

# ПОСТРОЕНИЕ КАЧЕСТВЕННЫХ МОДЕЛЕЙ ОБЪЕКТОВ, КРИТИЧНЫХ ПО БЕЗОПАСНОСТИ: СТАТИЧЕСКИЙ И ДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

Д. Разинков  
Кафедра ЭВМ ДонГТУ  
[rasinkov@cs.dgtu.donetsk.ua](mailto:rasinkov@cs.dgtu.donetsk.ua)

## Abstract

*Rasinkov D. Qualitative modelling for hazardous objects. Static and dynamic Analysis. A survey paper of situation based qualitative modeling and analysis (SQMA). A perspective for enhancement of approach to modeling, simulation and result analysis. A effectiveness evaluation of approach usage for explosive mine ventilation modeling*

## 1. Введение

Институтом автоматизации и программного обеспечения (IAS) Штуттгартского университета в Германии предложен новый метод построения моделей SQMA (Situationbasierte Qualitative Modelbildung und Analyse – ситуационно-ориентированное построение качественных моделей и анализ) [1,2]. Метод позволяет проводить исчерпывающий анализ всевозможных ситуаций для моделируемого объекта. Полученные при построении модели результаты могут применяться для оценки различных режимов и состояний объекта с точки зрения безопасности. В настоящий момент и в Штуттгарте и в Донецке ведутся исследования, направленные на развитие данного метода.

Данная статья представляет собой обзор существующего метода ситуационного качественного моделирования и анализа (SQMA). Также рассматриваются перспективы расширения и модернизации подходов к построению моделей, процессу моделирования – проведения испытаний моделей и анализу полученных результатов. Дается оценка эффективности использования метода в области моделирования вентиляции взрывоопасных шахт.

## 2. Методика построение моделей

*Определение понятий и терминов.* В сложной системе как объекте моделирования метод SQMA выделяет неделимые элементы – модули или компоненты. Характеристики компонентов описываются через *интервальные переменные*. Интервальная переменная может принимать ограниченное число значений, каждое из которых представляет собой непрерывный диапазон вещественных чисел. Если интервальная переменная принимает определенное значение, значит, величина характеристики компонента, которую она описывает, лежит в заданных пределах. Возможность применения вероятностного характера отношений с использованием fuzzy-логики описана в [3].

Совокупность значений интервальных переменных всех характеристик компонента в конкретный момент времени однозначно определяют *ситуацию* или состояние компонента. В ряде случаев проводят разделение понятий ситуация и состояние: под *ситуацией* следует понимать уникальный набор значений интервальных переменных одного компонента, а под *состоянием* – то же для нескольких компонентов, объединенных в систему.

При объединении компонентов в систему важно учитывать следующее: *соединение* компонентов считается идеальным, поэтому реальные соединители

(например, трубы с ограниченной пропускной способностью) представляются отдельными компонентами.

Для определения поведения компонентов и системы в целом – изменения переменных, ситуаций и состояний, необходимо четко выразить правила. Формулирование правил описания поведения компонентов связано с физической природой.

*Декомпозиция системы.* Моделирование используется для объектов и систем различной физической природы, которые могут состоять из большого числа элементов, различных по своим характеристикам и роли в общей системе. Выделение фрагментов систем и объектов с точки зрения функциональной законченности или пространственной обособленности требует от экспертов предметной области досконального знания системы и составляющих ее частей. На начальной стадии разработки качественной модели перед техническим экспертом ставится задача декомпозиции моделируемой системы или объекта на более мелкие составляющие. Данный процесс заканчивается на этапе, когда эксперт может с уверенностью описать все характеристики каждого отдельного полученного элемента.

В результате декомпозиции систему можно представить в виде древовидной структуры, изображенной на рисунке 1.

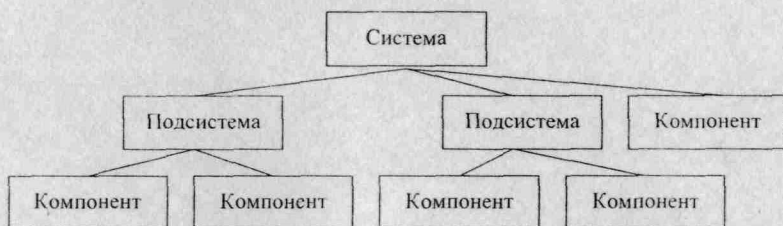


Рис.1 - Иерархическая структура системы после процесса декомпозиции.

*Характеристика компонентов.* Метод качественного моделирования требует отдельного и независимого описания каждого модуля, полученного в результате декомпозиции системы, подлежащей моделированию. При описании компонента в первую очередь должны быть выделены параметры, характеризующие связи с внешним миром. Компонент в этом случае рассматривается как черный ящик. Для обозначения внешних связей вводятся переменные определенного типа. Этот тип может быть абсолютно произвольным и иметь абстрактный характер. Назначением типизации параметров является возможность контроля при соединении компонентов. При этом одной физической точке соединения может соответствовать несколько параметров разного типа, например, таких как ток и потенциал.

Число характеристик компонента, не отраженных во внешних связях, должно быть минимально. Вместо применения таких характеристик предпочтительнее разбиение компонента на более мелкие составляющие. Это необходимо во избежание ситуаций, когда по внешним признакам нельзя достоверно определить состояние объекта.

Точки соединения компонентов на языке спецификаций SQMA описываются в разделе *terminals* следующим образом:

*Terminals*

- #1 type Top id A;
- #2 type Right id B;
- #3 type Left id C;

При этом точки соединения также типизируются для последующего контроля объединения компонент в систему.

*Выделение характерных интервалов переменных.* После определения переменных-параметров компонента наступает самая ответственная фаза описания объекта: от эксперта, специалиста предметной области, требуется определить диапазон изменения параметров и разбить его на интервалы.

Диапазоны изменения параметров определяются физическими свойствами объекта и областью конкретного применения. Большинство параметров по своей природе не ограничены, т.е. не имеют четких пределов, или ограничены лишь с одной стороны числовой оси (например, геометрические размеры). Для каждого конкретного объекта общее описательное понятие приобретает конкретную форму, сужая область допустимых значений.

При выделении интервалов в области значений эксперт должен руководствоваться следующими соображениями. Количество вводимых им интервалов определяет точность представления модели. Чем большее число значений может принимать интервальная переменная, тем ближе ее соответствие численным непрерывным моделям. С другой стороны растет сложность будущей качественной модели, так как увеличивается число возможных состояний параметра, компонента и системы в целом. Увеличение числа состояний, помимо технических сложностей, связанных с хранением и обработкой информации, приводит к усложнению анализа моделей и представления результатов. Избыточность и чрезмерная точность могут сыграть отрицательную роль, лишь ухудшив конечный результат.

Таким образом, перед экспертом стоит задача оптимального выбора интервалов переменных.

Описание переменных и их интервалов производится следующим образом:

*Quantities*

- id D from 3 type Potential
- intervals [0,0] (0,6200) [6200,6200];

Для переменных дополнительно указывается, к какой точке соединения компонента она относится (в данном случае №3) и какой тип имеет.

*Задание критериев возможности.* Дальнейшее описание компонента сводится к определению логических связей между параметрами одного компонента. Целью данной операции является исключение противоречащих здравому смыслу ситуаций. Данный этап разработки модели позволяет определить наборы значений переменных, описывающих реально возможные состояния моделируемого объекта. Правила, связывающие значения переменных в определенные комбинации, устанавливают строгие однозначные соответствия между диапазонами различных переменных, которые могут быть в наличии одновременно. Например, в языке спецификаций SQMA правила можно описать следующим образом:

$$D = [0;1) \rightarrow C = [0, \infty)$$

Определенному диапазону значений переменной  $D$  в любой ситуации должен соответствовать заданный диапазон переменной  $C$ . Данное правило можно представить и в другом виде:

$$C = [0; x] \rightarrow D = [0; 1]$$

Правила можно также сформулировать в виде арифметических и логических операций над интервальными переменными:

$$D = [0; 1200] \ \&\& \ B + C > 0 \ \&\& \ E \neq 0 \Rightarrow A = [0; 1]$$

*Процесс создания модели компонента.* После процедуры описания компонента метод SQMA предполагает автоматическое создание модели. Этот процесс заключается в определении всех ситуаций, которые возможны для данного компонента.

Первый этап моделирования состоит в полном переборе всех комбинаций значений интервальных переменных компонента. Создается так называемая полная таблица ситуаций моделируемого объекта.

На втором этапе производится проверка каждой ситуации на удовлетворение критерию возможности, т. е. для каждой ситуации осуществляется проверка всех правил из списка *SituationRules*. Если комбинация значений параметров допустима всеми правилами, то она заносится в редуцированную таблицу ситуаций, которая является результатом качественного моделирования компонента и исходным материалом для анализа.

*Модель системы.* Топология соединения компонент представляется в SQMA следующим описанием:

```
Netlist
(COMPONENTS
  component1, component1.txt
  component2, component2.txt
)
(NODES
  (UNI
    component1,2
    component2,1
  ))
```

В разделе *COMPONENTS* описываются все компоненты, входящие в систему, в разделе *NODES* перечисляются все узлы соединений, объединяющие точки внешних связей компонентов.

Создание модели системы заключается в получении таблицы ситуаций системы, являющейся результатом полного перебора ситуаций всех компонент. Из-за большого числа компонентов или переменных эта таблица может быть очень больших размеров. Для сокращения таблиц возможно объединение сходных по каким-то признакам ситуаций в так называемые *состояния* системы. Тогда для анализа будут использоваться меньшие и более обозримые таблицы. Такое объединение возможно с помощью меток ситуаций, о которых речь пойдет ниже.

### 3. Анализ опасных ситуаций

*Метки ситуаций.* Таблицы комбинаций значений не несут наглядной информации. Конкретный набор значений параметров полезен лишь специалисту. Для снабжения ситуаций дополнительной информацией служат комментарии. Они несут лингвистическое описание конкретной ситуации и должны отражать ключевые отличия данной ситуации от какой-либо другой.

Если некоторое значение параметра, определяющее ситуацию, выводит систему или компонент из штатного режима и ведет к опасному режиму, или уже идентифицирует его, то с помощью комментария можно это отметить и выделить ситуацию из общего ряда. При анализе таблицы ситуаций возможен отбор ситуаций по определенному критерию, группировка ситуаций одного типа, например, опасных, а также оценка общего числа опасных ситуаций, как в абсолютном плане, так и по отношению к остальным ситуациям или общему числу ситуаций.

Перебор всех ситуаций позволяет получить не только полный список всех опасных ситуаций, или ситуаций определенного характера, но также всевозможные ситуации, комбинирующие несколько опасных диапазонов параметров. Так, например, при анализе различных исключительных обстоятельств метод не позволит упустить вариант присутствия одновременно нескольких опасных факторов, таких как ошибки, отклонения, сбои.

*Правила меток ситуаций.* Ситуация оценивается экспертом по значениям параметров, которые ее определяют. Поэтому по определенному набору значений параметров однотипно может быть охарактеризована группа ситуаций. Для этой цели служат правила определения комментария ситуаций.

Правила комментария однозначно связывают значение параметра или группы значений с текстом, объясняющим тип ситуации. Правила описываются следующим образом:

*CommentRules*

$D = (0; 6200) \Rightarrow \text{Danger } D;$

Правая часть правила содержит краткий текстовый комментарий и буквенный атрибут, позволяющий при работе с таблицами ситуаций производить по нему отбор определенных ситуаций из общего числа.

*Оценка результатов моделирования.* Результаты моделирования методом SQMA представляются в таблицах. При этом, благодаря спецификациям описания моделей, возможно очень гибкое представление таблиц для анализа. Например, для одного компонента возможна следующая таблица ситуаций:

Таблица 1. Таблица состояний компонента

Ситуация №	Параметр №1	Параметр №2	Комментарий	Атрибут
1	{0;1}	{0;1}	Норма	N
3	{1x}	{0;1}	Опасность	D
...	...	...	...	...

Ситуации могут иметь пропуски в последовательности порядковых номеров, так как некоторые ситуации могут быть исключены по критериям возможности.

Для системы объектов возможности представления таблиц еще более расширены. Возможно представление таблицы в кратком виде:

Таблица 2. Таблица ситуаций системы

Компонент 1		Компонент 2	
№ ситуации	Комментарий	№ ситуации	Комментарий
1	Норма	1	Норма
1	Норма	2	Опасность
...	...	...	...

Можно также получить развернутое представление таблицы со всеми значениями переменных.

Средства выбора групп ситуаций посредством атрибута позволяют проводить широкий анализ вариантов статических состояний моделируемой системы. Результатами анализа могут быть не только статистические оценки, но и рекомендации к улучшению или исправлению системы. В таком случае целью моделирования является выявление пропущенных при проектировании ситуаций. К таковым могут относиться:

- опасные ситуации, связанные с выходом переменной из зоны штатного режима. Данный момент может быть упущен при первоначальном проектировании из-за отсутствия анализа параметров, который в данном методе осуществляется на этапе описания переменных.
- комбинации значений параметров, вызывающие опасное состояние системы. Данная проблема может возникнуть при недостаточно точном представлении о моделируемой системе. Полный перебор ситуаций SQMA исключает такую возможность.
- одновременное возникновение нескольких опасностей. При обычной оценке нештатных ситуаций каждая особая ситуация рассматривается подробно, но как правило, независимо. Данный метод показывает возможность одновременного возникновения таких ситуаций, что требует дополнительного анализа системы.

#### 4. Обзор переходов состояний

*Определение правил переходов.* Статический анализ не дает полного представления о системе. Отсутствие связей между ситуациями не позволяет проследивать возможный ход развития процесса, а в случае необходимости путь и причины возникновения внештатной ситуации.

Метод качественного моделирования предлагает упрощенный подход к моделированию изменений в системе. Не отходя от концепции анализа всех возможностей, первоначально утверждается наличие перехода из каждой ситуации в любую другую. Таким образом, создается полная таблица (таб.3) переходов, имеющая вид:

Таблица 3. Полная таблица переходов.

	Ситуация 1	Ситуация 2
Ситуация 1	X	X
Ситуация 2	X	X

В SQMA сформулированы следующие правила редуцирования этой таблицы, которые запрещают некоторые переходы:

1) Непрерывность интервальных переходов. Большинство переменных изменяются непрерывно, а это значит, что параметр при изменении должен принять значение из интервала, соседнего по отношению к предыдущему (рис. 2).



Рис. 2 - Правило непрерывности интервальных переходов

В спецификации языка описания модели данное правило записывается следующим образом:

*TransitionRules*

*SD;*

2) Правило определения направления изменения интервальной переменной. Оно опирается на интервальную арифметику, позволяющую осуществлять арифметические операции над интервальными переменными. Запись данного правила имеет вид:

@ $D=A+B$ ;

Здесь направление изменения переменной  $D$  зависит от знака результата суммы, т.е. от положения интервала, получившегося в результате суммирования, на числовой оси. Если интервал лежит в положительной области, то возникнет увеличение переменной  $D$ , в отрицательной – уменьшение. Но при этом не должно возникать ситуаций с неопределенным результатом суммирования, когда интервал охватывает диапазон значений и в положительной и в отрицательной областях. Это предопределяет ограничения на выделение интервалов для переменных  $A$  и  $B$ . Данное правило строго определяет переход из одной ситуации в другую. Анализ показывает, что отсутствие временных параметров переходов делает модели неестественными, т.к. величина изменения интервальных переменных не зависит от начала и длительности воздействия. Такой статический подход оправдан лишь для узкого круга предметных областей, таких как, например, синхронная дискретная электроника, где изменение ситуации происходит каждый такт в зависимости от значений входных переменных.

*Получение таблицы переходов.* Результатом моделирования переходов системы из ситуации в ситуацию является редуцированная таблица переходов. Ее получают из полной таблицы путем исключения переходов, при которых изменение переменных не удовлетворяет правилам переходов.

Представление редуцированной таблицы переходов отличается от полной таблицы лишь наличием пустых мест в ячейках, определяющих связи между ситуациями, что говорит о невозможности перехода.

Возможно также списочное отображение связей между переменными. При этом для каждой ситуации составляется список других ситуаций, в которые возможен переход. Данная интерпретация дает возможность говорить о представлении картины переходов в виде сложной многомерной геометрической фигуры, каждый примитив которой – одна ситуация, которая своей гранью-переходом соприкасается с другой ситуацией.

*Транзитивный анализ.* Анализ переходов между ситуациями компонента или системы заключается в оценке вариантов развития событий, в выявлении возможностей поворота событий к опасным ситуациям и определении мер, которые можно принять по ходу событий.

Методом обратной раскрутки событий возможно прослеживание и устранение путей, ведущих к нештатным ситуациям.

Практическим применением таблиц переходов может быть создание систем управления на их основе, как показано в [10].

## **5. Направление дальнейших исследований**

Основным достоинством метода качественного ситуационного моделирования и анализа является возможность получения исчерпывающего результата, т. к. метод гарантирует при соответствующем полном и точном описании моделируемой системы получение всех возможных ситуаций и переходов в системе.

Точность результата может регулироваться точностью задания интервалов изменения переменных в описании компонентов системы. Возможно очень гибкое представление результатов моделирования с применением средств, положенных в основу спецификаций описаний и реализованных в программном обеспечении, поддерживающем метод.

Метод SQMA открывает новые перспективы анализа состояний объектов и систем, в первую очередь анализа опасных состояний. Транзитивный анализ служит опорой для прогнозирования поведения моделируемых систем и служит средством реконструкции ситуаций и поиска причин того или иного характера поведения системы.

К недостаткам относится наличие определенных трудностей при описании объектов моделирования. Отсутствие точных инструкций и алгоритмов выделения интервалов качественных переменных, задания критериев возможностей и правил комментариев может явиться причиной ошибок в модели, требует от экспертов предметной области определенного опыта в вопросах качественного моделирования.

Основным недостатком метода является игнорирование временного фактора при оценке изменений, происходящих в системе. Это значительно сужает область применения метода для моделирования реальных систем или же вносит недопустимые упрощения, приносящие ошибки в результаты моделирования и анализа.

IAS и кафедра ЭВМ работают совместно над совершенствованием метода SQMA. Исследования ведутся в следующих направлениях:

- Создание новых спецификаций качественного описания динамических моделей с использованием интервальных переменных.
- Выработка методик предварительного описания моделей, выбора качественных переменных и определения характерных интервалов.
- Разработка способов построения качественных моделей динамических объектов.
- Решение проблем построения моделей сложных сетевых систем.
- Наследование результатов количественного моделирования качественными моделями.
- Способы испытаний, тестов и анализа моделей динамических объектов.
- Интеграция методов качественного и количественного моделирования.

## **6. Заключение**

На кафедре ЭВМ накоплен значительный опыт количественного моделирования сетевых динамических систем. В течении ряда лет велись исследовательские работы по созданию методов и средств моделирования систем проветривания угольных шахт.



Высокий уровень опасностей и внештатных ситуаций в этих системах, связанный с накоплением метана в горных выработках, которое приводит к взрывоопасным обстоятельствам и возможностям отравления персонала, требует неотложных мер по созданию средств моделирования и анализа, способствующих накоплению знаний и разработке новых средств по предотвращению аварий.

Метод SQMA обладает свойствами, позволяющими ориентировать систему в сторону безопасности, что является немаловажным фактором при моделировании шахтной вентиляции. Количественные модели, разработанные на кафедре ЭВМ, довольно точно отражают характер аэрогазодинамических процессов. Имеются также методики построения сетевых моделей больших размеров, основывающиеся на матричном подходе, которые могут быть реализованы на современных параллельных ЭВМ.

Разработка новых методов и средств качественного моделирования динамических сетевых объектов, критичных по условиям безопасности, которые объединят достоинства описанного выше метода SQMA и методов количественного моделирования, способствует решению актуальной проблемы обеспечения безопасности угольных шахт и других промышленных систем.

## Литература

1. P.Fröhlich, X.Laufenberg, G.Burgbacher "A new qualitative model based approach to hazard analysis", 1994, 6 s.
2. X.Laufenberg, P.Fröhlich "A qualitative model-based Approach to integrate system and hazard analysis, 1994, 6 s.
3. P.Fröhlich, X.Laufenberg, "A qualitative modeling approach using fuzzy Intervals", 1994, 6 s.
4. X.Laufenberg, "Modeling and mode-based analysis for safety and hazard analysis", 1995, 6 s.
5. U.Biegert, "Gefahrenanalyse auf der Basis von qualitativen Modellen". Dechema-Tätigkeitsbericht, 1998, Institut für Automatisierungs- und Softwaretechnik, Universität Stuttgart
6. U.Biegert, "Qualitative Beschreibung von Automatisierungssoftware" Begleitaufsatz zum Vortrag: "Qualitative Beschreibung von Automatisierungssoftware", GMA-Fachausschuss 1.6 des VDI/VDE, Workshop - Einsatz qualitativer Modelle für die Überwachung und Steuerung technischer Systeme. Informationen in at 7/98, S358-359
7. S.Manz „Qualitative Modellierung komplexer dynamischer Systeme“, 5. Berichtskolloquium Graduiertenkolleg Parallele und Verteilte Systeme, Universität Stuttgart, 3. Juli 1998, Наукові праці донецького технічного університету, Серія: "Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка", Випуск 6, Донецьк 1999, с.129.
8. S.Manz : "Einsatz qualitativer Modelle für die Überwachung und Steuerung technischer Systeme", Hamburg/Emmendorf, 16-18.3.98
9. X.Laufenberg "Ein modellbasiertes qualitatives Verfahren für die Gefahrenanalyse", Dissertation, Institut für Automatisierungs- und Softwaretechnik Universität Stuttgart, 1996, 145 s.
10. P.Fröhlich „Überwachung verfahrenstechnischer Prozesse unter Verwendung eines qualitativen Modellierungsverfahrens“, Dissertation, Institut für Automatisierungs- und Softwaretechnik Universität Stuttgart, 1996, 166 s.