

МЕТОДИКА РАЗРАБОТКИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО И АЛГОРИТМИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ УПРАВЛЕНИЯ ОБЪЕКТАМИ КИБЕРФИЗИЧЕСКИХ СИСТЕМ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ

Щекочихин Олег Владимирович

Специальность 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации, математическая статистика

2.3.8. Информатика и информационные процессы

Научный консультант: доктор технических наук, профессор
Шведенко В.Н.

Актуальность исследования

- ▶ Одной из современных тенденций цифровой трансформации является развитие киберфизических систем, которые на сегодняшний день являются неотъемлемой частью промышленности, энергетики, логистики. Современные киберфизические системы являются особым классом system-of-systems, которые представляют собой объединение и взаимодействие человека, логических, физических и преобразовательных компонентов.
- ▶ При этом основная сложность взаимодействия независимых производственных и иных систем связана с различающимся их целеполаганием, а также неоднородностью физической, технологической, информационной, организационной и управленческой среды. Это требует создания условий интероперабельности взаимодействующих систем для обеспечения связности информационных потоков и определения правил и условий обмена данными. Важным аспектом при этом выступает обеспечение их безопасности, независимости и целостности. Часть этих функций могут взять на себя цифровые двойники.

Решаемая научно-техническая проблема

Проблемная ситуация связана с реализацией в информационной системе модели поведения для принятия рациональных управленческих решений как неотъемлемой части процесса цифровизации.

Научная проблема - обеспечение эффективности цифрового двойника для управления киберфизическими системами на этапах их жизненного цикла, создание единой методологической платформы построения структурных и параметрических моделей технических объектов, позволяющих формализовать процесс проектирования и создания их цифровых двойников.

- ▶ *Теоретический аспект* проблемы заключается в создании методов автоматического управления киберфизическими системами
- ▶ *Практический аспект* проблемы заключается в разработке методов и унифицированных инструментов построения цифровых двойников объектов производственных систем.

▶ **Объект исследования:**

Цифровой двойник киберфизической системы

▶ **Предмет исследования:**

Математические модели, методы и алгоритмы построения цифровых двойников киберфизической систем

▶ **Цель работы:**

Разработка методики проектирования цифровых двойников для обеспечения прогнозирования состояния объектов киберфизических систем для подготовки и принятия управленческих решений.

Задачи исследования

- ▶ Разработать методическое обеспечение по построению архитектур интеллектуальных информационных систем управления взаимодействующими киберфизическими системами на основе цифровых двойников, совершенствование метрологии цифровых двойников
- ▶ Разработать методическое обеспечение создания моделей поведения информационной системы и их классификацию
- ▶ Разработать язык информационных запросов извлечения данных из цифровых двойников для принятия управленческих решений
- ▶ Разработать методику декомпозиции предметной области и построение её модели для информационного обеспечения цифрового двойника.
- ▶ Пример создания цифрового двойника для управления многоинструментальной обработкой деталей на станках с ЧПУ в производственных системах

Научная новизна

1. Теоретико-множественная модель цифрового двойника киберфизической системы, отличительными особенностями которой являются использование объектно-процессной модели данных, для описания объектов системы и процессов, протекающих в ней, наличие инвариантной и переменной части цифрового двойника, где инвариантная часть позволяет учитывать отраслевые особенности.
2. Новый подход к описанию метрологии цифрового двойника, который заключается в том, что в его структуре выделен компонент, выполняющий функцию организации информационных ресурсов для описания точной физической копии, временной базы данных, хранящей информацию о показателях состояния объектов и физической среды на этапах жизненного цикла киберфизической системы.
3. Научные основы прогнозирования состояния киберфизической системы с учетом вероятностных показателей свойств объектов для вычислений вероятности появления аварийных ситуаций

Научная новизна

4. Научный подход к обоснованию экономической целесообразности применения цифрового двойника объектов в киберфизической системы.
5. Язык информационных запросов для извлечения данных из цифрового двойник, для выбора модели поведения
6. Методы реализации алгоритмического, триггерного и поискового поведения киберфизической системы с использованием цифровых двойников, на основе таблиц решений, организованные в ансамбли, и классифицированные по показателям и по диапазонам их значений.
7. Научное обоснования применения структурного, параметрического и межклассового полиморфизма при проектировании цифрового двойника

Положения выносимые на защиту

1. Методика проектирования метрологии цифрового двойника, позволяющая обеспечивать точность предсказаний состояния киберфизической системы в зависимости от состояния физической среды, в которых она функционирует, а так же точности инженерных расчетов и возможности корректировки математических моделей объектов киберфизической системы на этапах её жизненного цикла
2. Алгебраическая система, позволяющая создавать объектно-процессную базу данных, осуществлять поиск моделей поведения цифрового двойника
3. Язык запросов для извлечения данных из объектно-процессной базы данных цифрового двойника
4. Алгоритм использования метрологии цифрового двойника

Практическая ценность

1. Разработанная методика позволяет определить закон распределения плотности вероятности отказа киберфизической системы и соответственно, среднее арифметическое и среднеквадратическое отклонение прогнозируемых параметров
2. Разработанная математическая модель металлорежущего инструмента позволяет прогнозировать износ его режущих граней в зависимости от режимов его эксплуатации.
3. Структурный, параметрической и межклассовый полиморфизм позволяют корректировать математическую модель с учетом особенностей вида металлорежущего инструмента
4. Предложенная методика дает возможность экономически обосновать период эксплуатации киберфизической системы по критерию её безубыточности



Апробация работы

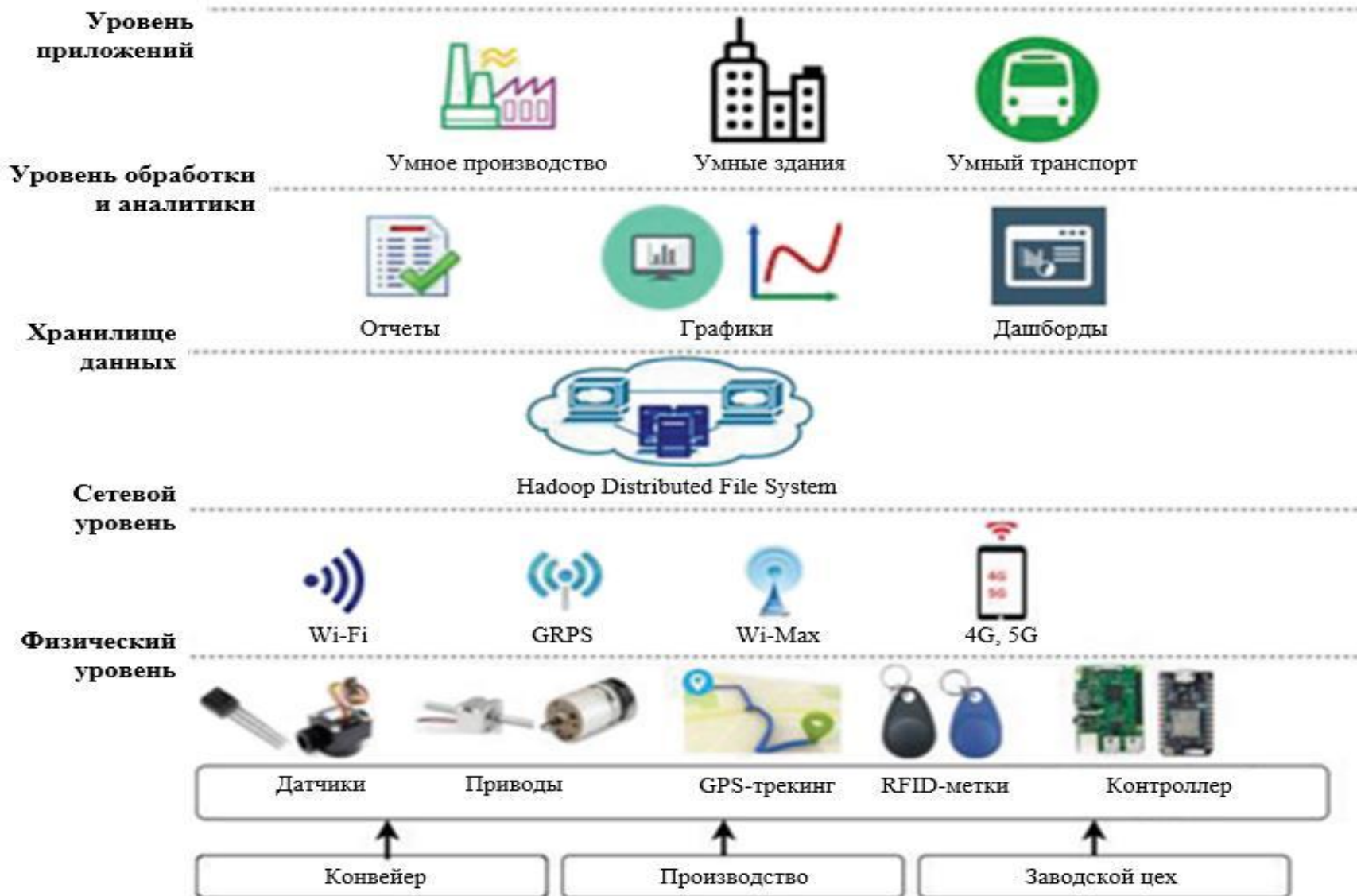
- ▶ Результаты и научные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на всероссийских и международных научных конференциях: Международная научно-практическая конференция Системный анализ в проектировании и управлении (СПб, 2017), Международная научно-практическая конференция Тенденции развития науки и образования (Москва, 2017), Международная научная конференция: «Стандартизация и техническое регулирование: современное состояние и перспективы развития» (Москва, 2020) и т.д.

Базовая система понятий. Киберфизическая система (КФС)

- ▶ **с функциональной точки зрения, КФС** - материальная система, оснащенная датчиками, позволяющая осуществлять сбор данных, обеспечивать их хранение и осуществлять их предварительную обработку, а так же наличие регуляторов, основанных на микропроцессорном управлении, дает возможность объединять кибернетические, механические устройства и физическую среду в единую систему, особенностью которой является возможность интеллектуального поведения без участия человека.
- ▶ **С точки зрения управления, КФС** - это совокупность кибернетических и мехатронных устройств и физической среды, совместные действия которых направлены на достижение общей цели.

Часть КФС может не иметь формы и быть реализована средствами интеллектуальных сетей.

Традиционная схема киберфизической системы



Концептуальная информационная модель киберфизической системы

Входящие информационные потоки:

- ▶ данные о состоянии внешней среды,
- ▶ информация о внешних значимых событиях в цифровом виде с интернет-вещей или внешних баз данных,
- ▶ целевые установки в виде значений целевых показателей.

Исходящие информационные потоки:

- согласование режимов работы кибернетического устройства с КФС,
- данные о состоянии кибернетического устройства, необходимые для оценивания состояния КФС в целом,
- управляющее воздействие на функциональные элементы КФС для изменения состояния внешней среды,
- управляющие воздействия на функциональные элементы КФС для реализации выбранной модели поведения.

Внутренние потоки информации:

- идентификация состояния объекта,
- валидация данных, поступающих от внешних источников,
- анализ ограничений на используемые виды ресурсов,
- обработка данных и поиск режима работы КФС в целом.

Структура объекта цифровизации



Объект цифровизации

Объект цифровизации позволяет обеспечить перевод физической системы на новый уровень управления, который связан с наличием в физической системе механической, электронной и информационной составляющей, наличием датчиков, которые снимают данные о состоянии материальной системы и передают в информационную систему для дальнейшего использования, а также управляющих устройств, позволяющих реагировать на возмущающие воздействия внешней среды.

Объект цифровизации

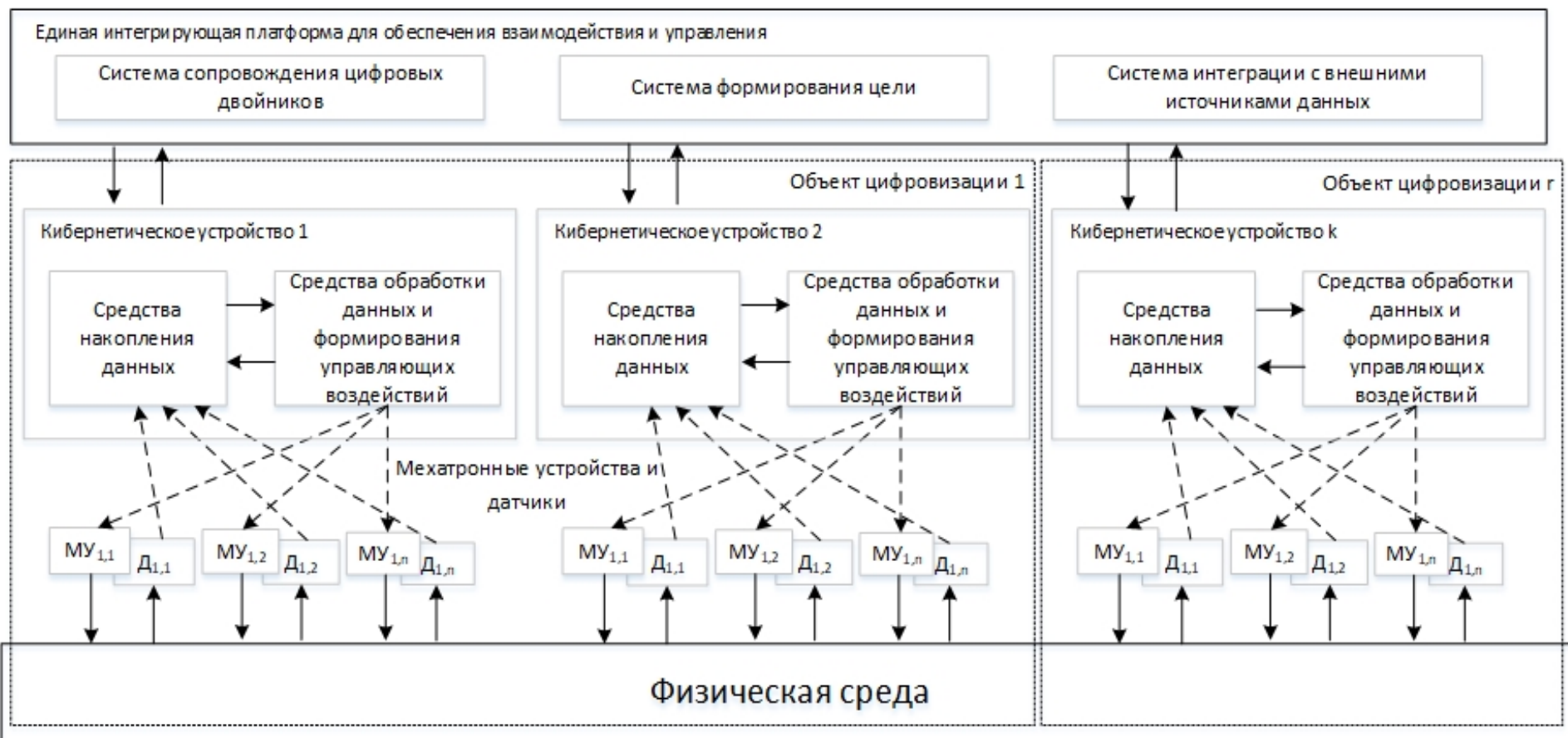
- содержит элементы, позволяющие получать и передавать данные о состоянии объекта.
- подготовлен к самостоятельному интеллектуальному поведению

Материальный объект

- требует установки отдельных датчиков для сбора данных, либо сбор исходных данных о состоянии осуществляется человеком вручную
- не готов к самостоятельному интеллектуальному поведению



Структурная схема киберфизической системы



Объект цифровизации - базовый элемент информационного обеспечения киберфизической системы и атомарная единица при её описании и декомпозиции.

Многообразии состояний физической среды и интеллектуализация её поведения в меняющихся условиях

Киберфизическая система с поведением позволяет расширять её функциональные возможности без перенастройки отдельных компонентов системы в условиях возникновения проблемных ситуаций, когда её нужно перевести в устойчивое состояние, или когда имеется набор мероприятий планового перевода системы из одного состояния в другое устойчивое состояние.

Возможны два способа реализации свойства поведения киберфизической системы: формирование библиотеки моделей поведения и интеллектуальная обработка данных, с последующим распределением управляющих воздействий, которые обеспечивают достижение цели.

Инструментальным средством реализации функций поведения является механизм создания и эксплуатации моделей поведения.

Модели поведения

1. Создание модели поведения осуществляется в автоматизированном режиме, с использованием методов моделирования процессов и известных алгоритмов решения задач управления. Модели поведения хранятся в соответствующем репозитории информационной системы.
2. Модель поведения может быть заранее известна для заданного типа проблемных ситуаций, на основе анализа значений показателей состояния системы. Такая модель поведения может использоваться без участия человека или под его контролем при наличии «красной кнопки».
3. В условиях неопределенности выбора модели поведения возникает ситуация, когда поведение системы осуществляется средствами искусственного интеллекта. Поведение определяется целью. Достижение цели при возмущающих факторах определяется корректировкой параметров управляемой системы.
4. **Поведение системы** – это её свойство, которое позволяет осуществлять переход системы из одного устойчивого состояния в другое.



Модели поведения

Модель поведения представляет собой алгоритм перевода управляемой системы из одного состояния в другое в соответствии с её целями на основе анализа показателей.

В основе классификации моделей поведения лежит набор показателей, их значений и правила их обработки.

**Алгоритмическая
модель поведения**

Условия применения:
поддержка
стационарного
состояния
управляемой системы

**Триггерная
модель поведения**

Условия применения:
выбор одного из
нескольких устойчивых
состояний управляемой
системы

**Поисковая
модель поведения**

Условия применения:
поиска новой траектории
достижения целей
системы на основе
циклической смены
состояний управляемой
системы



Алгоритмическая модель поведения

Цель поведения в алгоритмической модели – удерживать показатель в пределах допустимых отклонений.

Механизм достижения цели - активизация заранее определенного процесса, который и управляет всей КФС. Может быть предусмотрено несколько алгоритмов типового поведения КФС в различных условиях её функционирования. Алгоритм формируется из типовых процедур. Процесс достижения цели организуется в соответствии с описанными в дереве целей связями показателей и методами их агрегации. Связи показателей определяют регламент исполнения функций управления КФС.

Для описания модели поведения выделим из математической модели КФС следующие сущности:

- ▶ Нормативное значение показателя из дерева целей
- ▶ Фактическое значение показателя
- ▶ Отклонение
- ▶ Источник значения показателя, который определяет поток данных

Триггерная модель поведения

Начальные условия - Система изначально находится в известном устойчивом состоянии.

Цель поведения - провести переход системы в другое известное устойчивое состояние.

В рамках триггерной модели поведения происходит оценка и реализация вариантов перехода управляемой системы к новому устойчивому состоянию на основе predetermined процесса. Триггерная модель поведения заключается в автоматическом переключении с одного процесса управления КФС на альтернативный. Переключение осуществляется в зависимости от степени рассогласования показателей КФС из дерева целей. Каждый процесс может подавать управляющее воздействие на соответствующую группу кибернетических устройств. Центры активного воздействия могут различаться у альтернативных процессов.



Триггерная модель поведения (продолжение)

Для описания триггерной модели поведения выделим из математической модели следующие сущности:

- ▶ Нормативные знания показателей из дерева целей, которые необходимо отслеживать
- ▶ Фактическое значение показателя
- ▶ Отклонение
- ▶ процесс
- ▶ Центр активного воздействия на котором находится изменяемый показатель

Поисковая модель поведения

- ▶ Цель поведения - найти новое устойчивое состояние системы, за счет умышленного изменения группы показателей в пределах допустимых значений
- ▶ Модель поведения определяется набором показателей и их отклонений, вышедших за границы, состоит из набора функций центров активного воздействия и набора показателей. Чем большее количество факторов будет учитываться, тем более эффективными будут алгоритмы модели поведения.
- ▶ В отличие от триггерной и алгоритмической моделей не опирается на существующие типовые процессы. При применении поисковой модели в зависимости от текущей ситуации осуществляется поиск возможной реакции управляемой системы на компенсацию отклонений показателей.
- ▶ КФС представляется в виде многомерного пространства её состояний, на основании которой ведется поиск её нового устойчивого состояния.

Этапы построения цифровой модели киберфизической системы

Построение дерева цели управляемой системы



Создание метамодели объектов



Создание метамодели процессов



Формирование математических моделей, связывающих показатели объектов и технологических процессов с управляемыми параметрами и свойствами управляемой системы



Создание хранилища объектных данных

Положения объектно-процессной модели данных

Для описания структур объектов и процессов использовано теоретико-множественное представление и математический аппарат теории графов, а для моделирования семантики – язык исчисления предикатов.

Мета модель объектов киберфизической системы представим в виде алгебраической системы

$$A = \langle \Theta, \Sigma_F, \Sigma_p \rangle$$

Θ - основное множество

Σ_F - множество операций (функций), определенных на множестве Θ

Σ_p - множество предикатов, заданных на множестве Θ

$O = \{o_1, o_2, \dots, o_q\}$ – множество объектов системы,
где i – код объекта, $i \in [1, q]$, q – количество объектов.

$H = \{h_1, h_2, h_3, \dots, h_m\}$ – множество элементарных свойств системы,
где h_j – код свойства; $j \in [1, m]$, m – количество свойств объектов.

Одним из свойств объекта является его тип.

$K = \{k_1, k_2, \dots, k_{15}\}$ – конечное множество типов объектов, где k_p – тип объекта.



Создание метамоделей объектов. Свойства управляемой системы

$E = \{E_k : k \in K\}$ - множество свойств управляемой системы, где

K – множество индексов свойств объектов управляемой системы;

E_K – множество свойств, характеризующих объекты управляемой системы.

В таком случае объект O_i определяется как

$$O_i \subset \bigoplus \{E_k : k \in K\}$$

Свойства управляемой системы характеризуются типом данных и признаком стохастичности. Можно выделить виды свойств управляемой системы:

Детерминированные – свойства не изменяются в течение жизненного цикла технического объекта (например, модель изделия, масса изделия, год выпуска, дата изготовления)

Изменяемые – свойства, которые меняют своё значение в течение жизненного цикла технического объекта.

Изменяемые свойства можно разделить на два множества:

- Переменные – свойства, значения которых изменяется по известному закону (например, время наработки на отказ, величина нормального износа рычага клапана)
 - Случайные – свойства, значения которых невозможно определить однозначно (например, величина износа режущей грани зубьев фрезы, величина износа зубьев передаточной звездочки)
-

Построение метамодели процессов

Управление технической системой осуществляется посредством изменяемых параметров, которые позволяют переводить систему в другое состояние. Изменение параметров происходит в рамках процессов. Каждый процесс представлен ориентированным графом:

$$\bar{G}_R = (R, L), \text{ где } R = \{R^0, R^1, \dots, R^N\}$$

где R – множество центров активного воздействия,

L – множество связей между центрами активного воздействия в процессе.



Построение метамоделей процессов. Центр активного воздействия

Центр активного воздействия – есть совокупность четырех элементов: исполнительное устройство, определяющее операции над объектом, информационный объект, регламент работы в рамках процесса и набор показателей, по которым можно отследить исполнение процесса.

Каждый центр активного воздействия есть элемент множества R и представляет собой кортеж информации.

$$R = \{R_j\}$$

где, $R_j = (P_j, O_j, H, PR, t)$

где $P_j \in P$ - исполнительное устройство;

$O_j \in O$ - информационный объект;

H – набор правил работы исполнительного устройства с информационным объектом в рамках описываемого процесса;

PR – множество показателей, которые характеризуют работу центра активного воздействия.

t - время исполнения процесса.



Базовые функции языка описания структур данных

Описание функции	Предикат
Создание типа объекта	obj_type(O,K)
Создание типа свойства объекта	prop_type(H,T)
Назначение имени объекта	obj_name(O,B)
Назначение имени свойства	prop_name(H,A)
Создание объекта	uiio(O,N,H,O,Y, DT)
Создание версии объекта	version(O,N)
Добавление в структуру объекта нового свойства	s_prop(O,N,H)
Добавление в структуру объекта другого объекта	inserted_sd(O, N,O' , L)
Создание этапа бизнес-процесса	step_SBP(BP,N, N, APP, O', O', O',...)
Создание бизнес-процесса	struct_SBP(BP, N, O', O', O',...)

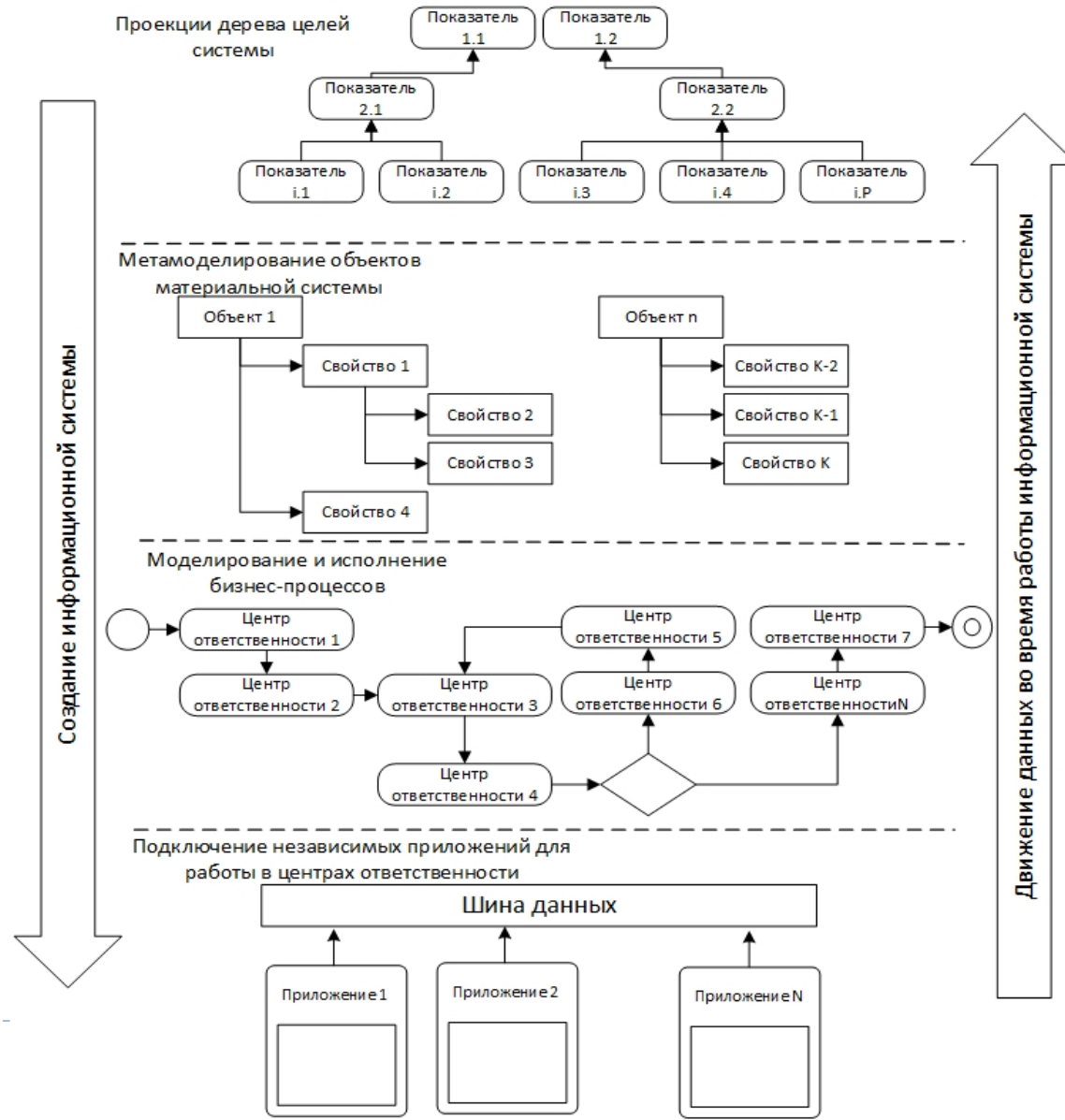


Базовые функции языка манипулирования данными

Название функции	Аргументы	Значение функции	Обозначение
Создание экземпляра объекта	Идентификатор объекта, Ключ, определяющий местоположение свойства в структуре объекта, идентификатор приложения, Значение свойства	Идентификатор экземпляра объекта либо код ошибки	InstanceObject (Obj, PropKeyInTree, APP, Value)
Запуск бизнес-процесса в момент времени t	Идентификатор бизнес-процесса, Идентификатор экземпляра объекта, Регламентное время	Идентификатор экземпляра бизнес-процесса, идентификатор экземпляра объекта, фактическое время получения данных либо код ошибки	StartBusinessProcess(BP, IO, DT)
Извлечение потока данных	Идентификатор объекта, Идентификатор экземпляра объекта, Ключ, определяющий местоположение свойства в структуре объекта. временной интервал	Поток данных либо код ошибки	DataStream(Obj, IO, PropKeyInTree, DTbegin, DTend)



Схема построения информационной системы объектно-процессного управления



Метрология цифрового двойника

Метрология цифрового двойника обеспечивает высокоточное измерение характеристик технического объекта и физических сред и поставляет эти данные в базу данных информационной системы. Базовые задачи метрологии:

- 1) измерение датчиками текущего состояния управляемой системы для корректировки модели цифрового двойника. Здесь ключевой функцией должна стать периодичность измерения и перевода цифрового двойника в новую транзакцию.
- 2) оценка математической модели прогнозирования состояния технической системы в зависимости от условий внешней среды и внутренних процессов, происходящих в технической системе.
- 3) изменение регулируемых параметров для снижения к минимуму вероятности появления аварийной ситуации.

Метрология включает в себя методики проектирования физического объекта, средства измерений и добычи исходных данных для достижения конечных результатов проектного решения, которое должно соответствовать техническим требованиям проектируемого объекта с заданной точностью или с допускаемыми отклонениями от планируемого результата.

Особенности применения полиморфизма при создании цифровых двойников в объектно-процессной модели данных

Для создания универсальных методов обработки данных в объектно-процессной модели, а так же использования ранее созданных типовых алгоритмов и программ моделирования, проектирования применяются три вида полиморфизма: структурный, параметрический и межклассовый.

Структурный полиморфизм

реализуется через набор событий информационной системы, проявляется во внешней общности методов работы с экземплярами информационных объектов

Параметрический полиморфизм

предлагает явную параметризацию по типам и модулям, делает реализацию методов универсальными по отношению к интерфейсам

Межклассовый полиморфизм

решает проблему разрозненности форматов представления данных и методов их обработки, увеличить расширяемость объектов и адаптивную мощь классов типов



Детерминированные и случайные величины и процессы и их методы расчета

Математическая модель процесса представляет собой аналитическую зависимость от свойств информационных объектов, участвующих в процессе:

$$M = f(E_1, E_2, E_3 \dots E_m),$$

где E_i – свойства информационных объектов, $i \in [1; m]$
 m – количество свойств информационных объектов, характеризующих процесс.

Т.к. свойства являются независимыми, то можно говорить о независимости случайных величин. Будем считать, что статистические характеристики параметра и закон распределения случайной величины известны заранее. Если в математической модели участвует два свойства с вероятностными характеристиками, то закон распределения прогнозируемого параметра $Z = \varphi(E_1, E_2)$ является простейшим случаем и плотность распределения случайной величины контролируемого параметра вычисляется следующим образом:

$$g(z) = \int_{-\infty}^{\infty} g(e_1, z) dx = \int_{-\infty}^{\infty} f(e_1, \psi(e_1, z)) \cdot \left| \frac{\partial \psi(e_1, z)}{\partial z} \right| de_1$$

где $f(e_1, e_2)$ - плотность распределения случайных величин (E_1, E_2) известна заранее.

Периодичность измерения характеристик технического объекта

Транзакция цифровой модели цифрового двойника - период времени между двумя измерениями.

затраты на обслуживание цифрового двойника при измерениях через заданный постоянный период времени:

$$Z_m = z_m \frac{t}{t_1 - t_0}$$

где

z_m – единичные затраты на измерение,
 t – время эксплуатации

Затраты на обслуживание цифрового двойника в зависимости от изменения вероятности отказа на заданную величину $\Delta p(t)$

$$Z_m = z_m (1 - P(t)) \frac{t}{\Delta t}$$

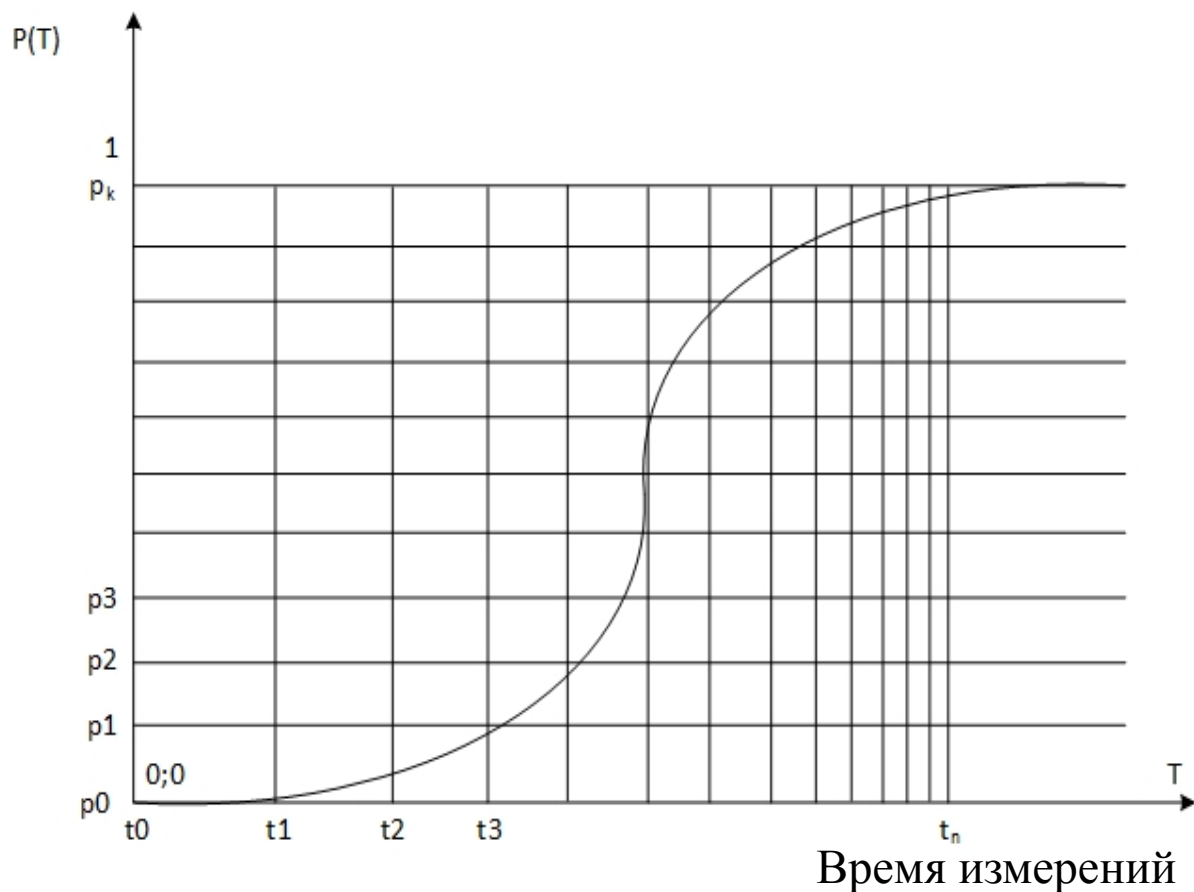
где

$P(t)$ – вероятность отказа,
 z_m – единичные затраты на измерение.
 Δt – интервал между двумя измерениями.



Периодичность измерения характеристик технического объекта

Вероятность
отказа



затраты на обслуживание
цифрового двойника будут
вычисляться по формуле:

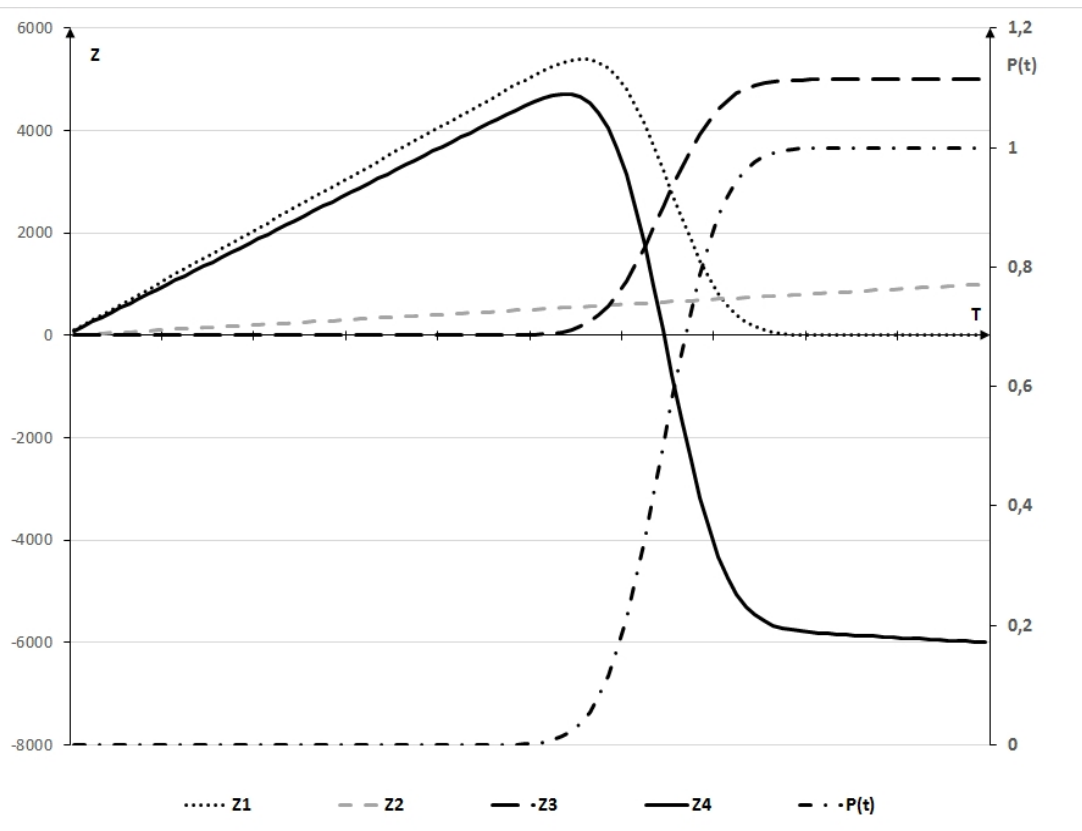
$$Z_m = z_m (1 - P(t)) \frac{t}{\Delta t}$$

где

$P(t)$ – вероятность отказа,
 z_m – единичные затраты на
измерение,
 Δt – интервал между двумя
измерениями.



Экономическая целесообразность использования цифрового двойника технической системы



Z1 - доход от эксплуатации технического изделия за вычетом расходов на содержание и эксплуатацию

$$Z1 = (F - C)t(1-p(t))$$

Z2 - затраты на использование цифрового двойника

$$Z2 = Ct$$

Z3 - вероятностные затраты, вызванные аварией

$$Z3 = Ap(t)$$

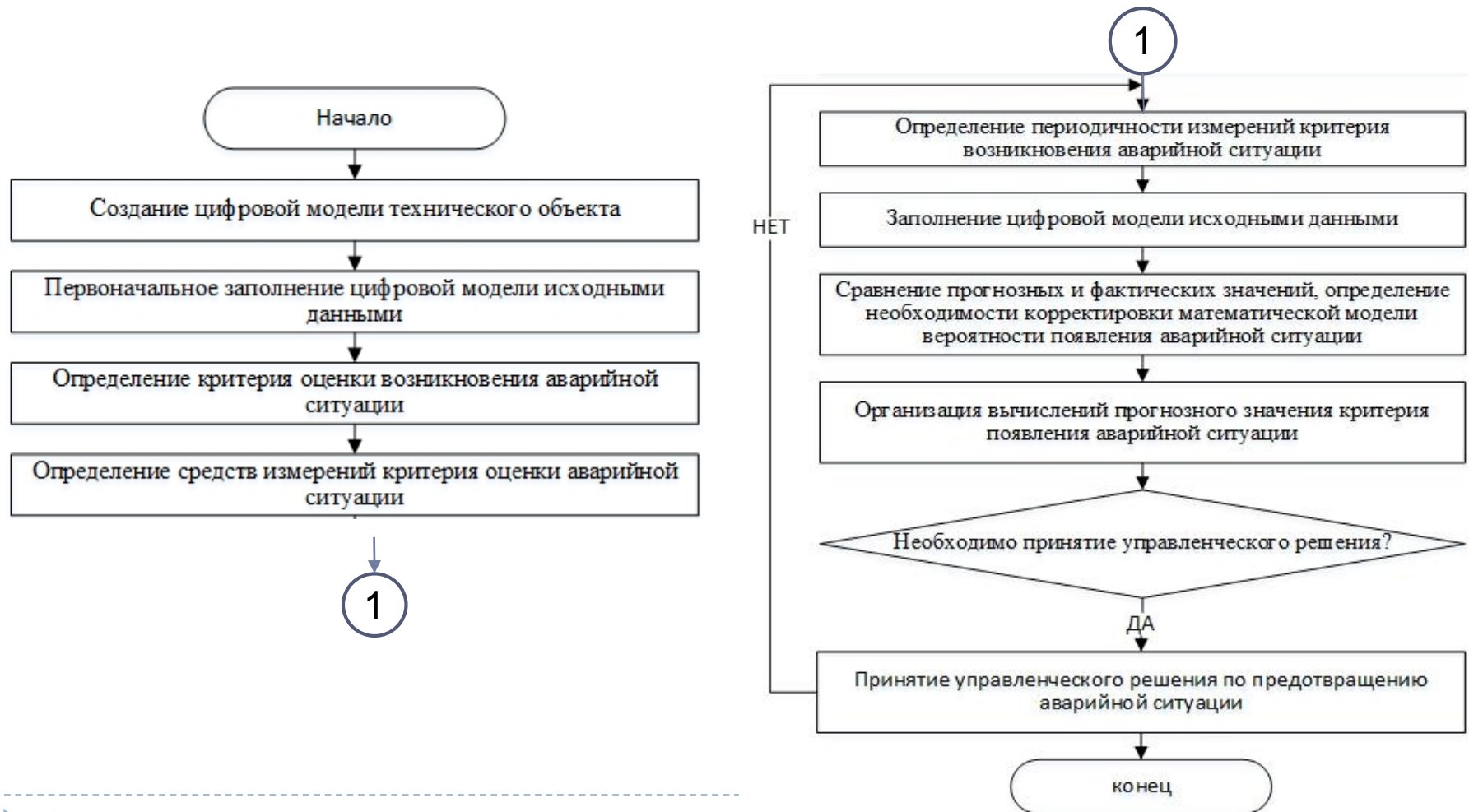
Z4 - критерий экономической целесообразности использования цифрового

двойника

$$Z4 = Z1 - Z2 - Z3$$



Алгоритм использования метрологии цифрового двойника

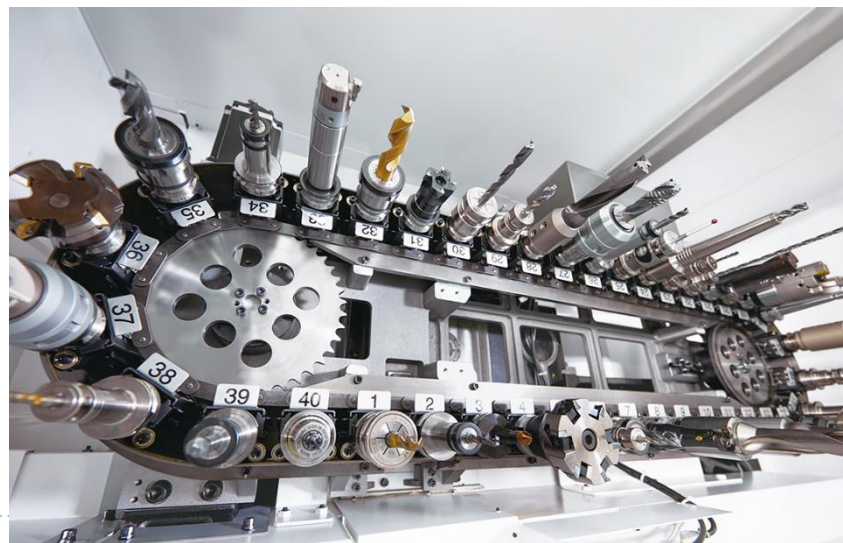


Реализация метрологии цифрового двойника на примере процесса контроля износа режущих граней металлорежущих инструментов

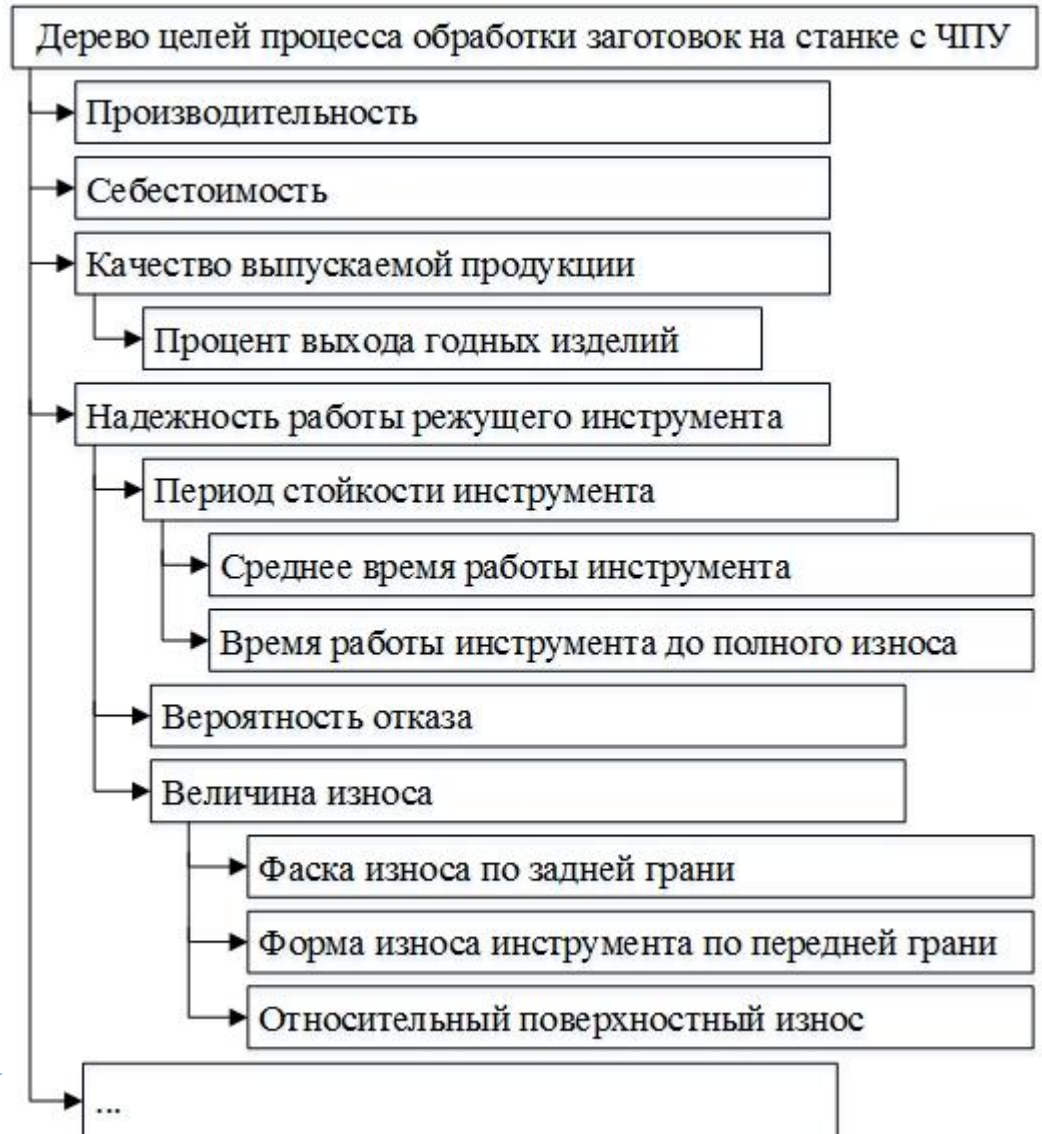
Гибкая линия по производству поршней может выпускать соответствующую линейку изделий.



Для изготовления инструментов используются механической обработки

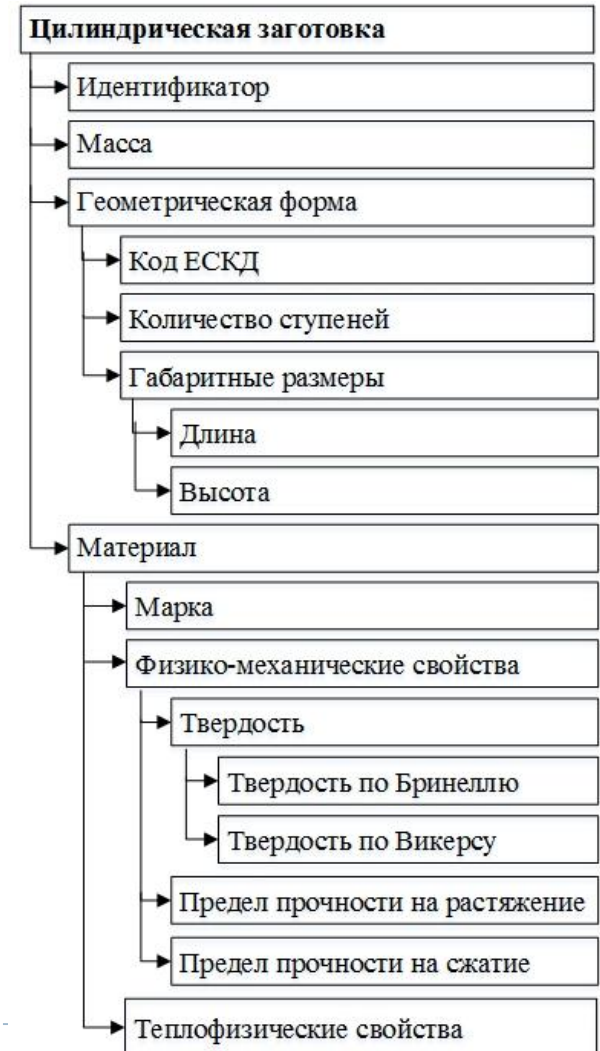
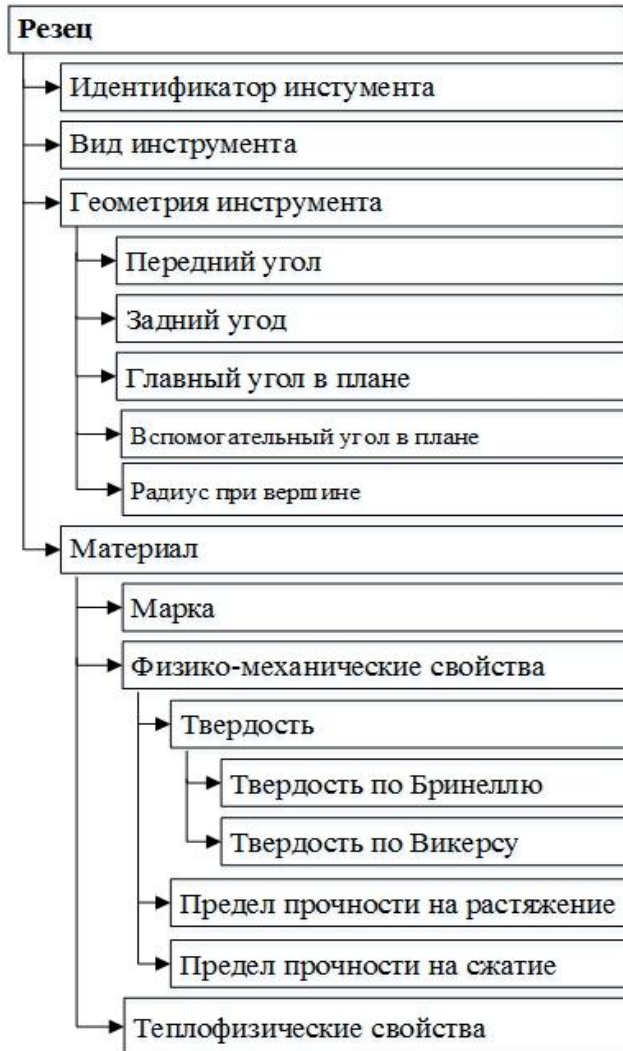


Этап 1: Построение дерева целей процесса обработки заготовки



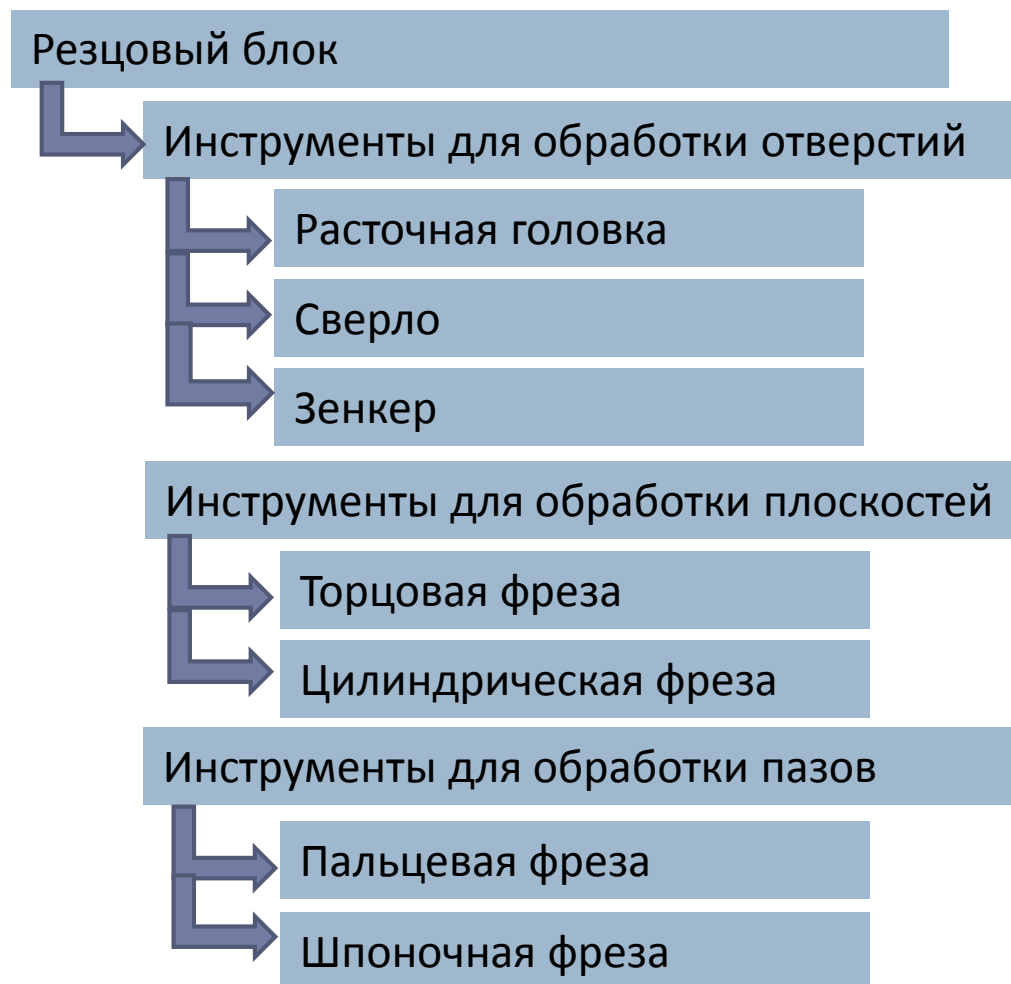
Этап 2: Построение иерархии объектов киберфизической системы

Примеры иерархической структуры информационных объектов



Иерархия классов металлорежущих инструментов

Особенности групп обрабатываемых материалов, групп инструментальных материалов, технологии производства заготовок деталей, особенности станка, и т.п. требуют учета в математической модели процесса изнашивания инструмента. Для этого строится иерархия классов, физические процессы экземпляров которых подобны, но обладают рядом особенностей. Применительно к обработке резанием иерархия класса создана по признакам технологических операций и видов металлорежущих инструментов.



Этап 4: Формирование математической модели на примере процесса резания при механической обработке детали

Цифровой двойник позволяет проводить виртуальные эксперименты физических процессов, которые возникают в технической системе. Применительно к металлорежущему инструменту математическая модель построена на основе совместного решения уравнений, описывающих механические, теплофизические и трибологические эффекты.

Математическая модель состоит из двух блоков:

1. Моделирование относительного поверхностного износа
2. Моделирование стойкости металлорежущего инструмента

По критерию относительного поверхностного износа можно судить как о процессе изнашивания инструмента, так и о производительности операции или перехода технологического процесса.

Формирование математической модели. Относительный поверхностный износ резцового блока

Относительный поверхностный износ непрерывного резания для резцового блока рассчитывается по формуле:

$$h_{o.n.} = \frac{dh}{d\tau} \psi (\nu s)^{-1} \quad (1)$$

В уравнении

$$\frac{dh}{d\tau} = c_1 \frac{Q_{pm}}{bh\psi \exp(-k_0 \bar{\theta}_3)} \quad (2)$$

можно положить, что

$$Q_{pm} = k_1 \tau_p \nu h b_1 \quad (3)$$

где k_1 – безразмерный коэффициент, зависящий от ряда параметров.

Подставляя (3) в (2) и (1) приходим к выражению:

$$h_{o.n.} = c_1 \frac{k_1 \tau_p}{s \exp(-k_0 \theta)} \quad (4)$$

Анализ показывает, что коэффициент k_1 должен быть функцией критериев подобия Pe, F, B, H, fg , где

$$H = ha_1^{-1} \quad F = \frac{\lambda_p \varepsilon \beta}{\lambda}$$

Для аппроксимации зависимости $K_1 = K_1(Pe, F, B, H)$ используется степенная функция

$$k_1 = c Pe^{m_1} F^{m_2} B^{m_3} H^{m_4} f_g^{m_5} \quad (4)$$

Формирование математической модели. Относительный поверхностный износ резцового блока

Значения коэффициентов $m_1..m_5$ определялись по результатам натуральных экспериментов.

В результате получено что

$$k_1 = 0.421Pe^{0.329}F^{0.120}B^{-0.417}H^{0.330}f_g^{0.665} \quad (5)$$

В уравнении (4) значение средней температуры контакта предлагается рассчитывать по следующей зависимости:

$$\bar{\theta} = c \frac{\tau_p}{c_p} Pe^{m_6} H^{m_7} B^{m_8} f_g^{m_9} e^{m_{10}H} \quad (6)$$

С учетом полученных экспериментальных значений можно перейти к следующему:

$$\bar{\theta} = 1.65 \frac{\tau_p}{c_p} Pe^{0.25+0.076H} H^{0.20} f_g^{0.415} B^{-0.27H} e^{-0.48H} \quad (7)$$

С учетом (5) и (7) уравнение (4) преобразуется к виду

$$h_{on} = c_1 0.421 \tau_p Pe^{0.329} F^{0.120} B^{-0.417} H^{0.330} f_g^{0.665} s^{-1} \exp \left(1.65 \frac{\tau_p}{c_p} Pe^{0.25+0.076H} H^{0.20} f_g^{0.415} B^{-0.27H} e^{-0.48H} \right) \quad (8)$$

Получено уравнение, которое связывает относительный поверхностный износ резца на операции механической обработки с базовыми характеристиками инструментального и обрабатываемого материалов, а так же режимов эксплуатации металлорежущего инструмента в технологическом процессе.

Формирование математической модели.

Закон распределение стойкости металлорежущего инструмента

При анализе надежности работы режущего инструмента различают два типа отказов: невосстановимый и восстанавливаемый. Первый тип отказа связан с разрушением режущей части инструмента, т.е. происходит полная потеря режущих способностей инструмента. Разрушение обусловлено высокими ударными нагрузками в зоне контакта стружки с передней гранью резца, что присутствует на операциях фрезерования.

Второй тип отказа характерен для нормального изнашивания инструмента. В этом случае отказ инструмента означает ухудшение качества и точности обработки за счет большой величины износа. После замены твердосплавной пластины режущий инструмент вновь готов к работе.

При теоретическом исследовании закона распределения стойкости используется следующее уравнение, связывающее стойкость с твердостью инструментального материала и сопротивлением сдвигу при резании:

$$T = C_3 \frac{HV_0}{\tau_p} \exp(-k_3 \tau_p) \quad (9)$$

где $C_3 = C_2 \frac{H_* a_1}{\nu P e^{0,329} F^{0,12} B^{-0,417} H_*^{0,33} f_g^{0,665}},$

$$K_3 = -1,65 \frac{K_\theta}{c_p} P e^{0,25+0,078 H_*} H_*^{0,2} f_g^{0,415} B^{-0,27 H_*} e^{-0,48 H_*},$$

$$H_* = \frac{h_{kp}}{a_1}, C_2 = \frac{\psi}{HV_0 C_1}$$



Формирование математической модели.

Закон распределение стойкости металлорежущего инструмента

Для того, чтобы получить закон распределения стойкости от указанных параметров в аналитической форме, преобразуем уравнение (12) и рассмотрим его как произведение двух случайных величин

$$T = XY \quad (10)$$

Где X , Y – случайные величины:

$$X = HV_0 \quad Y = C_3 \tau_p^{-1} e^{-k_3 \tau_p}$$

Согласно теории случайных функций, произведение двух случайных величин является величиной случайной, которая распределена по закону:

$$\varphi_5(T) = - \int_{-\infty}^0 \frac{1}{x} \varphi_1(x) \varphi_4\left(\frac{T}{x}\right) dx + \int_0^{+\infty} \frac{1}{x} \varphi_1(x) \varphi_4\left(\frac{T}{x}\right) dx \quad (11)$$

где φ_1 - закон распределения HV ,

φ_4 - закон распределения Y .

Формирование математической модели.

Закон распределение стойкости металлорежущего инструмента

Используя полученное ранее решение для нормальных законов распределения твердости обрабатываемого и инструментального материалов, закон плотности распределения стойкости металлорежущего инструмента рассчитывается следующим образом:

$$\varphi(T) = \frac{1}{2\pi\sigma_{HB}\sigma_{HV}} \int_{\overline{HV}_o - 3\sigma_{HV}}^{\overline{HV}_o + 3\sigma_{HV}} \exp\left[-\frac{(HV_o - \overline{HV}_o)^2}{2\sigma_{HV}^2}\right] \cdot \exp\left[\frac{\left(\frac{3.215 + \ln\left(\frac{T \cdot C_3}{HV_o}\right) - \overline{HB}}{0.0139 + K_3}\right)^2}{2\sigma_{HB}^2}\right] \cdot \left(T \cdot K_3 - \frac{0.0139 + K_3}{3.215 + \ln\left(\frac{T \cdot C_3}{HV_o}\right)}\right)^{-1} dHV_o$$

где: T – период стойкости металлорежущего инструмента,
 HV_o – твердость инструментального материала при нормальных условиях,

\overline{HV}_o – среднее арифметическое твердости инструментального материала при нормальных условиях.

HB – твердость обрабатываемого материала,

\overline{HB} – среднее арифметическое твердости обрабатываемого материала,

σ_{HB} – среднее квадратичное твердости обрабатываемого материала,

σ_{HV} – среднее квадратичное твердости инструментального материала,

K_3 C_3 – вычисляемые коэффициенты

Поскольку формула содержит эмпирические коэффициенты, то точность прогнозирования относительного поверхностного износа и периода его стойкости должна периодически контролироваться через измерения фактической фаски износа по задней грани. На сегодняшний день имеются технические средства, позволяющие автоматически определять фактическое значение величины износа режущей кромки инструмента.

Выводы по примеру

Полученная математическая модель подобным образом может быть распространена на другие объекты иерархии классов металлорежущих инструментов. Коэффициенты m_1-m_{10} будут корректироваться путем анализа фактических данных величины износа режущей грани дочернего класса. Для формирования алгоритма вычисления прогноза по всей иерархии класса с учетом масштабных, структурных и межклассовых факторов необходимо использовать параметрический, структурный и межклассовый полиморфизм. Например, новые марки обрабатываемых материалов, виды инструментов, технологических операций могут использовать уже существующие математические модели. Используя цифровой двойник они будут развиваться по мере накопления статистических данных, что создаст условия для формирования новых решений с минимальным участием инженерно-технической службы.

Предложенная математическая модель позволяет проводить оценку вероятностных характеристик таких критериев, как период стойкости инструмента, времени наработки на отказ, что позволяет проводить виртуальные эксперименты для определения рациональных режимов его эксплуатации, таких как скорость резания, скорость подачи, глубина резания, геометрия инструмента. Предложенный подход к использованию возможностей цифрового двойника позволяет создавать развивающиеся системы в инженерных расчетах и новых конструкторско-технологических решениях промышленного производства.



Результаты работы

1. Разработано методическое обеспечение создания моделей поведения информационной системы и их классификация
2. Разработана методика декомпозиции предметной области и построение её модели для информационного обеспечения цифрового двойника.
3. Разработан язык информационных запросов извлечения данных из цифровых двойников для принятия управленческих решений
4. Проведен синтез структурной и функциональной организации интегрированной информационной системы для автоматического принятия управленческого решения посредством цифрового двойника киберфизической системы
5. Разработана математическая модель цифрового двойника для управления многоинструментальной обработкой деталей на станках с ЧПУ в производственных системах



Наукометрические показатели

ЩЕКОЧИХИН ОЛЕГ ВЛАДИМИРОВИЧ *

Костромской государственной университет, Институт физико-математических и естественных наук, Кафедра защиты информации (Кострома)

SPIN-код: 7323-6576, AuthorID: 511676

Название показателя	Значение		
Число публикаций на elibrary.ru	76	Число статей в зарубежных журналах	0 (0,0%)
Число публикаций в РИНЦ	67	Число статей в российских журналах	49 (73,1%)
Число публикаций, входящих в ядро РИНЦ	19	Число статей в российских журналах из перечня ВАК	45 (67,2%)
		Число статей в российских переводных журналах	6 (9,0%)
		Число статей в журналах с ненулевым импакт-фактором	43 (64,2%)
Число цитирований из публикаций на elibrary.ru	222	Число цитирований из зарубежных журналов	1 (0,5%)
Число цитирований из публикаций, входящих в РИНЦ	196	Число цитирований из российских журналов	157 (80,1%)
Число цитирований из публикаций, входящих в ядро РИНЦ	57	Число цитирований из российских журналов из перечня ВАК	142 (72,4%)
		Число цитирований из российских переводных журналов	0 (0,0%)
		Число цитирований из журналов с ненулевым импакт-фактором	151 (77,0%)
Индекс Хирша по всем публикациям на elibrary.ru	8	Средневзвешенный импакт-фактор журналов, в которых были опубликованы статьи	0,294
Индекс Хирша по публикациям в РИНЦ	7	Средневзвешенный импакт-фактор журналов, в которых были процитированы статьи	0,351
Индекс Хирша по ядру РИНЦ	4		
Число публикаций, процитировавших работы автора	105	Число публикаций в РИНЦ за последние 5 лет (2016-2020)	46 (68,7%)
Число ссылок на самую цитируемую публикацию	11	Число публикаций в ядре РИНЦ за последние 5 лет	15 (32,6%)
Число публикаций автора, процитированных хотя бы один раз	45 (67,2%)	Число ссылок из РИНЦ на работы, опубликованные за последние 5 лет	120 (61,2%)
Среднее число цитирований в расчете на одну публикацию	2,53	Число ссылок из ядра РИНЦ на работы, опубликованные за последние 5 лет	37 (18,9%)
		Число ссылок на работы автора из всех публикаций за последние 5 лет	133 (67,9%)
Индекс Хирша без учета самоцитирований	4	Основная рубрика (ГРНТИ)	500000. Автоматика. Вычислительная техника
Индекс Хирша с учетом только статей в журналах	6	Основная рубрика (OECD)	202. Electrical engineering, electronic engineering
Год первой публикации	2006	Процентиль по ядру РИНЦ	7
Число самоцитирований	111 (56,6%)	Участие в публикациях:	
Число цитирований соавторами	146 (74,5%)	автор	61
Число соавторов	30	составитель	1
		научный руководитель	6

Благодарю за внимание!

