Методологические и методические основы теории оценивания качества моделей и полимодельных комплексов

Methodological and methodical fundamentals of the theory of estimation of the quality of models and poly-model complexes

Соколов / Sokolov B.
Борис Владимирович
(sokolov_boris@inbox.ru)
доктор технических наук, профессор,
заслуженный деятель науки РФ.
ФГБУН Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук (СПИИРАН),
руководитель лаборатории – главный научный сотрудник.
г. Санкт-Петербург

Бураков / Burakov V.
Вадим Витальевич
(burakov@eureca.ru)
доктор технических наук, доцент.
СПИИРАН, старший научный сотрудник.
г. Санкт-Петербург

Микони / Mikony S.
Станислав Витальевич
(smikoni@mail.ru)
доктор технических наук, профессор.
СПИИРАН, ведущий научный сотрудник.
г. Санкт-Петербург

Юсупов / Yusupov R.
Рафаэль Мидхатович
(spiiran@iias.spb.su)
Член-корреспондент РАН,
доктор технических наук, профессор,
заслуженный деятель науки и техники РСФСР.
СПИИРАН, научный руководитель.
г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: модули и полимодельные комплексы – modules and poly-model complexes; развивающаяся ситуация – developing situation; квалиметрия – qualimetry; комплексное моделирование – complex simulation; проактивное управление – proactive control.

В статье излагаются методологические и методические основы новой прикладной теории оценивания качества моделей и модельных комплексов или, по-другому, квалиметрии моделей и полимодельных комплексов (ПК). Формирование данной теории предполагает проведение комплексных исследований по следующим основным направлениям: разработка основных понятий, принципов, подходов, используемых в квалиметрии семиотических моделей (ПК); построение иерархии концептуальных моделей развивающихся ситуаций, участниками которой являются субъекты и объекты моделирования, а также собственно разрабатываемые (используемые) модели; классификация и систематизация семиотических моделей (ПК), установление взаимосвязей и соответствия между различными видами и родами семиотических моделей, классификация и выбор системы показателей, оценивающих качество знаковых моделей и полимодельных комплексов; разработка комбинированных методов оценивания значений показателей качества семиотических моделей (ПК), заданных с использованием числовых и нечисловых (номинальных, порядковых) шкал; разработка методов и алгоритмов решения задач многокритериального анализа, упорядочения и выбора семиотических моделей (ПК), управления качеством семиотических моделей. В статье приводятся примеры из различных предметных областей, иллюстрирующие возможности разрабатываемой теории оценивания качества моделей.

The article describes the methodological and methodical fundamentals of the allied theory of qualimetry for mathematical models and poly-model complexes (PMC). Developing the theory involves a comprehensive analysis in the fields described below: Development of fundamentals, principles, and approaches applicable to the qualimetry of semiotic models (PMC); forming an hierarchy of concept models of developing situations comprising simulated subjects and objects, as well as models being developed (utilized); classification and systemization of semiotic models (PMC); identification of interrelation and correspondence among various types and kinds of semiotic models; classification and selection of a system of parameters to evaluate the quality of sign models and poly-model complexes; development of combined methods for estimation of the semiotic model (PMC) quality performance set by means of numerical and non-numerical (nominal, ordinal) scales; development of methods and algorithms for solving problems regarding the multicriterion analysis, normalization and selection of semiotic models (PMC), semiotic models quality management The articles gives examples from various application environments in order to demonstrate the capabilities of the model quality estimation theory being developed.

0-2018.indd 36 26.09.2018 10:03:24

Введение

В современных условиях математическое моделирование является универсальным инструментом познания, исследования и проектирования объектов в различных предметных областях. К настоящему времени теория, методы и технологии создания, использования математических моделей развиты достаточно хорошо. Однако, к сожалению, практически остаётся не исследована проблема многокритериального оценивания качества математических моделей, анализа и упорядочения различных классов моделей, обоснованного выбора моделей для решения конкретных прикладных задач. Перечисленные вопросы являются основными объектами рассмотрения в статье, где приведены результаты исследований разрабатываемой авторами новой прикладной теории: квалиметрии математических моделей и полимодельных комплексов.

В статье приводятся и обосновываются методологические основы предлагаемой теории оценивания качества моделей, включающие в себя концепции, принципы, подходы к постановке и решению ее базовых проблем. В качестве ключевых концепций выделяются концепции комплексного моделирования и проактивного управления. Предлагается обобщенное описание формальное моделей развивающейся ситуации (РС), участниками которой являются субъекты и объекты моделирования, а также собственно разрабатываемые (используемые) модели. Данное описание позволяет с наиболее общих позиций подойти к решению задач квалиметрии моделей. Предлагаются конкретные комбинированные методы оценивания значений показателей качества семиотических моделей (полимодельных комплексов), заданных с использованием числовых и нечисловых (номинальных, порядковых) шкал, а также методы и алгоритмы решения задач многокритериального анализа, упорядочения и выбора семиотических моделей (ПК), управления качеством семиотических моделей. Полученные результаты иллюстрируются на ряде примеров, в том числе из сферы космических приложений.

Рассмотрим более подробно вопросы обобщенного описывания проблематики квалиметрии моделей и полимодельных комплексов применительно к классу сложных объектов (СлО).

Обобщенное описание проблем субъектно-объектного моделирования развивающейся ситуацией и их управленческая интерпретация

К настоящему моменту времени существуют многочисленные варианты определения понятия модель, которое характеризуется ярко выраженной полисемией, отражающей различные смысловые значения, вкладываемые в данное понятие в зависимости от сферы приложений и от контекста, в связи с которым оно используется. В настоящее время существует несколько сотен определений понятий «модель» и «моделирование» [1–10, 11, 12, 14, 17–20]. Приведём еще одно из них: модель – это системное многоместное отображение объекта оригинала, имеющее наряду с безусловно-истинным, условно-истинное и ложное содержание, проявляющееся и развивающееся в процессе его создания и практического использования [14]; моделирование – один из этапов познавательной деятельности субъекта, включающий в себя разработку (выбор) модели, проведение на ней исследований, получение и анализ результатов, выдачу рекомендаций о дальнейшей деятельности субъекта и оценивание качества самой модели применительно к решаемой задаче с учётом конкретных условий.

Из анализа перечисленных определений следует, что всякая корректно построенная модель содержит объективную истину (т.е. в чём-то правильно отображает объект-оригинал) [14, 15]. Вместе с тем из-за конечного числа элементов и их отношений в создаваемых (используемых) моделей, описывающих объекты, принадлежащие бесконечно разнообразной действительности и ограниченности ресурсов (временных, денежных, материальных), выделяемых на моделирование, они (модели) всегда упрощённо и приближённо отображает объект-оригинал. Однако человеческая практика свидетельствует, что данные свойства модели являются вполне приемлемыми при решении задач, стоящих перед субъектами. Базируясь на принципе баланса точностей, всегда можно найти компромисс между степенью детализации описания объекта-оригинала и прагматической ценностью создаваемой модели.

Анализ вышеизложенных определений показывает, что при моделировании различных классов сложных объектов (СлО) естественных и искусственных целесообразно выделять следующие основные элементы и отношения, характеризующие данный процесс: во-первых, субъекта либо субъектов ($S^m_{<>}$), объект-оригинал ($Ob^{op}_{<>}$), объект-модель $Ob^m_{<>}$), среду ($CP^m_{<>}$) (в которой осуществляется моделирование); и, во-вторых, бинарные отношения между перечисленными элементами $R_{<1>}(Ob^{op}_{<>}, S^m_{<>})$; $R_{<2>}(S^m_{<>}, Ob^m_{<>})$; $R_{<3>}(Ob^{op}_{<>}, Ob^m_{<>})$; $R_{<4>}(CP^m_{<>}, Ob^{op}_{<>})$; $R_{<5>}(CP^m_{<>}, Ob^m_{<>})$; $R_{<6>}(CP^m_{<>}, S^m_{<>})$. Нижние индексы < > в перечисленных условных обозначениях означают собственные имена объектов (субъектов) и отношений [12, 15, 22]. Сразу же отметим, что, говоря в дальнейшем о субъектах моделирования, мы будем под этим термином понимать, как говорилось ранее, различные классы социальных субъектов, к числу которых могут быть отнесены: лица, принимающие решения (ЛПР), лица, обосновывающие решения (ЛОР), эксперты, лица, эксплуатирующие (использующие) модели, лица, строящие модели (обеспечивающие построение моделей). На рис. 1. представлен возможный вариант взаимосвязи перечисленных элементов и отношений между ними [12,15].

3-2018.indd 37 26.09.2018 10:03:25

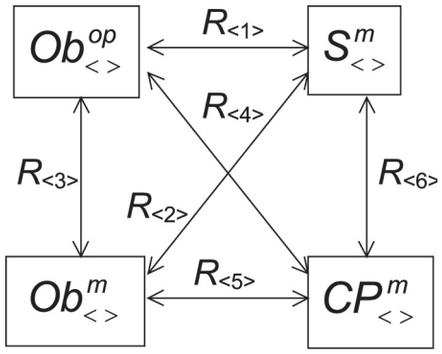

Рис. 1. Варианты взаимосвязи объектов и субъектов моделирования развивающейся ситуации

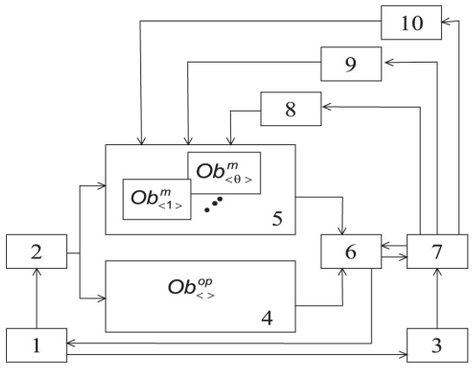

Рис. 2. Обобщённая технология моделирования развивающейся ситуацией при ее управленческой интерпретации

Из анализа рис. 1 следует, что процесс моделирования, определяется процессами взаимодействия субъектов ($S^{m}_{<>}$), объект-оригинала ($Ob^{op}_{<>}$), объект-модели ($Ob^{m}_{<>}$), среды ($CP^{m}_{<>}$), которые конструктивно задаются с помощью бинарных отношений между перечисленными элементами $R_{<1>}(Ob^{op}_{<>}, S^{m}_{<>})$; $R_{<2>}(S^{m}_{<>}, Ob^{m}_{<>})$; $R_{<3>}(Ob^{op}_{<>}, Ob^{m}_{<>})$; $R_{<4>}(CP^{m}_{<>}, Ob^{op}_{<>})$; $R_{<5>}(CP^{m}_{<>}, Ob^{m}_{<>})$; $R_{<6>}(CP^{m}_{<>}, S^{m}_{<>})$. Важно отметить, что все перечисленные элементы и отношения под действием объективных-субъективных, внешних-внутренних причин постоянно изменяются во времени. В этом случае мгновенно зафиксированное структурное состояние рассматриваемой четверки назовем ситуацией, а ее изменение во времени – развивающейся ситуацией (РС). При таком описании процесс субъектно-объектного моделирования СлО можно интерпретировать как управляемый процесс (как управление РС).

Цель такого процесса будет состоять в постоянном минимизации субъектом “невязки” возникающей между объектом-оригиналом и моделью на всех этапах их жизненного цикла путем постоянной “подстройки” (адаптации) модели под изменения, происходящие как в $Ob^{op}_{<>}$, так и $CP^{m}_{<>}$, $S^{m}_{<>}$ (например, изменение субъектом целей функционирования и моделирования $Ob^{op}_{<>}$).

Представленная трактовка процесса разработки модели объекта в контексте РС является весьма перспективной. Такой подход позволяет использовать достаточно хорошо разработанный аппарат анализа и синтеза сложных технических систем и их систем управления применительно к таким объектам управления как модели и полимодельные комплексы, а также в целом к РС [12, 15, 22].

Данный процесс (технология) графически представлен на рис. 2. На данном рисунке приняты следующие условные обозначения: 1 – формирование субъектом $S^{m}_{<>}$ целей создания (функционирования) объекта оригинала $Ob^{op}_{<>}$; 2 – формирование входных воздействий (сценариев управляющих и возмущающих воздействий) на объект-оригинал (реальный, либо виртуальный); 3 – формирование субъектом $S^{m}_{<>}$ целей моделирования РС; 4 – моделируемая система (объект $Ob^{op}_{<>}$); 5 – модели (полимодельные комплексы) ($Ob^{m}_{<\theta>}$) исследуемой системы; 6 – оценивание показателей качества моделей (полимодельных комплексов); 7 – управление качеством моделей (полимодельных комплексов); 8 – управление параметрами моделей (полимодельных комплексов); 9 – управление структурами моделей (полимодельных комплексов); 10 – изменение концепции описания моделей (полимодельных комплексов), состоящее в изменении границ между объектом-оригиналом и воздействующей на него средой.

Из анализа рис. 2 следует, что моделирование РС можно интерпретировать как управляемый процесс, состоящий в управлении качеством соответствующих моделей (полимодельных комплексов) и самой технологии системного моделирования.

К настоящему времени разработаны многочисленные конструктивные подходы, позволяющие обобщенно описывать различные виды моделей, что необходимо для их оценивания и сравнительного анализа [12, 15, 22]. Теперь необходимо с таких же общих позиций содержательно и формально описать возможные технологии субъектно-объектного моделирования (в общем случае – субъектно-объектного системного моделирования), опираясь на предлагаемую управленческую интерпретацию.

На содержательном (вербальном) уровне проблема моделирования РС на различных этапах её ЖЦ сводится к решению следующих трёх основных классов задач:

– задачи анализа структурной динамики РС;

– задачи оценивания (наблюдения) структурных состояния и структурной динамики РС;

– задачи структурно-функционального синтеза модели (полимодельного комплекса), а также выбора оптимальных программ управления и регулирования структурной динамикой РС (управления качеством моделей и полимодельных комплексов) в различных условиях обстановки.

В данной статье уделим основное внимание этапу применения синтезируемых моделей (полимодельных комплексов) по целевому назначению. Для указанного

3-2018.indd 38 26.09.2018 10:03:27

этапа на содержательном уровне сформулируем соответствующие задачи, связанные с проблемами моделирования РС (управления ее структурной динамикой).

В этом случае задачи анализа структурной динамики моделирования РС включают в себя три основных подкласса задач [12,22,23]:

– задачи структурного анализа РС (в том числе и многовариантного прогнозирования);

– задачи исследования структурной динамики РС в условиях отсутствия входных воздействий (управляющих и возмущающих воздействий);

– задачи исследования структурной динамики РС при наличии входных воздействиях.

На содержательном уровне суть рассматриваемых задач сводится к следующему: известно исходное структурное состояние РС, известен состав, допустимые варианты структурного построения РС, варианты сценариев изменения входных воздействий на базовые компоненты РС, известны пространственно-временные, технические и технологические ограничения, связанные с РС, задан интервал времени, на котором проводится анализ структурной динамики РС, определён перечень показателей, с помощью которых оцениваются различные аспекты структурной динамики РС (например, такие показатели качества моделей (полимодельных комплексов) как показатели адекватность, структурной и функциональной сложности, гибкости (адаптивности), надежности и т.п.).

Требуется провести многокритериальное оценивание и анализ структурной динамики РС при различных вариантах входных воздействий. В том числе в ходе указанного анализа необходимо:

– провести анализ существования решений в задачах структурной динамики РС;

– провести анализ управляемости, наблюдаемости, устойчивости РС, чувствительности оптимальных решений к изменению исходных данных в задаче управления структурной динамикой РС;

– провести анализ, классификацию и упорядочение многоструктурных состояний РС.

Содержательное описание задачи оценивания (наблюдения) структурного состояния, структурной динамики РС состоит в следующем: известно исходное структурное состояние РС, известен состав, допустимые варианты структурного построения РС, варианты сценариев изменения входных воздействий на базовые компоненты РС, известны пространственно-временные, технические и технологические ограничения, связанные с РС, известны результаты измерений параметров, характеризующих РС на заданном интервале времени. Известны количественные показатели и критерии, с помощью которых оценивается качество решения задачи оценивания структурного состояния РС.

В этих условиях требуется для заданного момента времени найти наилучшую оценку текущего структурного состояния РС, оценить тенденции изменения структурной динамики РС.

Содержательная формулировка задач управления структурной динамикой РС сводится к следующему: известно исходное структурное состояние РС, известен состав, допустимые варианты структурного построения РС, известны пространственно-временные, технические и технологические ограничения, связанные с РС, заданы интервал времени, на котором осуществляется управление РС и соответствующая система показателей качества указанного управления.

Требуется осуществить многокритериальный динамический структурно-функциональный синтез как самого полимодельного комплекса (исходя из поставленных субъектом целей моделирования и используемых показателей качества моделирования), так и соответствующей технологии системного моделирования РС, при которых для каждого заданного сценария изменения возмущающих воздействий на развивающуюся ситуацию обеспечивался ее наиболее предпочтительный переход из текущего в требуемое структурное состояние.

Проведем формализацию рассматриваемых задач с использованием развиваемой авторами теории управления структурной динамикой (УСД) СлО [12,21]. Для конструктивного описания связей перечисленных ранее субъектов и объектов, являющихся базовыми компонентами РС, введём в рассмотрение динамический системный альтернативный мультиграф (ДСАМ) с перестраиваемыми структурами следующего вида:

$$G_{\chi}^{t} = \left\langle X_{\chi}^{t}, F_{\chi}^{t}, Z_{\chi}^{t} \right\rangle, \qquad (1)$$

где χ – индекс, характеризующий базовые компоненты РС, $\chi \in NS = \{1,2,3,4\}$ – множество индексов, соответствующих структурам $Ob_{<>}^{op}$, $Ob_{<\theta>}^{m}$, $S_{<>}^{m}$, $CP_{<>}^{m}$, $t \in T$ – множество моментов времени; $X_{\chi}^{t} = \{x_{\chi l}^{t}, l \in L_{\chi}\}$ – множество базовых компонент, входящих в состав структуры G_{χ}^{t} (множество вершин ДСАМ) в момент времени *t*; $F_{\chi}^{t} = \{f_{<\chi,l,l'>}^{t}, l, l' \in L_{\chi}\}$ – множество дуг ДСАМ типа G_{χ}^{t}, отражающих взаимосвязи (отношения) между его базовыми компонентами в момент времени *t*; $Z_{\chi}^{t} = \{f_{<\chi,l,l'>}^{t}, l, l' \in L_{\chi}\}$ – множество значений параметров, количественно характеризующих взаимосвязь соответствующих базовых компонент ДСАМ (например, параметры материальных, энергетических и информационных потоков, циркулирующих между базовыми компонентами РС).

Кроме того, зададим множество допустимых (исходя из содержательной постановки каждой конкретной задачи и сценария моделирования развивающейся ситуации) операций отображения указанных выше ДСАМ друг на друга:

$$M_{<\chi,\chi'>}^{t} : F_{\chi}^{t} \to F_{\chi'}^{t}, \qquad (2)$$

а также операций композиции указанных отображений в момент времени *t*:

3-2018.indd 39 26.09.2018 10:03:28

$$M^t_{<\chi,\chi'>} = M^t_{<\chi,\chi_1>} \circ M^t_{<\chi_1,\chi_2>} \circ \ldots \circ M^t_{<\chi'',\chi'>}. \quad (3)$$

С учётом вышеизложенного, структурное состояние РС можно определить как подмножество декартова произведения множеств ее базовых компонент, на которых строятся возможные сценарии их взаимодействия:

$$S_\delta \subseteq X^t_1 \times X^t_2 \times X^t_3 \times X^t_4, \quad \delta = 1,\ldots,K_\Delta \quad (4)$$

В этом случае множество структурных состояний запишется следующим образом:

$$S = \{S_\delta\} = \{S_1,\ldots,S_{K_\Delta}\}. \quad (5)$$

Введём ещё множество допустимых операций отображения структурных состояний РС друг на друга:

$$\Pi^t_{<\delta,\delta'>} : S_\delta \to S_{\delta'}. \quad (6)$$

При этом предполагается, что каждое структурное состояние РС в момент времени $t \in T$ задаётся в результате операции композиции соответствующих ДАМГ, описывающих каждый тип структуры (см. формулу 3).

Графическая управленческая интерпретация рассматриваемых задач системного субъектно-объектного моделирования РС (управления ее структурной динамикой) в этом случае сводится к поиску такого структурного состояния $S^*_\delta \in \{S_1, S_2,\ldots, S_{K_\Delta}\}$ и такой последовательности (композиции) выполнения операций отображения вида (6) во времени $\Pi^{t_1}_{<\delta_1,\delta_2>} \circ \Pi^{t_2}_{<\delta_2,\delta_3>} \circ \Pi^{t_f}_{<\delta',\delta>}$, при которых обеспечивался многокритериальный динамический структурно-функциональный синтез как самого полимодельного комплекса (исходя из поставленных субъектом целей моделирования и используемых показателей качества моделирования), так и соответствующей технологии системного моделирования РС, обеспечивающей переход динамических систем вида (1) из заданных в требуемые структурные состояния. Наряду с графической интерпретацией исследуемой проблемы может быть также предложено следующее ее теоретико-множественное описание: необходимо разработать принципы, подходы, модели, методы, алгоритмы, позволяющие находить такие $<U^t_*,\ S^{*t_f}_\delta>$, при которых выполняются следующие условия

$$J_\theta\left(X^t_\chi, \Gamma^t_\chi, Z^t_\chi, F^t_{<\chi,\chi'>}, \Pi^t_{<\tilde{\delta},\tilde{\tilde{\delta}}>}, t \in (t_0, t_f]\right) \to \underset{<U^t, S^{*t_f}_\delta> \in \Delta_g}{extr}, \quad (7)$$

$$\Delta_g = \left\{ <U^t, S^{t_f}_\delta> \middle| R_\beta\left(X^t_\chi, \Gamma^t_\chi, Z^t_\chi, F^t_{<\chi,\chi'>}, \Pi^t_{<\tilde{\delta},\tilde{\tilde{\delta}}>}\right) \le \tilde{R}_g; \; U^t = \Pi^{t_1}_{<\delta_1,\delta_2>} \circ \Pi^{t_2}_{<\delta_2,\delta_3>} \circ \Pi^{t_2}_{<\tilde{\delta},\delta>}; \beta \in \mathbf{B} \right\}, \quad (8)$$

где U^t — управляющие воздействия, позволяющие синтезировать как наиболее предпочтительную структуру и параметры полимодельного комплекса, описывающего РС так и соответствующие технологии системного моделирования РС; J_θ – стоимостные, временные, ресурсные показатели, характеризующие качество выбираемых (в общем случае) полимодельных комплексов и соответствующих технологий системного моделирования развивающейся ситуации, $q \in Q = \{1,\ldots,l\}$ – множество номеров показателей; Δ_g – множество динамических альтернатив (множество функций, структур и параметров полимодельных комплексов и соответствующих технологий системного моделирования РС); **B** – множество номеров пространственно-временных, технических и технологических ограничений, определяющих процессы реализации системного моделирования РС; $\tilde{R}_g$ – заданные величины; $T = (t_0,\ t_f]$ – интервал времени, на котором синтезируются как наиболее предпочтительная структура полимодельного комплекса, так и соответствующие технологии системного моделирования РС.

Анализ показывает, что предложенная управленческая интерпретация процессов моделирования РС (или, по-другому, управления структурной динамикой РС) базируется на фундаментальном функционально-структурном подходе (ФСП) к описанию объектов любой природы (в том числе и сложных технических объектов), о которых уже говорилось в работах [2, 6, 12].

ФСП, в общем случае, представляет собой совокупность философских концепций, объективных закономерностей развития систем, научных положений и выводов, определяющих стратегию и методы анализа и синтеза антропогенных систем, к которым, в частности, относится РС.

Характерными особенностями ФСП являются [2, 6, 12, 14]: учёт диалектической взаимосвязи функций и структуры объектов при определяющей роли функции по отношению к структуре; целостный подход к анализу и синтезу многоуровневых систем; учёт вещественно-энергетических и информационных связей между элементами системы; учёт взаимосвязей исследуемой (создаваемой) системы с внешней средой.

Взаимоотношения функций и структур основных компонент РС в процессе её изменения под действием различных причин характеризуются не только единством, но и противоречиями между ними. При этом разрешение указанных противоречий может осуществляться различными альтернативными путями – от полного отказа от старой структуры (структур), переставшей соответствовать новому содержанию (новым функциям), до использования старой структуры (структур), несмотря на существенно изменившиеся функции. Предлагаемая интерпретация субъектно-объектного моделирования как управленческого процесса (а точнее процесса управления структурной динамикой РС) в этом случае предназначено для целенаправленного формирования оптимальной последовательности действий, которая должна обеспечить наилучшее разрешение (с точки зрения ЛПР) диалектического противоречия между функциями и соответствующими структурами РС на каждом из этапов ее ЖЦ.

3-2018.indd 40 26.09.2018 10:03:29

При этом на ранних этапах ЖЦ развивающейся ситуации должны быть синтезированы такие ее взаимосвязанные множества функций и структур, а также внесён такой уровень избыточности в указанные множества и отношения, при которых на этапе применения объекта-оригинала и его модели по целевому назначению имелась бы возможность гибко реагировать на все расчётные и нерасчётные нештатные ситуации, вызывающие деградацию и реконфигурацию их структур.

Пример решения задачи нахождения расстояния от *i*-й вершины графа до всех остальных вершин

Проиллюстрируем основные идеи предложенного подхода к оцениванию качества моделей.

Дано:

I. Модель объекта – матрица расстояний D.

Пример матрицы расстояний *D:*

$$\mathbf{D}_1 = \begin{pmatrix} 0 & 9 & 6 & \infty & 3 \\ 9 & 0 & \infty & \infty & \infty \\ 6 & \infty & 0 & \infty & \infty \\ \infty & 2 & 4 & 0 & \infty \\ \infty & 4 & \infty & \infty & 0 \end{pmatrix}$$

II. Методы (алгоритмы) решения

1. Умножение *i*-й строки графа расстояний на матрицу расстояний по формуле:

$$d_{ik}^{s} = \min\left\{ d_{ik}^{s-1}, \min_{j}\left(d_{ij}^{s-1} + d_{jk}^{1}\right)\right\}, \; i, j = \overline{1, n}. \tag{9}$$

2. Алгоритм динамического программирования Дейкстра с последовательным уменьшением расстояния между вершинами v_i и v_k по формуле:

$$d_{ik}^{s} = \min\left\{ d_{ik}^{s-1}, \min_{j} d_{ij}^{s-1} + d_{tk}\right\}; \; t = \arg\left(\min_{j} d_{ij}^{s-1}\right). \tag{10}$$

3. Нахождение всех вариантов путей от *i*-й вершины до всех остальных на основе модифицированной матрицы смежности с последующим вычислением минимальных расстояний [12-13].

III. Расчёт асимптотической сложности методов решения

1. Умножение *i*-й строки на матрицу по формуле (7)

Число операций: Умножение строки на столбец – n; нахождение минимальной суммы – $n-1$; сравнение с предыдущим расстоянием – 1. Общее число операций умножения строки на столбец равно: $n+n-1+1=2{\cdot}n$. Умножение строки на n столбцов: $2{\cdot}n{\cdot}n=2{\cdot}n^2$; Число умножений *i*-й строки на матрицу до достижения всех вершин – $n-1$; Общее число операций равно $2{\cdot}n^2{\cdot}(n-1)$.

2. Алгоритм динамического программирования Дейкстра.

Число операций: Нахождение вершины с минимальным расстоянием от предыдущей – $n-1$; добавление расстояния между этими вершинами к общему расстоянию от начальной вершины – 1; исключение помеченной вершины из рассмотрения – 1. Общее число операций нахождения ближайшей вершины равно: $n+1$; За счёт исключения помеченной вершины общее число операций при поиске каждой следующей вершины равно $n+1-i$; $i = \overline{1, n-1}$.Общее число операций за n итераций равно:

$$\sum_{i=1}^{n-1} n+1-i = n{\cdot}(n-1).$$

3. Нахождение расстояний по всем путям от *i*-й вершины до всех остальных на основе модифицированной матрицы смежности.

Число операций: умножение строки на столбец – n; выявление и исключение циклических маршрутов – 1. Общее число операций умножения строки на столбец: $n+1$. Умножение строки на n столбцов: $(n+1){\cdot}n$. Число умножений *i*-й строки на матрицу до достижения всех вершин – $n-1$. Общее число операций на 1-м этапе равно $(n+1){\cdot}n{\cdot}(n-1)=n{\cdot}(n^2-1)$. Вычисление расстояний для путей любой длины – $n{\cdot}(n-1)/2$; Общее число операций на двух этапах равно $v{\cdot}(n^2-1)+n{\cdot}(n-1)/2$.

Первые два метода имеют общую модель объекта и ориентированы только на вычисление расстояний. Поэтому они сравниваются только по трудоёмкости. В отличие от нахождения расстояний перемножением строки на матрицу, реализующего процедуру параллельного поиска, алгоритм динамического программирования реализует метод сокращённого последовательного поиска, в силу чего его трудоёмкость в $2{\cdot}n$ раз меньше. Следовательно, при одинаковых результатах он более предпочтителен для решения поставленной задачи. Третий метод имеет более сложную модель (матрицы смежностей и расстояний), которая позволяет находить не только кратчайшие, но всевозможные расстояния от *i*-й вершины до всех остальных. Поэтому он более универсален по отношению к предыдущим методам, но вместе с тем и более трудоёмок, чем эти методы. Для сравнения с ними необходимо применять двухкритериальную оценку качества моделей (см. табл. 3).

В последней строке табл. 1 приведены предпочтения на множестве значений показателей. Для указанных предпочтений множество Парето образуют 2-й и 3-й алгоритмы. Для выбора одного из них следует агрегировать численные оценки, приведя их к единой шкале. В качестве нормирующих величин используются оценки 3-го алгоритма, превышающие оценки других алгоритмов. На двухкритериальные оценки алгоритмов влияет важность показателей, назначаемая заказчиком (экспертом).

Заключение

Подводя краткий итог сказанному, следует отметить, что в современных условиях назрела острая необ-

3-2018.indd 41 26.09.2018 10:00:30

Таблица 1

Методы вычисления расстояний во взвешенном графе

N п/п	Наименование метода (алгоритма)	Универсальность (по числу путей)	Трудоёмкость
1	Умножение на матрицу расстояний	$(n–1)$	$2·n^2·(n–1)$
2	Алгоритм Дейкстра	$(n–1)$	$n·(n–1)$
3	На основе модифицированную матрицу смежности	$(n–1)·(n–1)$	$n·(n^2–1)+n·(n–1)/2$
	Предпочтение	max	min

ходимость разработки методологических и методических основ теории оценивания и управления качеством моделей или, по-другому, квалиметрии моделей и полимодельных комплексов, являющейся одной из базовых теорий современной междисциплинарной отрасли системных знаний. Одна из основных целей данной теории состоит в количественном и качественном оценивании таких базовых свойств моделей и полимодельных комплексов сложных объектов и процессов как адекватность, сложность, гибкость, адаптивность, универсальность, многофункциональность, надежность, открытость, интеллектуальность, трудоемкость, достоверность. Данная теория, являющаяся составной частью такой научной отрасли знаний как качествоведение, сама может быть декомпозирована на множество частных прикладных теорий, в которых должно проводиться оценивание качества моделей, используемых в определённой предметной области. По нашему мнению, разработка квалиметрии моделей должна идти параллельно в двух основных взаимодействующих и взаимообогащающих направлениях исследований. В рамках первого направления должны разрабатываться общие вопросы квалиметрии моделей, которые базируются на результатах, получаемых в рамках большого числа частных прикладных теорий оценивания и управления качеством моделей (второе направление исследований), развиваемых в каждой из конкретных предметных областей [3, 6, 9, 12, 13, 17–25, 27–28]. В качестве самостоятельного направления исследований по рассматриваемой проблематике целесообразно выделить создание интегрированных систем поддержки принятия решений при оценивании и управлении качеством моделей и полимодельных комплексов.

Исследования, выполненные по данной тематике, проводились при частичной финансовой поддержке грантов РФФИ (№№15-07-08391, 15-08-08459, 16-07-00779, 16-08-00510, 16-08-01277, 16-29-09482-офи-м, 17-08-00797, 17-06-00108, 17-01-00139), госзадания Министерства образования и науки РФ №2.3135.2017/4.6, Международного проекта ERASMUS +, Capacity building in higher education, № 73751-EPP-1-2016-1-DE-EPPKA2-CBHE-JP.

Литература

1. Андрианов, Ю. М. Квалиметрия в приборостроении / Ю.М. Андрианов, А.И. Суббето. – Л.: Машиностроение, 1990. – 216 с.

2. Балашов, Е. П. Эволюционный синтез систем / Е.П. Балашов. – М.: Радио и связь, 1985. – 328 с.

3. Процесс разработки программных изделий / С.Н. Баранов [и др.]. – М.: Наука, 2000. – 176 с.

4. Валькман, Ю. Р. О проблеме “отчуждения” моделей исследуемых объектов от создателей в проектировании сложных изделий / Ю.Р. Валькман . // Теория и системы управления. 1996. – №3. – С. 146–152.

5. Калинин, В. Н. Многомодельный подход к описанию процессов управления космическими средствами / В.Н. Калинин, Б.В. Соколов // Теория и системы управления. 1995. – №1. – С. 149–156.

6. Калинин, В. Н. Теория систем и управления (структурно-математический подход) / В.Н. Калинин, Б.А. Резников. – Л.: ВИКИ, 1987. – 417 с.

7. Кини, Р. Л. Принятие решений при многих критериях: предпочтения и замещения / Р.Л. Кини, Х. Райфа. – М.: Радио и связь, 1981. – 560 с.

8. Ларичев, О. И. Теория и методы принятия решений / О.И. Ларичев. – М.: Логос, 2000. –392 с.

9. Липаев, В. В. Тестирование компонентов и комплексов программ: учебник / В.В. Липаев. – М.: Синтег, 2010. – 400 с.

10. Микони, С. В. Системный анализ методов многокритериальной оптимизации на конечном множестве альтернатив / С.В. Микони // Труды СПИИРАН. – 2015. – Вып. 4(41). – С. 180–199.

11. Нечёткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта / под ред. Д.А. Поспелова. – М.: Наука, 1986. – 312 с.

12. Охтилев, М. Ю. Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов / М.Ю. Охтилев, Б.В. Соколов, Р.М. Юсупов. – М.: Наука, 2006. – 410 с.

13. Павловский, Ю. А. Имитационные модели и системы / Ю.А. Павловский. – М.: Фазис, 2000. – 134 с.

14. Перегудов, Ф. И. Введение в системный анализ / Ф.И. Перегудов, Ф.П. Тарасенко. – М.: Высшая школа, 1989. – 320 с.

3-2018.indd 42 26.09.2018 10:00:30

15. Ростовцев, Ю. Г. Проблема обеспечения адекватности субъектно-объектного моделирования / Ю.Г. Ростовцев, Р.М. Юсупов // Известия ВУЗов. Приборостроение. – 1991. – № 7. – С. 7–14.

16. Саати, Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий / Т. Саати ; пер. с англ. Р.Г. Вачнадзе. – М.: Радио и связь, 1993. – 278 с.

17. Савин, Г. И. Системное моделирование сложных процессов / Г.И. Савин. – М.: Фазис, 2000. – 276 с.

18. Самарский, А. А. Математическое моделирование: Идеи. Методы. Примеры / А.А. Самарский, А.П. Михайлов. – М.: Физматлит, 2001. – 320 с.

19. Сапожникова, К. В. Измерения как основа формирования новых знаний / К.В. Сапожникова, Р.Е. Тайманов // В книге Метрология и измерительная техника, книга-справочник в трех томах / под ред. проф. Х. Радева, перевод с болгарского М. Иговой и К. Коджабашевой, Т.3. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2016. – С. 749–780.

20. Скурихин, В. И. Адаптивные системы управления машиностроительным производством / В.И. Скурихин, В.А. Забродский, Ю.В. Копейченко. – М.: Машиностроение, 1989. – 207 с.

21. Соколов, Б. В. Комплексное моделирование функционирования автоматизированной системы управления навигационными космическими аппаратами / Б.В. Соколов, Р.М. Юсупов // Проблемы управления и информатики. – 2002. – № 5. – С. 24–41.

22. Соколов, Б. В. Концептуальные основы оценивания и анализа качества моделей и полимодальных комплексов / Б.В. Соколов, Р.М. Юсупов // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2004. – № 6. – С. 5–16.

23. Соколов, Б. В. Квалиметрия моделей и полимодельных комплексов: состояние исследований и перспективы развития / Б.В. Соколов, Р.М. Юсупов, С.В. Микони // Материалы пленарного заседания 7-й Российской мультиконференции по проблемам управления. – СПб.: ОАО “Концерн “ЦНИИ “Электроприбор”, 2014. – С. 44–53.

24. Технология системного моделирования / Е.Ф. Аврамчук [и др.] ; под общ. ред. С.В. Емельянова. – М.: Машиностроение; Берлин: Техника, 1988. – 520 с.

25. Шрейдер, Ю. А. Системы и модели / Ю.А. Шрейдер, А.А. Шаров. – М.: Радио и связь, 1982. – 152 с.

26. Принципы квалиметрии моделей / Р.М. Юсупов [и др.] // Тез. докл. IV СПб Международная конференция «Региональная информатика-95», 1995. – С. 90–91.

27. Florac, W. A. Measuring the Software Process / W.A. Florac, A.D. Carlton. – US: Addison-Wesley, 1999. – 272 p.

28. Jones, C. Software Assessments, Benchmarks, and Best Practice / C. Jones. – US: Addison-Wesley, 2000. – 688 p.

3-2018.indd 43 26.09.2018 10:03:30