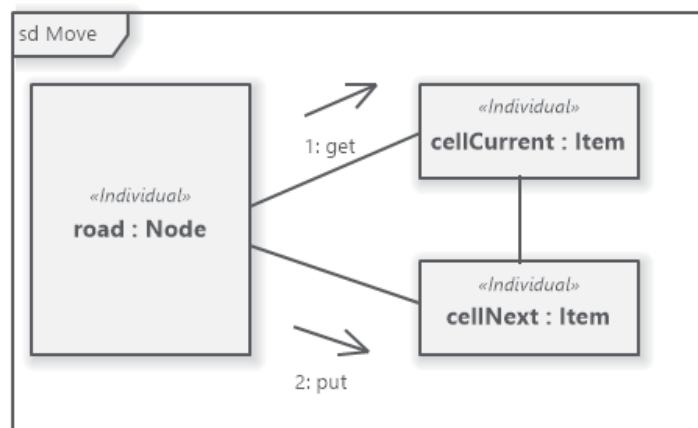


Рис.4 . Диаграмма коммуникаций для экспликации перемещения

После определения протокола обмена сообщениями подбираем подходящие структуры данных (конструируем агрегат-структуру).

Масштабируемость модели. Конечно, «игрушечные» модели недостаточны для получения количественных результатов. Поэтому следующим шагом является масштабирование модели. В нашем примере количество ячеек должно быть пропорциональным расстоянию между *A* и *B*, а алгоритм перекладывания должен учитывать скорость движения. Масштабируемая модель должна сводиться к «игрушечной» модели, возможно, как предельный случай. Это относится как к структурам данных, так и к алгоритмам.

В заключение сделаем следующие общие замечания.

Системные исследования – это обширное поле, охватывающее множество направлений исследований. В данной статье мы ограничились только теми аспектами системного подхода, которые, по нашему мнению, являются определяющими. В частности мы никак не касались вопросов развития систем или приложения системного анализа в управлении.

Установление соответствия между методологией SSP и системным подходом имеет значение также и для развития самой методологии SSP. По большей части изменения, вносимые в SSP, связаны с уточнением и углублением понимания концепций и методов, включенных в методологию. Именно этот момент отражает

разные версии языка UML2 SP, что, в частности, видно по смене названий стереотипов, таблица 1.

Таблица 1. Список изменений в версиях UML2 SP

UML2 SP ver. 1.2	UML2 SP ver. 1.1	UML2 SP ver. 1.0	UML SP ver. 1*
Meron	Box	Space	Space
Taxon	Category	Category	Category
Context	Context	Environment	Environment

* эта версия языка использована в книге Гурьянов В. И. Имитационное моделирование на UML SP: монография – Чебоксары: Филиал СПбГЭУ в г. Чебоксары, 2014. – 135 с.

Несколько слов скажем о применении LLM (Large Language Model) в SSP. Существующие UML-редакторы недостаточно хорошо выполняют генерацию кода по диаграммам. Однако LLM значительно лучше понимают модели UML2 SP. Современные инструменты, такие как Cursor AI (<https://cursor.com/>), позволяют дообучать модель на готовых проектах, что можно использовать для генерации кода прототипа имитационной модели. Впрочем, следует ожидать появление UML-редакторов со встроенным LLM для быстрого прототипирования. На наш взгляд главное не это. LLM можно использовать для первичной генерации концептуальной модели и последующего анализа модели, причем перспективы анализа выглядят весьма заманчиво.

Выводы

В данном докладе представлен вариант системного подхода в формализованном виде на языке UML2 SP. Применение системного подхода к объекту «модель», как к системе, позволило четко структурировать системную парадигму на следующие три аспекта: ОТС, системный подход и модель ЖЦ. Системный подход, в свою очередь, представлен системным анализом и синтезом систем. Установлено, что каждому принципу системного анализа можно сопоставить паттерн проектирования или ассоциацию концептуальных классов методологии SSP, верно и обратное. Это открывает возможность построения комплексных моделей на базе моделей UML2 SP, поскольку комплексное моделирование в значительной мере опирается на системные представления. Не менее важно, на наш взгляд, и то, что также появляется возможность сравнения системных моделей и моделей UML2 SP, прежде всего, по критерию качества модели.

Также предложен метод экспликаций для построения агрегации (композиции, синтеза систем). Этот метод может представлять интерес и для специалистов по системному анализу.

Предложенный вариант системного подхода также можно рассматривать как неформальное описание методологии SSP на языке системных представлений.

Безусловно, предлагаемая формулировка системного подхода накладывает более жесткие ограничения на модели систем, чем это имеет место в системных исследованиях. По нашему мнению, данное обстоятельство обладает положительным потенциалом, т.к. сужает пространство поиска решений. Обратно, системный анализ позволяет несколько смягчить формальный стиль моделирования SSP, придавая большую глубину понимания модели.

Данную формулировку системного подхода можно рассматривать как часть онтологического инжиниринга. Тем самым, SSP можно рекомендовать системным

аналитикам. Системный аналитик получает достаточно выразительный и строгий инструмент для моделирования систем, а главное, модель является исполняемой, что позволяет находить ошибки в модели.

Отметим еще один момент. Мы видим, что составляющие UML2 SP могут быть достаточно четко привязаны к основным положениям системной парадигмы. Это дает весомое обоснование для языка UML2 SP и методологии SSP.

Литература

1. **Гурьянов В.И.** Мета модель языка имитационного моделирования UML2 SP // Седьмая всероссийская научно-практическая конференция «Имитационное моделирование. Теория и практика» (ИММОД-2015): Труды конф., 21-23 окт. 2015 г., Москва: в 2 т. / Ин-т проблем упр. им. В.А. Трапезникова Рос. Акад. наук ; под общ. ред. С.Н. Васильева, Р.М. Юсупова. Т. 1. – М.: ИПУ РАН, 2015. С.59-62.
2. **Арлоу Д., Нейштадт И.** UML2 и Унифицированный процесс. Практический объектно-ориентированный анализ и проектирование, 2е издание. – Пер. с англ. – СПб: Символ-Плюс, 2007. 624 с.
3. **Микони С.В., Соколов Б.В. Юсупов Р.М.** Квалиметрия моделей и полимодельных комплексов : монография С. В. Микони, Б. В. Соколов, Р. М. Юсупов. — М. : РАН, 2018. 314 с.
4. **Перегудов Ф.И., Тарасенко Ф.П.** Основы системного анализа: Учеб. 2-е изд., доп.- Томск: Изд-во НТЛ, 1997. 396 с.:
5. **Л. Фон Берталанфи.** Общая теория систем: критический обзор // Исследования по общей теории систем [Текст] : Сборник переводов / Общ. ред. и вступ. статья В. Н. Садовского и Э. Г. Юдина. Москва : Прогресс, 1969. 518 с..
6. **Заболеева-Зотова А.В., Фоменков С.А., Орлова Ю.А.** Основы системного анализа: Учебное пособие – Волгоград: ИУНЛ ВолгГТУ, 2012. 230 с.
7. **Гамма Э., Хелм Р., Джонсон Р., Влиссидес Дж.** Приемы объектно-ориентированного проектирования. Паттерны проектирования. СПб: Питер, 2001. 368с.
8. **Минский М.** Фреймы для представления знаний / Пер. с англ. О.Н. Гринбаума; Под ред. Ф.М. Кулакова. Москва : Энергия, 1979. 151 с.
9. **Смит, Джейсон Мак-Колм.** Элементарные шаблоны проектирования. : Пер. с англ. — М. : ООО «И.Д. Вильямс», 2013. 304 с.
10. **Шрейдер Ю.А., Шаров А.А.** Системы и модели. - М: Радио и связь, 1982 – 152 с. (Кибернетика).
11. **Бусленко Н.П.** Моделирование сложных систем. : Наука, 1968. 356 с.
12. **Никаноров С.П., Никитина Н.К., Теслинов А.Г.** Введение в концептуальное проектирование АСУ: анализ и синтез структур. М.: Концепт, 2007. 236 с.
13. **Тода М., Шуфорд Э. Х. (мл.).** Логика систем: введение в формальную теорию структуры // Исследования по общей теории систем [Текст] : Сборник переводов / Общ. ред. и вступ. статья В. Н. Садовского и Э. Г. Юдина. Москва : Прогресс, 1969. 518 с.
14. **Моисеев Н. Н.** Модели экологии и эволюции. М.: Знание, 1983. 64 с. (Новое в жизни, науке, технике. Серия «Математика, кибернетика»; №10).
15. **Гемпель К. Г.** Логика объяснения. М., 1998