

## Цифровые двойники

УДК 519.876.5

doi:10.38028/ESI.2022.25.1.006

### Интеграция концептов цифровых двойников и ситуационной осведомленности в системе моделирования критических инфраструктур

Фридман Александр Яковлевич

Институт информатики и математического моделирования ФИЦ КНЦ РАН,

Россия, Апатиты, [fridman@iimm.ru](mailto:fridman@iimm.ru)

**Аннотация.** Рассмотрена интеллектуальная информационная технология ситуационного моделирования промышленно-природных систем (ППС) различного масштаба в целях стратегического и оперативного управления ими, ориентированная на комплексную обработку разнородной информации о статических и динамических характеристиках подобных систем. Актуальность задачи вызвана: усложнением и взаимопроникновением ППС; ростом неопределенностей в мире из-за ускорения развития ППС; увеличением доступности данных в связи с рождением Интернета Вещей. Новизна подхода состоит в интеграции средств изучения слабо формализованных сложных нестационарных пространственных объектов в рамках причинно-следственных моделей и комплексном использовании экспертных знаний для формирования критериев и выбора предпочтительных вариантов реализации структуры ППС, изучаемых более детально в имитационном режиме с помощью цифровых двойников компонентов ППС.

**Ключевые слова:** промышленно-природная система комплекс, стратегическое и оперативное управление, количественная оценка ситуационной осведомленности, превентивная аналитика в задачах безопасности, цифровой двойник

**Цитирование:** Фридман А.Я. Интеграция концептов цифровых двойников и ситуационной осведомленности в системе моделирования критических инфраструктур // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2022. – № 1 (25). – С. 70-78. – DOI:10.38028/ESI.2022.25.1.006.

**Введение.** В статье анализируются возможности повышения гибкости и эффективности моделирования нестационарных распределенных объектов, параметры которых меняются во времени и пространстве. Будем называть их промышленно-природными системами, поскольку они содержат как промышленные, а так и природные компоненты. Характеристики первых обычно требуется оптимизировать с помощью управляющих сигналов (решений разного уровня и масштаба), а условия жизни вторых формируют ограничения на допустимые параметры первых.

Такая задача актуальна всегда, но возможности ее решения непрерывно меняются с развитием технологий конструирования и методов управления. В последнее время новые подходы к решению указанной задачи связаны с Интернетом вещей (Internet of Things – IoT). Этот фактор привел к экспоненциальному росту количества данных о параметрах ППС, чаще всего в виде временных рядов. С другой стороны, наблюдающееся усложнение и взаимопроникновение (по функциональным характеристикам и географическим координатам) ППС существенно повышает риск возникновения и ущерб от последствий комплексных (зависимых [1]) отказов, вызывающих самые значительные последствия.

Методы моделирования сложных объектов чаще всего оценивают только вероятностные значения их параметров (энтропии, средних значений и других статистических свойств),

либо характеристики графов таких объектов (достижимость состояний, связность и т.п.). Однако в задачах, связанных с безопасностью, такие подходы неэффективны, поскольку иницирующие события, приводящие к нештатным и чрезвычайным ситуациям (НЧС), возникают при конкретных сочетаниях значений параметров и переменных на объекте, которые можно выявить только на причинно-следственных моделях, анализирующих реальные характеристики объекта. Аналитические модели редко адекватны сложным системам, для них наиболее пригодно имитационное моделирование. К первым моделям такого класса можно отнести системную динамику, но они не поддерживают иерархическую структуру описания объекта и поэтому становятся неконтролируемыми при росте размерности модели.

Для исследования иерархий предложены модели с различными принципами декомпозиции (в скобках даны названия соответствующего программного обеспечения каждого типа декомпозиции): функциональная (Structures Analysis and Design Technique – SADT [2]), организационная или структурная декомпозиция (Data Flow Diagram – DFD [3]), декомпозиция по состояниям (State Transition Diagram – STD [4]). Моделирование сложных объектов требует использовать все перечисленные типы декомпозиции совместно, что их программное обеспечение не поддерживает. Для решения этой задачи разрабатывался универсальный объектно-ориентированный язык моделирования Universal Modelling Language – UML [5], но в его среде требуется встраивать все программные модули в диаграмму классов и писать их тексты на этом языке, что не позволяет использовать интеллектуальные методы обработки данных и интегрировать в модель ранее разработанные модули.

**1. Ситуационная система моделирования (ССМ).** Видимо, самый близкий аналог рассматриваемой ниже ситуационной системы моделирования [6, 7] – интеллектуальная система имитационного моделирования «Ресурс-Действие-Объект» (РДО) [8], предназначенная для моделирования сложных систем, функционирование которых требуется представить в форме продукционных правил. У РДО и ССМ есть следующие общие аспекты: все переменные рассматриваются как дискретные; имитация производится в рамках дискретно-событийного метода; можно строить иерархическое описание объекта и подключать внешние программные модули, имитирующие работу компонентов объекта (в последнее время их называют «цифровыми двойниками» [9]). Основные минусы РДО для решения задачи исследования ППС таковы:

- не для всех объектов пригодна модель в виде системы продукций и моделирование с помощью логического вывода, особенно при высокой размерности модели;
- отсутствуют встроенные механизмы сравнения альтернатив реализации ППС;
- иерархические структуры модели не соответствуют структуре объекта: они предназначены либо для увеличения скорости логического вывода путем классификации продукционных правил, либо реализуют систему классов в стиле объектно-ориентированного программирования;
- РДО не позволяет работать с географическими параметрами объекта.

Все перечисленные и другие существующие системы моделирования имеют общий недостаток при решении рассматриваемой здесь задачи исследования ППС: они не предоставляют возможности эффективной реализации идей ситуационного подхода, который, по мнению автора, наиболее адекватен этой задаче.

Указанных недостатков лишена представленная ниже ССМ, разработанная в рамках работ М. Месаровича по иерархическим системам [10] и ситуационного управления, предложенного Д.А. Поспеловым [11]. Эта конкретизация ситуационного подхода для задачи моделирования ППС создавалась при участии и под руководством автора, ее отличия от прототипов заключаются в следующем:

- ядром ССМ является ситуационная концептуальная модель (СКМ) ППС, отражающая организационную структуру объекта и взаимодействия между его составными частями. Это иерархическая модель, описывающая все перечисленные выше типы декомпозиции, она допускает оперативную модификацию на любом этапе жизненного цикла, позволяет в деталях контролировать consistency реализации ППС, осуществлять имитацию сценариев развития ППС, автоматизировать генерацию вычислительных экспериментов, интегрировать подмодели различных типов, в том числе экспертной системы и геоинформационной системы (ГИС);
- в отличие от всех аналогов, в ССМ даны формальные определения главных концептов ситуационного управления [11]: ситуации, сценария, пополнения и обобщения ситуаций и т.д., что позволило автоматизировать основные задачи моделирования: формирование ситуаций и сценариев, их сопоставление в статике и в режиме имитации с выбором на этой основе такой структуры ППС, которая соответствует предпочтениям ЛПР, а также генерацию «быстрых прототипов» в традициях ИИ для поддержки принятия решений, касающихся составных частей ППС.

СКМ относится к причинно-следственным моделям, в частности, в ней не применяется нечеткая логика, использованная в некоторых системах ситуационного управления. Это позволяет компьютеризировать вычислительные эксперименты по поиску «узких мест» в структуре объекта, которые порождают наиболее опасные зависимые отказы, появляющиеся при определенных комбинациях параметров ППС, а также анализировать чувствительность предполагаемых решений к вариациям внешних воздействий и внутренних характеристик системы. С этой же целью, НЧС моделируются как расширение модели нормальной работы ППС, с применением тех же процедур исполнения расчетов.

**2. Основные особенности ССМ. Модель ППС в ССМ [7]** включает элементы трех типов: объекты, процессы и ресурсы. Первый этап создания СКМ – это построение *дерева объектов* – компонентов ППС. Оно изоморфно организационной структуре ППС, а также формирует пространственные характеристики объектов: при конструировании СКМ один или более объектов из каждой ветви дерева сопоставляются с электронной картой средствами встроенной в ССМ ГИС. В результате всегда имеется взаимно-однозначная связь СКМ и отображения ППС на карте, что позволяет учитывать его параметры наряду с другими в ходе моделирования. *Ресурсы* отображают взаимодействия объектов и формализуют любые (как материальные, так и информационные) связи между объектами и приписанными к ним *процессами*, каждый из которых описывает преобразование определенного набора входных ресурсов этого процесса в набор выходных ресурсов. При формировании дерева объектов и назначении связей по ресурсам в СКМ вводятся возможные альтернативы структуры ППС путем декомпозиции объектов либо указанием альтернативных путей передачи наборов ресурсов между процессами и/или объектами. Компьютерная спецификация элементов СКМ определяется назначенными им *исполнителями*, которые для процессов задают способ доступа к имитатору (*цифровому двойнику*) процесса, для ресурсов определяют процедуру получения временного ряда значений, а для объектов организуют доступ к их графическим параметрам. Вызов исполнителя процесса при имитации переводит СКМ из одного состояния в другое, последовательность таких вызовов формирует конкретный сценарий имитации.

Математическое описание СКМ и ССМ, формулировки и доказательства теорем здесь не приводятся из-за ограниченного объема статьи, все это имеется в работах, на которые даны ссылки.

*Ситуационный подход в СКМ* опирается на следующие концепты. Атом данных в модели именуется *фактом*, он содержит имя и набор допустимых или запрещенных значений

одного ресурса. *Исходная ситуация* формируется пользователем в начале сеанса моделирования в виде набора интересующих его фактов, она рассматривается как цель анализа в данном сеансе. С помощью связей, заданных в СКМ, и правил пополнения ситуаций, которые хранятся во встроенной в ССМ экспертной системе (ЭС), исходная ситуация автоматически расширяется до тех пор, пока не будет найден связный фрагмент СКМ, включающий все ресурсы из исходной ситуации. Он именуется *полной ситуацией* (ПС) и трактуется как зона интересов ЛПР в данном сеансе. Объект принятия решения (ОПР) соответствует корневому объекту найденной ПС, его положение в дереве объектов задает организационный уровень решения этой ПС. Любая ПС может включать ранее заданные альтернативы и тем самым определять набор возможных в этой ПС структур ППС. Каждая такая (не включающая вариантов) допустимая структура называется *достаточной ситуацией* (ДС), так как она содержит конкретную структуру ППС, достаточную для корректного задания по крайней мере одного шага имитации. Если в некоторой ДС ЛПР принимает решение перевести модель из текущего класса ситуаций в новый, такая ДС называется *управляющей*. В таком случае ССМ предлагает ЛПР предпочтительную структуру из выбранного им класса путем статического сопоставления ситуаций для одного и того же ОПР. С этой целью при построении СКМ каждому объекту приписывается обобщенный критерий качества (ОКК) [7], представляющий собой взвешенную среднеквадратическую сумму относительных девиаций скалярных критериев качества (СКК) этого объекта от их номиналов, которые вводит ЛПР верхнего (относительно ОПР) уровня. Он же вводит допустимые отклонения СКК от номиналов, обратные значения этих допусков используются как веса в ОКК, то есть как коэффициенты важности СКК (чем данный СКК важнее для ЛПР, тем меньше допуск на его отклонение, что логично). Обобщенный критерий может стать равным нулю только при полном совпадении всех критериев с номиналами, то есть при идеальном для вышестоящего ЛПР функционировании ОПР). У такого ОКК есть еще одно полезное свойство: он равен 1, когда девиации всех СКК равны допускам, и существенно больше 1 в недопустимых режимах работы ОПР. Используя это свойство, легко найти в дереве объектов объект самого нижнего уровня с большим значением ОКК, именно он служит источником проблем для ОПР. Для статического сопоставления ДС одного ОПР используются обобщенные затраты на удовлетворение его ОКК, равные удельной чувствительности ОКК к изменениям СКК. Эти затраты дают основу для *классификации ситуаций*. В один класс входят те ДС, где слагаемое с определенным СКК минимально в ОКК, ДС из одного класса тем лучше, чем меньше вклад этого скалярного критерия в ОКК. Если статическое сравнение не дает однозначного результата, последствия реализации каждой ДС можно исследовать в режиме имитации, задание на которую генерируется автоматически путем последовательного подключения исполнителей элементов выбранного фрагмента модели и синтеза баз исходных данных и результатов имитации. *Сценарий* есть последовательность ДС для одного ОПР при одинаковых исходных данных.

Представленный выше ОКК показал свою эффективность также при решении в рамках ССМ задач планирования и координации управлений [12].

Теперь рассмотрим новые модификации ССМ в рамках темы настоящей работы.

**3. Превентивная аналитика безопасности ППС.** Для решения любых задач сопоставления ситуаций прежде всего необходимо унифицировать процедуры обработки переменных различной природы. Начальным шагом для этого может быть принятое с самого начала разработки ССМ решение рассматривать области значений любых параметров как списковую структуру. Для числовых переменных упорядочение этих списков естественным образом задается отношением «больше или равно», для других типов переменных требуется дополнительная работа. Первым делом нужно выбрать одно (в общем случае – любое) допустимое значение как номинальное ( $Z_{\text{нуд}}$  на рис. 1). При реализации этого значения соответствующее

ему управление считается идеальным. Затем остальные значения упорядочиваются по степени их отличия от номинального: чем больше это отличие для некоторого значения параметра, тем дальше от номинального оно должно находиться в итоговом списке. На рис. 1 имена этих значений взяты в угловые скобки. При этом все значения, находящиеся по одну сторону от идеального, должны иметь тот же «знак» отклонения от него.

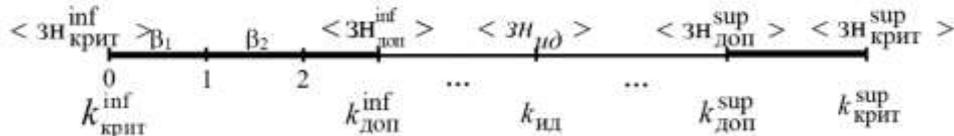


Рис. 1. Шкала значений параметра

Чтобы унифицировать процедуры анализа работы ППС в нормальных режимах и при НЧС [13], нежелательные и опасные значения параметров «дополняют» допустимые значения (от  $\langle 3H_{\text{доп}}^{\text{inf}} \rangle$  до  $\langle 3H_{\text{доп}}^{\text{sup}} \rangle$  на рис. 1) в соответствующие стороны. Неотрицательные числа показывают порядковые номера значений в стеке (списке) области значений параметра, их буквенные обозначения – символы  $k$ . Жирными отрезками оси выделены подмножества недопустимых значений параметра. Будем (без потери общности) считать, что все значения параметра за границами допуска, кроме крайних значений, нежелательны, но не критичны, а крайние значения ( $\langle 3H_{\text{крит}}^{\text{inf}} \rangle$  и  $\langle 3H_{\text{доп}}^{\text{sup}} \rangle$ ) соответствуют НЧС.

Для примера на рис. 2 показан безопасный диапазон значений строкового параметра «рост». При необходимости учета критических значений этот диапазон можно слева дополнить значением «карлик», а справа – значением «акромегал».

Если нельзя считать значения параметра равноудаленными, то при определении расстояния между ними можно учитывать экспертные положительные веса дуг между соседними значениями, показанные символами  $\beta$  с индексами на рис. 2.

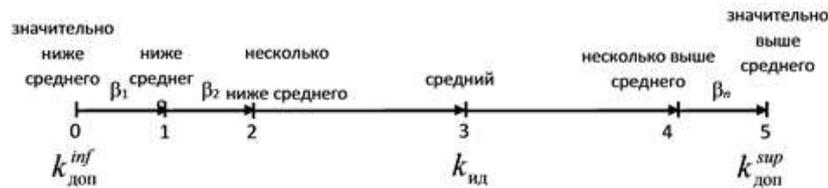


Рис. 2. Допустимые значения параметра «рост»

В работе [13] предложены соотношения для вычисления относительных девиаций параметров в представленном выше обобщенном пространстве параметров таким образом, чтобы сохранить все положительные свойства ОКК, в том числе равенство его значения 1 при нахождении всех параметров на границах их допусков.

После описанной модификации в обобщенное пространство состояний ППС можно вводить любые типы параметров наравне с числовыми переменными и применять унифицированные процедуры анализа интегральных свойств поведения ППС в этом пространстве, которое используется при решении всех задач моделирования ППС.

Для выявления предпочтительных сценариев работы ППС в ходе стратегического моделирования (при разработке новых ППС) применяются следующие определения.

*Определение 1.* Сценарий *допустим* на определенном промежутке времени, если не приводит к критическим величинам компонентов состояния ППС, иначе он *запрещенный*.

*Определение 2.* Сценарий *безопасен* на определенном промежутке времени, если не приводит к появлению опасных значений компонентов состояния ППС, иначе он *опасный*.

*Определение 3.* Предпочтительность опасных сценариев тем выше, чем меньше величина суммы обобщенных затрат, превышающих единицу, либо степень отличия для опасных ситуаций от ближайших допустимых.

*Определение 4.* Сценарий *оптимален* на определенном промежутке времени при минимальной (среди всех допустимых сценариев) сумме обобщенных затрат на этом промежутке.

С учетом определений 1 – 4, цель исследования нормальной работы ППС заключается в поиске сценария, оптимального на заданном временном интервале при отсутствии в этом сценарии опасных значений состояния ППС, для чего необходимо наличие непустых отображений из текущей ДС в следующую на всех шагах сценария.

Моделирование НЧС требует перебора доступных по ресурсам мероприятий для нахождения такого, которое приводит к предпочтительному из опасных сценариев без появления критических значений состояния ППС.

Разумеется, нет возможности анализировать сценарии на реальных объектах, необходимо компьютерное моделирование с применением цифровых двойников таких объектов.

В задачах безопасности *ситуационные цифровые двойники (СЦД)*, пригодные в качестве исполнителей процессов в ССМ, должны решать две основные задачи: корректное моделирование опасных воздействий новых ППС на окружающие ППС и обратно – реакции новых систем на опасные воздействия со стороны окружающих ППС. По этим критериям и должны разрабатываться и сертифицироваться СЦД. При появлении новых ППС может потребоваться и доработка СЦД уже существующих ППС, поскольку новым объектам могут быть опасны и те параметры существующих ППС, которые не были опасны для других ППС.

**4. Ситуационная осведомленность в ППС.** Парадигму ситуационной осведомленности (СО) [14] можно сегодня считать наиболее общим подходом к применению ситуационного подхода в задачах, связанных с нестационарными системами. Авторы этой концепции выделяют три уровня или этапа достижения СО: восприятие происходящего вокруг, понимание происходящего и прогноз будущего состояния. Концепция СО исходно разрабатывалась для операторов в таких видах деятельности, где количество информации велико, а последствия неверных решений серьезны (пилотирование, военные конфликты, скорая помощь и т.д.), однако, на наш взгляд, измерение СО полезно и в рассматриваемых проблемах исследования ППС, где фактор времени не так значителен, но многие аспекты СО важны и могут быть эффективно реализованы для СКМ следующим образом:

- восприятие моделируется заданием исходной ситуации, понимание – формированием полной ситуации и определением организационного уровня решения задачи, прогнозирование – имитационным экспериментом;
- цель моделирования задается ЛПР путем выбора желательного класса ситуаций в ходе моделирования;
- специфика информации учитывается выбором исходной ситуации и автоматической отбраковкой неперспективных альтернатив;
- ожидания ЛПР в ССМ формализуются выбором доминирующего частного критерия в ОКК и составом допустимых альтернатив, заложенных в СКМ при ее создании.

В результате впервые предложены числовые оценки СО для ССМ [15].

**Заключение.** Стратегическое моделирование ППС направлено на анализ структуры проектируемых потенциально опасных объектов и их взаимосвязей для выявления возможностей зависимых отказов, которые порождают цепочки событий, приводящие к самым значительным ущербам в нештатных и чрезвычайных ситуациях. Этот режим в ССМ использует ситуационные цифровые двойники ППС и решает задачу превентивной аналитики для поиска и сценарного прогнозирования «узких мест» в структуре ППС с возможностью оценки ущер-

бов от отказов и обоснования рациональных мер по их предупреждению. *Для повышения безопасности целесообразно до встраивания новых устройств и систем в реальный мир встроить их модели в мир виртуальный.*

Предложена метрика обобщенного пространства состояний, включающего как строковые, так и числовые переменные. Описано применение этой метрики в системе ситуационного моделирования статических и динамических характеристик промышленно-природных систем с учетом аспектов безопасности. Метрика допускает использование экспертных знаний о степени опасности различных состояний объекта моделирования.

Для оперативного моделирования ППС предложены количественные оценки ситуационной осведомленности ЛПР, участвующих в работе ППС, путем метризации пространства всех трех основных аспектов СО, что позволяет объективизировать оценку достигнутой степени СО и особенно важно, когда различные составные части одного ППС входят в зоны ответственности нескольких ЛПР. Для этого случая предложенный подход позволяет координировать действия ЛПР и предотвратить конфликты между ними.

ППС рассматриваются как иерархические системы, при росте их масштаба возможен переход к сетцентрической модели [16], основное отличие процесса моделирования от исследования иерархических структур в таком случае состоит в том, что зоны ответственности ЛПР формируются динамически по результатам оценки их СО.

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. ГОСТ 27.002-89: Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения.
2. Nam Pyo Suh. *Axiomatic Design - Advances and Applications*. Chapter 5, New York, Oxford University Press, 2007, p. 239-298.
3. Коваленко В.В. Проектирование информационных систем / В.В. Коваленко. – М.: Форум, 2011. – 357с.
4. Joe Celko's. *Trees and Hierarchies in SQL for Smarties*. The Morgan Kaufmann Series in Data Management Systems. Second Edition, Elsevier Inc., 2012.
5. Hunt J. *The Unified Process for Practitioners: Object-oriented Design, UML and Java*. Springer, 2000.
6. Фридман А.Я., Курбанов В.Г. Ситуационное моделирование надежности и безопасности промышленно-природных систем / А.Я. Фридман, В.Г. Курбанов // Информационно-управляющие системы № 4(71), 2014. – с. 1-10.
7. Фридман А.Я., Курбанов В.Г. Формальная концептуальная модель промышленно-природного комплекса как средство управления вычислительным экспериментом / А.Я. Фридман, В.Г. Курбанов // Труды СПИИРАН, 2014. № 6 (37), – с. 424–453.
8. Ясиновский С.И. Интеллектуальная гибридная система поддержки принятия решений РДО: вчера, сегодня, завтра / С.И. Ясиновский // Мягкие измерения и вычисления. № 12 (13), 2018. – с. 33-50.
9. Digital Twin: Transforming How We Make Sense of Data. URL: <https://www.ptc.com/ru/industry-insights/digital-twin> (accessed 11.03.2022).
10. Месарович М., Мако Д., Такахара И. Теория иерархических многоуровневых систем / М. Месарович, Д. Мако, И. Такахара. – М.: Мир, 1973. – 344с.
11. Поспелов Д.А. Ситуационное управление: теория и практика / Д.А. Поспелов. – М.: Наука, 1986. – 228с
12. Фридман А.Я. Координация и планирование управлений в локально организованных иерархических системах // Шестая Международная конференция «Системный анализ и информационные технологии» САИТ-2015 (15-20 июня 2015 г., г. Светлогорск, Россия): Труды конференции. В 2-х т, Т. 1. – М.: ИСА РАН, 2015. – с. 115-124.

13. Фридман А.Я. Экспертное пространство для ситуационного моделирования промышленно-природных систем / А.Я. Фридман // Вестник Московского университета им. С.Ю. Витте, № 1 (4), 2014. – с. 233-245.
14. Endsley M.R. Final Reflections: Situation Awareness Models and Measures. J. of Cognitive Engineering and Decision Making. Vol. 9, no. 1, 2015, pp. 101-111.
15. Fridman A., Kulik B. Situation Awareness in Modeling Industrial-Natural Complexes. Intern. Conf. Cyber-Physical Systems and Control (CPS&C'2019, St. Petersburg). In: Lecture Notes in Networks and Systems. Cyber-Physical Systems and Control. Vol. 95, 2020, pp. 247-256.
16. Fridman A., Oleynik A. Modelling of Situation Awareness in Net-Centric Commercial Systems. Proc. 34th Eur. Simulation and Modelling Conf. (ESM-2020) Toulouse, France, Oct. 21-23, 2020, pp. 64-67.

*Фридман Александр Яковлевич, д.т.н., профессор, в.н.с. лаборатории управления промышленно-природными системами, Институт информатики и математического моделирования ФИЦ КНЦ РАН, fridman@iimm.ru, Россия, Апатиты Мурманской области, ул. Ферсмана 24А*

UDC 519.876.5

doi:10.38028/ESI.2022.25.1.006

## **Incorporation of concepts of digital twins and situational awareness in the modelling system of critical infrastructures**

**Alexander Y. Fridman**

Institute for Informatics and Mathematical Modelling, FRC KSC RAS,  
Russia, Apatity, *fridman@iimm.ru*

**Abstract.** An intelligent information technology for situational modelling of industrial-natural complexes (INCs) of various scales for the purpose of strategic and operative management of them, focused on complex processing of heterogeneous information regarding static and dynamic characteristics of such systems, is considered. The relevance of this task results from the following: complication and interpenetration of INCs; growth of uncertainties in the world due to acceleration of INCs development; increasing data availability due to the birth of the Internet of Things. The novelty of the proposed approach lies in integration of means for studying poorly formalised complex non-stationary spatial objects within the framework of cause-and-effect models and integrated usage of expert knowledge to form criteria and select preferable options for implementing INCs structure, which are studied in more detail in a simulation mode with using digital twins of INCs components.

**Keywords:** industrial-natural complex, strategic and operative management, quantitative assessment of situational awareness, preventive analytics in safety tasks, digital twin

### REFERENCES

1. GOST 27.002-89: Nadezhnost' v tehnikе. Osnovnye ponjatija. Terminy i opredelenija [Reliability in engineering. Basic concepts. Terms and Definitions].
2. Nam Pyo Suh. Axiomatic Design – Advances and Applications. Chapter 5, New York, Oxford University Press, 2007, p. 239-298.
3. Kovalenko V.V. Proektirovanie informacionnyh sistem [Design of information systems]. Moscow, Forum, 2011, 357p.
4. Joe Celko's. Trees and Hierarchies in SQL for Smarties. The Morgan Kaufmann Series in Data Management Systems. Second Edition, Elsevier Inc., 2012.

5. Hunt J. The Unified Process for Practitioners: Object-oriented Design, UML and Java. Springer, 2000.
6. Fridman A.Ja., Kurbanov V.G. Situacionnoe modelirovanie nadezhnosti i bezopasnosti promyshlenno-prirodnih sistem [Situational modeling of reliability and safety of industrial and natural systems]. Informacionno-upravljajushhie sistemy [Information and control systems], 2014, no. 4(71), p. 1-10.
7. Fridman A.Ja., Kurbanov V.G. Formal'naja konceptual'naja model' promyshlenno-prirodnogo kompleksa kak sredstvo upravlenija vychislitel'nyh jeksperimentom [Formal conceptual model of an industrial-natural complex as a means of managing a computational experiment]. Trudy SPIIRAN [Proceedings of SPIIRAS], 2014, no. 6 (37), p. 424–453.
8. Jasinovskij S.I. Intellektual'naja gibridnaja sistema podderzhki prinjatija reshenij RDO: vchera, segodnja, zavtra [Intelligent hybrid decision support system RDO: yesterday, today, tomorrow]. Mjagkie izmerenija i vychislenija [Soft Measurements and Computing], 2018, no. 12 (13), p. 33-50.
9. Digital Twin: Transforming How We Make Sense of Data. URL: <https://www.ptc.com/ru/industry-insights/digital-twin> (accessed 11.03.2022).
10. Mesapovich M., Mako D., Takahapa I. Teorija ierarhicheskikh mnogourovnevnyh sistem [Theory of hierarchical multilevel systems]. Moscow, Mir, 1973, 344p
11. Pospelov D.A. Situacionnoe upravlenie: teorija i praktika [Situational management: theory and practice]. Moscow, Nauka, 1986, 228p.
12. Fridman A.Ja. Koordinacija i planirovanie upravlenij v lokal'no organizovannyh ierarhicheskikh sistemah [Coordination and planning of management in locally organized hierarchical systems]. Shestaja Mezhdunarodnaja konferencija «Sistemnyj analiz i informacionnye tehnologii» SAIT-2015 (15-20 ijunja 2015 g., g. Svetlogorsk, Rossija): Trudy konferencii. V 2-kh t, T. 1. [Sixth International Conference "System Analysis and Information Technologies" SAIT-2015 (June 15-20, 2015, Svetlogorsk, Russia): Proceedings of the conference. In 2 volumes, vol. 1]. Moscow, ISA RAN, p. 115-124.
13. Fridman A.Ja. Jekspertnoe prostranstvo dlja situacionnogo modelirovanija promyshlenno-prirodnih sistem [Expert space for situational modeling of industrial and natural systems]. Vestnik Moskovskogo universiteta im. S.Ju. Vitte [Bulletin of the Moscow University named after S.Yu. Witte], no.1 (4), 2014, p. 233-245.
14. Endsley M.R. Final Reflections: Situation Awareness Models and Measures. J. of Cognitive Engineering and Decision Making. Vol. 9, №. 1, 2015, pp. 101-111.
15. Fridman A., Kulik B. Situation Awareness in Modeling Industrial-Natural Complexes. Intern. Conf. Cyber-Physical Systems and Control (CPS&C'2019, St. Petersburg). In: Lecture Notes in Networks and Systems. Cyber-Physical Systems and Control. Vol. 95, 2020, pp. 247-256.
16. Fridman A., Oleynik A. Modelling of Situation Awareness in Net-Centric Commercial Systems // Proc. 34th Eur. Simulation and Modelling Conf. (ESM-2020) Toulouse, France, Oct. 21-23, 2020, pp. 64-67.

*Alexander Y. Fridman, Doctor of Technical Sciences, Professor, Leading Researcher at the Laboratory for Industrial-Natural Systems Control, Institute for Informatics and Mathematical Modelling, FRC KSC RAS, fridman@iimm.ru, Russia, Apatity, Murmansk region, st. Fersmana 24A*

*Статья поступила в редакцию 17.02.2022; одобрена после рецензирования 25.03.2022; принята к публикации 28.03.2022.*

*The article was submitted 02.17.2022; approved after reviewing 03.25.2022; accepted for publication 03.28.2022.*