МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

УДК 004.45

ПРИНЦИПЫ И МЕТОДЫ ФУНКЦИОНАЛЬНО-РОЛЕВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

В. А. Бочаров, ассистент кафедры «Системы автоматизированного проектирования» МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия;
orcid.org/0009-0006-7724-3862, e-mail: bocharov.v@bmstu.ru

Работа содержит описание принципов и методов формирования моделей кибер – физических систем в объёме принципиальных схем и функциональной логики, в которых обеспечивается выводимость внешних свойств системы – функциональности и поведения от внутренних свойств – её строения. Моделирование реализует проекцию целевых характеристик системы на системные требования, а функциональность интегрирует её с поведением – конечным автоматом, определяющим смену состояний системы в зависимости от смены условий. В качестве основного конструктива использованы отношения частично упорядоченных множеств, которые могут быть исследованы с применением математических методов. Для их адаптации в процесс разработки предложен способ прямой интеграции естественных языков, на которых мыслят инженеры-разработчики, с алгоритмическими языками, которыми оперируют вычислительные системы. Результатом интеграции стал язык, оперирующий семантикой отношений функций, ролей их элементов, фаз, режимов и функциональных связей с одной стороны, и результатов работы системы во внешней сред – с другой. Формализация систем, основанная на специально созданной для этой цели функционально-ролевой спецификации (ФРС), обеспечивает возможность интерпретировать целевые характеристики системы в её системные требования и затем декомпозировать их, руководствуясь принципами рациональности и минимальной сложности. При этом декомпозиция обеспечивает эквивалентность «по построению», основанная на семантических правилах, поэтому разработчик может повысить размерность и порог сложности разрабатываемой системы, не повышая трудоёмкости работы над её анализом и синтезом. Также разработчик получает возможность пошагово (интерактивно) разрабатывать киберфизическую систему, сначала достигая цели любым доступным способом, а затем упрощая полученный результат, находя более простые реализации механизмов функций. Процесс интерактивной функциональной декомпозиции показан на примере типовой киберфизической системы, характерной для летательных аппаратов. Данная разработка предназначена для реализации в перспективной системе САПР, призванной дать возможность инженерам работать в проблемно-ориентированной постановке научно-технических задач, что обеспечивает получение более качественного результата.

Ключевые слова: *киберфизические системы, функциональность, функционально-ролевая спецификация, эквивалентирование, техническое решение, семантика.*

DOI: 10.21667/1995-4565-2024-90-91-100

Введение

Приводится пример проектирования типовой киберфизической системы на уровне функциональной логики, с использованием функционально-ролевой спецификации (ФРС) и техники проблемно-ориентированного моделирование. Цель примера – продемонстрировать укрупнённый и обобщённый сценарий действий разработчика, в котором реализуется преобразование постановки задачи проектирования в системные требования, выраженные в функциях и функциональных связях, которые реализуют заданные потребительские свойства.

Критерием достижения цели принимается соответствие внутреннего строения системы её внешнему свойству – функциональности. Процесс начинается с определения ключевых понятий и отношений, составляющих систему, затем из них формируется концептуальный облик системы, в которой присутствует *идея* разработчика и на её основе формируется состав функций, ролей, фаз и режимов, которые могут быть проверены на соответствие её целевым потребительским свойствам. Действия инженера можно условно разделить на теоретизацию, детерминирование, концептуализацию и аксиоматизацию, что обеспечивает выполнение преобразования модели (детализацию, упрощение, оптимизацию) на основе эквивалентирования.

Теоретическая часть

Центральным понятием, обозначающим предмет исследования, является воздух A (air). К общим свойствам воздуха относится: газ, его состав, давление и температура, а к частным – место и обстоятельства, где воздух присутствует – салон самолёта и рейс W. Салон ограничивает объём, в котором находится конкретный интересуемый нами воздух в салоне некоторого летательного аппарата, а полёт (рейс) указывает на обстоятельства, при которых мы наблюдаем за интересуемыми нас переменными – температурой и давлением.

Для формализации предмета исследования применяем частично упорядоченные множества [1]. Это позволяет устанавливать связь между объектом и явлениями, происходящими с участием этих объектов, независимо от предметной области и от размера и сложности исследуемой системы. При этом предмет исследования может и должен быть выводим из контекста на основе предикатов и правил логического вывода. Это даёт модели достаточную адекватность [2].

Применим этот подход к понятиям исследуемой системы. «Воздух» как «вещь в себе» может быть выражен системой свойств, операций над свойствами и отношениями, как показано на рисунке 1:

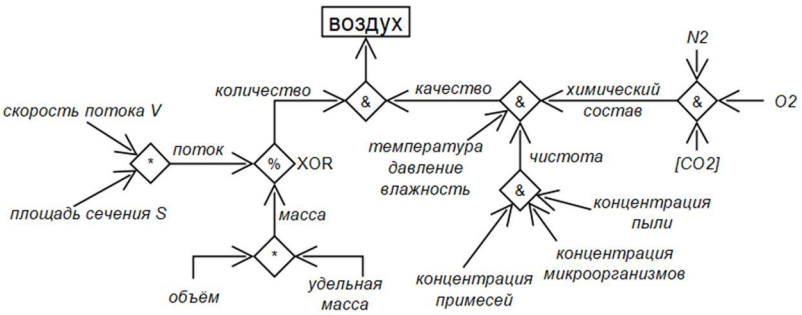

Рисунок 1 – Структура понятия *«Воздух»* с точки зрения его внутреннего содержания
Figure 1 – The structure of «*Air*» concept in terms of its internal content

Аналогично выразим и остальные понятия, представляющие элементы модели. Понятие *«Кабина»* при том же подходе будет выглядеть как пересечение множеств (фильтр), которыми представляется некоторое содержание, распределённое в некоторых пространствах.

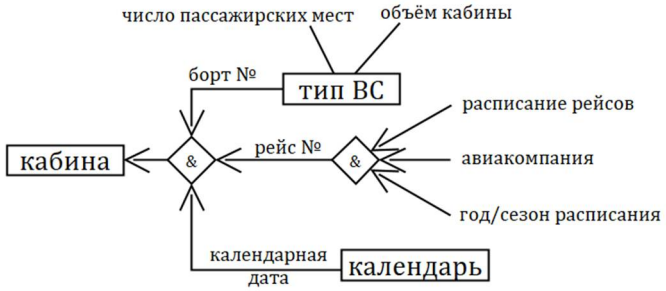

Рисунок 2 – Структура понятия «*Кабина*» с точки зрения внутреннего содержания
Figure 2 – The structure of «*Cabin*» concept in terms of its internal content

Соединяя эти два определения понятий, получаем экспликацию понятия *«Воздух в кабине»*, в которой имеются предикаты для вычисления логики первого порядка. Имеем в виду, что существуют два аксиоматических суждения, вытекающих из знаний природы физического мира: а) о том, что на высоте давление и температура воздуха ниже, чем на земле; б) что для комфорта человека значения этих переменных лежат в заданных пределах. Они в нашей модели являются постулатами и участвуют в построении функций в качестве граничных условий [3].

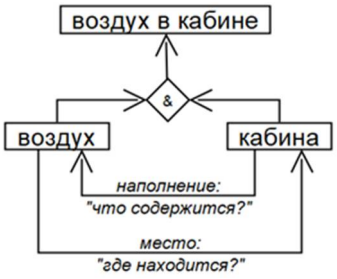

Рисунок 3 – Определение понятия «*Воздух в кабине*»
Figure 3 – Definition of «*Air in a cabin*»concept

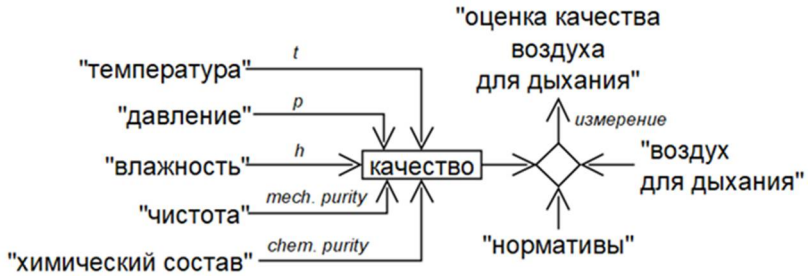

Рисунок 4 – Определение понятия «*Оценка качества воздуха в кабине*»
Figure 4 – Definition of «*Assessment of air quality in a cabin*» concept

Таким образом, получаем теорию, описывающую предмет исследования и разработки.

Формализация идеи разработчика

Набор исходных данных для будущих функций будет выглядеть как именованный массив *«качество воздуха для дыхания»*, состоящий из операций сравнения текущего и нормативного значения каждого из параметров:

dataSet "air_breath_quality": {
{t: {<curr> vs <norm>} → <low / norm / high>},
{p: {<curr> vs <norm>} → <low / norm / high>},
{h: {<curr> vs <norm>} → <low / norm / high>},
{mech_purity: {<curr> vs <norm>} → <low / norm / high>},
{chem_purity: {<curr> vs <norm>} → <low / norm / high>} }.

Его мы используем для аксиоматизации цели работы функции – приведения состояния воздуха к установленной норме.

Полученный набор понятий, свойств и связей образует исходные данные для функционального моделирования – предназначений функций и их портов – входов, выходов, управления и механизмов.

Определяем функцию системы в терминах функций, состояний и изменений.

Функция «Кондиционирование воздуха», которая отражает облик всей целевой системы, на функционально-ролевом языке моделирования будет выглядеть так:

function:{states, conditions, relations},

где*: function=«Регулировать температуру»*

states:{ a:“ожидание” | b:“нагрев” | c:“охлаждение” }

conditions:{ d:“T=Тнорм”, e:“T≤Тнорм”, g:“T>Тнорм”, h:“T↑Тнорм”, k:“T↓Тнорм” },
relations:{ r1:d(a,a) | r2:e(a,b) | r3:g(b,a) | r4:h(a,c) | r5:k(c,a) },
или проще: *ft:{ s:{ a, b, c }, c:{ d, e, g, h, k }, r:{ r1 ... r5 } }*
Аналогично будет выглядеть функция регулирования давления:
function=«Регулировать давление»
states:{ a:“ожидание” | b:“компрессия” | c:“декомпрессия” }
conditions:{ l:“P=Рнорм”, m:“P≤Рнорм”, n:“P>Рнорм”, q:“P↑Рнорм”, p:“P↓Рнорм” },
relations:{ r6:l(v,v) | r7:m(v,u) | r8:n(u,v) | r9:q(v,w) | r10:p(w,v) },
или проще: *fp:{ s:{ u, v, w }, c:{ l, m, n, q, p }, r:{ r6 ... r10 } }.*

Полученные таким образом конечные автоматы представляют собой ожидаемые потребительские свойства целевой системы, выраженные через ограничения на её поведение – управляемую смену состояний. Они предопределяют принцип работы целевой системы, выражая его тремя состояниями и пятью условиями перехода, как показано в формулах выше и как показано на рисунке 5:

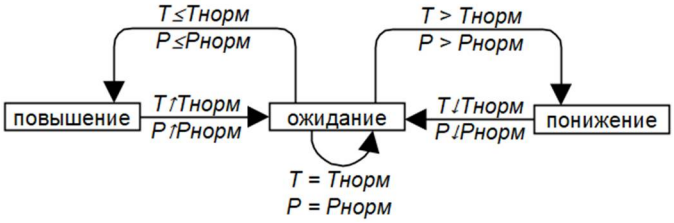

Рисунок 5 – Схема принципиальная работы системы кондиционирования воздуха
Figure 5 – Schematic diagram of air conditioning system basic operation

Полученная принципиальная схема указывает на разницу (различие) в потребном объёме тепловой энергии воздуха в кабине и фактическом её объёмом на тех высотах, где движется самолёт с пассажирами. Эту разницу можно условно выразить, как разницу между фактическим и требуемым значениями температуры и давления воздуха: *{{t0, p0} vs {tv, pv}}*, где *t* – температура, *p* – давление, *«0»* – на земле, *V* – на высоте. Но увеличение давления ведёт к росту температуры, а снижение давления – к охлаждению. Поэтому следует оперировать другой физической величиной – удельной тепловой энергией и брать за основу разницу между требуемым и текущим значениями. Для этого выбирается техническое решение, основанное на идее смешения воздушных потоков из двух источников – забортного воздуха и сжатого воздуха после третьей ступени компрессора, в результате чего достигается нужное значение удельной тепловой энергии [4].

Концептуально формирование воздушного потока заданного объёма тепловой энергии выглядит, как на рисунке 6:

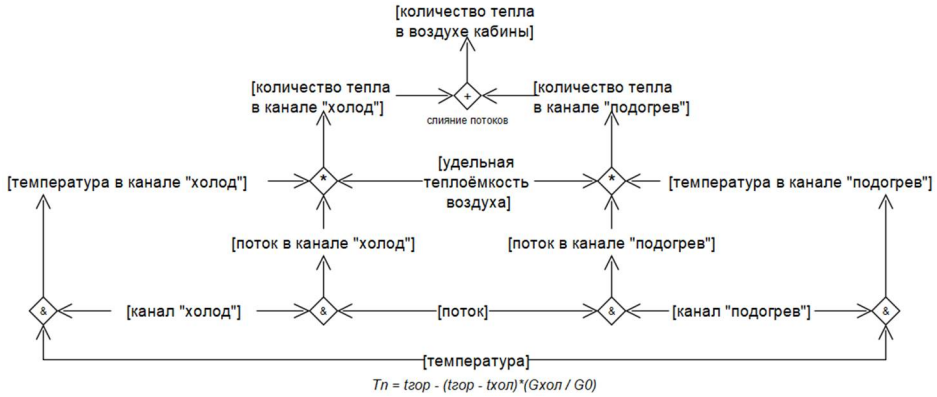

Рисунок 6 – Принцип формирования требуемого количества тепла в кабине самолёта на основе смешения двух потоков
Figure 6 – The principle of generating the required amount of heat in a cabin of aircraft based on mixing two flows

Решение заключается в нахождения таких функций, которые выполняют указанные преобразования заданных параметров.

Интерпретация проблемы в функцию даёт: F0 = { изменяемое (i):{ tv, pv }, изменённое (d):{ t0, p0 }, условие изменения (c):{ {(t0 - tv), (p0 - pv)}, { tn, pn } }, изменяющее (m):{ St:{t}, Sp:{p} }, где S – обозначение для СКВ – «Системы кондиционирования воздуха», n – «нормативное значение». Таким образом, основная функция целевой системы заключается в изменении температуры и давления воздуха от значения, обусловленного внешней средой – условиями полёта, до значения, нормального для дыхания и температурного комфорта пассажиров.

Итак, система целиком F0 = {i:{температура и давление воздуха за бортом и в кабине}, d:{команды исполнительным механизмам}, c:{законы гидродинамики; нормативы}, m:{система кондиционирования воздуха ЛА}}, с граничными условиями, определёнными выше.

Функциональная декомпозиция системы

Как видим из *F0*, в системе явно присутствуют два действия, выполняемые в отношении свойств одной и той же сущности (воздуха) – температуры и давления. Разделяем кондиционирование *F0* на нагрев/охлаждение *F1* и компрессию/декомпрессию *F2* по схеме *F:{<список функций>, <список функциональных связей>}*:

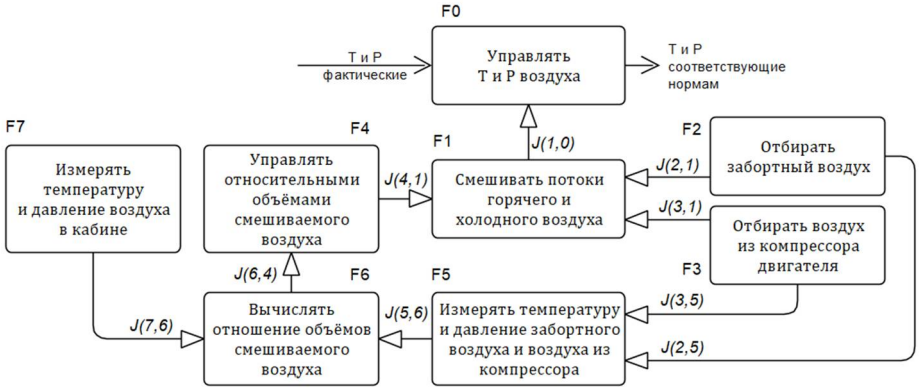

Рисунок 7 – Схема функциональной модели системы кондиционирования воздуха в терминах выполняемых действий и функциональных связей

Figure 7 – Diagram of air conditioning system functional model in terms of the actions performed and functional connections

Завершив декомпозицию, получаем описание системы S в формальном виде на языке ФРС:

$$S=\left\{\begin{array}{l} F0:\left\{\dfrac{F1}{J(1,0)}\right\};F1\left\{\dfrac{F2}{J(2,1)},\dfrac{F3}{J(3,1)},\dfrac{F4}{J(4,1)}\right\};F4:\left\{\dfrac{F6}{J(4,6)}\right\}; \\ F5:\left\{\dfrac{F2}{J(3,5)},\dfrac{F3}{J(2,5)}\right\};F6\left\{\dfrac{F5}{J(5,6)},\dfrac{F7}{J(7,6)}\right\} \end{array}\right\} \quad (1)$$

Здесь каждая функциональная связь J(x,y) содержит в себе описание того, какими изменяемыми, изменёнными, изменяющими и условиями изменения обмениваются функции по формуле *F:{ input, output, control, mechanism },* которые образуют частично упорядоченные множества (в других понятиях – «направленные ациклические графы») [5-7].

К модели системы, выраженной таким способом, можно применять алгоритмы анализа частично упорядоченных множеств и получать сведения о свойствах целостности и состоятельности системы, а именно выводы о том, что:

а) в системе исходные данные и условия не появились ниоткуда и никуда не исчезли; б) все начальные исходные данные и условия имеют связи с конечными результатами работы

функции; в) все изменения и преобразования в функциональности системы обеспечены своими методами (формулами, предикатами, алгоритмами). Эти три условия являются основанием для утверждения, что построение системы соответствует заданию на проектирование, а сами основываются на двух простых условиях: 1) отсутствие свободных (не занятых) портов, 2) функциональные связи *J(x,y)* семантически однозначны. Оба этих условия обеспечиваются на каждом шаге декомпозиции функциональности системы в процессах её разработки. Итак, получена технология кондиционирования воздуха, и теперь нужно её применить на всём парке воздушных судов (бортах). Для этого нужно построить фактологию (базу фактов) состояния воздуха для дыхания пассажиров во всех салонах, всех рейсов, во всей временной шкале каждого полёта.

Тиражирование результата работы системы кондиционирования воздуха на миссию авиалинии будет представлять собой направленный ациклический граф вида:

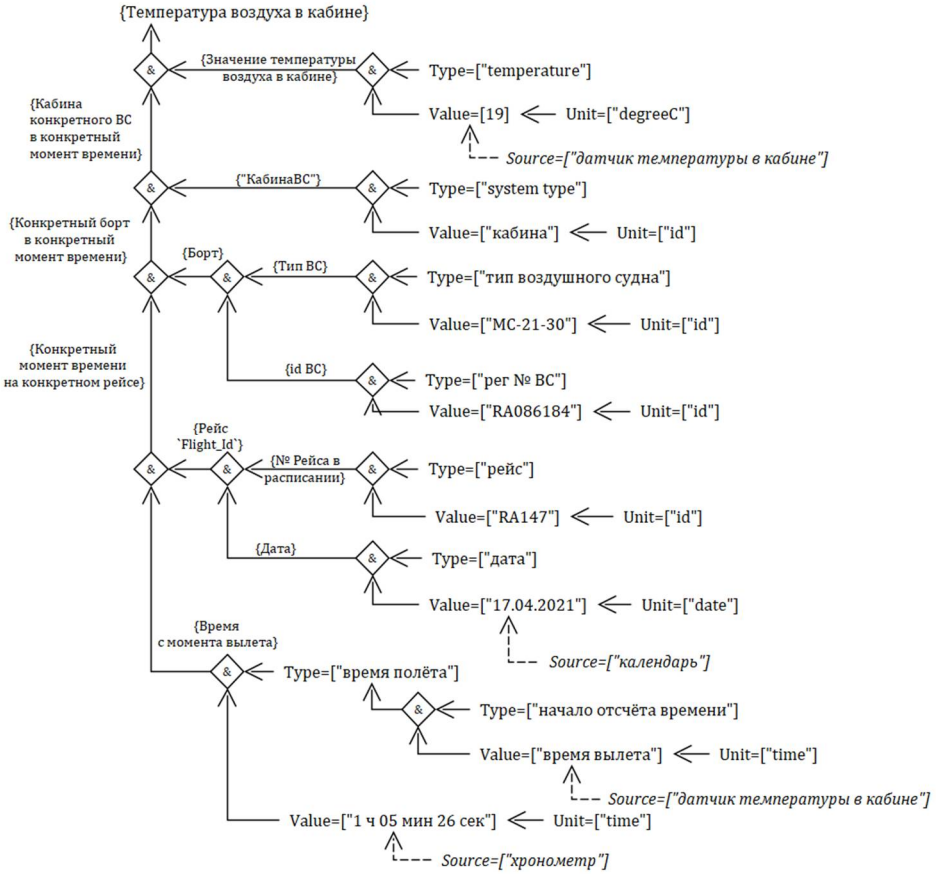

Рисунок 8 – Представление цели работы функции Т воздуха в виде комплекса логических операций над переменными контента и контекста

Figure 8 – Representation of T air function purpose in the form of a set of logical operations on content and context variables

Этот направленный ациклический граф даёт возможность фиксировать всю прагматику задачи обеспечения качества воздуха для дыхания, распределённую по бортам, рейсам и времени работы системы, что обеспечивает её полный контроль.

Единичная транзакция функциональной декомпозиции. Абстрагируясь от существа приведённого примера, опишем процесс интерактивной функциональной декомпозиции. Пусть есть предметная область, формализованная словарём D (*dictionary*) с конечным числом понятий, которые мы встречали на рисунках 7, 8 и в формуле (1). Обозначая роли портов функций номерами, имеем вид исходной функции:

$$F(p, q) = \{ \{ i1, ..., ik \},\{ d1, ..., dl \},\{ c1, ..., cm \},\{ m1, ..., mn \}\},$$

где: i – идентификатор роли входа, k – число ролей входа; d, l – соответственно для ролей выхода; c, m – для управления; m, n – для механизмов; p, q – индекс уровня декомпозиции

функции; *(i, c, d, m) ∈ D*. Возьмём для примера часть функционала системы кондиционирования – регулирование температуры воздуха. Обозначив роли портов функций номерами, имеем вид функциональной модели:

F0 = {1, 2, 3, 4}, где 1 – температура исходная, 2 – температура результирующая, 3 – формула для положения заслонки смесителя, 4 – механизм смесителя, в котором управляемая заслонка меняет соотношение потоков холодного и горячего воздуха.

Выполним декомпозицию этой функции, руководствуясь тем, что регулирование температуры сводится к регулированию количества тепловой энергии в смешиваемых объёмах воздуха с разной температурой.

F0 = { F1, F2, {J(f1, f2)}}.

F1 = { {1, 5}, {2, 6}, {7}, 4 }, причём данные связаны отношениям «вид – подвид»: *1 ← 5* и *2 ← 6*, а управление *3 ← 7*.

F2 = { {1, 8}, {2, 9}, {10}, 4 }, 1 ← 8 и 2 ← 9, а управление *3 ← 10*.

J(f1, f2) = { { (5, 8) → 1}, {(6, 9) → 2 }, {(7, 10) → 3}, {4 → 4} }.

Тождество в формуле гарантируется тем, что не существует свободных портов (не занятых ролей в функции), и все декомпозируемые роли семантически связаны - производные роли выводимы по отношению к вышестоящим ролям по уровню абстракции. В такой постановке эквивалентность F0 по отношению к совокупности F1 и F2 может быть проверена с учетом формулы (1). Совокупность всех шагов проектирования, выполненных таким способом, даёт возможность выразить всю систему в наборе взаимосвязанных механизмов, функциональность которых соответствует системным требованиям, и которые, в свою очередь, соответствуют требованиям к результатам работы системы, выдвигаемым её потребителем.

Повторив процедуру необходимое количество раз, получим набор функций, в котором сигнатура функции сведена к одному условию для одной переменной, что и является критерием завершения процесса функциональной декомпозиции. Результатом работы является формальная (теоретическая) система, выраженная тождеством формулы (1) и набором выражений вида *F0 = {{ F1, F2, ..., Fi }, { J(fp, fq) }}*.

Экспериментальные исследования

На основе вышеизложенного определена и опробована функциональность перспективного программного приложения, реализующего интерактивную функциональную декомпозицию с поддержкой эквивалентирования, которое представляет собой набор из семи взаимосвязанных модулей, не считая средств ввода-вывода и интерпретаторов языка:

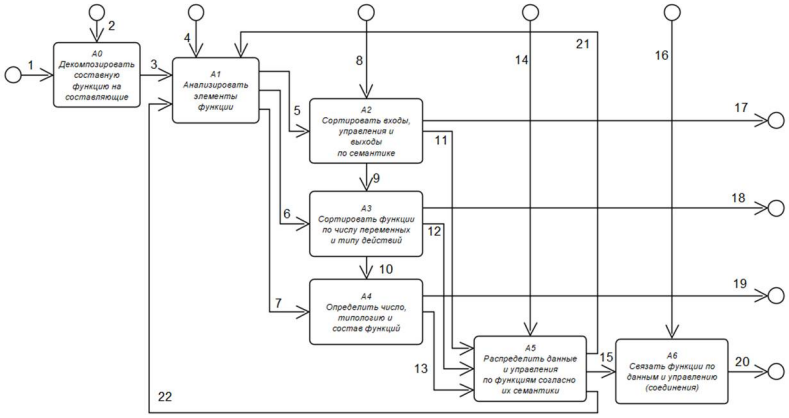

Рисунок 9 – Функциональная схема программного приложения, реализующего функциональную декомпозицию с эквивалентированием
Figure 9 – Functional diagram of software application implementing functional decomposition with equivalence

Обозначения на рисунке 9:

1 – исходное системное требование, основанное на целях, заявленных потребителем целевой системы.

2 – теория функциональности систем (системология; исследование систем) в словаре понятий, отношений и правил отношений.

3 – формальное представление целевой системы на языке ФРС.

4 – теория, связывающая синтаксис и семантику языка ФРС с теориями систем (2).

5 – фактология ролей элементов функций (портов).

6 – фактология предикатов функций.

7 – фактология функциональной модели.

8 – справочник-классификатор семантических связей и их экспликаций.

9 – справочник-классификатор предикатов.

10 – теория сигнатур функций.

11 – распределение данных и управления по семантике.

12 – распределение предикатов функций по семантике.

13 – распределение сигнатур функций.

14 – семантика отношений данных, управления и методов (теория).

15 – спецификация функциональная (теория).

16 – семантика функциональных связей (теория).

17-19 – разделы функциональной спецификации целевой системы

20 – спецификация функциональных связей.

Приложение использует фактологический формат данных *{id, content, context}*, где *id* – идентификатор записи, *content* – блок данных содержания, *context* – блок данных контекста, содержащий в себе блоки: время, логическое место, логическое пространство, имя абонента системы и имя транзакции, сеанса работы или рабочей сессии.

Память системы хранения данных предусматривает четыре уровня хранения. «*Фиксированная память*» хранит информацию об объектах языка моделирования, экспликациях отношений и аксиомах, и никогда не удаляется. «*Память потоковая*» хранит записи рабочих данных, которые пишутся и никогда не удаляются. «*Транзакционная память*» заполняется и освобождается в ходе исполнения сценариев работы системы. «*Временная память*» служит для быстро доступных буферных данных, которые по окончании транзакции не сохраняются.

В ходе эксперимента выявлено, что для одного и того же примера соотношение предметных и служебных (обеспечивающих и вспомогательных) данных в спецификации ФРС на треть выше, чем на традиционных XML-подобных языках – SysML/AADL.

Заключение

На примере одного шага функциональной декомпозиции системы климатического контроля в салоне пассажирского самолёта показан типовой процесс формирования киберфизической системы с использованием языка, объединяющего в себе как свойства естественного («понятность» для человека), так и алгоритмического – пригодность к обработке вычислительными средствами. В моделировании функциональности реализована логика отношений изменяемого, изменённого, изменяющего и условий изменения, независимая от предметной области и тем самым позволяющая решать задачи построения систем, затрагивающих различные предметные области, использующие терминологию разных словарей и реализующие единство и взаимосвязанность функциональности и поведения. Метод моделирования даёт разработчику гарантию, что система «верна по построению» независимо от числа и состава шагов декомпозиции её функциональности. Функционально-ролевая спецификация как набор языковых средств и методов научно-технической деятельности может стать ключевым элементом перспективной отечественной системы САПР для поддержки разработки сложных киберфизических систем.

Библиографический список

1. **Авдошин С.М., Набебин А.А**. Дискретная математика. Алгоритмы: теория и практика. // М.: Изд-во ДМК, 2019 .

2. **Авдошин С.М., Набебин А.А**. Дискретная математика. Формально-логические системы и языки. // М.: Изд-во ДМК, 2018.

3. **Омельченко В.В.** Основы Систематизации. Методология и философские аспекты. Принципы и законы познания реальной действительности // Изд-во «Либроком», 2012.

4. Бортовые системы летательных аппаратов: Справочное пособие для инженеров. / под ред. В.Л. Толмачёвой. МАИ, 2004.

5. **Бочаров В.А, Волосатова Т.М, Солоделов Ю.А, Филиппов М.В.** Обзор методологий перехода от требований к решениям в системной инженерии // Вестник Российского государственного гуманитарного университета. 2022. № 3. С. 8

6. **Бочаров В.А., Солоделов Ю.А., Очередько С.В.** Функционально-ролевой метод проектирования систем // Конференция «Управление в аэрокосмических системах имени академика Е.А. Микрина» (УАКС–2022).

7. **Бочаров В.А.** Функционально-ролевой метод проектирования систем // В книге: Управление в аэрокосмических системах им. академика Е.А. Микрина. Материалы 15-й конференции по проблемам управления (УАКС-2022).

UDC 004.45

ON THE WAY TO INTERACTIVE FUNCTION – ROLE MODELING

V. A. Bocharov, BMSTU, assistant teacher, Moscow, Russia;
orcid.org/0009-0006-7724-3862, e-mail: bocharov.v@bmstu.ru

The work contains a description of principles and methods for forming the models of cyber-physical systems in the volume of basic diagrams and functional logic, which ensure the derivability of external properties of the system - functionality and behavior from internal properties - its structure. Modeling implements the projection of target characteristics of the system on system requirements, and functionality integrates it with behavior - a finite state machine that determines the change of system states depending on the change of conditions. The main construct is the relations of partially ordered sets that can be studied using mathematical methods. For their adaptation to the development process, a method for direct integration of natural languages, the languages that engineers use to think, with algorithmic languages that are operated by computing systems is proposed. The result of integration is a language that operates with the semantics of relations of functions, the roles of their elements, phases, modes and functional connections, on the one hand, and the results of system's operation in external environment, on the other. Formalization of systems based on functional-role specification (FRS) specially created for this purpose provides the ability to interpret the target characteristics of a system in its system requirements, and then decompose them, guided by the principles of rationality and minimal complexity. At the same time, decomposition ensures equivalence "by construction" based on semantic rules, so the developer can increase dimensionality and complexity threshold of a system being developed without increasing efforts in analysis and synthesis. The developer also gets the opportunity to develop a cyber-physical system step-by-step (interactively), first achieving the goal in any available way, and then simplifying the obtained result, finding simpler implementations of the mechanisms of functions. The process of interactive functional decomposition is shown on the example of air conditioning system used in aircraft. This development is intended for implementation in a promising CAD system designed to work in problem-oriented formulation of scientific and technical problems.

Keywords: *cyber-physical system, functionality, functional-role specification, equivalent transformation, realization, semantics.*

DOI: 10.21667/1995-4565-2024-90-91-100

References

1. **Avdoshin S.M., Nabebin A.A.** Discrete Mathematics. *Algoritmy: teoriya i praktika*. DMK publisher, Moscow, 2019. (in Russian).

2. **Avdoshin S.M., Nabebin A.A.** Discrete Mathematics. Formal Logical Systems and Languages. DMK publisher, Moscow, 2018. (in Russian).

3. **Omelchenko V.V.** Basics of Systematization. Methodological and Philosophical aspects. Principles and Laws of Cognition. Limbocom publisher 2012. (in Russian).

4. **Tolmachyova V.L.** Bortovye sistemy letatel'nyh apparatov. *Spravochnoe posobie dlya inzhenerov*. Pod redakciej MAI. 2004. (in Russian).

5. **Bocharov V.A., Volosatova T.M., Solodelov Yu.A., Filippov M.V.** Obzor metodologij perekhoda ot trebovanij k resheniyam v sistemnoj inzhenerii. *Vestnik Rossijskogo gosudarstvennogo gumanitarnogo universiteta.* 2022, no. 3, pp. 8. (in Russian).

6. **Bocharov V.A., Solodelov Yu.A., Ochered'ko S.V.** Funkcional'no-rolevoj metod proektirovaniya sistem. *Konferenciya «Upravlenie v aerokosmicheskih sistemah imeni akademika E.A. Mikrina» (UAKS-2022*). (in Russian).

7. **Bocharov V.A.** Funkcional'no-rolevoj metod proektirovaniya sistem. V knige: Upravlenie v aerokosmicheskih sistemah im. akademika E.A. Mikrina. *Materialy 15 konferencii po problemam upravleniya (UAKS-2022)*. (in Russian).