

Модельно-ориентированное проектирование в системе оценки качества телекоммуникационного оборудования

К. В. Нарышкин

Аннотация — Актуальность работы связана со снижением точности оценок качества вычислительных систем (ВС). Существующие методы моделирования не позволяют решать все задачи, возникающие в процессе оценки качества. Предлагается использовать модельно-ориентированное проектирование, которое направлено на создание классов моделей в соответствии с характеристиками качества, что позволяет структурировать информацию, полученную из готового образца системы. Разработанный метод состоит из 8 шагов: от определения терминов, понятий и места в предметной области до математических моделей оценки качества ВС. Метод включает создание онтологических и архитектурных моделей, иерархических структур системы, таблиц отношений с указанием типа связей. Параметризованные модели используют количественные и качественные метрики – элементы показателей качества (ЭПК). Расчеты метрик основаны на математических моделях, которые соответствуют характеристикам качества.

Ключевые слова — оценка качества, характеристики качества, вычислительная система, MBSE, моделирование сложных систем, надежность, функциональная пригодность, производительность

I. ВВЕДЕНИЕ

Рост сложности вычислительных систем (ВС) затрудняет их моделирование, что снижает точность и полезность получаемых моделей [1]. В процессах оценки качества только разработчику доступен тот объем информации о системе, которого достаточно для создания точных и полезных моделей. В тех случаях, когда оценку проводит потребитель или третья сторона, требуется получать информацию из самой системы и применять новые подходы к моделированию сложной ВС.

Качество ВС включает три базовые характеристики: функциональная пригодность, надежность и производительность. Характеристики качества определяются

показателями качества (ПК), а расчет ПК основан на измерении или расчете элементов ПК (ЭПК) [2].

Значения ЭПК определяются разными способами; наиболее популярные — это измерение метрик на готовом образце системы [3], построение аналитических [4] или имитационных моделей [5]. В условиях, когда отсутствует готовый образец системы или доступ к информации ограничен, подходящими являются аналитические и имитационные модели.

Моделирование ВС целиком представляется трудоемкой задачей, которая может не иметь решения. Поэтому целесообразно разделить систему на компоненты и создать класс моделей для каждой характеристики качества.

Модельно-ориентированный системный инжиниринг (от англ. Model Based System Engineering, MBSE) позволяет унифицировать представления результатов наблюдения за системой и создавать комплексные метамодел. Научная значимость исследования заключается в расширении области применения MBSE на анализ готовых систем при ограниченном доступе к информации. Также предлагается специализировать метод и ограничиться только теми моделями, которые необходимы для оценки качества. На практике метод MBSE способен создавать машиноориентированные метамодел, которые усиливают возможности при оценке качества ВС.

II. МОДЕЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ В ОЦЕНКЕ КАЧЕСТВА ВС

Модельно-ориентированный подход применяется в системном инжиниринге для описания и представления технических систем [6]. Сбалансированный комплекс частных моделей образует метамодел и описывает сложные системы.

Метамоделирование ВС целесообразно рассматривать по методу «сверху вниз». На

рисунке 1 представлена опорная стратификация моделей для оценки качества ВС.

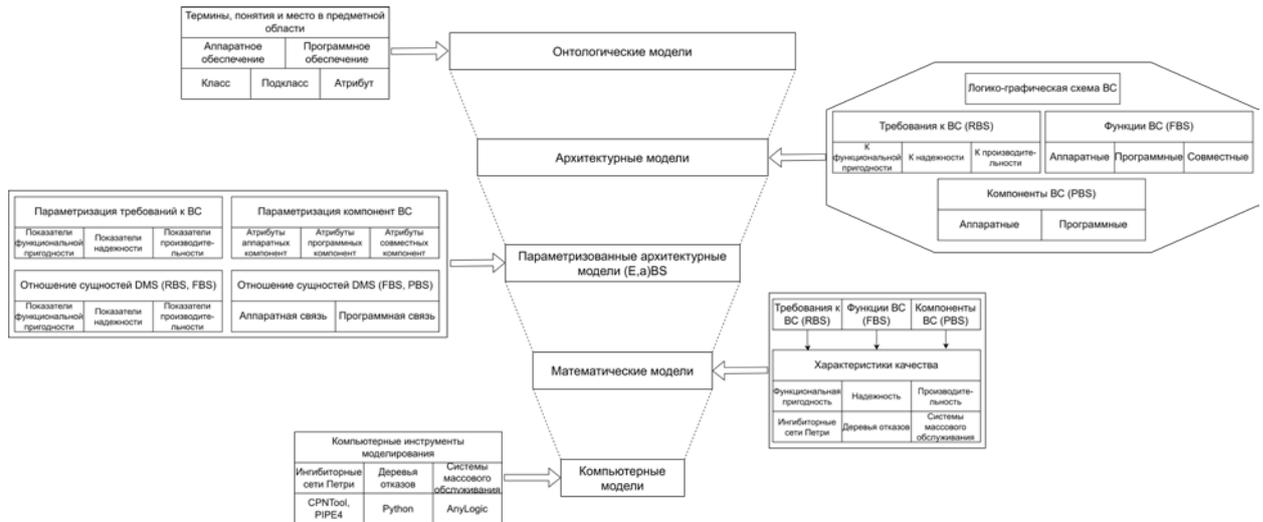


Рисунок 1 – Стратификация моделей оценки качества ВС

Введение качественных и количественных параметров в модели позволяет создавать классификаторы и справочники данных. С одной стороны, качественные и количественные данные наполняют математические модели параметрами, а с другой – эти параметры являются ЭПК при оценке ВС. В итоге по архитектурным и математическим моделям создаются имитационные модели, способные выполняться на компьютере.

На рисунке 2 представлена схема оценки качества ВС с применением метода MBSE.

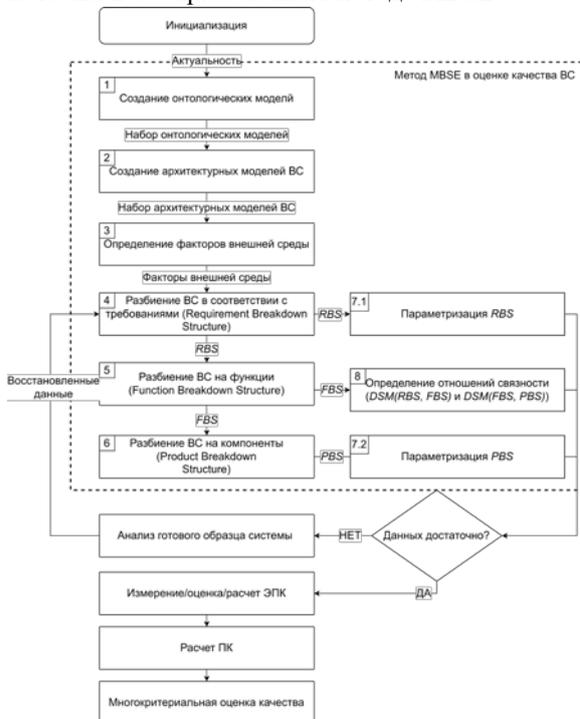


Рисунок 2 – Схема оценки качества ВС

Вычислительная система S – это совокупность аппаратных (H_i) и программных компонент (P_i), которые обладают целостностью. Архитектурная

модель, учитывающая компоненты H_i и P_i системы S , характеризуется:

- уровнями иерархии моделирования;
- древовидными графами, где вершинами являются компоненты системы и компоненты компонент;
- наличием связей как внутри компонентов H_i и P_i , так и между ними;
- видами связей c_i ;
- таблицами отношений сущностей по видам связей c_i .

Первичное представление системы состоит из иерархической структуры системы (System Breakdown Structure, SBS), связей c_i и таблиц отношений $DSM_k(SBS, SBS)$. На следующем шаге моделируются требования (Requirement Breakdown Structure, RBS) в соответствии с характеристиками качества, функции (Function Breakdown Structure, FBS) и компоненты (Product Breakdown Structure, PBS) системы, а также создаются таблицы отношений (Design Structure Models, DSM) с обозначением программных и аппаратных связей.

Параметризация моделей основана на определении метрик a_{ij} сущностей E_i , которые представляются в виде качественных и количественных величин. В иерархической модели качества выделено 11 метрик, которые определены как ЭПК.

III. ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА MBSE ПРИ ОЦЕНКЕ КАЧЕСТВА ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ

В качестве ВС для апробации метода MBSE используется телекоммуникационное оборудование (ТКО). ТКО — это «идеальный объект» исследования, так как зачастую управляется ОС общего назначения (как правило,

Unix-подобными системами), является частью систем связи и относится к типу встраиваемых систем.

Рассматривая ТКО как объект приобретения и поставки с предварительной оценкой качества, необходимо описать ограничения исследования:

- система является готовым образцом;
- производителем предоставляется техническая документация на готовый образец;
- отсутствует детальное описание программных и аппаратных компонент системы;
- отсутствуют исходные коды программного обеспечения.

Требуется создать опорную стратификацию моделей ТКО с целью дальнейшей оценки характеристик качества системы.

ШАГ 1. Термины, понятия и место в предметной области

Онтологическая модель приобретаемого ТКО описывает термины, понятия и место в предметной области, где применяется оборудование [7]. Чтобы задать систему понятий, прежде всего определяется основная задача ТКО. Основная задача заключается в обеспечении функционирования канала связи между элементами компьютерных, промышленных, сотовых, домашних, корпоративных сетей. Канал должен удовлетворять заданным критериям качества. Качество канала связи напрямую зависит от качества ТКО.

В соответствии с правилами разработки онтологий проведен анализ ТКО и выделены основные понятия – классы (аппаратное обеспечение общего назначения (АО ОН), системное программное обеспечение (системное ПО) и подсистема обработки и передачи данных), подклассы и атрибуты. На рисунке 3 предлагается обобщенная структурная схема элементов онтологии.



Рисунок 3 – Структурная схема элементов онтологии ТКО

Класс «Аппаратное обеспечение общего назначения» представлен в таблице 1.

Таблица 1 – Онтология аппаратного обеспечения общего назначения ТКО

| Класс | Подкласс | Атрибут |
|--|--------------------|---|
| Аппаратное обеспечение общего назначения | Микропроцессор | Архитектура |
| | | Разрядность |
| | | Тактовая частота |
| | | Размер кэш-памяти |
| | Чипы памяти | ОЗУ |
| | | ПЗУ |
| | | Память микропроцессора |
| | Интерфейсы отладки | Интерфейсы отладки микропроцессора |
| | | Интерфейсы отладки памяти |
| | | Интерфейсы отладки периферийных устройств |
| | | Визуальные интерфейсы (световые индикаторы) |
| | Источник питания | Схемы подключения |
| | | Входное напряжение |
| | | Выходное напряжение |
| | | Мощность |
| | | Количество выходов |
| | | Температурные характеристики |

ШАГ 2. Архитектурная модель

После построения онтологических моделей предлагается архитектурная модель ТКО с обозначением известных связей (рис. 4) [8] [9].

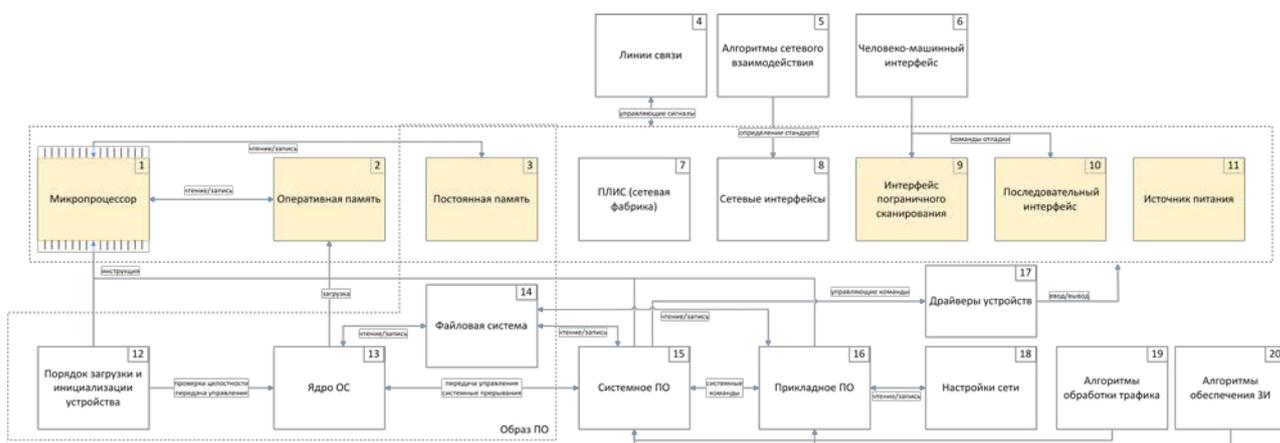


Рисунок 4 – Архитектурная модель ТКО

Компоненты из таблицы 1 представлены под номерами 1, 2, 3, 9, 10, 11 и выделены цветом на рисунке 5.

ШАГ 3. Факторы внешней среды

На исследование накладываются ограничения, источником которых является внешняя среда (факторы воздействия на систему), поэтому в таблице 2 производится их учет.

Таблица 2 – Факторы внешней среды

| Индекс | Название | Описание |
|--------|---|--|
| Е.1 | Неделимость системы | ВС в условиях переноса с предварительной оценкой качества существует в виде готового образца. Деление системы на части может менять свойства системы. |
| Е.2 | Полнота технической документации | Техническая документация может быть неполной или содержать ошибки. |
| Е.3 | Состав системы | Номенклатура программных и аппаратных компонент может быть скрыта полностью или частично. Структура системы имеет поверхностное представление. |
| Е.4 | Применение подсистем защиты информации | Применение технических методов защиты информации (проприетарные протоколы связи, обфускация программного кода, удаление отладочных интерфейсов и др.). |
| Е.5 | Отсутствие поддержки | Отсутствие возможности взаимодействия с разработчиками ВС. |
| Е.6 | Отсутствие исходных кодов на программные компоненты | Так как большая часть основных функций ТКО реализована в программных компонентах, то отсутствие исходных кодов является важнейшим фактором воздействия на ВС в условиях оценки качества. |
| Е.7 | Применение закрытых технологий | Широкое применение нестандартизированных технологий в ВС усложняет процесс анализа системы. |

Факторы внешней среды формируют ограничения на применение существующих методов оценки качества ВС и должны учитываться при выборе методов и моделей.

ШАГ 4. Требования

Оценка качества системы зависит от того, какие требования предъявляются к системе [2]. Как часть общего процесса оценки качества подпроцессы – оценка соответствия, верификация и валидация – определяются тем, что подтверждают выполнение заданных требований. Отсюда следует, что необходимо создать метамодели (RBS) по принципу разбиения системы в соответствии с требованиями, которым она и её компоненты должны отвечать (рис. 5).



Рисунок 5 – Иерархическая модель требований к ТКО

ШАГ 5. Функции

По аналогии с RBS система ТКО разбивается в соответствии с функциями (FBS), которые она выполняет, и компонентами (PBS), из которых она состоит. Так как моделирование ограничено отсутствием информации о системе (фактор внешней среды), то полнота моделей FBS и PBS ограничена доступной информацией. Поэтому, в процессе оценки качества предлагается использовать методы восстановления информации о системе (системный анализ бинарного кода и восстановление информации об аппаратных компонентах). Таким образом, применение методов восстановления информации о функциях и компонентах системы обеспечивает модели FBS и PBS достаточной полнотой для оценки качества системы.

На рисунке 6 представлена иерархическая модель функций ТКО, главной функцией которого является обеспечение функционирования компьютерной сети [10].

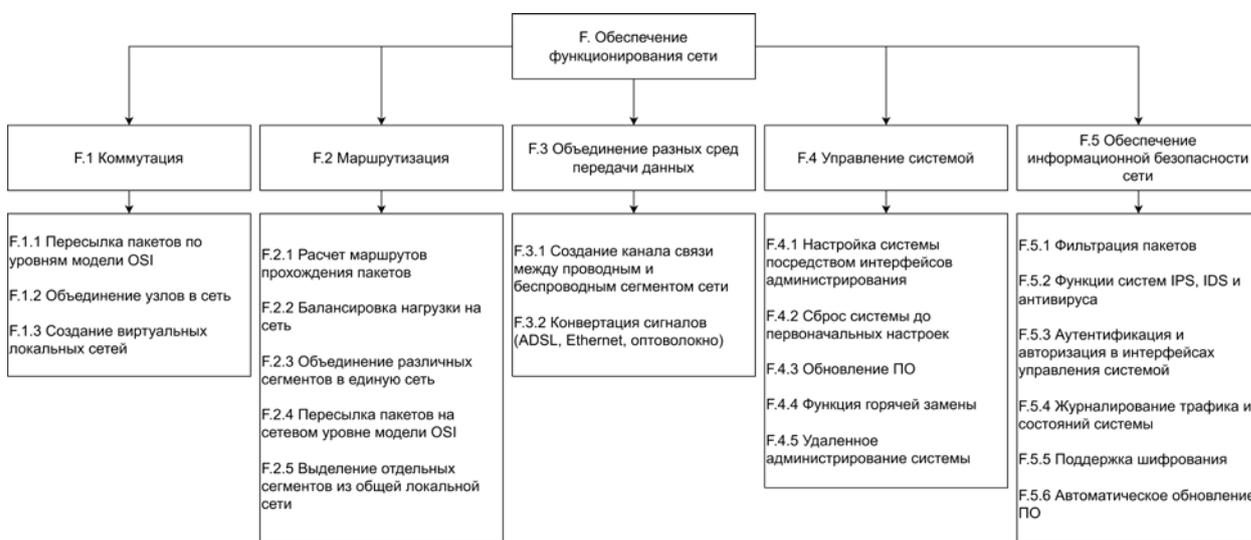


Рисунок 6 – Иерархическая модель функций ТКО

ШАГ 6. Компоненты

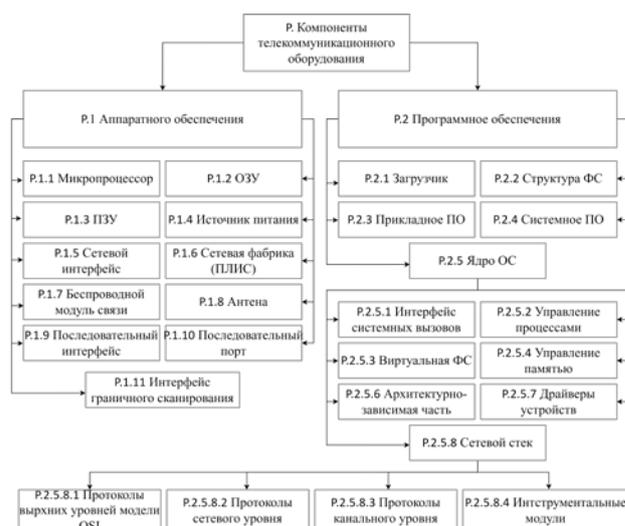


Рисунок 7 – Иерархическая модель компонент ТКО

Как и в любой ВС, в ТКО компоненты делятся на аппаратные и программные, а они в свою очередь детализируются в соответствии с реализацией. На рисунке 7 представлен пример иерархической модели компонент ТКО.

ШАГ 7. Параметризация требований и компонент системы

Оценка качества базовых характеристик ВС сопровождается построением математических моделей по параметризованным архитектурным моделям (E, a)BS. В рассматриваемом случае к таким моделям относятся иерархические модели RBS и PBS.

Предлагается составлять таблицу 3 на основе требований к качеству ВС (рис. 5), где ЭПК базовых характеристик заданы качественными, временными и числовыми атрибутами

Таблица 3 – Параметризация требований

| № и атрибуты требований | | | | |
|---|---|--|---|---|
| Иерархически упорядоченные индексы компонент требований | Имена иерархически упорядоченных компонент требований | Метрики/единицы измерения и символьные обозначения атрибутов | | |
| | | a1 | a2 | a3 |
| R.1.1 | Функциональная полнота | Количество реализованных компонент (F^c) | Количество компонент, заданных в требованиях (F^m) | - |
| R.1.2 | Корректность | Количество реализованных компонент (F^c) | Количество компонент, заданных в требованиях (F^m) | - |
| R.1.3 | Точность | Множество всех входных данных (D) | Сумма результатов индикаторной функции $F_i^c(D_i)$ | Сумма результатов индикаторной функции $F_i^m(D_i)$ |
| R.1.4 | Целесообразность | Количество реализованных компонент (F^c) | Количество компонент, обеспечивающих функционирование системы (F^a) | - |
| R.1.5 | Согласованность | Количество реализованных компонент (F^c) | Количество компонент, реализованных по стандартам (F^s) | - |
| R.2.1 | Безотказность | Интервал времени безотказной работы (t_i) | Количество отказов (m) | Индекс отказа (i) |
| R.2.2 | Устойчивость к ошибкам | Тип отказа (N^*) | Общее количество отказов (N) | - |
| R.2.3 | Восстанавливаемость | Время на восстановление системы (t'_i) | Количество отказов (m) | Индекс отказа (i) |
| R.3.1 | Пропускная способность | Вероятность отказа обработки данных ($p_n(t)$) | Момент времени (t) | - |
| R.3.2 | Время отклика | Среднее время ожидания заявки | Среднее время обслуживания | - |

| | | | | |
|-------|----------------|---|--|------------------------|
| | | $(T_{ож})$ | $(T_{об})$ | |
| R.3.3 | Ресурсоемкость | Загруженность микропроцессора $(Cl(t))$ | Количество используемой памяти $(Vm(t))$ | Время выполнения (t) |

Для того чтобы соотнести реализованную систему с требованиями к ней, задаются качественные и числовые атрибуты для модели PBS (рис. 7). В таблице 4 представлена

необходимая часть параметризованных компонент ТКО, которая позволяет построить и провести анализ математических моделей.

Таблица 4 – Параметризация компонент

| № и атрибуты компонент | | | | |
|---|---|---|------------------------|---------------------------|
| Иерархически упорядоченные индексы компонент требований | Имена иерархически упорядоченных компонент требований | Метрики/единицы измерения и символные обозначения атрибутов | | |
| | | a1 | a2 | a3 |
| P.1.1 | Микропроцессор | Тактовая частота | Разрядность | Архитектура |
| P.1.2 | ОЗУ | Скорость чтения/записи (Мбит/с) | Объем памяти (МБ) | Тип памяти |
| P.1.3 | ПЗУ | Скорость чтения/записи (Мбит/с) | Объем памяти (МБ) | Тип памяти |
| P.1.4 | Источник питания | Выходное напряжение | Выходная мощность | Тип ИП |
| P.1.5 | Сетевой интерфейс | Скорость приема/передачи данных | Количество интерфейсов | Тип интерфейса |
| P.1.6 | Сетевая фабрика (ПЛИС) | Скорость линии | Объем буфера | Тип микросхемы |
| P.1.7 | Беспроводной модуль связи | Скорость приема/передачи данных | Тип модуля | Количество модулей |
| P.1.8 | Антенна | Количество антенн | Тип антенн | Частота приема/передачи |
| P.1.9 | Последовательный интерфейс | Скорость приема/передачи данных | Количество интерфейсов | Тип интерфейса |
| P.1.10 | Последовательный порт | Количество портов | Тип порта | - |
| P.1.11 | Интерфейс граничного сканирования | Количество интерфейсов | Тип интерфейса | - |
| P.2.1 | Загрузчик | Размер занимаемой памяти | Время работы | Тип загрузчика |
| P.2.2 | Структура ФС | Размер занимаемой памяти | Тип ФС | - |
| P.2.3 | Прикладное ПО | Размер занимаемой памяти (МБ) | Разрядность | Тип ПО |
| P.2.4 | Системное ПО | Размер занимаемой памяти (МБ) | Разрядность | Скорость обработки данных |
| P.2.5 | Ядро ОС | Размер занимаемой памяти (МБ) | Разрядность | Тип ядра ОС |

ШАГ 8. Отношения связностей функций и компонент системы

Моделирование компонент системы использует информацию о функциях, которые реализуют эти компоненты. Для этого создается таблица отношений функций системы FBS (рис.

6) к её компонентам PBS (рис. 7) с указанием видов связей. В таблице 5 представлена часть отношений функций к компонентам с двумя видами связей: программными (×) и аппаратными (*).

Таблица 5 – Отношения сущностей DMS (FBS, PBS)

| Функции системы F | Компоненты системы P | | | | | | | |
|-------------------|----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | P.1.1 | P.1.2 | P.1.3 | P.1.5 | P.1.6 | P.2.3 | P.2.4 | P.2.5 |
| F.1.1 | | * | | * | * | | × | × |
| F.2.1 | * | | | * | | | | × |
| F.2.2 | * | * | | * | * | | × | × |
| F.3.2 | * | | | * | * | | | × |
| F.4.1 | | | * | | | × | × | |
| F.4.3 | | | * | | | × | × | |
| F.4.4 | | * | * | | | | × | |
| F.5.2 | | * | * | | | | × | × |
| F.5.4 | | | * | | | × | × | × |

Таблица 6 составляется на основе иерархической модели требований RBS и функций FBS, а связи между сущностями

определяются аналитической моделью оценки качества BC [11].

Таблица 6 – Отношения сущностей DMS (RBS, FBS)

| Требования системы R | Функции системы F | | | | | расчет ПК |
|----------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|----------------------------|----------------------------|---|
| | F.1.1 | F.2.1 | F.2.2 | ... | | |
| R.1.1 | 0...1 | 0...1 | 0...1 | 0...1 | 0...1 | $\sum_{i=1}^N F^c / \sum_{j=1}^K F^m$ |
| R.1.2 | 0...1 | 0...1 | 0...1 | 0...1 | 0...1 | $1 - (F^m \setminus F^c) / F^m $ |
| R.1.3 | 0...1 | 0...1 | 0...1 | 0...1 | 0...1 | $\frac{\sum_{i=1}^{ F^m } ((F_i^c(D_i) - F_i^m(D_i)) / F_i^m(D_i))}{ F^m }$ |
| R.1.4 | 0...1 | 0...1 | 0...1 | 0...1 | 0...1 | $\sum_{i=1}^N F^a / \sum_{j=1}^K F^c$ |
| R.1.5 | 0...1 | 0...1 | 0...1 | 0...1 | 0...1 | $\sum_{i=1}^N F^s / \sum_{j=1}^K F^c$ |
| R.2.1 | $m_{1.1}$ | $m_{2.1}$ | $m_{2.2}$ | m_n | m_n | $\sum_{i=1}^m t_i / m$ |
| R.2.2 | $m_{1.1}$ | $m_{2.1}$ | $m_{2.2}$ | m_n | m_n | $\frac{m^*}{m}$ |
| R.2.3 | $m_{1.1}$ | $m_{2.1}$ | $m_{2.2}$ | m_n | m_n | $\sum_{i=1}^m t_i^r / m$ |
| R.3.1 | $p_{1.1}(t)$ | $p_{2.1}(t)$ | $p_{2.2}(t)$ | $p_n(t)$ | $p_n(t)$ | $1 - p(t)$ |
| R.3.2 | $T_{1.1}^{ож}, T_{1.1}^{об}$ | $T_{2.1}^{ож}, T_{2.1}^{об}$ | $T_{2.2}^{ож}, T_{2.2}^{об}$ | $T_n^{ож}, T_n^{об}$ | $T_n^{ож}, T_n^{об}$ | $T_{ож} + T_{об}$ |
| R.3.3 | $Cl_{1.1}(t), Vm_{1.1}(t)$ | $Cl_{2.1}(t), Vm_{2.1}(t)$ | $Cl_{2.2}(t), Vm_{2.2}(t)$ | $Cl_{2.2}(t), Vm_{2.2}(t)$ | $Cl_{2.2}(t), Vm_{2.2}(t)$ | $\{Cl(t), Vm(t)\}$ |

Расчеты основаны на математических моделях и параметризованных архитектурных моделях, представленных в таблицах 3 – 5. Функциональная пригодность, надежность и производительность моделируются сетями Петри,

деревьями отказов и системами массового обслуживания (СМО) соответственно. Таким образом рассчитываются ПК BC, и, следовательно, представляется возможность провести оценку качества BC.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В жизненном цикле (ЖЦ) сложной технической системы возникают трудности, которые связаны с моделированием всей системы целиком. На разных этапах ЖЦ ВС применяются методы системного анализа. К таким методам относится модельно-ориентированный системный инжиниринг, который успешно применяется на этапе создания системы.

Моделирование программно-аппаратной архитектуры ВС методом MBSE позволяет:

1. Выделить систему из предметной области:
 - выявить актуальность моделирования;
 - задать цель моделирования.
2. Выделить особенности системы:
 - декомпозировать и выявить связи между программными и аппаратными компонентами;
 - выделить факторы внешней среды.
3. Описать архитектуру системы:
 - создать иерархию сущностей (RBS, PBS, FBS);
 - уточнить иерархию сущностей с помощью методов обратного проектирования.
4. Параметризовать сущности системы:
 - выделить качественные и количественные показатели требований и компонент.
5. Провести оценку качества ВС:
 - построить математические модели;
 - определить ЭПК;
 - рассчитать ПК.

В работе предлагается специализированный метод MBSE, который позволяет моделировать ВС при оценке характеристик качества.

БИБЛИОГРАФИЯ

- [1] Дышленко С. Г. Сложные вычислительные системы // ИТНОУ: Информационные технологии в науке, образовании и управлении. – 2019. – № 3 (13). – С. 53-58.
- [2] ГОСТ Р ИСО/МЭК 25010-2015. Информационные технологии. Системная и программная инженерия. Требования и оценка качества систем и программного обеспечения (SQuaRE). Модели качества систем и программных продуктов. – М.: Стандартинформ, 2015 – 36 с.
- [3] Ярмолик С. В., Ярмолик В. Н. Квазислучайное тестирование вычислительных систем // Информатика. – 2016. – № 3. – С. 65-81.
- [4] Лаврищева Е. М. Программная инженерия. Парадигмы, технологии и CASE-средства: учеб. для вузов / Е. М. Лаврищева. — М.: Издательство Юрайт, 2018. — 280 с.
- [5] Левчук Т. В., Маслов А. А. Использование имитационного моделирования для анализа эксплуатационных испытаний программного обеспечения // История и перспективы развития транспорта на севере России. – 2015. – № 1. – С. 32-34.
- [6] Кондратьев В. В. Модельно-ориентированный системный инжиниринг 2.0: учеб. пособие / В. В. Кондратьев. – М.: МФТИ, 2021. – 102 с.

- [7] Лапшин, В. А. Онтологии в компьютерных системах. Роль онтологий в современной компьютерной науке // RSDN Magazine. – 2009. – № 4. – С. 61-67.
- [8] Таненбаум Э. С. Архитектура компьютера; пер. с англ. – СПб.: Издательский дом "Питер", 2011.
- [9] Харрис Д., Харрис С. Цифровая схемотехника и архитектура компьютера. – Litres, 2022.
- [10] Самуйлов К. Е. и др. Модель функционирования телекоммуникационного оборудования программно-конфигурируемых сетей // Современные информационные технологии и ИТ-образование. – 2018. – Т. 14. – № 1. – С. 13-26.
- [11] Naryshkin K. V. Analysis of models for assessing the quality of a computer system // International Journal of Open Information Technologies. – 2023. – Т. 11. – № 10. – С. 44-54.

Статья получена 05.04.2024.

Константин Викторович Нарышкин, АО «Технологии радиоконтроля», (e-mail: konstantin.n.v@outlook.com)

Model-Based Design in the Telecommunication Equipment Quality Assessment System

K.V. Naryshkin

Abstract - The relevance of the work is associated with a decrease in the accuracy of estimates of the quality of computing systems. Existing modeling methods do not allow solving all the problems that arise in the process of quality assessment. It is proposed to use a model-oriented approach, which is aimed at creating classes of models in accordance with quality characteristics, which allows you to structure information obtained from a ready-made sample of the system. The developed method consists of 8 steps: from the definition of terms, concepts and place in the subject area to mathematical models for evaluating the quality of computing systems. The method includes the creation of ontological and architectural models, hierarchical structures of the system, tables of relationships indicating the type of relationships. Parameterized models use quantitative and qualitative metrics – elements of quality indicators. Metric calculations are based on mathematical models that correspond to quality characteristics.

Keywords - quality assessment, quality characteristics, computing system, MBSE, modeling of complex systems, reliability, functionality, performance.

REFERENCES

[1] Dyshlenko S. G. Complex computing systems // ITSEM: Information technologies in science, education and management. - 2019. - Vol. 13.- No. 3. - pp. 53-58.

- [2] GOST R ISO/IEC 25010-2015 Information technology. Systems and software engineering. Systems and software Quality Requirements and Evaluation (SQuaRE). System and software quality models. – M.: Standartinform, 2015 – 36 p.
- [3] Yarmolik S. V. Yarmolik, V. N. Quasi-random testing of computing systems // Informatics. - 2016. - No. 3. - pp. 65-81.
- [4] Lavrishcheva E. M. Software engineering. Paradigms, technologies and CASE tools: Studies for universities — 2nd ed., ispr. — M.: Yurayt Publishing House, 2016. — 280 p.
- [5] Levchuk T. V., Maslov A. A. The use of simulation modeling for the analysis of operational tests of software // The history and prospects of transport development in the north of Russia. - 2015. - No. 1. - pp. 32-34.
- [6] Kondratiev V. V. Model-oriented system engineering 2.0 / V.V. Kondratiev. - M.: MPTI, 2021. - p. 102.
- [7] Lapshin V. A. Ontologies in computer systems. The role of ontologies in modern computer science // RSDN Magazine. - 2009. - No. 4. - pp. 61-67.
- [8] Tanenbaum A. S. Structured computer organization, Upper Saddle River // NJ : Prentice Hall PTR. - p. 801. (Russ. ed. - 2011, St. Peterburg. - p. 844).
- [9] Harris D., Harris S. Digital Design and Computer Architecture // Morgan Kaufmann Publishers Inc. - p. 712. (Russ. ed. - 2018, Moscow. - p. 792).
- [10] Samuilov K.E., Shalimov I.A., Bunin I.G., Mironov Y.B. Model of functioning of telecommunication equipment of software-configurable networks // Modern information technologies and IT education. - Vol. 1. - No. 14. - pp. 13-26. doi: 10.25559/SITITO.14.201801.013-026.
- [11] Naryshkin K. V. Analysis of models for assessing the quality of a computer system // International Journal of Open Information Technologies. – 2023. – Vol. 11. – No. 10. – pp. 44-54.