

СИСТЕМЫ И СРЕДСТВА ИНФОРМАТИКИ

**Научный журнал Российской академии наук
(издается под руководством Отделения нанотехнологий
и информационных технологий РАН)**

Издается с 1989 года

Журнал выходит ежеквартально

Учредитель:

**Федеральный исследовательский центр
«Информатика и управление» Российской академии наук**

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

академик РАН И. А. Соколов — председатель Редакционного совета

академик РАН Г. И. Савин

академик РАН А. Л. Стемпковский

член-корреспондент РАН Ю. Б. Зубарев

профессор Ш. Долев (S. Dolev, Beer-Sheva, Israel)

профессор Ю. Кабанов (Yu. Kabanov, Besancon, France)

профессор В. Ротарь (V. Rotar, San-Diego, USA)

профессор М. Финкельштейн (M. Finkelstein, Bloemfontein, South Africa)

профессор В. Хофкирхнер (W. Hofkirchner, Wien, Austria)

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

академик РАН И. А. Соколов — главный редактор

профессор, д.ф.-м.н. С. Я. Шоргин — заместитель главного редактора

д.т.н. В. Н. Захаров

проф., д.ф.-м.н. А. И. Зейфман

проф., д.т.н. В. Д. Ильин

проф., д.т.н. К. К. Колин

проф., д.ф.-м.н. В. Ю. Королев

д.ф.-м.н. Р. В. Разумчик

д.ф.-м.н. В. И. Сеницын

проф., д.т.н. И. Н. Сеницын

проф., д.ф.-м.н. В. Г. Ушаков

д.ф.-м.н. А. К. Горшенин — отв. секретарь

к.ф.-м.н. С. А. Христочевский

Редакция

к.ф.-м.н. Е. Н. Арутюнов

С. Н. Стригина

© Федеральный исследовательский центр «Информатика
и управление» Российской академии наук, 2024

Журнал включен в базу данных Russian Science Citation Index (RSCI),
интегрированную с Web of Science

Журнал входит в систему Российского индекса научного цитирования (РИНЦ)

Журнал включен в базу данных CrossRef (систему DOI — Digital Object Identifier),
в базу данных Ulrich's periodicals directory

и в информационную систему «Общероссийский математический портал Math-Net.Ru»

Журнал реферируется в «Реферативном журнале» ВИНИТИ
и в системе Google Scholar

Журнал включен в сформированный Минобрнауки России Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук

<http://www.ipiran.ru/journal/collected>

СИСТЕМЫ И СРЕДСТВА ИНФОРМАТИКИ

Том 34 № 3 Год 2024

СОДЕРЖАНИЕ

Мониторинг функциональной безопасности больших сервисных систем

**А. А. Грушо, Н. А. Грушо, М. И. Забежайло,
А. А. Зацаринный, Д. В. Смирнов, Е. Е. Тимонина** 3

К задаче идентификации сбоев

в информационно-технологической инфраструктуре
путем мониторинга и анализа косвенных данных

Д. В. Смирнов, А. А. Грушо, М. И. Забежайло 14

Особенности обеспечения функциональной безопасности
автоматизированных систем с применением технологии
искусственного интеллекта

В. Е. Гаврилов, А. А. Зацаринный 23

Анализ подходов к идентификации структуры проблемы
в гибридных интеллектуальных многоагентных системах

С. В. Листопад, И. А. Кириков 35

Методы вероятностного и статистического моделирования
неявных стохастических систем

И. Н. Сеницын 48

Методы моделирования неявных эредитарных стохастических
систем

И. Н. Сеницын 67

Нейросетевой синтез оптимальной линейной стохастической
системы по критерию минимума среднеквадратичной ошибки

**И. Н. Сеницын, В. И. Сеницын, Э. Р. Корепанов,
Т. Д. Конашенкова** 87

Моделирование входного потока рабочих нагрузок
вычислительного кластера LANL Mustang

М. П. Кривенко 109

Реализация суммирующих самосинхронных счетчиков

**Ю. А. Степченков, Ю. Г. Дьяченко, Н. В. Морозов,
Д. Ю. Степченков, Д. Ю. Дьяченко** 123

Разработка программного комплекса моделирования
эффективности в авиатранспортной системе России

И. В. Урюпин 136

Онлайн-энциклопедии: актуальные проблемы развития

В. Д. Ильин 147

Об авторах 158

Правила подготовки рукописей статей 160

Requirements for manuscripts 164

МОНИТОРИНГ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ БОЛЬШИХ СЕРВИСНЫХ СИСТЕМ

*А. А. Грушо¹, Н. А. Грушо², М. И. Забейхайло³, А. А. Зацаринный⁴,
Д. В. Смирнов⁵, Е. Е. Тимонина⁶*

Аннотация: Функциональное предназначение информационной поддержки деятельности организации можно описать в виде совокупности бизнес-процессов (БП). В статье речь идет о контроле устойчивости реализации на одной платформе большого числа БП обслуживания большого числа клиентов, запрашивающих одновременно большое количество различных услуг и требующих частичной модификации бизнес-функций (БФ) в реальном масштабе времени. Следствием указанных условий становится значительное число конфликтов, ошибок и сбоев на различных уровнях реализации одних и тех же сервисов при ограничениях во времени. Мониторинг выполнения БП призван выявлять и классифицировать конфликты, ошибки и сбои для дальнейшего принятия управленческих решений. Совокупность функциональных, поведенческих, структурных и информационных моделей всех БП организации вместе с моделями связного обеспечения в статье называется метаданными (МД) организации. Метаданные служат основой для организации текущего управления и перспективного развития. Решены задачи разбиения системы на подсистемы для организации мониторинга функциональной безопасности (ФБ) и использования данных мониторинга для определения первопричины сбоя.

Ключевые слова: информационная поддержка бизнес-процессов; мониторинг функциональной безопасности; большие сервисные системы; метаданные

DOI: 10.14357/08696527240301

EDN: QQBQFK

1 Введение

Термин ФБ определяется в отношении к промышленным процессам (см., например, [1]). Если рассматривается безопасность бизнеса, то в аналогичных

¹Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук, grusho@yandex.ru

²Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук, info@itake.ru

³Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук, m.zabzhailo@yandex.ru

⁴ПАО Сбербанк России, dvlsmirnov@sberbank.ru

⁵Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук, AZatsarinny@ipiran.ru

⁶Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук, eltimon@yandex.ru

задачах информационной безопасности используется термин непрерывность бизнеса [2]. Общих терминов описания всех уровней обеспечения безопасности при организации работы системы от функционирования ее БП, инфраструктуры реализации БП до программно-аппаратной поддержки технологических процессов авторы не нашли. Заметим, что наиболее подходящий в этом случае термин кибербезопасность в научной литературе используется неоднозначно [3].

В данной статье принят термин **ФБ**, подразумевающий обобщенное значение обычного понимания **ФБ** и поддерживаемой программными и техническими средствами безопасности **БФ** и **БП**. Такое решение связано с тем, что в статье речь идет о контроле устойчивости реализации на одной платформе большого числа **БП** обслуживания большого числа клиентов, запрашивающих одновременно большое количество различных услуг и требующих частичной модификации **БФ** в реальном масштабе времени. В таких условиях, например, работают крупные банки с большим числом клиентов и сервисов. Следствием указанных условий становится значительное число конфликтов, ошибок и сбоев на различных уровнях реализации одних и тех же сервисов при ограничениях во времени. Мониторинг выполнения **БП** призван выявлять и классифицировать конфликты, ошибки и сбои для дальнейшего принятия управленческих решений.

Статья построена по схеме:

- описание объекта защиты;
- описание угроз и уязвимостей;
- исследование путей решения задач мониторинга.

Из описания объекта защиты, возможностей каскадных сбоев видно, что тематика статьи отличается от задач информационной безопасности. Важнейшим средством мониторинга **БП** становится анализ наблюдаемой информации мониторинга с использованием комплекса моделей всей инфраструктуры **БП**, который ранее был назван **МД** [4, 5].

2 Моделирование данных мониторинга

Самое главное требование к системам информационной поддержки деятельности любой организации — это сохранение ее функционального предназначения в условиях как внутренних, так и внешних вредоносных воздействий. Функциональное предназначение информационной поддержки деятельности организации можно описать в виде совокупности **БП**. Бизнес-процесс определяется как логически завершенная цепочка взаимосвязанных и взаимодействующих, повторяющихся видов деятельности (действий, **БФ**, работ и т. д.), в результате которых ресурсы организации используются для достижения определенных измеримых результатов [6].

Моделью **БП** назовем его формализованное описание в виде графа $G(\text{БП})$. Вершины графа — это **БФ**. Входящая и выходящая информация представляется ориентированными дугами, в соответствии с которыми информация передается по

сети связи. Порядок выполнения БФ и механизмы контроля и управления также отражаются на графе $G(\text{БП})$ либо в виде отдельных вершин, либо с помощью указания на задействованные ресурсы. Часто вспомогательные структуры не рассматриваются или могут быть добавлены в случаях необходимости. Описанные модели БП в виде графов $G(\text{БП})$ называются *функциональными*. Кроме функциональных моделей часто бывает необходимо рассмотреть следующие модели [6]:

- *поведенческие*, показывающие, когда и при каких условиях выполняются БФ (используются такие понятия, как событие, состояния системы, условия перехода из одного состояния в другое, последовательность событий);
- *структурные*, характеризующие состав подсистем и их взаимодействие;
- *информационные*, отражающие структуры данных, их состав и взаимодействие.

Функциональные и структурные модели тесно связаны между собой. Выделим множество вершин графа $G(\text{БП})$ со всеми внутренними дугами и «стянем» выделенный подграф в одну точку — новую вершину z . Эту вершину z будем называть *моделью подсистемы*, содержащей все БФ, которые «стянуты» в эту вершину. В вершину z входит одна ориентированная дуга от каждой вершины x , для которой в подсистеме была хоть одна вершина y , в которую входила дуга (x, y) . Аналогично из вершины z выходит одна дуга в вершину y , если в подсистеме существует хоть одна функция x , которая на графе $G(\text{БП})$ связана дугой (x, y) с x . Если внешняя вершина x связана входящими или исходящими дугами с несколькими вершинами подсистемы z , то для связи с z используется только одна входящая в подсистему из вершины x и одна исходящая из подсистемы в вершину x дуга.

Отдельная вершина в $G(\text{БП})$ также считается подсистемой. Если C представляет собой разбиение множества вершин графа $G(\text{БП})$, то построенный на элементах C граф $G(C)$ подсистем (при определенных C) называется *структурным* графом БП и соответствует структурному описанию части системы, связанной с данным БП.

Структурный подход к описанию систем (наборов БП) обычно представляет собой иерархию структурных графов [6]. Множество разбиений $\{C^*\}$ всех БФ системы образует частично упорядоченное множество C^{**} . Поэтому множество графов $G(C^*)$ также образует частично упорядоченное множество на всех порождениях графов $G(\text{БП})$ и всех БП.

Совокупность функциональных, поведенческих, структурных и информационных моделей всех БП организации вместе с моделями ресурсов (компьютеры, программное обеспечение) и моделями связанного обеспечения будем называть МД организации. Соответственно, они включают МД отдельных БП, МД отдельных подсистем обеспечения ресурсами, МД информационных взаимодействий.

Ясно, что МД служат основой для организации текущего управления и перспективного развития. Метаданные хранятся и используются отдельно от технологических БП организации.

Множество БП, МД и обслуживающий персонал образуют *функциональную систему организации* (ФСО). От правильной работы ФСО существенно зависит эффективность организации. Поэтому необходимо вести анализ угроз для ФСО, исследовать возможности непреднамеренных и умышленных воздействий на подсистемы ФСО, уязвимости ФСО.

Разумеется, не все компоненты ФСО имеют одинаковую значимость в результатах работы организации. Поэтому необходимо классифицировать БФ и подсистемы ФСО по значимости с помощью оценки потенциального ущерба для организации. При оценке рисков надо учитывать взаимодействия с внешними организациями. Функциональную безопасность можно определить как обеспечение функционирования информационной поддержки деятельности организации в условиях как внутренних, так и внешних вредоносных воздействий.

Нарушения ФБ можно легко перечислить:

- отказы при выполнении функций подсистем информационной поддержки;
- ошибки в выполнении функций подсистем информационной поддержки;
- конфликты при выполнении функций подсистем информационной поддержки;
- очереди при выполнении функций подсистем информационной поддержки.

Указанные нарушения возникают вследствие причин, которые существуют в ФСО или созданы нарушителями ФБ. Защита предполагает знание причин, но провести априори полный анализ причин потенциальных нарушений ФБ не представляется реальным. Значительное сокращение трудоемкости задачи состоит в отслеживании признаков нарушения ФБ на уровне подсистем и компенсации нарушений с помощью замены таких подсистем. В дальнейшем можно провести анализ причины нарушения в замененной подсистеме и, устранив причину, снова ввести в действие замененную подсистему.

Таким образом, приходим к основному методу защиты от нарушений ФБ — к избыточности системной архитектуры в ФСО. Ясно, что избыточность является дорогим методом защиты ФСО и ее реализация требует большой работы для минимизации рисков. При этом необходимо организовать мониторинг нарушений ФБ. Как правило, система мониторинга ориентирована на конкретное разбиение системы C^* . В этом случае будем говорить о мониторинге функциональной инфраструктуры, порожденной C^* .

3 Организация мониторинга функциональной безопасности

Мониторинг функциональной инфраструктуры (ФИ) состоит из:

- системы сбора мониторинговой информации (МИ);
- системы передачи этой информации в центр анализа;
- методов и средств анализа МИ;
- системы передачи результатов анализа в систему управления ФСО.

При организации мониторинга необходимо решать задачу минимизации рисков, связанных с полнотой сбора информации о признаках нарушения ФБ, с ограничениями суммарной пропускной способности каналов, передающих МИ, с ограничениями по времени для сбора, передачи и анализа МИ.

Сбор МИ, как правило, реализуется с помощью:

- многоагентной системы (МАС), в которой каждый агент, как правило, связан с одной подсистемой графа $G(C^*)$ и набором признаков нарушения ФБ в этой подсистеме, а информация передается для анализа по общей системе связи (детальный анализ этого подхода можно найти, например, в работах [7, 8]);
- системы сенсоров, выявляющих и передающих значения некоторых функций от проходящих через них данных о функционировании подсистемы (примеры можно найти в [9]).

В первом случае легче проводить анализ и выявлять нарушения ФБ в конкретной подсистеме. Во втором случае можно значительно снизить суммарную пропускную способность каналов мониторинга, однако при этом сложнее проводить анализ.

Многоагентную систему можно использовать не только для мониторинга функционирования системы. Например, МАС можно связать с системой технической защиты (СТЗ). Для проверки этого было проведено следующее исследование. Имитировалась интеграция МАС для мониторинга сетевого трафика с СТЗ, выявляющая сетевые атаки. Был построен макет из самодельной МАС и СТЗ (использовалось программное обеспечение (ПО) Wireshark). Эксперимент состоял из следующих шагов:

- мониторинг сетевой активности с помощью МАС;
- выявление подозрительных сессий (пакетов) с помощью МАС;
- сохранение подозрительных сессий (пакетов) в системе управления базами данных;
- разработка интеграционного ПО (ИПО) для взаимодействия с СТЗ;
- передача собранных пакетов из ИПО в СТЗ;
- эмуляция сетевой активности для его анализа с помощью СТЗ.

Полученный результат показал успешное выявление атаки в эмулированном трафике.

Одна из важнейших проблем мониторинга — распространение нарушения ФБ из одной подсистемы в другие. В частности, возникает сложная задача выявления первопричины (Root Cause Analysis — RCA) нарушения ФБ [10].

Раскроем некоторые цели и проблемы мониторинга ФСО на следующих примерах.

Пример 1. Предположим, что некоторая БФ f выполняется на данных длиной l . Если по какой-то ошибке на вход выполнения функции подана

последовательность длиной больше l , то функция f не может быть выполнена и, следовательно, происходит останов БП. Факт остановки БП может быть выявлен оператором БП, который может нажать кнопку «продолжить работу», и на вход БП будут поданы новые данные следующей задачи. Если в них нет ошибки, то останов БП не будет и сбой в обработке некоторых данных будет пропущен вместе с задачей, которую не удалось решить.

При останове БП оператор не может искать причину этого события. Посылать задачу, на которой произошел сбой, для выполнения на резервной копии нельзя, так как на резервной копии произойдет такой же сбой. Остановить работу БП для всех задач экономически невыгодно, тем более что на других задачах работа БП проходит без сбоев. Тогда система мониторинга должна обеспечить выявление факта исключения задачи с ошибочными данными и формирование сигнала об этом в систему управления ФБ.

Пример 2. Возникновение очередей ограниченного размера обычно допускается в информационных технологиях. Однако неограниченный рост очередей на выполнение БФ недопустим. Такой рост ведет, как правило, к каскадным сбоям (см., например, [11]). Каскадный сбой характеризуется остановом выполнения множества БФ. Анализ каскадного сбоя должен привести к первопричине сбоя, т. е. первому переполнению очереди. Как оказалось, это трудоемкая задача [12]. Помощь в ее решении может оказать мониторинг на базе сенсоров, передающих сигнал времени переполнения очереди к текущей БФ (или подсистеме). На основе этих данных можно вычислить последовательность распространения сбоя и прийти к окрестности первоисточника. В самом деле, переполнение очереди к БФ означает, что функция не работает или стоит в очереди к передаче данных следующей БФ. В любом из этих случаев обращение к следующей функции БП не может быть выполнено.

Предположим, что переполнения очереди к следующей функции нет. Если в следующей функции переполнения очереди нет, то надо смотреть обращение данной функции к другим БФ. Одна БФ может посылать свои результаты сразу нескольким другим БФ. Если хотя бы у одной из них произошло переполнение очереди, то исходная функция не может посылать результат другим, так как это может нарушить синхронизацию работы выполнения БП. Если для данной функции все очереди получения результатов от нее свободны, а к этой функции есть переполнение очереди от предыдущих функций, то найдена первопричина сбоя. Если к следующей БФ уже есть переполнение очереди, то эта функция находится ближе к первопричине сбоя. Если для данной БФ все следующие БФ обладают свойством переполнения очереди, то необходимо организовать эффективный переборный процесс выявления первого переполнения очереди. Таким образом определяется путь к первопричине сбоя.

Возможность эффективного поиска состоит в выборе направления к критическим точкам инфраструктуры. Ясно, что эти расчеты можно делать в автоматическом режиме при получении первого сигнала о переполнении очереди. Эти расчеты можно проводить на моделях в рамках МД.

Как правило, система мониторинга состоит из семейства подходов, которые можно включать в зависимости от текущих задач оператора. Например, сначала работает сенсорная система выявления нарушений ФБ. В удаленном режиме работы центра анализа оператор может подключить агентов в подозрительных подсистемах. Информация, получаемая от них, позволяет глубже понять сущность нарушения ФБ, хотя задействует больше ресурсов сети. Более того, в режиме диалога с агентом решаются многие проблемы анализа сбоев и восстанавливается нормальная работа.

Основная проблема мониторинга с помощью МАС и сенсорных систем состоит в том, что они не позволяют отслеживать нарушение путей выполнения БП. Правильное выполнение БП часто допускает пропуски некоторых БФ. Тогда подтверждение правильности выполнения БП требует дополнительного анализа [13]. Такое подтверждение часто пропускают, что может приводить к неправильным результатам работы БП или отказам, конфликтам, каскадным сбоям. Для контроля выполнения БП в таких случаях удобно использовать МД [14]. Аналогичные проблемы возникают при мониторинге БП, использующих циклические технологии.

Основные сложности в организации мониторинга возникают при одновременном выполнении нескольких сходных БП на одной платформе. Дополнительные сложности возникают, когда в БП используется внешняя инфраструктура. Эти проблемы еще предстоит исследовать.

4 Заключение

В работе очерчен круг задач, которые соседствуют с задачами информационной безопасности, но связаны выполнимостью функций, задействованных в БП. Этот круг задач можно выделить с помощью понятия функциональной безопасности БП организации. Приведены отличия объекта защиты в задачах ФБ и задачах информационной безопасности. Это позволяет выделить ФБ как отдельное направление исследований безопасности информационной поддержки организаций. Некоторые проблемы ФБ и решения этих проблем описаны и исследованы при построении критических информационных систем [15].

Литература

1. ГОСТ Р 59504-2021 / IEC TR 61511-4:2020. Безопасность функциональная. Системы безопасности приборные для промышленных процессов. Часть 4. Пояснение и обоснование изменений, внесенных в МЭК 61511-1 из издания 1 в издание 2. — М.: Стандартинформ, 2021. 41 с.
2. ГОСТ Р ИСО 22301-2014. Системы менеджмента непрерывности бизнеса. Общие требования. — М.: Стандартинформ, 2015. 38 с.
3. Белоус А. И., Солодуха В. А. Основы кибербезопасности. Стандарты, концепции, методы и средства обеспечения. — М.: Техносфера, 2021. 482 с.

4. Grusho A., Timonina E., Shorgin S. Security models based on stochastic meta data // Analytical and computational methods in probability theory / Eds. V. Rykov, N. Singpurwalla, A. Zubkov. — Lecture notes in computer science ser. — Cham: Springer, 2017. Vol. 10684. P. 388–400. doi: 10.1007/978-3-319-71504-9_32.
5. Грушо А. А., Забейайло М. И., Грушо Н. А., Тимонина Е. Е. Информационная безопасность на основе метаданных в компонентно-интеграционных архитектурах информационных систем // Системы и средства информатики, 2018. Т. 28. № 2. С. 34–41. doi: 10.14357/08696527180203. EDN: XNXXIL.
6. Самуйлов К. Е., Чукарин А. В., Яркина Н. В. Бизнес-процессы и информационные технологии в управлении телекоммуникационными компаниями. — М.: Альпина Паблишерс, 2009. 442 с.
7. Raciti M., Nadjm-Tehrani S. Embedded Cyber-physical anomaly detection in smart meters // Critical information infrastructures security / Eds. B. M. Hämmerli, N. Kalstad Svendsen, J. Lopez. — Lecture notes in computer science ser. — Cham: Springer, 2013. Vol. 7722. P. 34–45. doi: 10.1007/978-3-642-41485-5_4.
8. Tøndel I. A., Jaatun M. G., Line M. B. Threat modeling of AMI // Critical information infrastructures security / Eds. B. M. Hämmerli, N. Kalstad Svendsen, J. Lopez. — Lecture notes in computer science ser. — Cham: Springer, 2013. Vol. 7722. P. 264–275. doi: 10.1007/978-3-642-41485-5_23.
9. Грушо А. А., Грушо Н. А., Забейайло М. И., Тимонина Е. Е. Удаленный мониторинг рабочих процессов // Информатика и её применения, 2021. Т. 15. Вып. 3. С. 2–8. doi: 10.14357/1992264210301. EDN: VWANOS.
10. Grusho A., Grusho N., Zabezhailo M., Timonina E., Senchilo V. Metadata for root cause analysis // Communications ECMS, 2021. Vol. 35. Iss. 1. P. 267–271. doi: 10.7148/2021-0267.
11. Nan C., Eusgeld I. Exploring impacts of single failure propagation between SCADA and SUC // IEEE Conference (International) on Industrial Engineering and Engineering Management Proceedings. — Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2011. P. 1564–1568. doi: 10.1109/IEEM.2011.6118180.
12. Грушо А. А., Забейайло М. И., Зацаринный А. А., Николаев А. В., Писковский В. О., Тимонина Е. Е. Классификация ошибочных состояний в распределенных вычислительных системах и источники их возникновения // Системы и средства информатики, 2017. Т. 27. № 2. С. 29–40. doi: 10.14357/08696527170203. EDN: YPJBAR.
13. Agrawal R., Gunopulos D., Leymann F. Mining process models from workflow logs // Advances in database technology / Eds. H. J. Schek, G. Alonso, F. Saltor, I. Ramos. — Lecture notes in computer science ser. — Berlin, Heidelberg: Springer, 1998. Vol. 1377. P. 467–483. doi: 10.1007/BFb0101003.
14. Грушо А. А., Тимонина Е. Е., Грушо Н. А., Терехина И. Ю. Выявление аномалий с помощью метаданных // Информатика и её применения, 2020. Т. 14. Вып. 3. С. 76–80. doi: 10.14357/1992264200311. EDN: BGYULM.
15. Banerjee J., Sen A., Zhou C. On auxiliary entity allocation problem in multi-layered interdependent critical infrastructures // Critical information infrastructures security / Eds. G. Havarneau, R. Setola, H. Nassopoulos, S. Wolthusen. — Lecture notes in computer science ser. — Cham: Springer, 2017. Vol. 10242. P. 25–37. doi: 10.1007/978-3-319-71368-7_3.

Поступила в редакцию 19.07.24

FUNCTIONAL SAFETY MONITORING OF LARGE SERVICE SYSTEMS

*A. A. Grusho¹, N. A. Grusho¹, M. I. Zabezhailo¹, A. A. Zatsarinny¹, D. V. Smirnov²,
and E. E. Timonina¹*

¹Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119133, Russian Federation

²Sberbank of Russia, 19 Vavilov Str., Moscow 117999, Russian Federation

Abstract: The functional purpose of information support of the organization’s activities can be described in the form of a set of business processes. The article deals with monitoring the sustainability of the implementation on one platform of a large number of business processes for servicing a large number of customers, requesting a large number of different services at the same time, and requiring partial modification of business functions in real time. The consequence of these conditions is a significant number of conflicts, errors, and failures at different levels of implementation of the same services under time constraints. Business process monitoring is designed to identify and classify conflicts, errors, and failures for further management decision-making. In the article, the collection of functional, behavioral, structural, and information models of all business processes of the organization together with models and models of connected support is called organization metadata. Metadata are the basis for organizing current management and future development. The tasks of dividing the system into subsystems for organizing monitoring of functional security and using monitoring data to determine the root cause of the failure have been solved.

Keywords: information support of business processes; functional safety monitoring; large service systems; metadata

DOI: 10.14357/08696527240301

EDN: QQBQFK

References

1. GOST R 59504-2021 / IEC TR 61511-4:2020. 2021. Bezopasnost’ funktsional’naya. Sistemy bezopasnosti pribornye dlya promyshlennykh protsessov. Chast’ 4. Poyasnenie i obosnovanie izmeneniy, vnesennykh v MEK 61511-1 iz izdaniya 1 v izdanie 2 [Functional safety. Safety instrumented systems for the process industry sector. Part 4. Explanation and rationale for changes in IEC 61511-1 from Edition 1 to Edition 2]. Moscow: Standardinform Pubs. 41 p.
2. GOST R ISO 22301-2014. 2015. Sistemy menedzhmenta nepreryvnosti biznesa. Obshchie trebovaniya [Business continuity management systems. Requirements]. Moscow: Standardinform Pubs. 38 p.
3. Belous, A. I., and V. A. Solodukha. 2021. *Osnovy kiberbezopasnosti. Standarty, kontseptsii, metody i sredstva obespecheniya* [Fundamentals of cybersecurity. Standards, concepts, methods, and means of support]. Moscow: Tekhnosfera. 482 p.

4. Grusho, A., E. Timonina, and S. Shorgin. 2017. Security models based on stochastic meta data. *Analytical and computational methods in probability theory*. Eds. V. V. Rykov, N. D. Singpurwalla, and A. M. Zubkov. Lecture notes in computer science ser. Cham: Springer. 10684:388–400. doi: 10.1007/978-3-319-71504-9_32.
5. Grusho, A. A., M. I. Zabezhailo, N. A. Grusho, and E. E. Timonina. 2018. Informatsionnaya bezopasnost' na osnove metadannykh v komponentno-integratsionnykh arkhitekturakh informatsionnykh sistem [Information security on the basis of meta data in enterprise application integration architecture of information systems]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 28(2):34–41. doi: 10.14357/08696527180203. EDN: XNXXIL.
6. Samuylov, K. E., A. V. Chukarin, and N. V. Yarkina. 2009. *Biznes-protsessy i informatsionnye tekhnologii v upravlenii telekommunikatsionnymi kompaniyami* [Business processes and information technologies in management of the telecommunication companies]. Moscow: Alpina Pabls. 442 p.
7. Raciti, M., and S. Nadjm-Tehrani. 2013. Embedded cyber-physical anomaly detection in smart meters. *Critical information infrastructures security*. Eds. B. M. Hämmerli, N. Kalstad Svendsen, and J. Lopez. Lecture notes in computer science ser. Cham: Springer. 7722:34–45. doi: 10.1007/978-3-642-41485-5_4.
8. Tøndel, I. A., M. G. Jaatun, and M. B. Line. 2013. Threat modeling of AMI. *Critical information infrastructures security*. Eds. B. M. Hämmerli, N. Kalstad Svendsen, and J. Lopez. Lecture notes in computer science ser. Cham: Springer. 7722:264–275. doi: 10.1007/978-3-642-41485-5_23.
9. Grusho, A. A., N. A. Grusho, M. I. Zabezhailo, and E. E. Timonina. 2021. Udalennyy monitoring rabochikh protsessov [Remote monitoring of workflows]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 15(3):2–8. doi: 10.14357/19922264210301. EDN: VWANOS.
10. Grusho, A., N. Grusho, M. Zabezhailo, E. Timonina, and V. Senchilo. 2021. Metadata for root cause analysis. *Communications ECMS* 35(1):267–271. doi: 10.7148/2021-0267.
11. Nan, C., and I. Eusgeld. 2011. Exploring impacts of single failure propagation between SCADA and SUC. *Conference (International) on Industrial Engineering and Engineering Management Proceedings*. Piscataway, NJ: IEEE. 1564–1568. doi: 10.1109/IEEM.2011.6118180.
12. Grusho, A. A., M. I. Zabezhailo, A. A. Zatsarinny, A. V. Nikolaev, V. O. Piskovski, and E. E. Timonina. 2017. Klassifikatsiya oshibochnykh sostoyaniy v raspredelennykh vychislitel'nykh sistemakh i istochniki ikh vozniknoveniya [Erroneous states classification in distributed computing systems and sources of their occurrence]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 27(2):29–40. doi: 10.14357/08696527170203. EDN: YPJBP.
13. Agrawal, R., D. Gunopulos, and F. Leymann. 1998. Mining process models from workflow logs. *Advances in database technology*. Eds. H. J. Schek, G. Alonso, F. Salter, and I. Ramos. Lecture notes in computer science ser. Berlin, Heidelberg: Springer. 1337:467–483. doi: 10.1007/BFb0101003.
14. Grusho, A. A., E. E. Timonina, N. A. Grusho, and I. Yu. Teryokhina. 2020. Vyyavlenie anomalii s pomoshch'yu metadannykh [Identifying anomalies using metadata]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 14(3):76–80. doi: 10.14357/19922264200311. EDN: BGYULM.

15. Banerjee, J., A. Sen, and C. Zhou. 2017. On auxiliary entity allocation problem in multi-layered interdependent critical infrastructures. *Critical information infrastructures security*. Eds. G. Havarneanu, R. Setola, H. Nassopoulos, and S. Wolthusen. Lecture notes in computer science ser. Cham: Springer. 10242:25–37. doi: 10.1007/978-3-319-71368-7_3.

Received July 19, 2024

Contributors

Grusho Alexander A. (b. 1946) — Doctor of Science in physics and mathematics, professor, principal scientist, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119333, Russian Federation; grusho@yandex.ru

Grusho Nikolai A. (b. 1982) — Candidate of Science (PhD) in physics and mathematics, senior scientist, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119133, Russian Federation; info@itake.ru

Zabekhailo Michael I. (b. 1956) — Doctor of Science in physics and mathematics, principal scientist, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119333, Russian Federation; m.zabekhailo@yandex.ru

Zatsarinny Alexander A. (b. 1951) — Doctor of Science in technology, professor, principal scientist, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119133, Russian Federation; AZatsarinny@ipiran.ru

Smirnov Dmitry V. (b. 1984) — business partner for IT security department, Sberbank of Russia, 19 Vavilov Str., Moscow 117999, Russian Federation; dvlsmirnov@sberbank.ru

Timonina Elena E. (b. 1952) — Doctor of Science in technology, professor, leading scientist, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119133, Russian Federation; eltimon@yandex.ru

К ЗАДАЧЕ ИДЕНТИФИКАЦИИ СБОЕВ В ИНФОРМАЦИОННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ИНФРАСТРУКТУРЕ ПУТЕМ МОНИТОРИНГА И АНАЛИЗА КОСВЕННЫХ ДАННЫХ

Д. В. Смирнов¹, А. А. Грушо², М. И. Забейхайло³

Аннотация: Обсуждаются исследовательские аспекты проблематики идентификации сбоев в сложных информационно-технологических (ИТ) системах. Под сбоем понимается нештатный режим работы ИТ-инфраструктуры, в котором не обеспечивается заданная функциональность поддерживаемым ею бизнес-процессам, но имеющиеся средства мониторинга функционирования ИТ-инфраструктуры не подают сигналов тревоги. В таких ситуациях заключение о возникшем сбое можно сформировать лишь по косвенным данным, в частности по реакции пользователей, обращающихся в службу поддержки, и т. п. Задачи построения систем идентификации подобных нештатных ситуаций, так называемых детекторов сбоев, рассматриваются в контексте некоторых исследовательских проблем современного искусственного интеллекта: интеллектуального анализа текстов на естественном языке, выявления причинно-следственных связей в анализируемых данных, обучения на прецедентах в открытых предметных областях и др. Предложены направления научных исследований и формулировка задач, решение которых необходимо для существенного повышения эффективности выявления сбоев методами детекторов сбоев.

Ключевые слова: информационная инфраструктура; мониторинг косвенных данных; детекторы сбоев; причинно-следственные связи; искусственный интеллект

DOI: 10.14357/08696527240302

EDN: QZYOGK

1 Введение

Постоянно растущая сложность ИТ-инфраструктуры, обеспечивающей работу бизнес-приложений, отражается в том числе и на проблеме эффективности мониторинга режима ее функционирования. Ввиду все больших объемов объектов мониторинга далеко не всегда имеется возможность «покрывать» конкретную конфигурацию ИТ-системы таким комплексом датчиков — индикаторов штатного режима ее функционирования, который на любое выходящее за рамки

¹ПАО Сбербанк России, dvlsmirnov@sberbank.ru

²Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук, grusho@yandex.ru

³Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук, m.zabekhailo@yandex.ru

соответствующего SLA (Service Level Agreement — «Соглашение об уровне обслуживания (оказания услуги)») отклонение функциональных характеристик (штатных бизнес-функций), обеспечиваемых этой ИТ-инфраструктурой, реагировал бы сигналами тех или иных индикаторов.

Подобная неполнота покрытия ИТ-инфраструктуры индикаторами штатного режима ее работы приводит в общем случае к проблеме идентификации сбоев, которая может быть реализована обобщением косвенных данных. Речь идет о возможностях идентифицировать ту или иную нештатную ситуацию или эффект в ИТ-инфраструктуре, характеризуемые набором взаимосвязанных показателей (возможно, сложноорганизованным), по некоторым наблюдаемым фрагментам этого набора, в том числе с учетом характерных для этой инфраструктуры причинно-следственных взаимосвязей. Если подобное «опознание» в соответствующем множестве ситуаций в конкретном случае оказывается неоднозначным, для дальнейшей «дифференциации» сходных ситуаций можно целенаправленно использовать те или иные дополнительные признаки и возможные причинно-следственные связи между ними.

При идентификации сбоев в сложных ИТ-инфраструктурах, когда собственно сбой не «диагностируется» стандартными средствами мониторинга ИТ-инфраструктуры, например в силу их «неполноты» (лишь частичного представления всего множества возможных ситуаций сбоя), полезным источником информации могут оказаться различные каналы обратной связи, например от прямых обращений пользователей в соответствующие службы поддержки, до мониторинга медиасреды и социальных сетей. В качестве примеров можно отметить решения компании-производителя по анализу жалоб пользователей и устранению неполадок в системах Hewlett-Packard [1], а также решение Downtetector Ookla по мониторингу медиа-среды и социальных сетей [2].

Центральная проблема при подобной идентификации — установление надежного соответствия между наблюдаемыми характеристиками контролируемой ИТ-инфраструктуры и «отражением» ее текущего состояния в соответствующих косвенных данных. В случае мониторинга жалоб пользователей или же их сообщений в социальных сетях это отражение состояния отслеживаемой ИТ-инфраструктуры в множестве текстовых сообщений: описаний текущего состояния, оценочных высказываний и т. п.

С «инструментальной» точки зрения это проблема анализа текстовых Big Data в ограниченное время: сбой могут иметь каскадный характер, а значит, с ними желательно бороться по возможности на ранних стадиях их развертывания. Для этого требуется использование специальных проблемно-ориентированных подходов и математических моделей, эффективных методов и технологий.

2 Проблемы построения детекторов сбоев

Прикладной, или логический, сбой (далее сбой) в ИТ-инфраструктуре характеризуется тем, что некоторая ИТ-система в ней неисправна, т. е. не обслуживает

клиентов или не выполняет часть функций в штатном режиме. Неисправность, вызванная сбоем, не всегда идентифицируется стандартными средствами мониторинга. Часто она может быть обнаружена анализом косвенных сведений, например мониторингом жалоб пользователей. Если не иметь мониторинга жалоб, то выявление сбоя может занять много времени. При этом сбор жалоб также не является быстрым процессом.

Мониторинг жалоб позволяет отслеживать работоспособность инфраструктуры в обширном пространстве, например работу интернет-провайдеров на территории целого государства. Важное достоинство такого подхода — открытость, т. е. независимое получение мониторинговой информации без установления договорных обязательств с владельцами инфраструктуры или ее частей. Сбои конкретной системы — это зона ответственности ИТ-службы организации, так как именно ее специалисты владеют средствами мониторинга ИТ-системы и, соответственно, должны обладать необходимыми первичными данными о неисправностях, сводными отчетами об их причинах и мерах противодействия. Если «монопольное» владение средствами ИТ-мониторинга создает предпосылки сокрытия неисправностей, возникших по собственной вине ИТ-службы, то в этом случае руководству лучше доложить о сбое в программном обеспечении (ПО) или атаке злоумышленника, снимая свою вину в сбое.

В качестве эффективного независимого средства контроля за качеством работы ИТ-инфраструктуры можно использовать центр сбора жалоб пользователей, т. е. специальный проблемно-ориентированный онлайн-ресурс, где пользователи оперативно могут оставить жалобу на ИТ-сервис. В литературе такой центр часто называют «детектором сбоев — *downdetector*».

В получении по жалобам данных о сбоях могут быть следующие проблемы:

- если у ИТ-инфраструктуры множество провайдеров, с каждым из которых подписан SLA, то при сбоях существует проблема расследования «кто виноват», так как юридически значимое доказательство построить не всегда удастся, несмотря на то что данные предоставляются;
- ИТ-службы не всегда уведомляют свое руководство о наличии или об истинной причине сбоя. Поэтому жалобы могут носить противоречивый характер. Например, когда получена жалоба на сервис, но организация, предоставляющая сервис, утверждает, что жалоба безосновательная;
- число жалоб может быть большим, а текстовое изложение жалобы имеет индивидуальные особенности, однако ручная обработка — длительный и дорогостоящий процесс;
- могут возникнуть проблемы с достоверностью информации, когда с целью враждебных действий может быть создан фейковый поток жалоб;
- жалоба пользователя на конкретный сервис может оказаться следствием сбоев других сервисов. Отсюда возникает задача определения первопричины сбоя. В частности, некоторые жалобы могут оказаться эквивалентными с точки зрения исходного сбоя.

Список детекторов сбоев

№	Название сайта	Страна	Организация
1	downdetector.com	США	Ookla
2	istheservicedown.com	Эквадор	Частное лицо
3	downforeveryoneorjustme.com	США	Нет информации
4	www.thousandeyes.com	США	Cisco
5	outage.report	Израиль	Нет информации
6	isdown.app	Израиль	Нет информации
7	downhunter.com	США	Нет информации
8	downradar.ru	Россия	Нет информации
9	сбой.пф	Россия	Нет информации
10	brandanalytics.ru/corporate_downdetector	Россия	Сбербанк
11	portal.noc.gov.ru/ru/monitoring	Россия	Роскомнадзор
12	isitdownrightnow.com	США	Нет информации
13	не-работает-сегодня.пф	Россия	Нет информации
14	https://dominternet.ru/downdetector	Россия	Дом Интернет

Перечисленные проблемы носят научный характер и требуют исследований. Несмотря на то что указанные проблемы не решены или частично решены, построение и использование детекторов сбоев наблюдается в различных странах мира [3–6].

На данный момент в мире работают 14 детекторов сбоев (см. таблицу): 5 — в США; 2 — в Израиле; 1 — в Эквадоре; 6 — в России. Самый известный детектор сбоев принадлежит компании Ookla [2]. Остальные детекторы — довольно молодые продукты, так как работают примерно с 2020 г. В 2022 г. сайт downdetector.com прекратил оказывать услуги на территории РФ, где он работал с 2012 г.

Следует отметить, что у всех вышеперечисленных детекторов сбоев в настоящее время отсутствуют надежные функции, которые связаны с решением перечисленных выше проблем, но несмотря на это детекторы сбоев имеют существенную практическую значимость. Исследования по созданию надежных лингвистических процессоров ведутся интенсивно. Появились лингвистические (языковые) процессоры для обработки жалоб пользователей и выявления сервиса, на который жалуются пользователи. Такая функция особенно ценна для руководителей компаний и ИТ-служб. Например, анализируя текст жалобы, можно идентифицировать, какая конкретно функция в «большой» ИТ-системе не работала, например заказ билетов, переводы, оплата ЖКХ, отправка СМС и т. д., и по этой функции определить, какая команда в ИТ-службе отвечает за ее бессбойную работу. Языковой процессор есть у IBM [7], Сбербанка [8], Яндекса [9] и др., но он не встроен в детекторы сбоев именно для выявления предмета жалобы. Вместе с тем встраивание необходимо для автоматизации и расширения покрытия территории контролем работоспособности инфраструктуры. Качественный анализ жалоб на естественном языке может позволить сводить жалобы к «бедному» язы-

ку, для которого можно доказывать аналоги теоремы о полноте и обеспечивать семантическую однозначность содержания жалобы. Это позволит эффективнее централизовать обработку данных и решать проблему поиска первопричины сбоя.

3 Детекторы сбоев и искусственный интеллект

С точки зрения методики достижения поставленной цели идентификация сбоя может быть представлена как один из вариантов классической схемы так называемых абдуктивных рассуждений, предложенных Ч. С. Пирсом [10]. Действительно, здесь по наблюдаемым «следствиям» B необходимо конструктивным способом реконструировать «гипотезу» A , дедуктивным следствием которой будет наблюдаемое B , а далее убедиться также, что построенное A , как утверждение некоторого логического языка, является истинным. Таким образом, в рассматриваемом случае речь идет о восстановлении описания причин сбоя по наблюдаемым следствиям, представленным текстами на естественном языке, т. е. жалобами в службу поддержки, комментариями в социальных сетях и другими реакциями пользователей на нештатный характер запрашиваемых ими сервисов. При этом конструктивный алгоритм перехода от наблюдаемого B к истинному A оказывается центральным элементом всей реализуемой процедурной схемы.

Проблема поиска первопричины сбоя тесно связана с методами покрытия причин [11]. Покрытие определяется как объект, содержащий причину наблюдаемого следствия этой причины. Тогда несколько различных по содержанию жалоб можно представить как следствия причин, покрытых одним объектом. В покрытии могут быть цепочки причинно-следственных связей, которые ведут даже к разным причинам, но сужение области поиска за счет покрытия причины, как правило, упрощает задачу поиска первопричины.

К анализу причинно-следственных связей часто сводится задача идентификации фейкового потока жалоб. В самом деле, фейки, построенные как следствия разных причин, должны при причинно-следственном анализе порождать дополнительные следствия из тех же причин. Отсутствие таких следствий при наличии различных жалоб на сбой служит признаком фейкового потока жалоб. Кроме того, в экспериментах возникают другие противоречия, которые разрешаются причинно-следственным анализом. Расследование проблем «кто виноват» также приводит к задачам анализа причинно-следственных связей. Независимые жалобы, имеющие одну первопричину, служат основанием для опровержения утверждения организации об отсутствии сбоев в системе. Таким образом, одним из важных направлений исследования проблем построения надежного детектора сбоев служит анализ причинно-следственных связей в ИТ-инфраструктуре и множествах поступающих жалоб.

Сложность идентификации сбоев в крупных ИТ-системах обусловлена уже достаточно хорошо известной проблемой обеспечения частного результативного анализа в общем объеме Big Data и принятия в ограниченное время управленческих решений, основанных на результатах этого анализа.

При анализе жалоб как косвенных данных необходимо:

- идентифицировать собственно явление сбоя, т. е. совокупность характеристик текущего состояния отслеживаемой ИТ-инфраструктуры, позволяющую сформировать неоспариваемое заключение о наличии именно сбоя в штатном режиме ее функционирования; при этом представляется естественным опираться на совокупность заранее согласованных признаков сбоя;
- идентифицировать структуру возникших при данном сбое нарушений как совокупность нештатных характеристик, «возвращение» которых к штатным значениям «показателей» и может привести отслеживаемую ИТ-инфраструктуру в режим нормального функционирования;
- определить круг и индивидуальную степень ответственности эксплуатационных и управленческих структур за возникновение идентифицированного сбоя.

Необходимость при идентификации сбоев оперировать Big Data в режиме ограниченного времени для анализа данных и принятия решений требует предварительного накопления, формализации опыта и применения методов и систем искусственного интеллекта [12], а именно: эвристик, переносящих на компьютер используемый экспертом опыт и методы анализа данных, которые позволяют системам искусственного интеллекта выполнять те же действия, что и человек-эксперт, однако существенно быстрее и в существенно больших объемах.

Технологии искусственного интеллекта, в частности машинное обучение и текст-процессинг, позволяют результативно анализировать большие объемы накопленных данных мониторинга, выделяя шаблоны и аномалии в «поведении» компонентов отслеживаемой ИТ-инфраструктуры, существенно расширяя возможности профильного персонала, а также сокращая время принятия управленческих решений по устранению сбоя.

Решения на базе искусственного интеллекта при накоплении опыта и анализа жалоб позволяют:

- обучаться на уже накопленных предшествующих данных, фокусируя идентификацию сбоя на выявленных в процессе обучения шаблонах и примерах аномального поведения;
- выделять факторы, характеризующие конкретные типы сбоев, и строить на них соответствующие методики, средства мониторинга и противодействия;
- формировать признаки возникновения «локальных аномалий» для предсказаний возможности сбоя.

4 Заключение

В работе очерчен круг задач, которые соседствуют с задачами информационной безопасности.

Цель данной статьи заключается в определении направлений научных исследований и формулировке задач, решение которых необходимо для существенного повышения эффективности выявления сбоев методами детекторов сбоев. В работе не описан, но использован опыт построения детекторов сбоев на обширных территориях страны. Описание и использование имеющегося опыта и апробации построенных решений, а также практических проблем при расширении границ применения детекторов сбоев будут опубликованы в отдельной статье.

Основные направления научных исследований для разработки и применения детекторов сбоев связаны с использованием существующих методов искусственного интеллекта. При этом искусственный интеллект понимается в расширенном смысле, включающем:

- методы поиска и анализа причинно-следственных связей;
- текст-процессинг;
- машинное обучение и интеллектуальный анализ данных;
- методы организации, обработки и хранения больших данных;
- методы оперативного анализа обновляемых данных.

Литература

1. *Buchanan B. G., Smith R. G.* Fundamentals of expert systems // *Annu. Rev. Comput. Sci.*, 1988. Vol. 3. P. 23–58. doi: 10.1146/annurev.cs.03.060188.000323.
2. Downtdetector Ookla: Real-time problem & outage monitoring. <https://downtdetector.com>.
3. *Sun H., Wang Z., Wang J., Huang Z., Carrington N., Liao J.* Data-driven power outage detection by social sensors // *IEEE T. Smart Grid*, 2016. Vol. 7. No. 5. P. 2516–2524. doi: 10.1109/TSG.2016.2546181.
4. *Al-Shehri S. M., Loskot P., Numanoglu T., Mert M.* Common metrics for analyzing, developing and managing telecommunication networks. — Cornell University, 2017. arXiv:1707.03290 [cs.NI]. 51 p.
5. *Kharb L.* Performance analytics of network monitoring tools // *Int. J. Innovative Technology Exploring Engineering*, 2019. Vol. 8. Iss. 8. P. 2572–2577.
6. *Paul U., Ermakov A., Nekrasov M., Adarsh V., Belding E.* Outage: Detecting power and communication outages from social networks // *Web Conference Proceedings*. — New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2020. P. 1819–1829. doi: 10.1145/3366423.3380251.
7. IBM Watson. <https://www.ibm.com/watson/services/natural-language-understanding>.
8. Сбep GigaChat. <https://developers.sber.ru/portal/products/gigachat>.
9. YandexGPT. <https://yandex.cloud/en/services/yandexgpt>.
10. *Peirce C. S.* Reasoning and the logic of things: The Cambridge Conferences lectures of 1898 / Ed. L. K. Ketner. — Harvard historical studies ser. — Cambridge: Harvard University Press, 1992. 297 p.

11. Грушо А. А., Грушо Н. А., Забейайло М. И., Кульченков В. В., Тимонина Е. Е. Выявление причинно-следственных связей при покрытии причин // Информатика и её применения, 2024. Т. 18. Вып. 2. С. 54–59. doi: 10.14357/19922264240208. EDN: MKXMZY.
12. Смирнов Д. В. Методика проблемно-ориентированного анализа Big Data в режиме ограниченного времени // Int. J. Open Information Technologies, 2021. Vol. 9. Iss. 9. P. 88–94.

Поступила в редакцию 02.08.24

TO THE PROBLEM OF IDENTIFYING FAILURES IN THE INFORMATION TECHNOLOGY INFRASTRUCTURE BY MONITORING AND ANALYZING INDIRECT DATA

D. V. Smirnov¹, A. A. Grusho², and M. I. Zabezhailo²

¹Sberbank of Russia, 19 Vavilov Str., Moscow 117999, Russian Federation

²Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119133, Russian Federation

Abstract: Research aspects of the problem of identifying failures in complex information technology (IT) systems are discussed. A failure is understood as an abnormal mode of operation of the IT infrastructure, in which the specified functionality of the business processes supported by it is not provided but the existing means of monitoring the functioning of the IT infrastructure do not raise alarms. In such situations, the conclusion about the failure can be formed only by indirect data, in particular, by the reaction of users contacting the support service, etc. The tasks of building identification systems for such abnormal situations, the so-called downdetectors, are considered in the context of some research problems of modern artificial intelligence: intellectual analysis of natural language texts, identification of cause-and-effect relationships in the analyzed data, training on precedents in open subject areas, etc. The paper proposes directions of scientific research and formulation of tasks, the solution of which is necessary to significantly increase the efficiency of detecting failures using downdetector methods.

Keywords: information infrastructure; indirect data monitoring; downdetectors; cause-and-effect; artificial intelligence

DOI: 10.14357/08696527240302

EDN: QZYOGK

References

1. Buchanan, B. G., and R. G. Smith. 1988. Fundamentals of expert systems. *Annu. Rev. Comput. Sci.* 3:23–58. doi: 10.1146/annurev.cs.03.060188.000323.
2. Downdetector Ookla. Real-time problem & outage monitoring. Available at: <https://downdetector.com> (accessed August 26, 2024).

3. Sun, H., Z. Wang, J. Wang, Z. Huang, N. Carrington, and J. Liao. 2016. Data-driven power outage detection by social sensors. *IEEE T. Smart Grid* 7(5):2516–2524. doi: 10.1109/TSG.2016.2546181.
4. Al-Shehri, S. M., P. Loskot, T. Numanoglu, and M. Mert. 2017. *Common metrics for analyzing, developing and managing telecommunication networks*. Cornell University. 51 p. Available at: <https://arxiv.org/abs/1707.03290> (accessed August 26, 2024).
5. Chahal, D., L. Kharb, and D. Choudhary. 2019. Performance analytics of network monitoring tools. *Int. J. Innovative Technology Exploring Engineering* 8(8):2572–2577.
6. Paul, U., A. Ermakov, M. Nekrasov, V. Adarsh, and E. Belding. 2020. Outage: Detecting power and communication outages from social networks. *Web Conference Proceedings*. New York, NY: Association for Computing Machinery. 1819–1829. doi: 10.1145/3366423.3380251.
7. IBM Watson. Available at: <https://www.ibm.com/watson/services/natural-language-understanding> (accessed August 26, 2024).
8. GigaChat. Available at: <https://developers.sber.ru/portal/products/gigachat> (accessed August 26, 2024).
9. YandexGPT. Available at: <https://yandex.cloud/en/services/yandexgpt> (accessed August 26, 2024).
10. Peirce, C. S. 1992. *Reasoning and the logic of things: The Cambridge conferences lectures of 1898*. Ed. L. K. Ketner. Harvard historical studies ser. Cambridge: Harvard University Press. 297 p.
11. Grusho, A. A., N. A. Grusho, M. I. Zabezhalo, V. V. Kulchenkov, and E. E. Timonina. 2024. Vyyavlenie prichinno-sledstvennykh svyazey pri pokrytii prichin [Identification of cause-and-effect relationships when covering causes]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 18(2):54–59. doi: 10.14357/19922264240208. EDN: MKXMZY.
12. Smirnov, D. V. 2021. Metodika problemno-oriyentirovannogo analiza Big Data v rezhime ogranichenogo vremeni [Methodology of problem-oriented Big Data analysis in limited time mode]. *Int. J. Open Information Technologies* 9(9):88–94. EDN: NKHHGS.

Received August 2, 2024

Contributors

Smirnov Dmitry V. (b. 1984) — business partner for IT security department, Sberbank of Russia, 19 Vavilov Str., Moscow 117999, Russian Federation; dvlsmirnov@sberbank.ru

Grusho Alexander A. (b. 1946) — Doctor of Science in physics and mathematics, professor, principal scientist, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119333, Russian Federation; grusho@yandex.ru

Zabezhalo Michael I. (b. 1956) — Doctor of Science in physics and mathematics, principal scientist, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 40 Vavilov Str., Moscow 119333, Russian Federation; m.zabezhalo@yandex.ru

ОСОБЕННОСТИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

В. Е. Гаврилов¹, А. А. Зацаринный²

Аннотация: Статья посвящена рассмотрению особенностей обеспечения функциональной безопасности автоматизированных систем (АС) как с применением технологии искусственного интеллекта (ТИИ), так и без нее. Сравниваются факторы, влияющие на качество функционального программного обеспечения (ПО) в обоих случаях. Показано, что большинство специфических для систем искусственного интеллекта (СИИ) атак блокируется стандартными средствами защиты информации от несанкционированного доступа. Эффективность защиты от атаки уклонения определяется качеством СИИ и используемых для обучения данных. Для АС без применения ТИИ также актуальны атаки уклонения, а эффективность защиты от них определяется качеством функционального ПО.

Ключевые слова: системы искусственного интеллекта; безопасность информационных технологий; функциональная безопасность; качество программного обеспечения; атаки; защита информации

DOI: 10.14357/08696527240303

EDN: RPQAIE

1 Введение

Широкое внедрение новых информационных технологий (ИТ) в самых разных областях экономики, управления, обороны и безопасности приводит к новым угрозам информационной безопасности АС [1]. По мере расширения сферы применения и функциональности ИТ традиционные цели защиты информации (целостность, доступность и конфиденциальность) все чаще отходят на второй план и становятся вспомогательными для достижения основной цели — достижения устойчивого и корректного выполнения АС требуемых функций без нанесения неприемлемого ущерба владельцу АС; в этом суть реализации безопасной ИТ [2]. В первую очередь это касается так называемых киберфизических систем, в которых информационные процессы и процессы физического мира тесно переплетены и неотделимы друг от друга, например в системах управления технологическими процессами при обеспечении функциональной безопасности как способности поддерживать корректное функционирование системы управления и управляемого

¹Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук, vegavrilov@yandex.ru

²Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук, AZatsarinny@ipiran.ru

ею оборудования [3]. Представляется, что этот подход также приемлем и для информационно-аналитических систем [4], в которых нарушение установленной технологии обработки и хранения информации также может приводить к негативным последствиям даже при сохранении конфиденциальности, целостности и доступности.

Таким образом, безопасность ИТ и функциональная безопасность АС характеризуются качеством пользовательского ПО, а при использовании ТИИ — качеством систем СИИ и их устойчивостью к атакам. Функциональная безопасность АС должна обеспечиваться комплексным применением как средств технической защиты информации, так и средств, специфических для используемой СИИ. Безусловно, при этом должны выполняться требования по технической и, при необходимости, криптографической защите информации [5].

В статье рассматриваются специфические особенности обеспечения функциональной безопасности для АС с применением ТИИ и без нее.

2 Особенности технологии искусственного интеллекта с позиции информационной безопасности

Несмотря на то что исследования в области искусственного интеллекта ведутся уже несколько десятилетий, а в последние годы особенно интенсивно, устоявшееся понятие ТИИ не сформировано. Имеющиеся определения, основанные на сравнении функционального назначения СИИ с когнитивными возможностями человека [6], часто оказываются неприемлемыми для разработки технологических решений вследствие существенных отличий индивидуальных способностей человека применительно к решению конкретных задач. Другие определения акцентируют возможности ТИИ на решении заданных функциональных задач в условиях отсутствия наперед заданного алгоритма и формировании этого алгоритма на основе входных данных (обучающих выборок) [7, 8].

Сравним с этих позиций АС с применением ТИИ и традиционным способом реализации функционального ПО. На ранних этапах развития вычислительной техники программирование велось на низкоуровневых языках или непосредственно в машинных кодах, а программист самостоятельно распределял вычислительные ресурсы, т. е. человек самым тесным образом взаимодействовал с вычислительной средой и мог детально объяснить и задокументировать весь вычислительный процесс. По мере развития систем программирования и операционных систем большая часть рутинной работы программиста была возложена на инструменты так называемого промежуточного слоя (трансляторы, компиляторы, редакторы и интерпретаторы языков высокого уровня, системы ввода-вывода и операционные системы). Стали широко применяться библиотеки стандартных программ, обладающие в силу своей универсальности высокой избыточностью. Степень алгоритмизации языков программирования возросла, появились динамически подгружаемые модули и системы автоматического программирования. В результате упомянутые выше и другие технологии, с одной стороны, суще-

ственно повысили эффективность систем программирования и облегчили труд программистов, а с другой — снизили уровень информационной безопасности за счет снижения возможности контроля исполняемого кода: появилась проблема объяснимости (или необъяснимости) кода. Указанные факторы привели к невозможности полноценного анализа разработанного ПО на соответствие требованиям по уровням доверия традиционными статическими и динамическими методами на основе существующей нормативной базы регуляторов [6]. В связи с этим для анализа ПО все чаще используется так называемое фаззинг-тестирование [9].

Широкое внедрение ТИИ обострило проблемы в этом направлении. При этом ответ на вопрос о наличии или отсутствии заранее определенного алгоритма при использовании ТИИ зависит от степени детализации этого алгоритма. Действительно, например, при использовании технологии машинного обучения (МО) на основе искусственных нейронных сетей (ИНС) задание параметров нейронной сети уже определяет алгоритм дальнейшего функционирования. Оптимальные параметры ИНС можно было бы найти и путем тотального перебора с некоторым шагом (чем меньше, тем точнее) при наличии неограниченных вычислительных и временных ресурсов. Использование вероятностных методов для поиска оптимальных гиперпараметров при МО лишь позволяет сократить трудоемкость этого процесса до приемлемого уровня и, по сути, сводится к одному из применений метода Монте-Карло. Подобный подход распространяется и на другие технологии МО. Задание признаков описания, точки прототипа, пороговых значений расстояний, минимального числа точек в окрестности, числа кластеров и т. д. также определяет алгоритм функционирования модели МО.

Таким образом, можно предложить следующее определение: *технология искусственного интеллекта* — это технология оптимизации параметров алгоритма решения функциональной задачи на основе анализа входных данных.

Интегральным показателем оптимальности параметров алгоритма с использованием ТИИ служит оценка качества соответствующей СИИ.

3 Факторы, влияющие на функциональную безопасность

Рассмотрим, какие факторы влияют на качество СИИ и АС, реализующей фиксированный алгоритм решения функциональной задачи, на всех этапах жизненного цикла несколько более детально, чем в [10–12]. Выделим следующие 10 этапов.

1. Определение функциональной потребности заказчика. При этом в обоих случаях важны полнота и непротиворечивость функциональной задачи.
2. Постановка задачи и ее формализация в проекте технического задания. Словесное описание функциональной потребности (задачи) должно быть полным, исчерпывающим, непротиворечивым и не допускающим различных толкований.

3. Интерпретация функциональной задачи исполнителем и/или сведение первоначальной задачи к одной или совокупности типовых задач, решаемых с применением ТИИ (классификация, кластеризация, регрессия, понижение размерности и т. д.), в случае принятия решения об использовании ТИИ. Не обладая глубоким знанием автоматизируемой предметной области, исполнитель может допускать как систематические, так и случайные ошибки на этом этапе.
4. Разработка блок-схемы программы. На этом этапе предполагается декомпозиция алгоритма решения функциональной задачи заказчика и формализация каждого из компонентов, в том числе сведение к одной из решаемых с помощью ТИИ задач (в случае использования). Некорректность каждого из компонентов и/или их взаимосвязи приводит к некорректной работе всего алгоритма.
5. Разработка кода программы на языке высокого уровня. При использовании ТИИ на этом этапе разработчик выбирает архитектуру и гиперпараметры искусственных/глубинных нейронных сетей, а также проводит собственное обучение модели. В ходе программирования исполнитель использует стандартные библиотеки и подгружаемые модули, работа которых не всегда прозрачна и объяснима, так же как и выбор архитектуры ИНС и иных гиперпараметров. На качество функционального ПО в обоих случаях влияет также оптимальный выбор параметров алгоритма. В одном случае оптимальные параметры выбираются на основе статистических методов, используемых в МО, в другом это делает программист, который также может использовать численные методы решения некоторых уравнений, включая метод Монте-Карло. В свою очередь оптимальность параметров МО напрямую зависит от качества обучающих данных, отбор и подготовку которых осуществляют профильные эксперты, что предполагает некоторую субъективность.
6. Компиляция. Использование универсальных компиляторов, как правило, вносит избыточность в исполняемый код, что может приводить к снижению качества функционального ПО и появлению дополнительных уязвимостей. При использовании ТИИ аналогом этого процесса может служить компрессия ИНС (оптимизация архитектуры, пруннинг, квантование, дистилляция знаний), что также может снижать качество получаемого по результатам обучения функционального ПО.
7. Тестирование. Чаще всего оценка функциональной пригодности (качества) ПО проводится во время приемочных испытаний по специально разработанной методике. При этом полнота и достаточность такого тестирования никак не обосновываются. Отчасти этот пробел устраняется в [9, 13], которые приводят перечень наиболее часто встречающихся существенных характеристик качества ПО и подходы к их количественному экспертному оцениванию. Однако перечень значимых для конкретного применения характеристик и граничные значения соответствующих метрик при их оценивании по-преж-

нему возлагаются на экспертов, что может приводить к необъективности оценок.

8. Исследования на соответствие требованиям по уровню доверия. В соответствии с требованиями нормативных документов [14] такому исследованию подвергается все ПО из состава АС в защищенном исполнении. При этом предполагается статический и динамический анализ ПО с использованием комментированных исходных текстов. С учетом современных технологий программирования это требование чаще всего оказывается невыполнимым, что приводит к необходимости использования альтернативных методов исследований, например фаззинг-тестирования. Таким образом, АС с фиксированным алгоритмом функционирования практически ничем не отличается от АС с применением ТИИ, обладающей эффектом необъяснимости.
9. Выявление ошибок (некорректного функционирования), снижения эффективности СИИ. В ходе эксплуатации АС нередко выявляются ошибки или неточности (неполнота) реализации функциональной задачи, а для СИИ — снижение эффективности функционирования.
10. Внесение изменений и их оценка. В случае использования ТИИ и без нее требуется проведение исследования внесенных изменений, что, конечно, снижает оперативность такой корректировки. В обоих случаях как корректировка ПО, так и дообучение ИНС проводится вне рамок функционирующей АС на выделенных средствах вычислительной техники с необходимыми инструментальными средствами.

Как видим, принципиальной разницы между факторами, влияющими на качество функционального ПО при его разработке человеком и при формировании ПО по результатам обучения ИНС, практически не существует.

4 Угрозы функциональной безопасности и специфические атаки

Все атаки и угрозы, характерные для обычных АС, актуальны и для СИИ. Использование ТИИ не вносит какой-либо специфики в обеспечение технической защиты информации. Функциональную безопасность СИИ чаще всего связывают с обеспечением устойчивости к специфическим атакам через входные данные. Выделяют четыре типа атак: атаки отравления данных, атаки типа «уклонение», реверсивное проектирование и атаки вывода [15].

В атаках с отравлением данных злоумышленники намеренно влияют на обучающие данные, чтобы манипулировать результатами работы модели. При этом могут применяться: модификация данных путем внесения в них изменений перед использованием для обучения целевой модели, модификация меток и внедрение данных путем внесения новых данных в обучающий набор.

Как видим, все перечисленные способы реализации атаки отравления данных связаны с нарушением целостности набора данных, что является одной из базовых угроз безопасности информации, блокируемых средствами защиты от

несанкционированного доступа. При этом, конечно, сами обучающие данные должны быть получены из доверенного источника, а их качество проверено в установленном порядке.

Атаки типа «уклонение» относятся к разработке входных данных, которые кажутся нормальными для человека, но ошибочно классифицируются моделями МО. Такие атаки подразделяются на атаки по желаемому ответу (целевые/нецелевые), по доступности модели (черного ящика, белого ящика), по подбору помех (с однопроходными и итеративными методами расчета помех), а также атаки FGSM (Fast Gradient Sign Method) и JSMA (Jacobian Saliency Map Approach).

Как видим, перечисленные способы реализации атаки уклонения связаны с качеством модели (выбором гиперпараметров и архитектуры ИНС) и качеством обучающих данных. С точки зрения технической защиты информации необходимо ограничить доступ нарушителя к модели (обеспечить конфиденциальность). Специфические методы защиты от атак этого типа основаны на враждебной тренировке, шумоподавлении, рандомизации и др.

В классе атак «реверсивное проектирование» нарушитель атакует СИИ с целью извлечения информации о системе, которая впоследствии позволит восстановить модель искусственного интеллекта. В результате успешного проведения данной атаки противник может узнать, что модель считает угрозой, а что нет. При проведении атаки злоумышленник посылает входные данные в модель и наблюдает за тем, какие выходные результаты покажет модель на этих данных. Таким образом, с точки зрения технической защиты информации атаки этого типа блокируются путем ограничения доступа нарушителя к выходным данным. В некоторых случаях этого нельзя избежать, так как информацию о выходе противник может получать, просто наблюдая за физической реакцией СИИ, однако результаты такого наблюдения допускают неоднозначную трактовку, что приводит к увеличению необходимого объема тестирования. Технические средства защиты позволяют в некоторых случаях ограничить число попыток тестирования, как это делается, например, в системах авторизации по паролю. Кроме того, известны и применяются на практике способы защиты готового изделия от вскрытия и анализа при попадании в руки нарушителя [16].

При проведении «атаки вывода» нарушитель ставит целью определить, какие данные использовались для обучения модели искусственного интеллекта. Для этого он отправляет в модель данные и следит за выходными значениями модели, что требует доступа к модели, достаточного для того, чтобы посылать данные в модель и наблюдать за работой СИИ. При успешном получении данных от целевой модели нарушитель создает и обучает предсказывающую модель (состязательный ИИ), в результате работы которой будет определяться, использовались определенные данные для обучения целевой модели ИИ или нет. Таким образом, с точки зрения технической защиты информации речь идет об ограничении доступа нарушителя к функциональному ПО (модели ИНС).

Как видим, из приведенного перечня специфических для ТИИ атак только атака уклонения требует для ее парирования специфических приемов, связанных

с повышением устойчивости. В случае недоступности для нарушителя модели ИНС при проведении атак уклонения на ее эффективность может влиять качество обучения СИИ, которое, в свою очередь, зависит от качества обучающих данных. Методы оценки этих свойств регулируются действующими национальными стандартами (проектами) [13, 17] и базируются на экспертных оценках значимых характеристик качества данных, что, конечно, вносит элемент субъективности [18]. При этом состав и уровень значимости показателей качества ПО, СИИ и/или обучающих данных в значительной мере зависят от области применения конечного изделия. Так, для систем реального времени оперативность может оказаться более значимой, чем даже функциональная пригодность. Указанное обстоятельство необходимо учитывать при разработке методических документов в области функциональной безопасности [19, 20] как СИИ, так и АС без применения ТИИ. Однако и при разработке АС без применения ТИИ программист, зачастую не обладающий квалификацией в автоматизируемой предметной области, должен оценивать функциональную значимость входных данных, область их допустимых значений, возможные сочетания и др., что напрямую влияет на функциональную безопасность. При этом внешний нарушитель, так же как и в случае СИИ, может пытаться влиять на эффективность решения функциональных задач АС, манипулируя входными данными, к которым он может иметь доступ. Попытки противодействия атакам уклонения в СИИ, например с помощью враждебной тренировки, по сути, перекалывают решение отнюдь не рутинной задачи выявления возможности таких внешне приемлемых искажений входных данных на искусственный интеллект [10]. Этот подход не всегда приводит к успеху, что подтверждается многочисленными примерами выявления все новых видов искажений входных данных, не распознаваемых искусственным интеллектом. Отметим также, что и стандартом [21] при оценке устойчивости СИИ к атакам предусматривается лишь тестирование на враждебных примерах, полученных путем внесения случайных искажений в тестовый набор данных.

5 Заключение

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

- методы обеспечения функциональной безопасности и влияющие на нее факторы для АС с применением ТИИ принципиально не отличаются от известных методов, применяемых для классических АС (без применения ТИИ);
- специфические для АС с применением ТИИ проблемы, обусловленные качеством обучающих данных, сопоставимы с проблемой оценки разработчиком всех возможных значений входных данных и всех сценариев их обработки;
- приведенный анализ специфических для ТИИ видов атак показывает, что для парирования большинства из них могут использоваться известные меры и средства защиты от несанкционированного доступа, подлежащие сертификации в существующих системах;

- устойчивость СИИ к атакам уклонения определяется качеством модели ИНС и обучающих данных, целостность которых обеспечивается системой защиты информации от несанкционированного доступа;
- качество СИИ и обучающих данных оценивается, как и для случая АС без применения ТИИ, в рамках сертификации защищенных программных средств обработки информации и программных средств общего назначения на соответствие государственным стандартам [13, 17];
- оценку качества СИИ и качества функционального ПО целесообразно проводить на законченном изделии (стенде, полностью имитирующем весь технологический цикл обработки информации), реализующем функциональные задачи.

Литература

1. Гаврилов В. Е., Зацаринный А. А. Проблемы и угрозы внедрения некоторых новых цифровых технологий // Системы и средства информатики, 2022. Т. 32. № 3. С. 15–25. doi: 10.14357/08696527220302. EDN: QKESJR.
2. ГОСТ Р 50.1.053-2005 Информационные технологии. Основные термины и определения в области технической защиты информации. — М.: Стандартинформ, 2005. 16 с.
3. ГОСТ Р МЭК 62061-2015 Функциональная безопасность систем управления электрических, электронных и программируемых электронных, связанных с безопасностью. — М.: Стандартинформ, 2016. 78 с.
4. Гаврилов В. Е., Зацаринный А. А. Некоторые системотехнические вопросы использования интеллектуального анализа данных для обеспечения защиты информации в ситуационных центрах // Системы и средства информатики, 2018. Т. 28. № 1. С. 89–98. doi: 10.14357/08696527180107. EDN: YVXNEH.
5. Зацаринный А. А., Сучков А. П. Некоторые подходы к анализу факторов, влияющих на информационную безопасность систем искусственного интеллекта // Системы и средства информатики, 2023. Т. 33. № 3. С. 95–107. doi: 10.14357/08696527230308. EDN: QNXZBN.
6. Национальная стратегия развития искусственного интеллекта на период до 2030 года. Утверждена Указом Президента Российской Федерации от 10 октября 2019 г. № 490 «О развитии искусственного интеллекта в Российской Федерации».
7. Смолин Д. В. Введение в искусственный интеллект: Конспект лекций. — М.: Физматлит, 2004. С. 15–17.
8. ГОСТ Р 59276-2020 Системы искусственного интеллекта. Способы обеспечения доверия. Общие положения. — М.: Стандартинформ, 2005. 16 с.
9. ГОСТ 28195-89 Оценка качества программных средств. Общие положения: Межгосударственный стандарт. — М.: Изд-во стандартов, 1989. 3 с.
10. ГОСТ Р 56939-2016 Защита информации. Разработка безопасного программного обеспечения. Общие требования. — М.: Стандартинформ, 2018. 24 с.
11. ГОСТ Р 59793-2021 Информационные технологии. Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Автоматизированные системы. Стадии создания. — М.: Стандартинформ, 2021. 8 с.

12. *Зацаринный А. А., Ионенков Ю. С.* Некоторые вопросы оценки внутреннего качества информационных систем // Системы и средства информатики, 2022. Т. 32. № 1. С. 63–72. doi: 10.14357/08696527220106. EDN: NULTQH.
13. ГОСТ Р 59898-2021 Оценка качества систем искусственного интеллекта. Общие положения. — М.: Российский ин-т стандартизации, 2021. 24 с.
14. Требования по безопасности информации, устанавливающие уровни доверия к средствам технической защиты информации и средствам обеспечения безопасности информационных технологий: Приказ ФСТЭК России от 2 июня 2020 г. № 76.
15. *Vassilev A., Oprea A., Fordyce A., Anderson H.* Adversarial machine learning: A taxonomy and terminology of attacks and mitigations. — Gaithersburg, MD, USA: National Institute of Standards and Technology, 2024. NIST Artificial Intelligence (AI) Report, NIST Trustworthy and Responsible AI. NIST AI 100-2e2023. 107 p. doi: 10.6028/NIST.AI.100-2e2023.
16. FIPS PUB 140-2 Security Requirements for Cryptographic Modules. — NIST, 25.08.2007. <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/FIPS/NIST.FIPS.140-2.pdf>.
17. ISO/IEC 5259-2 Information technology — Artificial intelligence — Data quality for analytics and machine learning (ML). Part 2: Data quality measures.
18. *Зацаринный А. А., Ионенков Ю. С.* О применении экспертных методов при оценке эффективности и качества информационных систем // Системы и средства информатики, 2022. Т. 32. № 2. С. 47–57. doi: 10.14357/08696527220205. EDN: NJDPAY.
19. *Гаврилов В. Е., Зацаринный А. А.* Некоторые системотехнические и нормативно-методические вопросы обеспечения защиты информации в автоматизированных информационных системах на облачных технологиях с использованием методов искусственного интеллекта // Системы и средства информатики, 2016. Т. 26. № 4. С. 38–50. doi: 10.14357/08696527160404. EDN: XAKZBF.
20. *Гарбук С. В.* Функциональность и безопасность систем искусственного интеллекта: качество данных // Открытые системы. СУБД, 2024. № 1. С. 18–22. doi: 10.51793/OS.2024.95.90.004. EDN: IKAMSA.
21. ГОСТ Р 59921.7-2022 Системы искусственного интеллекта в клинической медицине. Алгоритмы анализа медицинских изображений. Методы испытаний. Общие требования. — М.: Российский ин-т стандартизации, 2021. 36 с.

Поступила в редакцию 15.06.24

SPECIFIC FEATURES OF ENSURING THE FUNCTIONAL SAFETY OF AUTOMATED SYSTEMS USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE TECHNOLOGY

V. E. Gavrilov and A. A. Zatsarinny

Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119133, Russian Federation

Abstract: The article is devoted to the consideration of the features of ensuring the functional safety of automated systems both with and without the use of

artificial intelligence technology. The factors affecting the quality of functional software in both cases are compared. It is shown that most of the attacks specific to artificial intelligence systems are blocked by standard means of protecting information from unauthorized access. The effectiveness of protection against an evasion attack is determined by the quality of the artificial intelligence system and the data used for training. For automated systems without the use of artificial intelligence technology, evasion attacks are also relevant and the effectiveness of protection against them is determined by the quality of functional software.

Keywords: artificial intelligence systems; information technology security; functional security; software quality; attacks; information protection

DOI: 10.14357/08696527240303

EDN: RPQAIE

References

1. Gavrilov, V. E., and A. A. Zatsarinny. 2022. Problemy i ugrozy vnedreniya nekotorykh novykh tsifrovyykh tekhnologiy [Problems and threats of some new digital technologies implementation]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 32(3):15–25. doi: 10.14357/08696527220302. EDN: QKESJR.
2. GOST R 50.1.053-2005. 2005. Informatsionnye tekhnologii. Osnovnye terminy i opredeleniya v oblasti tekhnicheskoy zashchity informatsii [Information technologies. Basic terms and definitions in scope of technical protection of information]. Moscow: Standartinform Pubs. 16 p.
3. GOST R MEK 62061-2015. 2016. Funktsional'naya bezopasnost' sistem elektricheskikh, elektronnykh, programmiruemykh elektronnykh, svyazannykh s bezopasnost'yu [Safety of machinery. Functional safety of safety-related electrical, electronic, and programmable electronic control systems]. Moscow: Standartinform Pubs. 78 p.
4. Gavrilov, V. E., and A. A. Zatsarinny. 2018. Nekotorye sistemotekhnicheskie voprosy ispol'zovaniya intellektual'nogo analiza dannykh dlya obespecheniya zashchity informatsii v situatsionnykh tsentrakh [Regarding systemic and technical problems of applying intellectual data analysis for providing information protection in situational centers]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 28(1):89–98. doi: 10.14357/08696527180107. EDN: YVXNEH.
5. Zatsarinny, A. A., and A. P. Suchkov. 2023. Nekotorye podkhody k analizu faktorov, vliyayushchikh na informatsionnuyu bezopasnost' sistem iskusstvennogo intellekta [Some approaches to the analysis of factors affecting the information security of artificial intelligence systems]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 33(3):95–107. doi: 10.14357/08696527230308. EDN: QNXZBN.
6. Natsional'naya strategiya razvitiya iskusstvennogo intellekta na period do 2030 goda: Ukaz Prezidenta RF ot 10 oktyabrya 2019 g. No. 490 "O razvitiy iskusstvennogo intellekta v Rossiyskoy Federatsii" [National strategy for the development of artificial intelligence for the period up to 2030: Decree of the President of the Russian Federation No. 490 "On the development of artificial intelligence in the Russian Federation" dated 10.10.2019].
7. Smolin, D. V. 2004. *Vvedenie v iskusstvennyy intellekt: Konspekt lektsiy* [Introduction to artificial intelligence: Lecture notes]. Moscow: Fizmatlit. 15–17.

8. GOST R 59276-2020. 2005. Sistemy iskusstvennogo intellekta. Sposoby obespecheniya doveriya. Obshchie polozheniya [Artificial intelligence systems. Methods for ensuring trust. General]. Moscow: Standardinform Publs. 16 p.
9. GOST 28195-89. 1989. Otsenka kachestva programmnykh sredstv. Obshchie polozheniya [Quality control of software systems. General principles]. Moscow: Standards Publs. 31 p.
10. GOST R 56939-2016. 2018. Zashchita informatsii. Razrabotka bezopasnogo programmnogo obespecheniya. Obshchie trebovaniya [Information protection. Secure software development. General requirements]. Moscow: Standardinform Publs. 24 p.
11. GOST R 59793-2021. 2021. Informatsionnye tekhnologii. Kompleks standartov na avtomatizirovannye sistemy. Avtomatizirovannye sistemy. Stadii sozdaniya [Information technology. Set of standards for automated systems. Stages of development]. Moscow: Standardinform Publs. 8 p.
12. Zatsarinny, A. A., and Yu. S. Ionenkov. 2022. Nekotorye voprosy otsenki vnutrennego kachestva informatsionnykh sistem [Some issues of internal quality assessment of information systems]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 32(1):63–72. doi: 10.14357/08696527220106. EDN: NULTQH.
13. GOST R 59898-2021. 2021. Otsenka kachestva sistem iskusstvennogo intellekta. Obshchie polozheniya [Quality assurance of artificial intelligence systems. General]. Moscow: Russian Standardization Institute. 24 p.
14. FSTEC Rossii. June 2, 2020. Trebovaniya po bezopasnosti informatsii, ustanavli-vayushchie urovni doveriya k sredstvam tekhnicheskoy zashchity informatsii i sredstvam obespecheniya bezopasnosti informatsionnykh tekhnologiy: Prikaz No. 76 [Information security requirements establishing levels of trust in technical information protection tools and information technology security tools: Order No. 76]. 17 p.
15. Vassilev, A., A. Oprea, A. Fordyce, and H. Anderson. 2024. Adversarial machine learning: A taxonomy and terminology of attacks and mitigations. Gaithersburg, MD: National Institute of Standards and Technology. NIST Artificial Intelligence (AI) Report, NIST Trustworthy and Responsible AI. NIST AI 100-2e2023. 107 p. doi: 10.6028/NIST.AI.100-2e2023.
16. NIST. 25.08.2007. FIPS PUB 140-2. Security requirements for cryptographic modules. Available at: <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/FIPS/NIST.FIPS.140-2.pdf> (accessed August 27, 2024).
17. ISO/IEC 5259-2. Artificial intelligence — Data quality for analytics and machine learning (ML). Part 2: Data quality measures.
18. Zatsarinny, A. A., and Yu. S. Ionenkov. 2022. O primenenii ekspertnykh metodov pri otsenke effektivnosti i kachestva informatsionnykh sistem [On the use of expert methods in evaluating effectiveness and quality of information systems]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 32(2):47–57. doi: 10.14357/08696527220205. EDN: NJDPAY.
19. Gavrilov, V. E., and A. A. Zatsarinny. 2016. Nekotorye sistemotekhnicheskie i normativno-metodicheskie voprosy obespecheniya zashchity informatsii v avtomatizirovannykh informatsionnykh sistemakh na oblachnykh tekhnologiyakh s ispol'zovaniem metodov iskusstvennogo intellekta [On system-technical and regulatory-methodological problems of data security in cloud automated information systems using artificial intelligence technologies]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 26(4):38–50. doi: 10.14357/08696527160404. EDN: XAKZBF.

20. Garbuk, S. V. 2024. Funktsional'nost' i bezopasnost' sistem iskusstvennogo intellekta: kachestvo dannykh [Functionality and security of artificial intelligence systems: Data quality]. *Otkrytye sistemy. SUBD* [Open Systems. DBMS] 1:18–22. doi: 10.51793/OS.2024.95.90.004. EDN: IKAMSA.
21. GOST R 59921.7-2022. 2021. *Sistemy iskusstvennogo intellekta v klinicheskoy meditsine. Algoritmy analiza meditsinskikh izobrazheniy. Metody ispytaniy. Obshchie trebovaniya* [Artificial intelligence systems in clinical medicine. Algorithms of medical images analysis. Test methods. General requirements]. Moscow: Russian Standardization Institute. 36 p.

Received June 15, 2024

Contributors

Gavrilov Victor E. (b. 1950) — principal specialist, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119333, Russian Federation; vegavrilov@yandex.ru

Zatsarinny Alexander A. (b. 1951) — Doctor of Science in technology, professor, principal scientist, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119133, Russian Federation; AZatsarinny@ipiran.ru

АНАЛИЗ ПОДХОДОВ К ИДЕНТИФИКАЦИИ СТРУКТУРЫ ПРОБЛЕМЫ В ГИБРИДНЫХ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ МНОГОАГЕНТНЫХ СИСТЕМАХ

С. В. Листонад¹, И. А. Кириков²

Аннотация: Сложность автоматического решения практических проблем во многом обусловлена их слабой формализацией, а иногда и отсутствием четкой постановки в момент возникновения. В результате требуются существенные временные и трудовые затраты на формулирование, выявление состава и структуры проблемы, подбор или разработку методов, релевантных ее частям, а также их синтезу. В работе рассматривается понятие проблемы и разрабатываются ее макро- и микроуровневые модели, выполнен анализ методов автоматической и автоматизированной идентификации ее структуры на предмет их возможного использования в системах гибридного и синергетического искусственного интеллекта, в частности в гибридных интеллектуальных многоагентных системах (ГиИМАС).

Ключевые слова: проблема; сложная задача; декомпозиция; редукция; коллектив специалистов; гибридная интеллектуальная многоагентная система

DOI: 10.14357/08696527240304

EDN: RSLMXC

1 Введение

Существенные особенности практических проблем [1–3] — их слабая формализация и комплексное строение, неоднородность знаний и методов, необходимых для решения [4, 5]. При их возникновении создаются группы специалистов для всестороннего анализа, выделения подпроблем и совместной выработки согласованного решения. В качестве вычислительной модели таких групп в [1] рассматриваются ГиИМАС, интегрирующие преимущества многоагентной [6] и гибридной [7] парадигм искусственного интеллекта. Элементарная составная часть таких систем — агент, т. е. программная сущность, характеризующаяся автономностью, широкими возможностями по моделированию предметной области, способностью проявлять целенаправленное поведение и взаимодействовать с другими агентами для решения общей проблемы. Сочетание в системе гетерогенных методов, знаний и целей у разных агентов позволяет преодолевать различные аспекты неоднородности поставленной проблемы [7], распределяя ее части между релевантными агентами. Наличие стандартных средств взаимодействия агентов

¹Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук, ser-list-post@yandex.ru

²Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук, baltbipiran@mail.ru

снижает сложность интеграции методов для решения очередной проблемы по сравнению с гибридными интеллектуальными системами [7].

Серьезный недостаток существующих моделей ГиИМАС — сложность автоматизированной и ограниченность автоматической идентификации структуры неизвестных, вновь возникающих слабоформализуемых проблем. Разработка методов и моделей идентификации структуры слабоформализуемой проблемы и динамического распределения подпроблем агентам ГиИМАС при ее решении позволит сократить выполняемые вручную действия по ее структурированию и установлению соответствия между частями проблемы и возможностями агентов. В настоящей работе рассматриваются основные методы и подходы к автоматизированной и автоматической идентификации структуры проблемы, анализируются их преимущества и недостатки с точки зрения их использования в ГиИМАС для решения проблемы путем ее декомпозиции, распределения подпроблем между агентами с последующей интеграцией полученных ими решений.

2 Понятие и концептуальная модель проблемы

Анализ подходов к определению понятия «проблема» представлен в [8]. Одно из наиболее общих определений описывает проблему как отрицательное отношение, недовольство, неудовлетворенность субъекта реальным течением обстоятельств и положением вещей [9], при этом подчеркивается субъективность проблемы и возможность ее решения как путем изменения субъектом объективной реальности, так и своего отношения к ней. В [10] проблема — некоторое затруднение или неопределенность, степень и природа которой характеризуют один из восьми классов проблем, а наиболее банальные из них рассматриваются как показательные задачи. Таким образом вводится шкала «задача–проблема», ближе к левой границе которой располагаются задачи как вырожденный случай проблем с минимумом неопределенности. Аналогичный подход принят в [4], где задача — четко поставленная цель при полностью определенных ограничениях по ее достижению. Проблема же характеризуется значительно большей неопределенностью и рассматривается как ограничения без четкой цели или определенная цель, не связанная с текущей неблагоприятной ситуацией. В настоящей работе под проблемой будем понимать затруднение, обуславливающее негативное восприятие субъектом текущей ситуации, со следующими свойствами [4]:

- недоопределенность и структурная аморфность — отсутствие четкой формулировки проблемы на момент ее возникновения и необходимость доопределения в процессе решения;
- комплексность и сетевой характер — наличие множества взаимосвязанных частей, представляющих собой проблемное поле;
- многослойность — необходимость выявления первопричин для решения проблемы, а не устранения ее симптомов;

- полителичность — из-за наличия множества стейкхолдеров, интересы которых следует учитывать, у проблемы нет единственно верного решения;
- непрозрачность — отсутствие у субъекта полной информации о текущей ситуации из-за невозможности ее получения или ее быстрого устаревания;
- динамичность — развитие проблемы во времени, накладывающее ограничение на срок ее решения;
- субъективность — проблема отсутствует без столкнувшегося с ней субъекта;
- межпредметное содержание, требующее привлечения множества специалистов с разным опытом и квалификацией для решения проблемы.

В момент возникновения затруднения еще невозможно определить, присущи ли ему перечисленные характеристики и является ли оно в действительности проблемой. В этот момент потенциальная проблема может быть описана на макроуровне (обозначается чертой над символом концепта) следующим кортежем:

$$\overline{\text{prb}} = \langle \text{id}, \text{sit}, \text{sbj}, \text{est} \rangle, \quad (1)$$

где id — идентификатор, наименование проблемы; sit — субъективное описание проблемной ситуации, т. е. состояния объективной реальности, к которому субъект негативно относится; sbj — идентификатор субъекта, столкнувшегося с проблемой; est — описание оценки, обуславливающей негативное отношение субъекта sbj к ситуации sit .

В дальнейшем выполняется формулирование, идентификация и моделирование проблемы, в результате чего строится ее микроуровневая (обозначается чертой под символом концепта) модель, описываемая кортежем

$$\underline{\text{prb}} = \langle \text{sitm}, \text{sbjm}, \text{STHM}, \text{pfmt}, \text{metm} \rangle, \quad (2)$$

где sitm — модель проблемной ситуации; sbjm — модель субъекта, столкнувшегося с проблемой; STHM — множество моделей стейкхолдеров, чьи интересы должны учитываться при решении проблемы; pfmt — метод динамического формирования проблемного поля, содержащего видение проблемы (ее частей) остальными стейкхолдерами; metm — модель метода решения проблемы.

Модель проблемной ситуации sitm из (2) представляется выражением:

$$\text{sitm} = \langle \text{dsam}, \text{DAT}, \text{CND} \rangle,$$

где dsam — динамическая модель предметной области, дополняемая в процессе анализа проблемы и учитывающая невозможность получения определенной информации или ее быстрое устаревание; DAT — множество исходных данных для решения проблемы; CND — множество условий (ограничений), накладываемых на решение проблемы.

Модели субъекта $sbjm$ и стейкхолдера $sthm \in STHM$ (2) описываются кортежем:

$$sbjm = sthm = \langle sthid, gl, EPR, evmet \rangle, \quad (3)$$

где $sthid$ — идентификатор субъекта или стейкхолдера; gl — цель, состояние объективной реальности, к которому стремится субъект или стейкхолдер; EPR — критерии оценки, выражающие поставленную цель gl количественно; $evmet$ — метод оценивания ситуации, формирующий значения критериев EPR на основе динамической модели предметной области $dsam$.

Метод формирования проблемного поля $pfmt$ (2) устанавливает отношение между моделью проблемной ситуации $sitm$, моделью субъекта $sbjm$, множеством моделей стейкхолдеров $STHM$ и моделью проблемного поля $prbfd$

$$\langle sitm, sbjm, STHM \rangle \xrightarrow{pfmt} prbfd. \quad (4)$$

Модель проблемного поля $prbfd$ из (4) описывается кортежем, вторая компонента которого описывает связи рассматриваемой проблемы с проблемами более высокого уровня, элементом которых она является, третья — связи проблемы со своими частями, т. е. подпроблемами и задачами (вырожденными проблемами), а четвертая — горизонтальные связи проблем одного уровня:

$$prbfd = \langle PRB, R_1^{prb-prb}(\overline{prb}, PRB), R_1^{prb-prb}(PRB, \overline{prb}), R_2^{prb-prb}(PRB, PRB) \rangle,$$

где PRB — множество проблем, описываемых выражениями (1) и (2), т. е. рассматриваемая проблема может быть многослойной, содержать в своем составе другие проблемы; $R_1^{prb-prb}$ — отношения между проблемами «быть частью»; $R_2^{prb-prb}$ — отношения между проблемами «быть связанным с».

Модель метода решения проблемы $metm$ из (2) описывается кортежем:

$$metm = \langle met, METD \rangle. \quad (5)$$

Здесь met — метод, интегрирующий методы из $METD$, либо автономный метод, если $METD = \emptyset$; $METD = \text{Пр}_1(\text{Пр}_5(\{\text{prb}^i | \text{prb}^i \in PRB \wedge R_1^{prb-prb}(\text{prb}^i, \overline{prb})\}))$ — множество методов met решения проблем-частей prb^i проблемы $\overline{prb}$, где Пр_i — проекция кортежа на i -ю компоненту.

Метод решения проблемы из (5) может быть пустым $met = \text{null}$, пока он не выбран или не построен. Наличие метода решения свидетельствует о том, что проблема может быть решена и является задачей, сложность которой характеризуется сложностью метода met .

Метод решения проблемы met (5) описывается кортежем:

$$met = \langle \text{proc}, IT, SPK \rangle,$$

где proc — процедура (алгоритм) реализации метода; IT — множество методов формализованного представления систем [11], в рамках которых реализован метод; SPK — множество идентификаторов специальностей, знания которых используются при реализации метода. Метод может предполагать как изменения динамической модели предметной области dsam , так и моделей субъекта sbjm или стейкхолдеров $\text{sthm} \in \text{STHM}$ (3), т. е. их целей gl и методов оценивания evmet , для решения проблемы путем улучшения их отношения к ситуации.

3 Подходы к автоматизированной и автоматической идентификации структуры проблемы

Существенная сложность при переходе от макроуровневой к микроуровневой модели проблемы в ходе ее системного анализа состоит в идентификации структуры проблемы, т. е. части проблемного поля prbfld , описывающей состав проблемы $\{\text{prb}^i | \text{prb}^i \in \text{PRB} \wedge R_1^{\text{prb}-\text{prb}}(\text{prb}^i, \overline{\text{prb}})\}$ и отношения $R_1^{\text{prb}-\text{prb}}$ и $R_2^{\text{prb}-\text{prb}}$ между ее частями. Традиционно для этих целей используются методы анкетирования, интервьюирования, предварительного исследования системы, построения диаграмм причинно-следственных связей, проблемных фреймов, матриц структур зависимостей и др. [11–14]. При этом могут использоваться средства автоматизации, например Автограф [15], Business Studio [16], MindOnMap [17].

Укрупненно могут быть выделены следующие группы автоматических методов идентификации структуры проблемы:

- эволюционные, предполагающие моделирование естественного отбора программ-индивидуумов с целью порождения особи, релевантной поставленной проблеме. Коза предложил внутрииндивидуумную декомпозицию проблемы на основе автоматически определяемых функций [18]. В [19] разработан межиндивидуумный многомодельный подход к декомпозиции проблемы классификации больших и несбалансированных многоклассовых наборов данных. В [20] используется двухуровневая коэволюционная архитектура для проектирования и оптимизации модульных нейронных сетей, отдельные подсети которых решают конкретные подпроблемы;
- популяционные, применяющиеся для решения оптимизационных проблем путем моделирования поведения множества взаимодействующих особей или частиц (муравьиные алгоритмы, колонии искусственных пчел и др.). Декомпозиция проблемы в данных алгоритмах заключается в разделении пространства поиска между несколькими взаимодействующими субпопуляциями [21];
- линейного программирования, в которых декомпозиция состоит в разделении исходной проблемы на основную задачу, состоящую из целочисленных переменных исходной проблемы и, возможно, некоторых дополнительных непрерывных переменных, и линейную программу, генерирующую сокращения, сформулированную в пространстве оставшихся переменных [22, 23];

Методы идентификации структуры проблемы

Группа методов	Решаемые проблемы	Достоинства	Недостатки
Автоматизированные	Формализованные и неформализованные	Возможность всестороннего анализа проблемы, учета целей различных стейкхолдеров; возможность работы с широким классом проблем; возможность решения проблемы на этапе анализа путем изменения отношения субъекта к реальности; работа с проблемами, сформулированными на естественном языке	Необходимость привлечения экспертов; низкая скорость; сильная зависимость результатов от квалификации системного аналитика и привлеченных экспертов
Эволюционные	Формализованные	Декомпозиция проблемы происходит одновременно с выработкой метода ее решения в ходе «выращивания» программы или комплекса программ	Невысокая скорость; высокие вычислительные затраты; сильная зависимость результатов от настроек алгоритма, специфических для каждой проблемы
Популяционные	Формализованные оптимизационные	Относительно высокая скорость работы	Ориентированность на достаточно узкий класс оптимизационных проблем (задач); сильная зависимость результатов от настроек алгоритма, специфических для каждой проблемы
Линейного программирования	Формализованные линейного программирования	Высокая скорость работы; нахождение точного решения	Ориентированность на узкий класс проблем (задач) линейного программирования
Многоагентные	Формализованные	Высокая скорость работы; поддерживается децентрализованное выделение подпроблем и их распределение между агентами	Требуется предварительное определение элементарных задач
Большие языковые модели	Неформализованные	Высокая скорость работы, возможность работы с широким классом проблем; работа с проблемами, сформулированными на естественном языке	Невысокие результаты на новых проблемах; возможность приобретения ложных знаний из-за обучения на некорректных текстах; возможность заикливания

- многоагентные, моделирующие совместную работу автономных программных или аппаратных сущностей — агентов — для решения общей проблемы, которую по отдельности они не могут решить. При этом выделяются агенты-специалисты, моделирующие экспертов, которые решают частные подпроблемы общей формализованной проблемы с использованием собственных и общих ресурсов, и агент-координатор, разрешающий конфликты между агентами-специалистами и моделирующий работу лица, принимающего решения [24, 25]. Альтернативный подход в сценариях «лидер–последователь» состоит в сведении проблемы управления группой агентов к управлению одним лидером [26];
- большие языковые модели, представляющие собой искусственные нейронные сети, способные анализировать запросы и выдавать ответы в виде текстов на естественных языках. В Auto-GPT предполагается возможность автоматической декомпозиции проблемы, сформулированной на естественном языке, на подпроблемы [27]. При этом отмечается вероятность заикливания и неспособность решать реальные проблемы [28]. Кроме того, в [29] продемонстрирована изменчивость, включая снижение, результатов работы больших языковых моделей во времени. В [30] разрабатывается метод на основе больших языковых моделей для планирования поведения робота, включая декомпозицию проблем на естественном языке, но на ранее не встречавшихся проблемах метод показывает невысокие результаты даже в лабораторных условиях.

В таблице представлен сравнительный анализ методов идентификации структуры проблемы. Как видно из таблицы, автоматизированные методы идентификации структуры проблемы требуют привлечения экспертов и серьезных временных затрат, что делает их нерелевантными динамичным проблемам. Методы автоматической идентификации структуры проблемы применяются в настоящее время преимущественно к хорошо формализованным проблемам (задачам) или к проблемам, для которых уже определен состав подпроблем другими методами. Большие языковые модели, способные работать с неформализованными проблемами, показывают ограниченную эффективность на новых проблемах даже в лабораторных условиях. В этой связи актуальна разработка новых и интеграция существующих методов идентификации структуры проблемы для компенсации их недостатков. Так, в [31] отмечается потенциал технологии генеративных агентов.

4 Заключение

В статье рассмотрены основные подходы к определению понятия «проблема», выделены типовые свойства проблем, а также разработана концептуальная модель этого понятия. Предложенная модель расширяет модель проблемы [32], которая представляла ее в виде сложной задачи [7], характеризующейся комплексностью, межпредметным содержанием (неоднородностью). В предложенной модели дополнительно учитываются такие характеристики проблемы, как недоопределен-

ность в момент возникновения, многослойность, полителичность, непрозрачность и динамичность. Показана актуальность автоматизации процессов идентификации структуры слабоформализуемой проблемы, проанализированы достоинства и недостатки существующих подходов к автоматизированной и автоматической идентификации ее структуры, продемонстрирована актуальность гибридизации предложенных подходов.

Литература

1. Кириков И. А., Колесников А. В., Листопад С. В. Компьютерная модель синергии коллективного принятия решений // Информатика и её применения, 2017. Т. 11. Вып. 3. С. 34–41. doi: 10.14357/19922264170304. EDN: ZGIGFJ.
2. Колесников А. В., Листопад С. В. Протокол гетерогенного мышления гибридной интеллектуальной многоагентной системы для решения проблемы восстановления распределительной электросети // Информатика и её применения, 2019. Т. 13. Вып. 2. С. 76–82. doi: 10.14357/19922264190211. EDN: MDLXEF.
3. Румовская С. Б., Колесников А. В., Литвин А. А. Визуальный метаязык описания решения диагностических проблем // Системы и средства информатики, 2019. Т. 29. № 4. С. 39–49. doi: 10.14357/08696527190404. EDN: XVDQLJ.
4. Спиридонов В. Ф. Психология мышления: Решение задач и проблем. — М.: Генезис, 2006. 319 с. EDN: RYZRZQ.
5. Нариньяни А. С. Инженерия знаний и НЕ-факторы: краткий обзор-08 // Вопросы искусственного интеллекта, 2008. № 1. С. 61–77.
6. Тарасов В. Б. От многоагентных систем к интеллектуальным организациям: философия, психология, информатика. — М.: Эдиториал УРСС, 2002. 352 с. EDN: ZQQRPP.
7. Колесников А. В. Гибридные интеллектуальные системы. Теория и технология разработки. — СПб.: СПбГТУ, 2001. 711 с.
8. Rumovskaya S. Revisiting the “Problem” and its structure // 4th Conference (International) on Technology Enhanced Learning in Higher Education Proceedings. — IEEE, 2024. P. 219–223. doi: 10.1109/TELE62556.2024.10605656.
9. Тарасенко Ф. П. Прикладной системный анализ. — М.: Кнорус, 2010. 224 с. EDN: QMUKWJ.
10. Ивин А. А. Искусство правильно мыслить. — М.: Просвещение, 1990. 240 с. EDN: TJMMWP.
11. Колесников А. В., Кириков И. А., Листопад С. В. Гибридные интеллектуальные системы с самоорганизацией: координация, согласованность, спор. — М.: ИПИ РАН, 2014. 189 с.
12. Sidky A. S., Sud R. R., Bhatia S., Arthur J. D. Problem identification and decomposition within the requirements generation process, 2002. <https://eprints.cs.vt.edu/archive/00000646/01/SCI.Paper.Submitted.Revised.pdf>.
13. Jin Z., Liu L. Towards automatic problem decomposition: An ontology-based approach // Workshop (International) on Advances and Applications of Problem Frames Proceedings. — New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2006. P. 41–48. doi: 10.1145/1138670.1138678.

14. *Sarkar S., Dong A., Gero J. S.* A problem decomposition method for conceptual design // *Research into design: Supporting multiple facets of product development*. — Singapore: Research Publishing Services, 2009. P. 59–66.
15. Автограф — универсальный графический редактор, российский аналог Microsoft Visio. <https://avtograf.pro>.
16. Business Studio. Проектирование организаций. <https://www.businessstudio.ru>.
17. MindOnMap. <https://www.mindonmap.com>.
18. *Koza J. R.* Genetic programming II: Automatic discovery of reusable programs. — Cambridge, MA, USA: MIT Press, 1994. 746 p.
19. *McIntyre A. R.* Novelty detection + coevolution = automatic problem decomposition: A framework for scalable genetic programming classifiers: PhD Thesis. — Halifax: Dalhousie University, 2007. 442 p.
20. *Khare V. R., Yao X., Sendhoff B., Jin Y., Wersing H.* Co-evolutionary modular neural networks for automatic problem decomposition // *IEEE C. Evol. Computat.*, 2005. Vol. 3. P. 2691–2698. doi: 10.1109/CEC.2005.1555032.
21. *El-Abd M.* A cooperative approach to The Artificial Bee Colony algorithm // *IEEE C. Evol. Computat.*, 2010. Art. 5586007. 5 p. doi: 10.1109/CEC.2010.5586007.
22. *Bonami P., Salvagnin D., Tramontani A.* Implementing automatic benders decomposition in a modern MIP solver // *Integer programming and combinatorial optimization* / Eds. D. Bienstock, G. Zambelli. — Lecture notes in computer science ser. — Cham: Springer, 2020. Vol. 12125. P. 78–90. doi: 10.1007/978-3-030-45771-6_7.
23. *Барашов Е. Б., Егоркин А. В., Лемтюжникова Д. В., Посыпкин М. А.* Анализ эффективности алгоритма редукции в решении задачи об упаковке в контейнеры // *Системы и средства информатики*, 2023. Т. 33. № 3. С. 61–75. doi: 10.14357/08696527230305. EDN: QDUAMY.
24. *Li F., Xu Z.* A multi-agent system for distributed multi-project scheduling with two-stage decomposition // *PLoS ONE*, 2018. Vol. 13. Iss. 10. Art. e0205445. 24 p. doi: 10.1371/journal.pone.0205445.
25. *Листонад С. В., Куриков И. А.* Разрешение конфликтов в гибридных интеллектуальных многоагентных системах // *Информатика и её применения*, 2022. Т. 16. Вып. 1. С. 54–60. doi: 10.14357/19922264220108. EDN: VHRAQC.
26. *Hung S., Givigi S. N.* A Q-learning approach to flocking with UAVs in a stochastic environment // *IEEE T. Cybernetics*, 2017. Vol. 47. Iss. 1. P. 186–197. doi: 10.1109/TCYB.2015.2509646.
27. *Ortiz S.* What is Auto-GPT? Everything to know about the next powerful AI tool, 2023. <https://www.zdnet.com/article/what-is-auto-gpt-everything-to-know-about-the-next-powerful-ai-tool>.
28. *Xiao H.* Auto-GPT unmasked: The hype and hard truths of its production pitfalls, 2023. <https://jina.ai/news/auto-gpt-unmasked-hype-hard-truths-production-pitfalls>.
29. *Егорова А. Ю., Зацман И. М., Романенко В. О.* Машинный перевод с помощью ChatGPT: мониторинг воспроизводимости результатов // *Системы и средства информатики*, 2023. Т. 33. № 3. С. 117–128. doi: 10.14357/08696527230310. EDN: LTOWWN.
30. *Huang W., Xia F., Xiao T., Chan H., Liang J., Florence P., Zeng A., Tompson J., Mordatch I., Chebotar Y., Sermanet P., Brown N., Jackson T., Luu L., Levine S., Hausman K., Ichter B.* Inner monologue: Embodied reasoning through planning with language models. — Cornell University, 2024. arXiv: 2207.05608 [cs.LG]. 25 p.

31. Park J. S., O'Brien J., Cai C. J., Morris M. R., Liang P., Bernstein M. S. Generative agents: Interactive simulacra of human behavior // 36th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology Proceedings. — New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2023. Art. 2. 22 p.
32. Колесников А. В., Листопад С. В., Денисова А. С., Колодин А. Е. Ролевые визуальные модели функциональной гибридной интеллектуальной системы с гетерогенным визуальным полем // Вестник Балтийского федерального ун-та им. И. Канта. Сер. Физико-математические и технические науки, 2017. № 4. С. 33–52. EDN: YLZWJG.

Поступила в редакцию 29.07.24

ANALYSIS OF APPROACHES TO PROBLEM STRUCTURE IDENTIFICATION IN HYBRID INTELLIGENT MULTIAGENT SYSTEMS

S. V. Listopad and I. A. Kirikov

Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119133, Russian Federation

Abstract: The complexity of automatic solution of practical problems is largely due to their weak formalization and sometimes, the absence of a clear statement at the time of their occurrence. As a result, significant time and labor costs are required for formulation, identification of the composition and structure of the problem, selection or development of methods relevant to its parts, as well as their synthesis. The paper considers the concept of the problem and develops its macro- and microlevel models, an analysis of the methods of automatic and automated identification of its structure is performed for their possible use in hybrid and synergetic artificial intelligence systems, in particular, hybrid intelligent multiagent systems for solving weakly formalized problems.

Keywords: problem; complex task; decomposition; reduction; team of specialists; hybrid intelligent multiagent system

DOI: 10.14357/08696527240304

EDN: RSLMXC

References

1. Kirikov, I. A. , A. V. Kolesnikov, and S. V. Listopad. 2017. Komp'yuternaya model' sinergii kollektivnogo prinyatiya resheniy [Computer model of synergy of team decision-making]. *Informatika i ee Primeneniya* — *Inform. Appl.* 11(3):34–41. doi: 10.14357/19922264170304. EDN: ZGIGFJ.
2. Kolesnikov, A. V., and S. V. Listopad. 2019. Protokol geterogennoy myshleniya gibridnoy intellektual'noy mnogoagentnoy sistemy dlya resheniya problemy vosstanovleniya raspredelitel'noy elektroseti [Heterogeneous thinking protocol of

- hybrid intelligent multiagent system for solving distributional power grid recovery problem]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 13(2):76–82. doi: 10.14357/19922264190211. EDN: MDLXEF.
3. Rumovskaya, S. B., A. V. Kolesnikov, and A. A. Litvin. 2019. Vizual'nyy metazyzyk opisaniya resheniya diagnosticheskikh problem [Visual metalanguage for description of solution of diagnostic problems]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 29(4):39–49. doi: 10.14357/08696527190404. EDN: XVDQLJ.
4. Spiridonov, V. F. 2006. *Psikhologiya myshleniya: Reshenie zadach i problem* [The psychology of mind: Solving of tasks and problems]. Moscow: Genesis. 319 p. EDN: RYRZQP.
5. Narinyani, A. S. 2008. Inzheneriya znaniy i NE-factory: kratkiy obzor-08 [Knowledge engineering and nonfactors: A brief overview-08]. *Voprosy iskusstvennogo intellekta* [Artificial Intelligence Issues] 1:61–77.
6. Tarasov, V. B. 2002. *Ot mnogoagentnykh sistem k intellektual'nykh organizatsiyam: Filosofiya, psikhologiya, informatika* [From multiagent systems to intelligent organizations: Philosophy, psychology, and informatics]. Moscow: Editorial URSS. 352 p. EDN: ZQQRPP.
7. Kolesnikov, A. V. 2001. *Gibridnye intellektual'nye sistemy. Teoriya i tekhnologiya razrabotki* [Hybrid intelligent systems: Theory and technology of development]. St. Petersburg: SPbGTU Publs. 711 p.
8. Rumovskaya, S. 2024. Revisiting the “Problem” and its structure. *4th Conference (International) on Technology Enhanced Learning in Higher Education Proceedings*. IEEE. 219–223. doi: 10.1109/TELE62556.2024.10605656.
9. Tarasenko, F. P. 2010. *Prikladnoy sistemnyy analiz* [Applied systems analysis]. Moscow: Knorus. 224 p. EDN: QMUKWJ.
10. Ivin, A. A. 1990. *Iskusstvo pravil'no myslit'* [The art of thinking right]. Moscow: Prosveshchenie Publs. 240 p. EDN: TJMMWP.
11. Kolesnikov, A. V., I. A. Kirikov, and S. V. Listopad. 2014. *Gibridnye intellektual'nye sistemy s samoorganizatsiey: koordinatsiya, soglasovannost', spor* [Hybrid intelligent systems with self-organization: Coordination, consistency, and dispute]. Moscow: IPI RAN. 189 p.
12. Sidky, A. S., R. R. Sud, S. Bhatia, and J. D. Arthur. 2002. Problem identification and decomposition within the requirements generation process. Available at: https://eprints.cs.vt.edu/archive/00000646/01/SCI.Paper_Submitted_Revised.pdf (accessed August 29, 2024).
13. Jin, Z., and L. Liu. 2006. Towards automatic problem decomposition: An ontology-based approach. *Workshop (International) on Advances and Applications of Problem Frames Proceedings*. New York, NY: Association for Computing Machinery. 41–48. doi: 10.1145/1138670.1138678.
14. Sarkar, S., A. Dong, and J. S. Gero. 2009. A problem decomposition method for conceptual design. *Research into design: Supporting multiple facets of product development*. Singapore: Research Publishing Services. 59–66.
15. Avtograf — universal'nyy graficheskii redaktor, rossiyskiy analog Microsoft Visio [Autograph is a universal graphic editor, the Russian analogue of Microsoft Visio]. Available at: <https://avtograf.pro> (accessed August 29, 2024).
16. Business Studio. Proektirovanie organizatsiy [Organization design]. Available at: <https://www.businessstudio.ru> (accessed August 29, 2024).

17. MindOnMap. Available at: <https://www.mindonmap.com> (accessed August 29, 2024).
18. Koza, J. R. 1994. *Genetic programming II: Automatic discovery of reusable programs*. Cambridge, MA: MIT Press. 746 p.
19. McIntyre, A. R. 2007. Novelty detection + coevolution = automatic problem decomposition: A framework for scalable genetic programming classifiers. Halifax: Dalhousie University. PhD Thesis. 442 p.
20. Khare, V. R., X. Yao, B. Sendhoff, Y. Jin, and H. Wersing. 2005. Co-evolutionary modular neural networks for automatic problem decomposition. *IEEE C. Evol. Computat.* 3:2691–2698. doi: 10.1109/CEC.2005.1555032.
21. El-Abd, M. 2010. A cooperative approach to the artificial bee colony algorithm. *IEEE C. Evol. Computat.* 5586007. 5 p. doi: 10.1109/CEC.2010.5586007.
22. Bonami, P., D. Salvagnin, and A. Tramontani. 2020. Implementing automatic benders decomposition in a modern MIP solver. *Integer programming and combinatorial optimization*. Eds. D. Bienstock and G. Zambelli. Lecture notes in computer science ser. Cham: Springer. 12125:78–90. doi: 10.1007/978-3-030-45771-6_7.
23. Barashov, E. B., A. V. Egorkin, D. V. Lemtyuzhnikova, and M. A. Posypkin. 2023. Analiz effektivnosti algoritma reduksii v reshenii zadachi ob upakovke v konteynery [Efficiency of the reduction algorithms in the bin packing problem]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 33(3):61–75. doi: 10.14357/08696527230305. EDN: QDUAMY.
24. Li, F., and Z. Xu. 2018. A multi-agent system for distributed multi-project scheduling with two-stage decomposition. *PLOS ONE* 13(10):e0205445. 24 p. doi: 10.1371/journal.pone.0205445.
25. Listopad, S. V., and I. A. Kirikov. 2022. Razreshenie konfliktov v gibridnykh intellektual'nykh mnogoagentnykh sistemakh [Conflict resolution in hybrid intelligent multiagent systems]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 16(1):54–60. doi: 10.14357/19922264220108. EDN: VHRAQC.
26. Hung, S., and S. N. Givigi. 2017. A Q-learning approach to flocking with UAVs in a stochastic environment. *IEEE T. Cybernetics* 47(1):186–197. doi: 10.1109/TCYB.2015.2509646.
27. Ortiz, S. 2023. What is Auto-GPT? Everything to know about the next powerful AI tool. Available at: <https://www.zdnet.com/article/what-is-auto-gpt-everything-to-know-about-the-next-powerful-ai-tool> (accessed August 29, 2024).
28. Xiao, H. 2023. Auto-GPT unmasked: The hype and hard truths of its production pitfalls. Available at: <https://jina.ai/news/auto-gpt-unmasked-hype-hard-truths-production-pitfalls> (accessed August 29, 2024).
29. Egorova, A. Yu., I. M. Zatsman, and V. O. Romanenko. 2023. Mashinnyy perevod s pomoshch'yu ChatGPT: monitoring vosproizvodimosti rezul'tatov [Machine translation by ChatGPT: Monitoring of outcome reproducibility]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 33(3):117–128. doi: 10.14357/08696527230310. EDN: LTOWWN.
30. Huang, W., F. Xia, T. Xiao, H. Chan, J. Liang, P. Florence, A. Zeng, J. Tompson, I. Mordatch, Y. Chebotar, P. Sermanet, N. Brown, T. Jackson, L. Luu, S. Levine, K. Hausman, and B. Ichter. 2024. Inner monologue: Embodied reasoning through planning with language models. Cornell University. 25 p. Available at: <https://arxiv.org/abs/2207.05608> (accessed August 29, 2024).

31. Park, J. S., J. O'Brien, C. J. Cai, M. R. Morris, P. Liang, and M. S. Bernstein. 2023. Generative agents: Interactive simulacra of human behavior. *36th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology Proceedings*. New York, NY: Association for Computing Machinery. Art. 2. 22 p.
32. Kolesnikov, A. V., S. V. Listopad, A. S. Denisova, and A. E. Kolodin. 2017. Rolevye vizual'nye modeli funktsional'noy gibridnoy intellektual'noy sistemy s geterogennym vizual'nym polem [Role visual models of the functional hybrid intelligent system with the heterogeneous visual field]. *Vestnik Baltiyskogo federal'nogo un-ta im. I. Kanta. Ser. Fiziko-matematicheskie i tekhnicheskie nauki* [Vestnik IKBFU. Physics, Mathematics, and Technology] 4:33–52. EDN: YLZWJG.

Received July 29, 2024

Contributors

Listopad Sergey V. (b. 1984) — Candidate of Science (PhD) in technology, senior scientist, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119133, Russian Federation; ser-list-post@yandex.ru

Kirikov Igor A. (b. 1955) — Candidate of Science (PhD) in technology, director, Kaliningrad Branch of the Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119133, Russian Federation; baltbipiran@mail.ru

МЕТОДЫ ВЕРОЯТНОСТНОГО И СТАТИСТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ НЕЯВНЫХ СТОХАСТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

*И. Н. Синицын*¹

Аннотация: Статья посвящена вероятностным (аналитическим) и статистическим методам моделирования в неявных (непрерывных, дискретных и непрерывно-дискретных) стохастических системах (СтС). Дан обзор работ в области методов вероятностного моделирования (МВМ) и методов статистического моделирования (МСМ) стохастических процессов (СтП). Основное внимание уделяется МВМ и МСМ для неявных СтС, приведенных к дифференциальным, разностным и непрерывно-дискретным уравнениям. Для МСМ разработаны дискретные алгоритмы различного порядка точности в $h/h^{1/2}$ и $h^2/h^{3/2}$ неявных СтС с гладкими функциями. Получены результаты для негладких неявных функций в рамках корреляционной теории на основе регрессионной линеаризации, а также параметризации одно- и многомерных плотностей распределения, в том числе с помощью канонических разложений с независимыми компонентами. Подробно рассмотрены примеры с неявными гладкими и разрывными функциями. Определены направления дальнейших исследований.

Ключевые слова: вероятностное (аналитическое) моделирование; неявная стохастическая система; сильная и слабая аппроксимация; статистическое моделирование; стохастическая система, не разрешенная относительно производной (разности)

DOI: 10.14357/08696527240305

EDN: RTNRUZ

1 Введение

В статьях [1–4] рассмотрены вопросы вероятностного (аналитического) моделирования процессов в СС, не разрешенных относительно производных (НРОП). Большое внимание в них уделено нормальным (гауссовским) СтП. В [5] разработаны методы нормализации систем, стохастически НРОП. Теория распределений с инвариантной мерой в СтС НРОП развита в [6]. В [7] дано обобщение [1–4] на случай СтС НРОП со случайными параметрами. Для СтС НРОП, допускающих приведение к системе дифференциальных и конечных стохастических уравнений, могут быть использованы известные методы численного интегрирования [8–10]. В [11, 12] предложен ряд численных методов интегрирования стохастических дифференциальных уравнений, основанных на использовании обобщенной формулы Ито, а также канонических разложений СтП. В [13] рассмотрены методы численного интегрирования уравнений дифференциальных СтС НРОП, приводимых к дифференциальным СтС.

¹Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук, sinitsin@dol.ru

Рассмотрим МСМ в неявных дискретных и непрерывно-дискретных СтС, т. е. НРОП (разностей). Особое внимание уделим негладким неявным СтС.

2 Неявные стохастические системы

2.1 Приводимые дифференциальные системы

Рассмотрим сначала дифференциальную СтС с нелинейностями, описываемыми гладкими скалярными детерминированными функциями:

$$\Phi = \Phi(t, Y_t, \dot{Y}_t, \dots, Y_t^{(k)}, U_t) = 0, \\ Y(t_0) = Y_0, \dot{Y}(t_0) = \dot{Y}_0, \dots, Y^{(k)}(t_0) = Y_0^{(k)}. \quad (1)$$

При этом уравнение нелинейного формирующего фильтра для стохастических возмущений U_t возьмем в виде, разрешенном относительно белых шумов:

$$\dot{U}_t = a^U(t, U_t) + b^U(t, U_t) V_t^U, \quad U(t_0) = U_0. \quad (2)$$

Здесь $a^U = a^U(t, U_t)$ и $b^U(t, U_t)$ — $(n^Y \times 1)$ - и $(n^Y \times n^V)$ -мерные функции; V_t^U — белый шум в строгом смысле [11], допускающий представление вида

$$V_t^U = \dot{W}_t^U, \quad W_t^U = W_0^U(t) + \int_{R_0^q} c^U(\rho) P^0(t, d\rho),$$

где ν_t — его интенсивность:

$$\nu_t = \nu_t^W = \nu_t^{W_0} + \int_{R_0^q} c^U(\rho) [c^U(\rho)]^T \nu_P(t, \rho) d\rho;$$

$c^U = c^U(\rho)$ — известная векторная функция той же размерности, что и W_0^U ; интеграл при любом $t \geq t_0$ представляет собой стохастический интеграл по центрированной пуассоновской мере $P^0(t, \mathcal{A})$, независимой от W_0^U и имеющей независимые значения на попарно непересекающихся множествах; $\mathcal{A}$ — борелевское множество пространства R_0^q с выколотым началом; ν_t^W , $\nu_t^{W_0}$ и ν_P — интенсивности СтП W_t^U , W_0^U и P^0 . Уравнение (2) понимается в смысле Ито и имеет единственное решение в среднеквадратичном [11].

Для гладких неявных функций в (1), допускающих стохастические производные Ито до h -го порядка, выполним следующие преобразования. Будем дифференцировать по t левые части уравнений (1) по обобщенной формуле

Ито [11] до тех пор, пока не появятся производные белого шума. В результате получим следующую систему нелинейных дифференциальных уравнений:

$$\Phi = 0, \dot{\Phi} = 0, \dots, \Phi^{(h)} = 0. \quad (3)$$

Далее введем вектор

$$Z_t = [\bar{Y}_t^T X_t^T]^T,$$

составленный из вектора

$$\bar{Y}_t = [Y_t^T Y_t^T \dots Y_t^{(k-1)T}]^T$$

и вспомогательного вектора X_t , определяемого уравнениями (3). В результате придем к векторному уравнению, разрешенному относительно дифференциалов, следующего вида:

$$dZ_t = a^Z dt + b^Z dW_0 + \int_{R_0^q} c^Z P^0(t, d\rho), \quad (4)$$

где $a^Z = a^Z(t, Z_t)$; $b^Z = b^Z(t, Z_t)$; $c^Z = c^Z(t, Z_t, u)$.

Таким образом, имеем следующее утверждение.

Теорема 2.1. Пусть неявная нелинейная негауссовская СтС (1), (2), НРОП k -го порядка, удовлетворяет условиям:

- 1⁰ неявные функции (1) допускают обобщенные стохастические дифференциалы Ито вплоть до h -го порядка включительно;
- 2⁰ уравнение (2) разрешено относительно белых шумов и имеет единственное среднеквадратичное решение.

Тогда неявная система (1), (2) приводима к дифференциальной системе, разрешенной относительно производных (4).

Положим, что в (1) стохастическое возмущение U_t является автокоррелированным СтП и описывается стохастическим дифференциальным уравнением вида

$$\begin{aligned} U_t^{(n)} + \sum_{k=n-m}^{n-1} \alpha_k^U(t, U_t, \dot{U}_t, \dots, U_t^{(n-m-1)}) U_t^{(k)} + \alpha_0^U(t, U_t, \dot{U}_t, \dots, U_t^{(n-1)}) = \\ = \sum_{h=1}^m \beta_h \left(t, U_t, \dot{U}_t, \dots, U_t^{(n-m-1)} \right) V_t^{(h)}. \end{aligned} \quad (5)$$

Здесь $n = n^U$ — порядок дифференциального уравнения, причем $0 < n^U < n$; α_0^U , α_k^U и β_k^U — известные функции отмеченных переменных.

Пусть теперь компоненты СтП $Y_t, \dot{Y}_t, \dots, Y_t^{(k)}$ более гладкие, чем U_t . В этом случае для приведения уравнений (1), (5) к (4) можно применить способ, основанный на дифференцировании (1) при исключении U_t и ее производных, не содержащих белого шума из уравнений (1) и уравнений, полученных из него дифференцированием (5) по обобщенной формуле Ито [11]. В результате придем к следующему уравнению вида (4):

$$d\bar{Z}_t = \bar{a}^Z dt + \bar{b}^Z dW_0 + \int_{R_0^q} \bar{c}^Z P^0(t, du), \quad (6)$$

где $\bar{a}^Z = \bar{a}^Z(t, \bar{Z}_t)$; $\bar{b}^Z = \bar{b}^Z(t, \bar{Z}_t)$; $\bar{c}^Z = \bar{c}^Z(t, \bar{Z}_t, u)$.

Таким образом, получаем следующий результат.

Теорема 2.2. Пусть неявная нелинейная негауссовская СтС (1), (5) удовлетворяет условиям:

- 1⁰ функции (1) допускают обобщенные стохастические дифференциалы Ито вплоть до h -го порядка включительно;
- 2⁰ уравнение (5) имеет единственное среднеквадратичное решение;
- 3⁰ СтП $Y_t, \dot{Y}_t, \dots, Y_t^{(k)}$ более гладкие, чем возмущение U_t .

Тогда система (1), (5) приводима к системе (6).

Аналогично [1–6] рассматривается случай неявных векторных дифференциальных уравнений.

Для гладких неявных вектор-функций (3) в (1) конечные неявные уравнения (1) допускают гладкую замену переменных и приведение исходных дифференциальных уравнений СтС НРОП к системе, состоящей из векторного дифференциального стохастического уравнения Ито

$$d\bar{Y}_t = a^Y(t, \bar{Y}_t) dt + b^Y(t, \bar{Y}_t) dW_0 + \int_{R_0^q} c^Y(t, \bar{Y}_t, u) P^0(t, d\rho) \quad (7)$$

и конечного векторного уравнения

$$\Psi(\bar{Y}_t, X_t, t) = 0. \quad (8)$$

2.2 Приводимые разностные системы

Как показано в [13], приводимые неявные разностные СтС описываются следующими уравнениями:

$$\begin{aligned} Y_{k+1} &= \Omega_k(Y_k, V_k), & \Psi_k(Y_k, X_k) &= 0, & k &= 1, 2, \dots; \\ Y_{k+1} &= a_k(Y_k) + b_k(Y_k)V_k, & \Psi_k(Y_k, X_k) &= 0, & k &= 1, 2, \dots \end{aligned}$$

Здесь функции $\Omega_k(y_k, v_k)$, $a_k(y_k)$ и $b_k(y_k)$ имеют размерность $(n_y \times 1)$, $(n_y \times 1)$ и $(n_y \times n_v)$ соответственно.

2.3 Приводимые непрерывно-дискретные системы

Следуя [11, 14], в качестве моделей СтС, не разрешенных относительно производных и разностей, возьмем следующие:

$$Y = Y' + Y''; \quad \Psi(Y, X) = 0; \quad (9)$$

$$dY' = a'(t, Y)dt + b'(t, Y)dW_0 + \int_{R_0^q} c'(t, Y, u)P^0(t, d\rho); \quad (10)$$

$$\dot{Y}'' = \sum_{k=0}^{\infty} Y_k'' \mathbf{1}_{A_k}(t); \quad (11)$$

$$Y_{k+1}'' = \Omega_k''(Y_k, V_k); \quad \Psi_k(Y_k, X_k) = 0; \quad (12)$$

$$Y_{k+1}'' = a_k''(Y_k) + b_k''(Y_k)V_k; \quad \Psi_k(Y_k, X_k) = 0. \quad (13)$$

Здесь

$$Y_k = Y(t_k) = \left[Y_k'^T Y_k''^T \right]^T \quad (k = 0, 1, 2, \dots);$$

$\mathbf{1}_{A_k}(t)$ — индикатор интервала; $A_k = [t^{(k)}, t^{(k+1)})$; $\{V_k\}$ — последовательность дискретных белых шумов (независимых векторных случайных величин (СВ), в том числе и от W_0 и P).

Замечание 2.1. Методы вероятностного (аналитического) моделирования неявных дифференциальных СтС подробно рассмотрены в [1–7]. Поэтому ограничимся МСМ для неявных дискретных и непрерывно-дискретных систем.

3 Методы статистического моделирования

3.1 Методы порядка $h/h^{1/2}$

Обобщая результаты [13] на случай приведенных непрерывно-дискретных уравнений (9), (10) и (13), приходим к следующему результату (**теорема 3.1**):

$$\begin{aligned} \bar{Y}_{n+1} &= \varphi_n(\bar{Y}_n) + \psi_n(\bar{Y}_n)V_n, \quad \bar{Y}_n = \bar{Y}_n' + \bar{Y}_n''; \\ \Psi(\bar{Y}_n, X_n) &= 0. \end{aligned} \quad (14)$$

Здесь введены следующие допущения и обозначения:

- (1) случайные векторы V_n образуют последовательность независимых случайных векторов $\{V_n\}$, причем блоки V_{1n} векторов V_n имеют нормальное (гауссовское) распределение $\aleph(0, \bar{G}_n)$, где

$$\bar{G}_n = \int_{nh}^{(n+1)h} \nu_0(\tau) d\tau \cong \nu_0(nh)h,$$

$\nu_0(t)$ — интенсивность винеровского СтП $W_0(t)$;

- (2) скалярные блоки V_{in} ($i = \overline{2, N+1}$) имеют пуассоновские распределения с параметрами

$$\mu_{in} = \int_{nh}^{(n+1)h} \nu_i(\tau) d\tau \cong \nu_i(nh)h;$$

- (3) ковариационная матрица G_n вектора V_n представляет собой блочно-диагональную матрицу:

$$G_n = \begin{bmatrix} \bar{G}_n & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \mu_{2n} & 0 & \ddots & 0 \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & \mu_{N+1,n} \end{bmatrix};$$

- (4) уравнение (10) заменено на следующее:

$$dY = a(t, Y) dt + b(t, Y) dW_0 + \sum_{i=1}^N c_i(t, Y) dP_i^0,$$

где $c_i(t, y)$ — n_y -мерные векторные функции, представляющие собой значения функции $c(t, y, v)$ в некоторых средних точках u_i соответствующих элементов A_i разбиения r -мерного шара достаточно большого радиуса; $u_i \in A_i$ ($i = \overline{1, N}$); $P_i^0(t)$ — центрированные простые пуассоновские СтП

$$P_i^0(t) = P^0([0, t], A_i) - \mu([0, t], A_i), \quad i = \overline{1, N}.$$

Интенсивности этих СтП определяются через математическое ожидание $\mu(\Delta, A)$ пуассоновской меры $P(\Delta, A)$ по формуле:

$$\nu_i(t) = \frac{d\mu([0, t], A_i)}{dt};$$

- (5) введены обозначения [11, 12]:

$$\begin{aligned} \bar{Y}_n &= Y(nh); \\ \varphi'_n(\bar{Y}_n) &= Y(nh) + a'(Y(nh), nh)h; \\ \psi'_{1n}(\bar{Y}_n) &= b'(Y(nh), nh), \quad \psi_{in}(\bar{Y}_n) = c_{i-1}(Y(nh), nh); \\ V_{1n} &= W_0((n+1)h) - W_0(nh), \quad V_{in} = P_{i-1}^0((n+1)h) - P_{i-1}^0(nh), \\ &\quad i = \overline{2, N+1}; \\ \varphi_n(\bar{Y}_n) &= \begin{bmatrix} a'(\bar{Y}_n)h \\ a''(\bar{Y}_n)h \end{bmatrix}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\psi_{1n}(\bar{Y}_n) &= \begin{bmatrix} b'(\bar{Y}_n) & 0 \\ 0 & b''(\bar{Y}_n) \end{bmatrix}; \\
\psi_n(\bar{Y}_n) &= [\psi_{1n}(\bar{Y}_n) \dots \psi_{N+1,n}(\bar{Y}_n)]; \\
V_n &= [V_{1n}^T V_{2n} \dots V_{N+1,n} V_n''^T]^T.
\end{aligned} \tag{15}$$

Уравнение (14) определяет $\bar{Y}_{n+1}$ при данном $\bar{Y}_n$ с точностью до h в детерминированном слагаемом $\varphi_n(\bar{Y}_n)$ и с точностью до $\sqrt{h}$ в случайном слагаемом $\psi_n(\bar{Y}_n)V_n$.

Соответствующее обобщение на случай гауссовых и пуассоновых СВ в (13) (**теорема 3.2**) немедленно получается путем расширения вектора V_n в (15):

$$V_n = [V_{1n}'^T V_{2n}' \dots V_{N+1,n}' V_{1n}''^T V_{2n}'' \dots V_{N+1,n}'']^T.$$

Аналогично формулируются результаты для уравнения (12).

3.2 Методы порядка $h^2/h^{3/2}$

Для приведенных уравнений (7) и (8) с точностью до h^2 в детерминированном слагаемом и $h^{3/2}$ в случайном слагаемом, следуя [11, 12], имеем следующую **теорему 3.3**:

$$\bar{Y}_{n+1} = \varphi_n(\bar{Y}_n) + \psi_n(\bar{Y}_n, V_n^{(1)}) V_n, \quad \bar{Y}_n = \bar{Y}_n' + \bar{Y}_n''; \tag{16}$$

$$\Psi(\bar{Y}_n, X_n) = 0. \tag{17}$$

Входящие в уравнения (16) и (17) величины определяются формулами:

$$\begin{aligned}
\varphi_n(\bar{Y}_n) &= \bar{Y}_n + \left[a(\bar{Y}_n, nh) - \sum_{j=1}^N c_j(\bar{Y}_n, nh) \nu_{jn} \right] h + \\
&+ \frac{1}{2} \left\{ a_t(\bar{Y}_n, nh) - \sum_{j=1}^N c_{jt}(\bar{Y}_n, nh) \nu_{jn} + [a_y(\bar{Y}_n, nh)]^T - \right. \\
&- \sum_{j=1}^N c_{jy}(\bar{Y}_n, nh)^T \nu_{jn} \left. \right] \left[a(\bar{Y}_n, nh) - \sum_{j=1}^N c_j(\bar{Y}_n, nh) \nu_{jnt} \right] + \\
&+ \frac{1}{3} \left[a_{yy}(\bar{Y}_n, nh) - \sum_{j=1}^N c_{jyy}(\bar{Y}_n, nh) \nu_{jn} \right] : \sigma(\bar{Y}_n, nh) \left. \right\} h^2;
\end{aligned}$$

$$\psi_{1n}(\bar{Y}_n) = b(\bar{Y}_n, nh) + \frac{1}{2} \left[a_y(\bar{Y}_{nh}, nh)^T - \sum_{j=1}^N c_j(\bar{Y}_n, hn)^T \nu_{jn} \right] b(\bar{Y}_n, nh);$$

$$\psi_{in}(\bar{Y}_n) = c_{i-1}(\bar{Y}_n, nh) + \left[\Delta_{i-1} a_n - \sum_{j=1}^N \Delta_{i-1} c_{jn} \nu_{jn} \right] h;$$

$$\begin{aligned} \psi'_{1n}(Y_n, V_n^{(1)}) = \\ = \left\{ b(\bar{Y}_n, nh) + \left[a(\bar{Y}_n, nh)^T - \sum_{j=1}^N c_j(\bar{Y}_n, hn)^T \nu_{jn} \right] \frac{\partial}{\partial y} b(\bar{Y}_n, nh) + \right. \\ \left. + V_{1n}^T b(\bar{Y}_n, nh)^T \frac{\partial}{\partial y} b(\bar{Y}_n, nh) \right\} h + \sum_{j=1}^N \Delta_j b_n V_{j+1,n}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \psi'_{in}(\bar{Y}_n, V_n^{(1)}) = \\ = \left\{ c_{i-1,t}(\bar{Y}_n, nh) + c_{i-1,y}(\bar{Y}_n, nh)^T \left[a(\bar{Y}_n, nh) - \sum_{j=1}^N c_j(\bar{Y}_n, hn) \nu_{jn} \right] \right\} h + \\ + c_{i-1,y}(\bar{Y}_n, nh)^T b(\bar{Y}_n, nh) V_{1,n} + \sum_{j=1}^N \Delta_j c_{j-1,n} V_{j+1,n}; \end{aligned}$$

$$\psi''_{1n}(\bar{Y}_n) = \frac{1}{2} [b_{yy}(\bar{Y}_n, nh) : \sigma(\bar{Y}_n, nh)];$$

$$\psi''_{in}(\bar{Y}_n) = \frac{1}{2} [c_{i-1,yy}(\bar{Y}_n, nh) : \sigma(\bar{Y}_n, nh)];$$

$$V_{1n} = \Delta W_n = W_0((n+1)h) - W_0(nh);$$

$$V_{in} = \Delta P_{i-1,n} = P_{i-1}((n+1)h) - P_{i-1}(nh), \quad i = \overline{2, N};$$

$$V'_{1n} = \int_{nh}^{(n+1)h} \frac{\tau - nh}{h} dW_0(\tau); \quad V''_{1n} = \int_{nh}^{(n+1)h} \left(\frac{\tau - nh}{h} \right)^2 dW_0(\tau);$$

$$V'_{in} = \int_{nh}^{(n+1)h} \frac{\tau - nh}{h} dP_{i-1}^0(\tau), \quad i = \overline{2, N+1}; \quad (18)$$

$$V_{in}'' = \int_{nh}^{(n+1)h} \left(\frac{\tau - nh}{h} \right)^2 dP_{i-1}^0(\tau), \quad i = \overline{2, N+1}. \quad (19)$$

Здесь введены следующие обозначения для векторных функций:

$$[\varphi_{yy} : \sigma]_k = \text{tr} [\varphi_{ky} \sigma], \quad \sigma = b\nu_0(t)b^T.$$

Величина $\varphi_{yy} : \sigma$ в случае матричной функции φ представляет собой матрицу, элементами которой служат следы произведений на матрицу σ матриц вторых производных соответствующих элементов матрицы φ по компонентам вектора y на матрицу σ : $[\varphi_{yy} : \sigma]_{kl} = \text{tr}[\varphi_{klyy}\sigma]$. Наконец, обозначим

$$V_n^{(1)} = [V_{1n}^T \ V_{2n} \ \cdots \ V_{n+1}]^T,$$

введем блочную матрицу

$$\begin{aligned} \psi_n \left(\bar{Y}_n, V_n^{(1)} \right) = & \left[\psi_{1n} \left(\bar{Y}_n \right) \ \psi'_{1n} \left(\bar{Y}_n, V_n^{(1)} \right) \ \psi''_{1n} \left(\bar{Y}_n \right) \ \cdots \right. \\ & \left. \cdots \ \psi_{N+1,n} \left(\bar{Y}_n \right) \ \psi'_{N+1,n} \left(\bar{Y}_n, V_n^{(1)} \right) \ \psi''_{N+1,n} \left(\bar{Y}_n \right) \right] \end{aligned}$$

и блочный случайный вектор

$$V_n = \left[V_{1n}^T \ V_{1n}'^T \ V_{1n}''^T \ V_{2n}^T \ V_{2n}'^T \ V_{2n}''^T \ \cdots \ V_{N+1,n} \ V_{N+1,n}' \ V_{N+1,n}'' \right]^T.$$

Замечание 3.1. Для полного определения распределения случайного вектора V_n в (16) достаточно найти ковариационную матрицу нормально распределенного случайного вектора $[V_{in}^T \ V_{in}'^T \ V_{in}''^T]^T$. Пользуясь известными формулами ковариационных и взаимных ковариационных матриц стохастических интегралов, находим блоки ковариационной матрицы K_{1n} случайного вектора $[V_{in}^T \ V_{in}'^T \ V_{in}''^T]^T$:

$$\begin{aligned} K_{1n,11} = MV_{1n}V_{1n}^T &= \int_{nh}^{(n+1)h} \nu_0(\tau) d\tau \cong \nu_0 \left(nh + \frac{h}{2} \right) h; \\ K_{1n,12} = MV_{1n}V_{1n}'^T &= \int_{nh}^{(n+1)h} \frac{\tau - nh}{h} \nu_0(\tau) d\tau \cong \frac{1}{2} \nu_0 \left(nh + \frac{h}{2} \right) h; \\ K_{1n,13} = MV_{1n}V_{1n}''^T &= \int_{nh}^{(n+1)h} \left(\frac{\tau - nh}{h} \right)^2 \nu_0(\tau) d\tau \cong \frac{1}{3} \nu_0 \left(nh + \frac{h}{2} \right) h; \end{aligned}$$

$$K_{1n,21} = K_{1n,12}; \quad K_{1n,31} = K_{1n,13};$$

$$K_{1n,23} = MV_{1n} V_{1n}^{\prime T} = \int_{nh}^{(n+1)h} \left(\frac{\tau - nh}{h} \right)^3 \nu_0(\tau) d\tau \cong \frac{1}{4} \nu_0 \left(nh + \frac{h}{2} \right) h;$$

$$K_{1n,31} = K_{1n,13}; \quad K_{1n,32} = K_{1n,23};$$

$$K_{1n,33} = MV_{1n}'' V_{1n}^{\prime T} = \int_{nh}^{(n+1)h} \left(\frac{\tau - nh}{h} \right)^4 \nu_0(\tau) d\tau \cong \frac{1}{5} \nu_0 \left(nh + \frac{h}{2} \right) h.$$

Замечание 3.2. Практически целесообразно аппроксимировать стохастические интегралы от неслучайных функций в (18) и (19), определяющие величины V_{in}' и V_{in}'' ($i = \overline{2, N+1}$), с помощью аналога интегральной теоремы о среднем для стохастических интегралов:

$$V_{in}' = \int_{nh}^{(n+1)h} \frac{\tau - nh}{h} dP_{i-1}^0(\tau) \cong \left[\frac{\int_{nh}^{(n+1)h} ((\tau - nh)/h) \nu_{i-1}(\tau) d\tau}{\int_{nh}^{(n+1)h} \nu_{i-1}(\tau) d\tau} \right] \times \\ \times \Delta P_{i-1,n} \cong \frac{1}{2} \Delta P_{i-1,n} = \frac{1}{2} V_{in}, \quad i = \overline{2, N+1};$$

$$V_{in}'' = \int_{nh}^{(n+1)h} \left(\frac{\tau - nh}{h} \right)^2 dP_{i-1}^0(\tau) \cong \left[\frac{\int_{nh}^{(n+1)h} ((\tau - nh)/h)^2 \nu_{i-1}(\tau) d\tau}{\int_{nh}^{(n+1)h} \nu_{i-1}(\tau) d\tau} \right] \times \\ \times \Delta P_{i-1,n} \cong \frac{1}{3} \Delta P_{i-1,n} = \frac{1}{3} V_{in}, \quad i = \overline{2, N+1}.$$

Замечание 3.3. Полученные разностные уравнения можно использовать как при теоретических исследованиях, так и для численного интегрирования стохастических дифференциальных уравнений. При этом нужно знать распределение всех СВ, входящих в разностные уравнения. В данном случае разностные уравнения будут представлять собой так называемую сильную аппроксимацию стохастических дифференциальных уравнений. При численном интегрировании такая аппроксимация нужна, когда требуется получать реализации

СтП $Y(t)$. Однако часто нет нужды в получении реализаций СтП, а достаточно иметь лишь оценки моментов или математических ожиданий каких-либо функций от значения СтП $Y(t)$ в определенный момент. В таких случаях можно отказаться от использования точных распределений входящих в разностные уравнения СВ, а заменить их какими-нибудь более простыми распределениями с теми же моментными характеристиками. Например, нормально распределенную скалярную величину с нулевым математическим ожиданием и дисперсией D можно заменить дискретной СВ, принимающей два значения $\pm\sqrt{D}$ с вероятностями $1/2$. При замене СВ на величины с более простыми распределениями разностное уравнение будет представлять собой слабую аппроксимацию стохастического дифференциального уравнения.

Замечание 3.4. Более точные методы статистического моделирования рассматриваются на основе [11–13].

4 Особенности статистического моделирования негладких неявных стохастических систем

Методы статистического моделирования для различных уровней точности аппроксимации, основанные на численном интегрировании уравнений дифференциальных СтС НРОП, приводимых к дифференциальным системам, применимы только к приведенным системам (7) и (8) с гладкими неявными нелинейными функциями.

Для негладких неявных нелинейных функций в исходных уравнениях (1) в рамках корреляционной теории, как показано в [3–6], целесообразно сразу применить регрессионную линеаризацию или полиномиальную аппроксимацию. В результате приходим к уравнениям (7) и (8), линеаризованным или полиномиальным стохастическим уравнениям, параметрически зависящим от первых двух вероятностных моментов переменных X и Y . Эти вероятностные моменты определяются или непосредственно статистическим, или аналитическим моделированием путем численного интегрирования обыкновенных дифференциальных уравнений для вероятностных моментов первого и второго порядка [11, 12]. Для полиномиальных моделей аппроксимации приходится решать обыкновенные дифференциальные уравнения для параметризованных одно- и многомерных плотностей. Такие методы моделирования называют комбинированными вероятностно-статистическими. К последним также относят методы моделирования СтС НРОП со случайными параметрами [7] как на основе канонических представлений случайных функций, так и прямого статистического моделирования уравнений для параметров одно- и многомерных плотностей. Соответствующие примеры даны в [7].

Рассмотрим подробнее алгоритм статистического моделирования приведенной дифференциальной СтС после регрессионной линеаризации применительно к следующей векторной дифференциальной системе:

$$dY = [a_0(t, \theta) + a_1(t, \theta)Y] dt + b(t, \theta) dW_0 + \sum_{i=1}^N c_i(t, \theta) dP_i^0, \quad (20)$$

где $\theta = \{m^Y, K^Y\}$; m — вектор математического ожидания; K^Y — ковариационная матрица. Разностное уравнение (20) принимает вид:

$$\bar{Y}_{n+1} = \bar{Y}_n + [a_0(nh, \theta_n) + a_1(nh, \theta_n)\bar{Y}_n] h + b(nh, \theta_n)V_{1n} + \sum_{i=1}^N c_i(nh, \theta_n)V_{i+1,n}.$$

Применяя формулу дифференцирования сложной функции $a(Y_\tau, \tau, \theta) = a_0(\tau, \theta) + a_1(\tau, \theta)Y_{\tau, \theta}$ для вычисления $a_0(\tau, \theta) + a_1(\tau, \theta)(Y_n + (\tau - nh)\Delta Y_n/h)$, получим

$$\begin{aligned} a_0(\tau, \theta) + a_1(\tau, \theta)\bar{Y}_\tau &\cong a_0(nh, \theta_n) + a_1(nh, \theta_n)\bar{Y}_n + \\ &+ [a_{0t}(nh, \theta_n) + a_{1t}(nh, \theta_n)\bar{Y}_n](\tau - nh) + a_1(nh, \theta_n)\Delta Y_n \left(\frac{\tau - nh}{h} \right). \end{aligned}$$

Здесь индекс t по-прежнему означает дифференцирование по времени t . Что касается функций b и c_i , то, поскольку они не зависят от $\bar{Y}_\tau$, их приращения можно просто вычислить путем линейной интерполяции на интервале $(nh, (n+1)h)$:

$$\begin{aligned} b(\tau, \theta) &= b(nh, \theta_n) + \Delta b(nh, \theta_n)(\tau - nh), \\ c_i(\tau, \theta) &= c_i(nh, \theta_n) + \Delta c_i(nh, \theta_n)(\tau - nh), \\ \Delta b(nh, \theta_n) &= b((n+1)h, \theta_n) - b(nh, \theta_n), \\ \Delta c_i(nh, \theta_n) &= c_i((n+1)h, \theta_n) - c_i(nh, \theta_n). \end{aligned}$$

В результате для стохастических интегралов получим следующее выражение:

$$\begin{aligned} \Delta Y_n &= [a_0(nh, \theta_n) + a_1(nh, \theta_n)\bar{Y}_n] h + \frac{1}{2} [a_{0t}(nh, \theta_n) + a_{1t}(nh, \theta_n)\bar{Y}_n] h^2 + \\ &+ \frac{h}{2} a_1(nh, \theta_n) \Delta Y_n + b(nh, \theta_n) V_{1n} + \sum_{i=1}^N c_i(nh, \theta_n) V_{i+1,n} + \Delta b(nh, \theta_n) h V'_{1n} + \\ &+ \sum_{i=1}^N \Delta c_i(nh) h V''_{i+1,n}. \quad (21) \end{aligned}$$

Таким образом, приходим к линейному алгебраическому уравнению относительно ΔY_n . Для асимптотически устойчивой системы это уравнение всегда имеет единственное решение, так как при любом t все корни определителя матрицы $\lambda I - a_1(t)$ лежат строго в левой полуплоскости комплексной переменной λ ,

а корни определителя матрицы $\lambda I - ha_1(t)/2$, очевидно, равны соответствующим корням определителя матрицы $\lambda I - a_1$, умноженным на $h/2$. Следовательно, $\lambda = 1$ не может быть корнем определителя матрицы $\lambda I - ha_1/2$, а значит, матрица $I - ha_1/2$ обратима. Решив уравнение (21) относительно $\Delta Y_n = \bar{Y}_{n+1} - \bar{Y}_n$, получим разностное уравнение (**теорема 4.1**)

$$\bar{Y}_{n+1} = A_{0n} + A_{1n}\bar{Y}_n + B_n V_n,$$

где

$$\begin{aligned} A_{0n}(\theta_n) &= \left[I - \frac{ha_1(nh, \theta_n)}{2} \right]^{-1} \left[a_0(nh, \theta_n)h + \frac{a_{0t}(nh)h^2}{2} \right]; \\ A_{1n}(\theta_n) &= I_n + \left[I - \frac{ha_1(nh, \theta_n)}{2} \right]^{-1} \left[a_1(nh, \theta_n)h + \frac{a_{1t}(nh, \theta_n)h^2}{2} \right]; \\ B_n(\theta_n) &= \left[I - \frac{ha_1(nh, \theta_n)}{2} \right]^{-1} [b(nh, \theta_n) \Delta b(nh, \theta_n) hc_1(nh, \theta_n) \Delta c_1(nh, \theta_n) \cdots \\ &\quad \cdots c_N(nh, \theta_n) \Delta c_N(nh, \theta_n)]; \\ V_n &= \begin{bmatrix} V_{1n}^T & V_{1n}'^T & V_{2n} & V_{2n}'^T & \cdots & V_{N+1,n} & V_{N+1,n}'^T \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

5 Пример

Рассмотрим одномерную дифференциальную СтС вида (1), (2):

$$\varphi(\dot{Y}, Y, U) = \varphi_0(\dot{Y}) + aY + bU = 0 \quad (22)$$

$$\dot{U} = a_1U + b_1V, \quad (23)$$

где $\varphi_0(\dot{Y})$ — гладкая функция; a , b , a_1 и b_1 — постоянные параметры; V — гауссовский (нормальный) скалярный белый шум интенсивности ν .

Выполним следующие преобразования: продифференцируем по формуле Ито уравнение (22), учтем (23) и перейдем к новым переменным:

$$X_1 = Y; \quad X_2 = \dot{Y}; \quad X_3 = \dot{X}_2; \quad X_4 = U. \quad (24)$$

В результате приходим к следующей приведенной нелинейной системе дифференциальных и конечных уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \dot{X}_1 &= X_2; \\ \dot{X}_2 &= X_3; \\ \dot{X}_4 &= a_1 X_4 + b_1 V; \\ \varphi_0(X_2) + aX_1 + bX_4 &= 0; \\ \frac{\partial \varphi_0}{\partial X_2} X_3 &= aX_2 + ba_1 X_4 + bb_1 V. \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

Решение (25) выполним в виде шести шагов:

шаг 1: из третьего уравнения находим $X_4 = \tilde{X}_4(t)$;

шаг 2: из пятого уравнения путем приравнивания $\dot{X}_2$ находим

$$X_3 = \tilde{X}_3(t) = - \left(\frac{\partial \varphi_0}{\partial X_2} \right)^{-1} (aX_2 + ba_1 \tilde{X}_4 + bb_1 V); \quad (26)$$

шаг 3: из третьего уравнения с учетом (26) имеем

$$\dot{X}_2 = - \left(\frac{\partial \varphi_0}{\partial X_2} \right)^{-1} (aX_2 + ba_1 \tilde{X}_4 + bb_1 V); \quad (27)$$

шаг 4: из четвертого уравнения получаем

$$X_1 = -a^{-1} [b\tilde{X}_4(t) + \varphi_0(X_2)]; \quad (28)$$

шаг 5: решаем уравнение относительно X_2

$$\dot{X}_2 = - \left(\frac{\partial \varphi_0}{\partial X_2} \right) [aX_2 + ba_1 \tilde{X}_4(t) + bb_1 V]; \quad (29)$$

шаг 6: находим $X_3 = \tilde{X}_3(t)$ согласно уравнениям (29) и второму (25).

В частности, при $\varphi_0 = X_2^3$ следует положить в (22)–(29) $\partial \varphi_0 / \partial X_2 = 3X_2^2$.

Для разрывной функции $\varphi_0 = \varphi_0(X_2) = \text{sgn } X_2$ после статистической линеаризации

$$\varphi_0 \approx \bar{\varphi}_{00} + k_{01} X_2,$$

где

$$\bar{\varphi}_{00} = \bar{\varphi}_{00}(m_2, D_2) = \varphi_{00}(m_2, D_2) - k_{01}(m_2, D_2)m_2, \quad D_2 = DX_2,$$

$$k_{01} = \frac{\partial \varphi_0}{\partial m_2}, \quad \varphi_{00}(\zeta) = 2\Phi(\zeta), \quad \zeta = \frac{m_2}{\sqrt{D_2}}, \quad \Phi(\zeta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^\zeta e^{-t^2/2} dt,$$

получим приведенные линейные регрессионные уравнения задачи для переменных $X_1 = Y$, $\dot{X}_1 = X_2$ и $X_3 = U$:

$$\dot{X}_1 = X_2; \quad \dot{X}_3 = a_1 X_3 + b_1 V; \quad \bar{\varphi}_{00} + k_{01} X_2 + a X_1 + b X_3 = 0. \quad (30)$$

Первые два уравнения (30) через m_2 и D_2 связаны между собой параметрически. Их можно найти МВМ или путем решения следующих обыкновенных дифференциальных уравнений для математических ожиданий и элементов ковариационной матрицы (дисперсий и взаимных ковариационных моментов):

$$\dot{m}_1 = -k_{01}^{-1} (\bar{\varphi}_{00} + a m_1); \quad \dot{m}_3 = a_1 m_3;$$

$$\dot{D}_1 = -2k_{01}^{-1} (a D_1 + b K_{13}); \quad \dot{D}_3 = 2a_1 D_3 + b_1^2 \nu; \quad \dot{K}_{13} = -k_{01}^{-1} (a K_{13} + b D_3)$$

при соответствующих начальных условиях. При больших шумах коэффициенты $\bar{\varphi}_{00}$ и k_{01} падают, что вызывает увеличение m_1 и D_1 .

Аналогично рассматривается случай, когда возмущение $U = U_k$ представляет собой дискретный СтП, определяемый дискретным уравнением формирующего фильтра с дискретным белым шумом V_k .

6 Заключение

Методическое обеспечение статистического моделирования для неявных СтС и различных уровней точности аппроксимации, основанное на численном интегрировании уравнений дифференциальных СтС, приводимых к дифференциальным системам, применимо только к приведенным системам (7) и (8) с гладкими нелинейными функциями.

Для негладких нелинейных функций в исходных уравнениях (1) в рамках корреляционной теории, как показано в [3–7], целесообразно сразу применить регрессионную линеаризацию (или полиномиальную аппроксимацию). В результате приходим к уравнениям (7) и (8), линеаризованным (или полиномиальным) стохастическим уравнениям, параметрически зависящим от первых двух вероятностных моментов переменных X и Y . В линеаризованном случае вероятностные моменты определяются или непосредственно статистическим, или аналитическим моделированием путем численного интегрирования обыкновенных дифференциальных уравнений для вероятностных моментов первого и второго порядка [11, 12]. Для полиномиальных моделей аппроксимации приходится решать обыкновенные дифференциальные уравнения для параметризованных одно- и многомерных плотностей. Такие методы моделирования называют комбинированными

вероятностно-статистическими. К последним также относят методы моделирования неявных СтС со случайными параметрами [7] как на основе канонических представлений случайных функций, так и прямого статистического моделирования уравнений для параметров одно- и многомерных распределений. Соответствующие примеры приведены в [7].

Представляет интерес развитие комбинированных методов моделирования для систем, стохастически ПРОП, на основе канонических разложений с независимыми компонентами и интегральных канонических представлений [12].

Важным направлением дальнейших разработок в области моделирования СтС представляются явные и неявные СтС с включениями [14–19].

Литература

1. *Синицын И. Н.* Аналитическое моделирование широкополосных процессов в стохастических системах, не разрешенных относительно производных // Информатика и её применения, 2017. Т. 11. Вып. 1. С. 3–10. doi: 10.14357/19922264170101. EDN: YOСMVЛ.
2. *Синицын И. Н.* Параметрическое аналитическое моделирование процессов в стохастических системах, не разрешенных относительно производных // Системы и средства информатики, 2017. Т. 27. № 1. С. 21–45. doi: 10.14357/08696527170102. EDN: YODCZL.
3. *Sinitsyn I. N.* Analytical modeling and estimation of normal processes defined by stochastic differential equations with unsolved derivatives // J. Mathematics Statistics Research, 2021. Vol. 3. Iss. 1. Art. 139. 7 p. doi: 10.36266/JMSR/139.
4. *Синицын И. Н.* Аналитическое моделирование и оценивание нестационарных нормальных процессов в стохастических системах, не разрешенных относительно производных // Системы и средства информатики, 2022. Т. 32. № 2. С. 58–71. doi: 10.14357/08696527220206. EDN: YMGERJ.
5. *Синицын И. Н.* Нормализация систем, стохастически не разрешенных относительно производных // Информатика и её применения, 2022. Т. 16. Вып. 1. С. 32–38. doi: 10.14357/19922264220105. EDN: LDFJJB.
6. *Синицын И. Н.* Аналитическое моделирование распределений с инвариантной мерой в стохастических системах, не разрешенных относительно производных // Информатика и её применения, 2023. Т. 17. Вып. 1. С. 2–10. doi: 10.14357/19922264230101. EDN: QWХVХC.
7. *Синицын И. Н.* Аналитическое моделирование стохастических систем, не разрешенных относительно производных, со случайными параметрами // Системы и средства информатики, 2024. Т. 34. № 1. С. 4–22. doi: 10.14357/08696527240101. EDN: ZPTXJI.
8. *Kloeden P., Platen E.* Numerical solution of stochastic differential equation. — Berlin: Springer-Verlag, 1992. 632 p. doi: 10.1007/978-3-662-12616-5.
9. *Артемов А. А., Михайличенко А. М., Синицын И. Н.* Статистическое моделирование срочных финансовых операций. — Новосибирск: ВЦ СО РАН, 1996. Кн. 1, 2. 280 с.

10. Кузнецов Д. Ф. Численное интегрирование стохастических дифференциальных уравнений. — СПб.: Изд-во С.-Петербургского гос. ун-та, 2001. 712 с. EDN: XOMZHV.
11. Пугачёв В. С., Синицын И. Н. Теория стохастических систем. — М.: Логос, 2000; 2004. 1000 с.
12. Синицын И. Н. Канонические представления случайных функций. Теория и применения. — 2-е изд. — М.: ТОРУС ПРЕСС, 2023. 816 с.
13. Синицын И. Н. Статистическое моделирование дифференциальных стохастических систем, не разрешенных относительно производных // Информатика и её применения, 2024. Т. 18. Вып. 3. С. 12–20. doi: 10.14357/19922264240302. EDN: WWMEOT.
14. Толстоногов А. А., Финогенко И. А. О функционально-дифференциальных включениях в банаховом пространстве с невыпуклой правой частью // Докл. АН СССР, 1980. Т. 254. № 1. С. 45–49.
15. Финогенко И. А. К вопросу о решениях функционально-дифференциальных включений // Прикладная математика и пакеты прикладных программ. — Иркутск: СЭИСО АН СССР, 1980. С. 95–107.
16. Финогенко И. А. Свойства множества решений функционально-дифференциальных включений // Краевые задачи. — Пермь: ППИ, 1981. С. 145–149.
17. Колмановский В. Б., Носов В. Р. Устойчивость и периодические режимы регулируемых систем с последствием. — М.: Наука, 1981. 448 с.
18. Финогенко И. А. О неявных функционально-дифференциальных уравнениях в банаховом пространстве // Динамика нелинейных систем. — Новосибирск: Наука, 1983. С. 151–164.
19. Азбелев Н. В., Максимов В. П., Рахматулина Л. Ф. Введение в теорию функционально-дифференциальных уравнений. — М.: Наука, 1991. 280 с.

Поступила в редакцию 12.02.24

PROBABILISTIC AND STATISTICAL MODELING METHODS FOR IMPLICIT STOCHASTIC SYSTEMS

I. N. Sinitsyn

Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119133, Russian Federation

Abstract: The article is devoted to probabilistic (analytical) and statistical modeling methods in implicit (continuous, discrete, and continuous-discrete) stochastic systems (StS). A survey in the fields: method of probabilistic modeling (MPM) and method of statistical modeling (MSM) is given. Basic implicit StS reduced to differential, discrete, and continuous-discrete are considered for smooth StS. Main attention is paid to MSM of $h/h^{1/2}$ and $h^2/h^{3/2}$ accuracy. Special attention is paid to the nonsmooth implicit StS. The methods of linear and polynomial regression were implemented. The example is devoted to scalar

implicit StS with smooth and nonsmooth functions. Basic conclusions and directions of combined MPM and MSM for StS with inclusions generalizations are given. Canonical expansions of applications to MPM and MSM are suggested.

Keywords: implicit stochastic system; method of probabilistic modeling; method of statistical modeling (MSM); stochastic system with unsolved derivatives (StS USD); strong and weak approximations

DOI: 10.14357/08696527240305

EDN: RTNRUZ

References

1. Sinitsyn, I. N. 2017. Analiticheskoe modelirovanie shirokopolosnykh protsessov v stokhasticheskikh sistemakh, ne razreshennykh otnositel'no proizvodnykh [Analytical modeling of wide band processes in stochastic systems with unsolved derivatives]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 11(1):3–10. doi: 10.14357/19922264170101. EDN: YOCMVL.
2. Sinitsyn, I. N. 2017. Parametricheskoe analiticheskoe modelirovanie protsessov v stokhasticheskikh sistemakh, ne razreshennykh otnositel'no proizvodnykh [Parametric analytical modeling of wide band processes in stochastic systems with unsolved derivatives]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 27(1):21–45. doi: 10.14357/08696527170102. EDN: YODCZL.
3. Sinitsyn, I. N. 2021. Analytical modeling and estimation of normal processes defined by stochastic differential equations with unsolved derivatives. *J. Mathematics Statistics Research* 3(1):139. 7 p. doi: 10.36266/JMSR/139.
4. Sinitsyn, I. N. 2022. Analiticheskoe modelirovanie i otsenivanie nestatsionarnykh normal'nykh protsessov v stokhasticheskikh sistemakh, ne razreshennykh otnositel'no proizvodnykh [Analytical modeling and estimation of nonstationary normal processors with unsolved derivatives]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 32(2):58–71. doi: 10.14357/08696527220206. EDN: YMGERJ.
5. Sinitsyn, I. N. 2022. Normalizatsiya sistem, stokhasticheski ne razreshennykh otnositel'no proizvodnykh [Normalization of systems with stochastically unsolved derivatives]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 16(1):32–38. doi: 10.14357/19922264220105. EDN: LDFJJB.
6. Sinitsyn, I. N. 2023. Analiticheskoe modelirovanie raspredeleniy s invariantnoy meroy v stokhasticheskikh sistemakh, ne razreshennykh otnositel'no proizvodnykh [Analytical modeling of distributions with invariant measure in stochastic systems with unsolved derivatives]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 17(1):2–10. doi: 10.14357/19922264230101. EDN: QWXVXC.
7. Sinitsyn, I. N. 2024. Analiticheskoe modelirovanie stokhasticheskikh sistem, ne razreshennykh otnositel'no proizvodnykh, so sluchaynymi parametrami [Analytical modeling of stochastic systems with random parameters and unsolved derivatives]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 34(1):4–22. doi: 10.14357/08696527240101. EDN: ZPTXJI.
8. Kloeden, P., and E. Platen. 1992. *Numerical solution of stochastic differential equation*. Berlin: Springer-Verlag. 632 p. doi: 10.1007/978-3-662-12616-5.
9. Artemyev, A. A., A. M. Mikhaylichenko, and I. N. Sinitsyn. 1996. *Statisticheskoe modelirovanie srochnykh finansovykh operatsiy* [Statistical modeling of urgent financial transactions]. Novosibirsk: CC SB RAS. Vols. 1, 2. 280 p.

10. Kuznetsov, D. F. 2001. *Chislennoe integrirovanie stokhasticheskikh differentsial'nykh uravneniy* [Numerical integration of stochastic differential equations]. St. Petersburg: Publishing House of Saint Petersburg State University. 712 p. EDN: XOMZHV.
11. Pugachev, V. S., and I. N. Sinitsyn. 2001. *Stochastic systems. Theory and applications*. Singapore: World Scientific. 908 p.
12. Sinitsyn, I. N. 2023. *Kanonicheskie predstavleniya sluchaynykh funktsiy. Teoriya i primeneniya* [Canonical expansion of random functions. Theory and application]. 2nd ed. Moscow: TORUS PRESS. 816 p.
13. Sinitsyn, I. N. 2024. Statisticheskoe modelirovanie differentsial'nykh stokhasticheskikh sistem, ne razreshennykh otnositel'no proizvodnykh [Statistical modeling of differential stochastic systems with unsolved derivatives]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 18(3):12–20. doi: 10.14357/19922264240302. EDN: WWMEOT.
14. Tolstonogov, A. A., and I. A. Finogenko. 1980. On functional-differential inclusions in a Banach space with a nonconvex right-hand side. *Soviet Mathematics Doklady* 22:320–324.
15. Finogenko, I. A. 1980. K voprosu o resheniyakh funktsional'no-differentsial'nykh vkluycheniy [On the issue of solutions of functional-differential inclusions]. *Prikladnaya matematika i pakety prikladnykh programm* [Applied mathematics and application software packages]. Irkutsk: SEISO AN SSSR. 95–107.
16. Finogenko, I. A. 1981. Svoystva mnozhestva resheniy funktsional'no-differentsial'nykh vkluycheniy [Properties of the solution set of functional differential inclusions]. *Kraevye zadachi* [Boundary value problems]. Perm: PPI. 145–149.
17. Kolmanovskiy, V. B., and V. R. Nosov. 1981. *Ustoychivost' i periodicheskie rezhimy reguliruemyykh sistem s posledstviem* [Stability and periodic modes of regulated systems with consequences]. Moscow: Nauka. 448 p.
18. Finogenko, I. A. 1983. O neyavnykh funktsional'no-differentsial'nykh uravneniyakh v banakhovom prostranstve [On implicit functional differential equations in a Banach space]. *Dinamika nelineynykh sistem* [Dynamics of nonlinear systems]. Novosibirsk: Nauka. 151–164.
19. Azbelev, N. V., V. P. Maksimov, and L. F. Rakhmatulina. 1991. *Vvedenie v teoriyu funktsional'no-differentsial'nykh uravneniy* [Introduction to the theory of functional differential equations]. Moscow: Nauka. 280 p.

Received February 12, 2024

Contributor

Sinitsyn Igor N. (b. 1940) — Doctor of Science in technology, professor, Honored scientist of RF, principal scientist, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119333, Russian Federation; sinitsin@dol.ru

МЕТОДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ НЕЯВНЫХ ЭРЕДИТАРНЫХ СТОХАСТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

*И. Н. Синицын*¹

Аннотация: Статья посвящена вероятностным и статистическим методам моделирования стохастических процессов (СтП) в неявных непрерывных и непрерывно-дискретных эредитарных стохастических системах (СтС). Дан обзор работ в области методов вероятностного моделирования (МВМ) эредитарных СтС (ЭСтС). Особое внимание уделено обзору методов статистического моделирования (МСМ) неявных СтС. Описаны два практических метода приведения уравнений неявных ЭСтС к дифференциальным уравнениям. Для гладких и негладких неявных функций представлены МВМ на основе метода нормальной аппроксимации (МНА) на разных этапах получения приведенных уравнений. Рассмотрены как стационарные, так и нестационарные СтП. Изучены численные МСМ различной точности в условиях слабой и сильной аппроксимации для гладких и негладких неявных функций. Рассмотрены МВМ и МСМ в неявных непрерывно-дискретных системах. В качестве иллюстративного примера приведены результаты моделирования посредством МВМ и МСМ для гладкой и разрывной неявной функции. Определены направления дальнейших исследований.

Ключевые слова: метод вероятностного (аналитического) моделирования (МВМ); метод статистического моделирования (МСМ); неявная стохастическая система; стохастический процесс (СтП); эредитарная стохастическая система (ЭСтС)

DOI: 10.14357/08696527240306

EDN: RVKAFM

1 Введение

Рассмотрим ЭСтС, описываемые функционально-дифференциальными стохастическими уравнениями, приводимыми к стохастическим дифференциальным уравнениям Ито. Соответствующие МВМ описаны в [1–10]. Для ЭСтС, описываемых интегро-дифференциальными уравнениями с гладкими нелинейностями, использовался метод дифференцирования по обобщенной формуле Ито [1, 2]. Для негладких нелинейностей применялась регрессионная линейризация или полиномиальная аппроксимация. Такие подходы позволили открыть и описать новые специфические стохастические эредитарные свойства этих систем. В [11–14] рассматривались МВМ для неявных ЭСтС, описываемых дифференциальными стохастическими уравнениями, не разрешенными относительно

¹Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук, sinitsin@dol.ru

производных, а также дискретными и непрерывно-дискретными уравнениями. Методы статистического моделирования для неявных дифференциальных СтС рассмотрены в [15, 16].

Рассмотрим обобщение МВМ и МСМ [11–16] на случай неявных ЭСтС. Раздел 2 посвящен стохастическим моделям неявных ЭСтС и приводимых к дифференциальным СтС. В разд. 3 представлены МВМ для негладких ЭСтС. Раздел 4 посвящен МСМ неявных ЭСтС для гладких и негладких функций. Методы моделирования в неявных непрерывно-дискретных системах представлены в разд. 5. Приводится иллюстративный пример. Заключение содержит выводы и направления дальнейших исследований.

2 Неявные дифференциальные эредитарные стохастические системы

Обобщая [1, 2], будем сначала рассматривать следующую неявную векторную дифференциальную ЭСтС:

$$\Phi(\dot{X}_t, X_{t_0}^t, U_t, t) = 0, \quad X(t_0) = X_0. \quad (1)$$

Здесь $\Phi(\dot{X}_t, X_t, U_t, t)$ — функция отмеченных переменных размерности n^Φ ; X_t и $\dot{X}_t$ — вектор состояния размерности n^X и его среднеквадратичная производная в момент времени t ; $X_{t_0}^t = \{X_\tau : t_0 \leq \tau < t\}$ — среднеквадратичные функционалы на интервале времени $[t_0, t)$; U_t — вектор размерности n^U стохастических возмущений, определяемый стохастическим дифференциальным уравнением Ито вида

$$dU_t = a^U(U_t, t) dt + b^U(U_t, t) dW_0 + \int_{R_0^q} c^U(U_t, t, \rho) P^0(t, d\rho), \quad U(t_0) = U_0, \quad (2)$$

где $a^U(U_t, t)$, $b^U(U_t, t)$ и $c^U(U_t, t, \rho)$ — функции отмеченных переменных размерностей $(n^U \times 1)$, $n^{W_0} \times n^U$ и $(n^U \times 1)$; $W_0 = W_{0t}$ — винеровский СтП размерности n^{W_0} и интенсивности $\nu^U = \nu^U(t)$; $P^0 = P^0(t, d\rho)$ — пуассоновский СтП, независимый от W_0 и имеющий независимые значения на непересекающихся множествах пространства R_0^q с выколотым началом.

Наряду с представлением (2) в задачах практики пользуются линейным стохастическим уравнением нормального (гауссовского) формирующего фильтра:

$$\dot{U}_t = \bar{a}^U U_t + \bar{b}^U V_0, \quad U(t_0) = U_0, \quad (3)$$

где $\bar{a}^U$ и $\bar{b}^U$ — векторно-матричные коэффициенты; $V_0 = V_{0t}$ — гауссовский белый шум с интенсивностью $\bar{\nu}_0$.

Совокупность уравнений (1), (2) или (1), (3) лежит в основе МВМ и МСМ, а также комбинированных методов моделирования неявных дифференциальных ЭСтС.

Для учета в (1) эрдитарности в виде $X_{t_0}^t$ положим

$$X_{t_0}^t = Z(t) = \int_{t_0}^t F(t, \tau, X(\tau), Z(\tau)) d\tau, \quad (4)$$

потребовав для физически реализуемых ЭСтС от функции $F = F(t, \tau, X(\tau), Z(\tau))$ затухания при $t \rightarrow \infty$. В этом случае различают два представления для функции F в (4) [1, 2].

Первое представление основано на формулах

$$F(t, \tau, x, z, \tau) = w(t, \tau) F_1(x, z, \tau),$$

где $w(t, \tau) = 0$ для $t > \tau$,

$$\int_{-\infty}^{\infty} |w_{kh}(t, \tau)| d\tau < \infty \quad (k = \overline{1, n^X}, \quad h = \overline{1, n^Z}),$$

причем $w(t, \tau)$ служит весовой функцией линейной дифференциальной системы

$$\dot{\zeta} = \alpha \zeta + \alpha_1 \xi,$$

где α и α_1 — некоторые матрицы; ξ — входной сигнал. Тогда z определяется уравнениями

$$z = \beta z', \quad \dot{z}' = \alpha z' + \alpha_1 F_1(x, z, t), \quad z'(t_0) = 0.$$

В результате неявная дифференциальная ЭСтС приводится к следующей неявной дифференциальной СтС (**теорема 2.1**):

$$\Phi_1(\dot{X}_t, X_t, \beta Z'_t, U_t, t) = 0, \quad Z_t = \beta Z'_t, \quad \dot{Z}'_t = \alpha Z'_t + \alpha_1 F_1(X_t, Z_t, t), \\ Z(t_0) = Z_0, \quad Z'(t_0) = 0.$$

Вторым типом подынтегральной функции в (4) может служить функция следующего вида:

$$F(t, \tau, x, z) = \psi(t) F_2(x, z, \tau),$$

где $\psi = \psi(t)$ — известная матричная функция времени; $F_1 = F_1(x, z, \tau)$ — известная векторная функция указанных аргументов; переменная z определяется уравнениями

$$z = \psi z', \quad \dot{z}' = F_2(x, z, t), \quad z'(t_0) = 0.$$

Таким образом, неявная ЭСтС заменяется следующей неявной дифференциальной СтС (**теорема 2.2**):

$$\Phi_2 \left(\dot{X}_t, X_t, \psi Z'_t, t, U_t \right) = 0, \quad \dot{Z}'_t = F_2 \left(X_t, \psi Z'_t, t, U_t \right), \\ Z(t_0) = Z_0, \quad Z'(t_0) = 0.$$

Отметим, что случаи, когда функция F в (4) определяется формулами (**теорема 2.3**):

$$F_1(t, \tau, x, z) = \sum_{k=1}^N w_k(t, \tau) F_k(x, z, \tau); \\ F_2(t, \tau, x, z) = \sum_{k=1}^N \psi_k(t, \tau) F_{2k}(x, z, \tau),$$

путем ввода блочных матриц

$$w(t, \tau) = [w_1(t, \tau) \cdots w_N(t, \tau)]; \\ \psi(t) = [\psi_1(t) \cdots \psi_N(t)]; \\ \vdots$$

$$F_1(x, z, \tau) = \left[F_{11}(x, z, \tau)^T \cdots F_{1N}(x, z, \tau)^T \right]^T$$

приводятся к предыдущим.

Далее, на втором этапе приведения, в зависимости от гладкости функций F_1 и F_2 (теоремы 2.1–2.3) в основе приведения неявных ЭСтС к явным дифференциальным СтС лежат методы, изложенные в [10].

Для гладких неявных функций путем дифференцирования уравнений теоремы 2.1 по обобщенной формуле Ито [1, 2] ℓ раз до появления винеровских пуассоновских белых шумов получим уравнения

$$\dot{\Phi}_1 = 0, \dots, \Phi_1^{(\ell)} = 0. \quad (5)$$

Далее образуем составной вектор Y_t , включающий вектор состояния X_t размерности n^X , вектор вспомогательных переменных $\bar{X}_t$ размерности $n^{\bar{X}}$, определяемый уравнениями (5), и вектор Z'_t размерности $n^{Z'}$:

$$Y_t = \left[X_t^T \bar{X}_t^T Z_t'^T \right]^T.$$

Тогда неявная дифференциальная ЭСтС (1), (2) будет описываться следующей системой векторных стохастических дифференциальных уравнений Ито и конечных уравнений для векторов Y_t и U_t (**теорема 2.4**):

$$dY_t = a_1^Y dt + b_1^Y dW_0 + \int_{R_0^q} c_1^Y P^0(t, d\rho), \quad \Psi_1(Y_t, t) = 0, \quad (6)$$

а также (2) или (3) для вектора возмущений U_t .

Аналогично на основе теоремы 2.2 получаются уравнения **теоремы 2.5**:

$$dY_t = a_0^Y dt + b_2^Y dW_0 + \int_{R_0^q} c_2^Y P^0(t, d\rho), \quad \Psi_2(Y_t, t) = 0, \quad (7)$$

а также (2) или (3) для вектора возмущений U_t .

3 Вероятностное моделирование неявных дифференциальных эредитарных стохастических систем

В основе МВМ для нормального (гауссовского) СтП в первом уравнении (6) приведенной дифференциальной системы с помощью МНА лежат следующие уравнения [1, 2]:

$$\left. \begin{aligned} \dot{m}_t^Y &= A_t^m(t, m_t^Y, K_t^Y), & m_0^Y &= m_{t_0}^Y, \\ \dot{K}_t^Y &= A_t^K(t, m_t^Y, K_t^Y), & K_0^Y &= K_{t_0}^Y, \\ \frac{\partial K^Y(t_1, t_2)}{\partial t_2} &= A_{t_1, t_2}^K(t_1, t_2, m_{t_2}^Y, K_{t_2}^Y), & K^Y(t_1, t_1) &= K_{t_1}^Y. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Здесь введены следующие обозначения:

$$\begin{aligned} A_t^m(t, m_t^Y, K_t^Y) &= M_N[a^Y]; \\ A_t^K(t, m_t^Y, K_t^Y) &= M_N A_{1t}(t, m_t^Y, K_t^Y) + A_{1t}^T(t, m_t^Y, K_t^Y) + A_{2t}(t, m_t^Y, K_t^Y); \\ A_{1t}(t, m_t^Y, K_t^Y) &= M_N[a^Y(Y_t - m_t^Y)^T]; \\ A_{2t}(t, m_t^Y, K_t^Y) &= M_N[\sigma(t, Y_t)]; \\ \sigma(t, Y_t) &= \sigma_0(t, Y_t) + \int_{R_0^q} c^Y(t, Y_t, u) c^Y(t, Y_t, u)^T \nu_P(t, du); \\ \sigma_0(t, Y_t) &= b^Y(t, Y_t) \nu_0(t) b^Y(t, Y_t)^T; \\ A_{t_1, t_2}^k(t_1, t_2, m_{t_2}^Y, K_{t_2}^Y) &= K^Y(t_1, t_2) (K_{t_2}^Y)^{-1} A_{1t}^T, \end{aligned}$$

где M_N — символ математического ожидания для гауссовского (нормального) распределения.

В стационарном случае при асимптотической устойчивости матрицы A_{1*} уравнения МНА имеют следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} A_*^m(m_*^Y, K_*^Y) &= 0; \quad A_*^K(m_*^Y, K_*^Y) = 0; \\ \frac{dk^Y(\tau)}{d\tau} &= A_\tau^k(k^Y(\tau), m_*^Y, K_*^Y), \quad k^Y(0) = K_*^Y, \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

где принято

$$\left. \begin{aligned} A_*^m(m_*^Y, K_*^Y) &= M_N[a^Y]; \\ A_*^K(m_*^Y, K_*^Y) &= A_{1*}(m_*^Y, K_*^Y) + A_{1*}(m_*^Y, K_*^Y)^T + A_{2*}(m_*^Y, K_*^Y); \\ A_{1*}(m_*^Y, K_*^Y) &= M_N[a^Y(Y_t - m_*^Y)]; \\ A_{2*}(m_*^Y, K_*^Y) &= M_N[\sigma_*(Y_t)]; \\ \sigma_*(Y_t) &= \sigma_{0*}(Y_t) + \int_{R_0^q} c^Y(Y_t, \rho) c^Y(Y_t, \rho)^T \nu_P(t, d\rho); \\ \sigma_{0*}(Y_t) &= b^Y(Y_t) \nu_{0*}(t) b^Y(Y_t)^T; \\ A_\tau^k(k^Y(\tau), m_*^Y, K_*^Y) &= k^Y(\tau) (K_*^Y)^{-1} A_{1*}^T, \quad \tau = t_1 - t_2. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Нормальная аппроксимация второго конечного уравнения в (6) приводит к конечным уравнениям:

$$\Psi_{10} = 0; \quad \left(\frac{\partial \Psi_{10}}{\partial m_t^Y} \right) Y_t^0 = 0; \quad \left(\frac{\partial \Psi_{10}}{\partial m_t^Y} \right) K_t^Y = 0 \quad (Y_t^0 = Y_t - m_t^Y),$$

где $\Psi_{10} = \Psi_{10}(m_t^Y, K_t^Y, t)$ и $\partial \Psi_{10} / \partial m_t^Y(m_t^Y, K_t^Y, t)$ — коэффициенты статистической линеаризации нелинейной функции Ψ_1 во втором уравнении (6).

Аналогично выписываются уравнения МНА в случае (7). Таким образом, справедливы следующие утверждения.

Теорема 3.1. Пусть негауссовская неявная дифференциальная ЭСтС (1), (2) приводима к дифференциальной негауссовской СтС согласно теоремам 2.2 и 2.4. Тогда уравнения МНА в нестационарном режиме имеют вид (8) при условии конечности интегралов (9) и $a^Y = a_1^Y$, $b^Y = b_1^Y$, $c^Y = c_1^Y$, а в стационарном режиме — (9) при конечности интегралов (10).

Теорема 3.2. Пусть негауссовская неявная ЭСтС (1) приводима к дифференциальной негауссовской СтС согласно теоремам 2.1, 2.2 и 2.5. Тогда уравнения МНА в нестационарном режиме имеют вид (8) при условии конечности интегралов (9) и $a^Y = a_2^Y$, $b^Y = b_2^Y$, $c^Y = c_2^Y$, а в стационарном режиме — (9) при конечности интегралов (10).

4 Статистическое моделирование неявных дифференциальных эрдитарных стохастических систем

4.1 Методы порядка h и $h^{1/2}$

Следуя [11, 12], заменим интеграл по переменной ρ в (6) соответствующей интегральной суммой. В результате первое уравнение (6) заменится уравнением

$$dY = a(Y, t) dt + b(Y, t) dW_0 + \sum_{i=1}^N c_i(Y, t) dP_i^0, \quad (11)$$

где $c_i(y, t)$ — $(n^U \times 1)$ -мерные функции, представляющие собой значения функции $c(y, t, r)$ в некоторых средних точках r_i соответствующих элементов A_i разбиения r -мерного шара достаточно большого радиуса, $r_i \in A_i$ ($i = 1, \dots, N$); $P_i^0(t)$ — центрированные простые пуассоновские СтП:

$$P_i^0(t) = P^0([0, t], A_i) - \mu([0, t], A_i), \quad i = \overline{1, N}.$$

Интенсивности этих СтП определяются через математическое ожидание $\mu(\Delta, A)$ пуассоновской меры $P(\Delta, A)$ по формуле:

$$\nu_i(t) = \frac{d\mu([0, t], A_i)}{dt}.$$

Простейший способ замены уравнения (11) разностным уравнением состоит в замене всех дифференциалов элементами интегральных сумм:

$$\begin{aligned} Y((n+1)h) - Y(nh) = & \\ & = a(Y(nh), nh)h + b(Y(nh), nh) [W_0((n+1)h) - W_0(nh)] + \\ & + \sum_{i=1}^N c_i(Y(nh), nh) [P_i^0((n+1)h) - P_i^0(nh)]. \end{aligned}$$

Положив

$$\begin{aligned} \bar{Y}_n = Y(nh); \quad \varphi_n(\bar{Y}_n) = Y(nh) + a(Y(nh), nh)h; \quad \psi_{1n}(\bar{Y}_n) = b(Y(nh), nh); \\ \psi_{in}(\bar{Y}_n) = c_{i-1}(Y(nh), nh); \quad V_{1n} = W_0((n+1)h) - W_0(nh); \\ V_{in} = P_{i-1}^0((n+1)h) - P_{i-1}^0(nh), \quad i = \overline{2, N+1}, \end{aligned}$$

получим стохастическое разностное уравнение

$$\bar{Y}_{n+1} = \varphi_n(\bar{Y}_n) + \sum_{i=1}^{N+1} \psi_{in}(\bar{Y}_n) V_{in}.$$

Вводя блочную матрицу $n^Y \times (n^U + N)$

$$\psi_n(\bar{Y}_n) = [\psi_{1n}(\bar{Y}_n) \cdots \psi_{N+1,n}(\bar{Y}_n)]$$

и $(n^U + N)$ -мерный случайный вектор

$$V_n = [V_{1n}^T \ V_{2n} \ \cdots \ V_{N+1,n}^T]^T,$$

можем записать полученное разностное уравнение коротко в виде:

$$\bar{Y}_{n+1} = \varphi_n(\bar{Y}_n) + \psi_n(\bar{Y}_n)V_n. \quad (12)$$

Случайные векторы V_n образуют последовательность независимых случайных векторов $\{V_n\}$, причем блоки V_{1n} векторов V_n имеют нормальное (гауссовское) распределение $\mathcal{N}(0, \bar{G}_n)$, где

$$\bar{G}_n = \int_{nh}^{(n+1)h} \nu_0(\tau) d\tau \cong \nu_0(nh)h;$$

$\nu_0(t)$ — интенсивность винеровского СтП $W_0(t)$; скалярные блоки V_{in} ($i = \overline{2, N+1}$) имеют пуассоновские распределения с параметрами

$$\mu_{in} = \int_{nh}^{(n+1)h} \nu_i(\tau) d\tau \cong \nu_i(nh)h.$$

Ковариационная матрица G_n вектора V_n представляет собой блочно-диагональную матрицу:

$$G_n = \begin{bmatrix} \bar{G}_n & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \mu_{2n} & 0 & \ddots & 0 \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & \mu_{N+1,n} \end{bmatrix}.$$

В случае гладких неявных функций уравнение (12) определяет $\bar{Y}_{n+1}$ при данном $\bar{Y}_n$ с точностью до h в детерминированном слагаемом $\varphi_n(\bar{Y}_n)$ и с точностью до $\sqrt{h}$ в случайном слагаемом $\psi_n(\bar{Y}_n)V_n$ (**теорема 4.1**).

Для негладких неявных функций в (11) при $b(Y, t) = b_0(t)$ и $c_i(Y, t) = c_{i0}(t)$ в рамках МНА функции a , b , c_i заменяют статистически линеаризованными функциями, так что $\varphi_n = \varphi_n(\bar{Y}_n, m_n^Y, K_n^Y)$ и $\psi_{1n} = \psi_{1n}(\bar{Y}_n, m_n^Y, K_n^Y)$, где m_n^Y и K_n^Y — вектор математических ожиданий и ковариационная матрица (**теорема 4.2**).

4.2 Методы порядка h^2 и $h^{3/2}$

Для уравнений (11) с точностью до h^2 в детерминированном слагаемом и $h^{3/2}$ в случайном слагаемом, следуя [2], для гладких функций имеем следующее утверждение (**теорема 4.3**):

$$\bar{Y}_{n+1} = \varphi_n(\bar{Y}_n) + \psi_n(\bar{Y}_n, V_n^{(1)})V_n. \quad (13)$$

Входящие в уравнения (13) величины определяются формулами:

$$\begin{aligned} \varphi_n(\bar{Y}_n) = & \bar{Y}_n + \left[a(\bar{Y}_n, nh) - \sum_{j=1}^N c_j(\bar{Y}_n, nh) \nu_{jn} \right] h + \frac{1}{2} \left\{ a_t(\bar{Y}_n, nh) - \right. \\ & - \sum_{j=1}^N c_{jt}(\bar{Y}_n, nh) \nu_{jn} + \left[a_y(\bar{Y}_n, nh)^T - \sum_{j=1}^N c_{jy}(\bar{Y}_n, nh)^T \nu_{jn} \right] \times \\ & \times \left[a(\bar{Y}_n, nh) - \sum_{j=1}^N c_j(\bar{Y}_n, nh) \nu_{jn} \right] + \\ & \left. + \frac{1}{3} \left[a_{yy}(\bar{Y}_n, nh) - \sum_{j=1}^N c_{jyy}(\bar{Y}_n, nh) \nu_{jn} \right] : \sigma(\bar{Y}_n, nh) \right\} h^2; \end{aligned}$$

$$\psi_{1n}(\bar{Y}_n) = b(\bar{Y}_n, nh) + \frac{1}{2} \left[a_y(\bar{Y}_n, nh)^T - \sum_{j=1}^N c_j(\bar{Y}_n, nh)^T \nu_{jn} \right] b(\bar{Y}_n, nh);$$

$$\psi_{in}(\bar{Y}_n) = c_{i-1}(\bar{Y}_n, nh) + \left[\Delta_{i-1} a_n - \sum_{j=1}^N \Delta_{i-1} c_{jn} \nu_{jn} \right] h;$$

$$\begin{aligned} \psi'_{1n}(\bar{Y}_n, V_n^{(1)}) = & \left\{ b(\bar{Y}_n, nh) + \left[a(\bar{Y}_n, nh)^T - \sum_{j=1}^N c_j(\bar{Y}_n, nh)^T \nu_{jn} \right] \frac{\partial}{\partial y} b(\bar{Y}_n, nh) + \right. \\ & \left. + V_{1n}^T b(\bar{Y}_n, nh)^T \frac{\partial}{\partial y} b(\bar{Y}_n, nh) \right\} h + \sum_{j=1}^N \Delta_j b_n V_{j+1,n}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\psi'_{in}(\bar{Y}_n, V_n^{(1)}) &= \\
&= \left\{ c_{i-1,t}(\bar{Y}_n, nh) + c_{i-1,y}(\bar{Y}_n, nh)^T \left[a(\bar{Y}_n, nh) - \sum_{j=1}^N c_j(\bar{Y}_n, nh) \nu_{jn} \right] \right\} h + \\
&\quad + c_{i-1,y}(\bar{Y}_n, nh)^T b(\bar{Y}_n, nh) V_{1,n} + \sum_{j=1}^N \Delta_j c_{j-1,n} V_{j+1,n}; \\
\psi''_{1n}(\bar{Y}_n) &= \frac{1}{2} [b_{yy}(\bar{Y}_n, nh) : \sigma(\bar{Y}_n, nh)]; \\
\psi''_{in}(\bar{Y}_n) &= \frac{1}{2} [c_{i-1,yy}(\bar{Y}_n, nh) : \sigma(\bar{Y}_n, nh)]; \\
\Delta_j c_n &= a(\bar{Y} + c_i, nh) - a(\bar{Y}_n, nh); \\
\Delta_i b &= b(\bar{Y}_n + c_i, nh) - b(\bar{Y}_n, nh); \\
\Delta_j c_{in} &= c_i(\bar{Y}_n + c_j, nh) - c_i(\bar{Y}_n, nh); \\
V_{1n} &= \Delta W_n = W_0((n+1)h) - W_0(nh); \\
V_{in} &= \Delta P_{i-1,n} = P_{i-1}((n+1)h) - P_{i-1}(nh), \quad i = \overline{2, N}; \\
V'_{1n} &= \int_{nh}^{(n+1)h} \frac{\tau - nh}{h} dW_0(\tau); \quad V''_{1n} = \int_{nh}^{(n+1)h} \left(\frac{\tau - nh}{h} \right)^2 dW_0(\tau); \\
V'_{in} &= \int_{nh}^{(n+1)h} \frac{\tau - nh}{h} dP_{i-1}^0(\tau); \\
V''_{in} &= \int_{nh}^{(n+1)h} \left(\frac{\tau - nh}{h} \right)^2 dP_{i-1}^0(\tau), \quad i = \overline{2, N+1}.
\end{aligned}$$

Здесь введены следующие обозначения для векторных функций:

$$[\varphi_{yy} : \sigma]_k = \text{tr} [\varphi_{ky} \sigma], \quad \sigma = b\nu_0(t)b^T.$$

Величина $\varphi_{yy} : \sigma$ в случае матричной функции φ представляет собой матрицу, элементами которой служат следы произведений на матрицу σ матриц вторых

производных соответствующих элементов матрицы φ по компонентам вектора y на матрицу σ :

$$[\varphi_{yy} : \sigma]_{kl} = \text{tr} [\varphi_{klyy} \sigma].$$

Наконец, если обозначить $V_n^{(1)} = [V_{1n}^T V_{2n} \cdots V_{n+1}^T]^T$ и ввести блочную матрицу

$$\begin{aligned} \psi_n \left(\bar{Y}_n, V_n^{(1)} \right) = & \left[\psi_{1n} \left(\bar{Y}_n \right) \quad \psi'_{1n} \left(\bar{Y}_n, V_n^{(1)} \right) \quad \psi''_{1n} \left(\bar{Y}_n \right) \quad \cdots \right. \\ & \left. \cdots \quad \psi_{N+1,n} \left(\bar{Y}_n \right) \quad \psi'_{N+1,n} \left(\bar{Y}_n, V_n^{(1)} \right) \quad \psi''_{N+1,n} \left(\bar{Y}_n \right) \right], \end{aligned}$$

то для блочного случайного вектора будет справедливо представление:

$$V_n = \left[V_{1n}^T \quad V_{1n}'^T \quad V_{1n}''^T \quad V_{2n}^T \quad V_{2n}'^T \quad V_{2n}''^T \quad \cdots \quad V_{N+1,n}^T \quad V_{N+1,n}'^T \quad V_{N+1,n}''^T \right]^T.$$

Для полного определения распределения случайного вектора V_n в (11) достаточно найти ковариационную матрицу нормально распределенного случайного вектора $[V_{in}^T \quad V_{in}'^T \quad V_{in}''^T]^T$. Пользуясь известными формулами ковариационных и взаимных ковариационных матриц стохастических интегралов, находим блоки ковариационной матрицы K_{1n} случайного вектора $[V_{in}^T \quad V_{in}'^T \quad V_{in}''^T]^T$:

$$\begin{aligned} K_{1n,11} &= \mathbf{M} V_{1n} V_{1n}^T = \int_{nh}^{(n+1)h} \nu_0(\tau) d\tau \cong \nu_0 \left(nh + \frac{h}{2} \right) h; \\ K_{1n,12} &= \mathbf{M} V_{1n} V_{1n}'^T = \int_{nh}^{(n+1)h} \frac{\tau - nh}{h} \nu_0(\tau) d\tau \cong \frac{1}{2} \nu_0 \left(nh + \frac{h}{2} \right) h; \\ K_{1n,13} &= \mathbf{M} V_{1n} V_{1n}''^T = \int_{nh}^{(n+1)h} \left(\frac{\tau - nh}{h} \right)^2 \nu_0(\tau) d\tau \cong \frac{1}{3} \nu_0 \left(nh + \frac{h}{2} \right) h; \\ K_{1n,21} &= K_{1n,12}; \quad K_{1n,31} = K_{1n,13}; \\ K_{1n,23} &= \mathbf{M} V_{1n} V_{1n}''^T = \int_{nh}^{(n+1)h} \left(\frac{\tau - nh}{h} \right)^3 \nu_0(\tau) d\tau \cong \frac{1}{4} \nu_0 \left(nh + \frac{h}{2} \right) h; \end{aligned}$$

$$K_{1n,31} = K_{1n,13}; \quad K_{1n,32} = K_{1n,23};$$

$$K_{1n,33} = MV_{1n}'' V_{1n}'^T = \int_{nh}^{(n+1)h} \left(\frac{\tau - nh}{h} \right)^4 \nu_0(\tau) d\tau \cong \frac{1}{5} \nu_0 \left(nh + \frac{h}{2} \right) h.$$

В [2, 15, 16] описаны более точные методы h^3 и $h^{5/2}$ для гладких неявных функций.

Замечание 4.1. Полученные разностные уравнения можно использовать как при теоретических исследованиях, так и для численного интегрирования стохастических дифференциальных уравнений. При этом нужно знать распределение всех случайных величин (СВ), входящих в разностные уравнения. В данном случае разностные уравнения будут представлять собой так называемую сильную аппроксимацию стохастических дифференциальных уравнений. При численном интегрировании такая аппроксимация нужна, когда требуется получать реализации СтП $Y(t)$. Однако часто нет нужды в получении реализаций СтП, а достаточно иметь лишь оценки моментов или математических ожиданий каких-либо функций от значения СтП $Y(t)$ в определенный момент. В таких случаях можно отказаться от использования точных распределений входящих в разностные уравнения СВ, а заменить их какими-нибудь более простыми распределениями с теми же моментными характеристиками. Например, нормально распределенную скалярную величину с нулевым математическим ожиданием и дисперсией D можно заменить дискретной СВ, принимающей два значения $\pm\sqrt{D}$ с вероятностями $1/2$. При замене СВ на величины с более простыми распределениями разностное уравнение будет представлять собой слабую аппроксимацию стохастического дифференциального уравнения.

5 Моделирование неявных непрерывно-дискретных эредитарных стохастических систем

Следуя [11, 14], в качестве неявных моделей СтС, не разрешенных относительно производных и разностей, возьмем следующие:

$$Y = Y' + Y''; \quad \Psi(Y, X) = 0; \quad (14)$$

$$dY' = a'(t, Y) dt + b'(t, Y) dW_0 + \int_{R_0^q} c'(t, Y, u) P^0(t, du); \quad (15)$$

$$\dot{Y}'' = \sum_{k=0}^{\infty} Y_k'' \mathbf{1}_{A_k}(t);$$

$$Y_{k+1}'' = \Omega_k''(Y_k, V_k); \quad \Psi_k(Y_k, X_k) = 0; \quad (16)$$

$$Y_{k+1}'' = a_k''(Y_k) + b_k''(Y_k) V_k; \quad \Psi_k(Y_k, X_k) = 0; \quad (17)$$

Здесь

$$Y_k = Y(t_k) = \begin{bmatrix} Y_k'^T & Y_k''^T \end{bmatrix}^T \quad (k = 0, 1, 2, \dots);$$

$\mathbf{1}_{A_k}(t)$ — индикатор интервала, $A_k = [t^{(k)}, t^{(k+1)})$; $\{V_k\}$ — последовательность дискретных белых шумов (независимых векторных СВ, в том числе и от W_0 и P , а также начальных условий).

Замечание 5.1. Методы вероятностного (аналитического) моделирования неявных дифференциальных СтС подробно рассмотрены в [1–7]. Поэтому ограничимся МСМ для неявных непрерывно-дискретных систем.

Обобщая результаты [13] на случай приведенных непрерывно-дискретных уравнений (14), (15) и (17), придем к следующему результату (**теорема 5.1**):

$$\bar{Y}_{n+1} = \varphi_n(\bar{Y}_n) + \psi_n(\bar{Y}_n) V_n, \quad \bar{Y}_n = \bar{Y}_n' + \bar{Y}_n'', \quad \Psi(\bar{Y}_n, X_n) = 0,$$

где использованы допущения и обозначения, принятые в теореме 4.1.

Соответствующее обобщение на случай гауссовых и пуассоновых СВ в (17) немедленно получается путем расширения вектора V_n следующим образом:

$$V_n = \begin{bmatrix} V_{1n}'^T V_{2n}'^T \cdots V_{N+1,n}'^T V_{1n}''^T V_{2n}''^T \cdots V_{N+1,n}''^T \end{bmatrix}^T.$$

Аналогично формулируются результаты для уравнения (16).

Особый практический интерес для негладких неявных непрерывно-дискретных функций представляет МНА для аддитивных гауссовских и пуассоновых шумов, когда $b(Y, t) = b_0(t)$ и $c_i(Y, t) = c_{i0}(t)$. В этом случае, как и в теореме 4.2, приведенные уравнения будут линейными с коэффициентами, зависящими от векторов математических ожиданий и ковариационной матрицы векторов Y' и Y'' .

Более точные уравнения получаются на первом этапе путем полиномиальной аппроксимации и на основе методов параметризации распределений.

6 Пример

Рассмотрим скалярную гауссовскую интегро-дифференциальную СтС (ИДСтС), не разрешенную относительно производной, вида

$$\int_{t_0}^t e^{-\alpha(t-\tau)} \varphi(\dot{X}_\tau) d\tau = a_0 + aX + bU; \quad (18)$$

$$\dot{U} = \gamma U + V_1. \quad (19)$$

Здесь a_0 , a , b и γ — постоянные; V_1 — гауссовский белый шум интенсивности ν_1 . Получим уравнения МВМ.

Выполним с ИДСтС (18) следующие преобразования.

1. Введем переменные $X_1 = X$, $X_2 = \dot{X}_1$ и $X_3 = U$. Заменяем нелинейную функцию $\varphi(\dot{X}_1) = \varphi(X_2)$ статистически линеаризованной:

$$\varphi(X_2) \approx \tilde{\varphi}_0 + k_1^\varphi X_2,$$

где $k_1^\varphi = \partial\varphi_0/\partial m^{X_2}$.

2. Введем вспомогательную переменную X_4 согласно уравнению

$$\frac{1}{\alpha} X_4 = \int_{t_0}^t e^{-\alpha(t-\tau)} (\tilde{\varphi}_{0\tau} + k_{1\tau}^\varphi X_{2\tau}) d\tau. \quad (20)$$

Пользуясь формулой дифференцирования интеграла, зависящего от параметра,

$$\frac{d}{d\lambda} \int_{u(\lambda)}^{v(\lambda)} \frac{\partial}{\partial \lambda} f(X, \lambda) dX + f(v(\lambda), \lambda) \frac{dv}{d\lambda} - f(u(\lambda), \lambda) \frac{du}{d\lambda},$$

закключаем, что X_4 удовлетворяет дифференциальному уравнению

$$\dot{X}_4 = -\alpha (X_4 - \tilde{\varphi}_0 - k_1^\varphi X_2). \quad (21)$$

3. Перепишем (18) и (19) с учетом (20) в виде:

$$a_0 + aX_1 + bX_3 - \frac{1}{\alpha} X_4 = 0; \quad (22)$$

$$\dot{X}_3 = \gamma X_3 + V_1 \equiv a_{33} X_3 + V_1. \quad (23)$$

4. Продифференцируем (21) один раз:

$$a\dot{X}_1 + b\dot{X}_3 - \frac{1}{\alpha} \dot{X}_4 = 0, \quad (24)$$

а затем разрешим уравнение относительно $X_2 = \dot{X}_1$:

$$X_2 = \frac{1}{a + (1 + \alpha b)k_{16}^\varphi} [-(1 + \alpha b)\tilde{\varphi}_0 + \alpha bX_3 + X_4] \equiv A_0^2 + A_0^2 X_3' + A_0^2 X_4.$$

В результате ИДСтС (18) и (19) будет заменена на эквивалентную статистически линеаризованную систему уравнений, состоящую из уравнения

$$\dot{X}_1 = X_2$$

и уравнений (21)–(24).

5. Упростим уравнения (21) с учетом (24), тогда получим

$$\begin{aligned}\dot{X}_4 &= -\alpha X_4 + \alpha \tilde{\varphi}_0 + \frac{\alpha k_1^\varphi}{a + (1 + \alpha b)k_1^\varphi} [-(1 + \alpha b)\tilde{\varphi}_0 + \alpha b X_3 + X_4] \equiv \\ &\equiv a_{40} + a_{43}X_3 + a_{44}X_4. \quad (25)\end{aligned}$$

Уравнения (23) и (25) отделяются от уравнений для X_1 и X_2 в силу (23) и (24). Пользуясь формулами теории линейных СтС [1, 2], получим искомые уравнения для математических ожиданий и ковариационной матрицы вектора $X^{34} = [X_3 X_4]^T$:

$$\begin{aligned}\dot{m}^{34} &= a_0^{34} + a^{34} m^{34}; \\ \dot{K}^{34} &= a^{34} K^{34} + K^{34} (a^{34})^T + b^{34} \nu (b^{34})^T.\end{aligned}$$

Здесь введены обозначения:

$$m^{34} = \begin{bmatrix} m_3 \\ m_4 \end{bmatrix}; \quad K^{34} = \begin{bmatrix} D_3 & K_{34} \\ K_{34} & D_4 \end{bmatrix}; \quad a^{34} = \begin{bmatrix} a_{33} & 0 \\ a_{43} & a_{44} \end{bmatrix}; \quad b^{34} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

Для переменных X_1 и X_2 в силу (22), если учесть соотношение

$$X_1 = \frac{1}{a} \left(-a_0 - bX_3 + \frac{1}{\alpha} X_4 \right) = A_0^1 + A_3^1 X_3 + A_4^1 X_4,$$

получим для математических ожиданий и ковариационной матрицы вектора $X^{12} = [X_1 X_2]^T$ следующие уравнения:

$$\begin{aligned}\dot{m}^{12} &= a_0^{12} + a^{12} m^{12} = 0; \\ \dot{K}^{12} &= a^{12} K^{12} + K^{12} (a^{12})^T,\end{aligned}$$

где

$$a_0^{12} = \begin{bmatrix} A_0^1 \\ A_0^2 \end{bmatrix}; \quad a^{12} = \begin{bmatrix} A_{13}^1 & A_{14}^1 \\ A_{13}^2 & A_{14}^2 \end{bmatrix}.$$

В силу зависимости φ_0 и k_1^φ от m^{X_2} и D^{X_2} полученные системы уравнений МВМ взаимосвязаны и решаются численно стандартными методами численного анализа. Проведенное статистическое моделирование подтверждает качественные и количественные полученные МВМ результаты: нечетная зависимость от старшей производной и эрдитарности приводит к снижению математического ожидания и дисперсии, а четная — к дополнительному систематическому и флуктуационному смещению и дрейфу.

7 Заключение

Разработаны МВМ и МСМ неявных непрерывных (дифференциальных) и непрерывно-дискретных ЭСтС, приводимых к дифференциальным, для гладких и негладких неявных функций различной точности. Приведен иллюстративный пример.

Среди направлений развития МВМ и МСМ следует развивать комбинированные методы, основанные на параметризации распределений. Следует отметить использование других методов приведения функционально-дифференциальных уравнений ЭСтС, описанных в [17, 18]. На очереди стоят вопросы разработки методов оценивания и управления в неявных ЭСтС.

Литература

1. Пугачёв В. С., Сеницын И. Н. Стохастические дифференциальные системы. Анализ и фильтрация. — М.: Наука, 1990. 632 с.
2. Пугачёв В. С., Сеницын И. Н. Теория стохастических систем. — М.: Логос, 2000; 2004. 1000 с.
3. Сеницын И. Н. Анализ и моделирование распределений в эредитарных стохастических системах // Информатика и её применения, 2014. Т. 8. Вып. 1. С. 2–11. doi: 10.14357/19922264140101. EDN: RYYFEF.
4. Сеницын И. Н., Сергеев И. В., Сеницын В. И., Корепанов Э. Р., Белоусов В. В. Математическое обеспечение параметрического моделирования распределений в интегродифференциальных стохастических системах // Системы и средства информатики, 2014. Т. 24. № 1. С. 4–45. doi: 10.14357/08696527140101. EDN: SJHVJF.
5. Сеницын И. Н. Аналитическое моделирование распределений с инвариантной мерой в негауссовских дифференциальных и приводимых к ним эредитарных стохастических системах // Информатика и её применения, 2014. Т. 8. Вып. 2. С. 2–14. doi: 10.14357/19922264140201. EDN: SFRWKN.
6. Сеницын И. Н., Сеницын В. И. Нормальные и эллипсоидальные распределения в интегродифференциальных стохастических системах // Системы компьютерной математики и их приложения. — Смоленск: СмолГУ, 2014. Вып. 15. С. 196–197. EDN: SMHJZX.
7. Сеницын И. Н., Сеницын В. И., Корепанов Э. Р. Аналитическое моделирование эредитарных стохастических систем со сложными нелинейностями // Современные проблемы прикладной математики, информатики автоматизации и управления. — М.: ИПИ РАН, 2014. С. 29–34.
8. Сеницын И. Н., Сергеев И. В., Сеницын В. И., Корепанов Э. Р., Белоусов В. В. Аналитическое компьютерное моделирование в эредитарных стохастических системах с автокоррелированными шумами // Кибернетика и высокие технологии XXI века. — Воронеж: САКВОЕЕ, 2014. С. 543–551. EDN: UKHELH.
9. Сеницын И. Н., Корепанов Э. Р., Белоусов В. В. Развитие математического обеспечения аналитического и статистического моделирования эредитарных стохастических систем // Идентификация систем и задачи управления. — М.: ИПУ РАН, 2015. С. 1275–1297. EDN: TQGEJF.

10. *Синицын И. Н.* Аналитическое моделирование и фильтрация процессов в интегрированных дифференциальных стохастических системах, не разрешенных относительно производных // Системы и средства информатики, 2021. Т. 31. № 1. С. 37–56. doi: 10.14357/08696527210104. EDN: PLYOSF.
11. *Синицын И. Н.* Аналитическое моделирование широкополосных процессов в стохастических системах, не разрешенных относительно производных // Информатика и её применения, 2017. Т. 11. Вып. 1. С. 3–10. doi: 10.14357/19922264170101. EDN: YOСMVL.
12. *Синицын И. Н.* Параметрическое аналитическое моделирование процессов в стохастических системах, не разрешенных относительно производных // Системы и средства информатики, 2017. Т. 27. № 1. С. 21–45. doi: 10.14357/08696527170102. EDN: YODCZL.
13. *Синицын И. Н.* Нормальные субоптимальные фильтры для дифференциальных стохастических систем, не разрешенных относительно производных // Информатика и её применения, 2021. Т. 15. Вып. 1. С. 3–10. doi: 10.14357/19922264210101. EDN: UPEHRI.
14. *Синицын И. Н.* Аналитическое моделирование стохастических систем, не разрешенных относительно производных, со случайными параметрами // Системы и средства информатики, 2024. Т. 34. № 1. С. 4–22. doi: 10.14357/08696527240101. EDN: ZPTXJI.
15. *Синицын И. Н.* Статистическое моделирование дифференциальных стохастических систем, не разрешенных относительно производных // Информатика и её применения, 2024. Т. 18. Вып. 3. С. 12–20.
16. *Синицын И. Н.* Методы вероятностного и статистического моделирования неявных стохастических систем // Системы и средства информатики, 2024. Т. 34. № 3. С. 48–66.
17. *Колмановский В. Б., Носов В. Р.* Устойчивость и периодические режимы регулируемых систем с последствием. — М.: Наука, 1981. 448 с.
18. *Азбелев Н. В., Максимов В. П., Рахматулина Л. Ф.* Введение в теорию функционально-дифференциальных уравнений. — М.: Наука, 1991. 280 с.

Поступила в редакцию 04.03.24

MODELING METHODS FOR IMPLICIT HEREDITARY STOCHASTIC SYSTEMS

I. N. Sinitsyn

Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119133, Russian Federation

Abstract: The paper is devoted to probabilistic and statistical modeling methods of stochastic processes (StP) in continuous and continuous-discrete implicit

hereditary stochastic systems (StS). A survey of methods for probabilistic modeling (MPM) and methods for statistical modeling (MSM) in hereditary StS (HStS) is given. Basic differential implicit HStS are considered. Two practical methods of implicit HStS reduction to differential StS are presented. For smooth and nonsmooth implicit functions, MPM based on the normal approximation method are given for various stages of reduction. Stationary and nonstationary StP are considered. Numerical MSM of various accuracy for reducible differential HStS are considered. Both MPM and MSM for systems described by continuous-discrete implicit equations are given. An illustrative example for scalar integrodifferential with smooth and nonsmooth implicit HStS is presented. Basic conclusions and directions for future investigations are discussed.

Keywords: hereditary stochastic system (HStS); implicit stochastic system; method of probabilistic modeling (MPM); method of statistical modeling (MSM); stochastic process (StP)

DOI: 10.14357/08696527240306

EDN: RVKAFM

References

1. Pugachev, V. S., and I. N. Sinitsyn. 1987. *Stochastic differential systems. Analysis and filtering*. Chichester – New York: John Wiley & Sons. 549 p.
2. Pugachev, V. S., and I. N. Sinitsyn. 2001. *Stochastic systems. Theory and applications*. Singapore: World Scientific. 908 p.
3. Sinitsyn, I. N. 2014. Analiz i modelirovanie raspredeleniy v ereditarnykh stokhasticheskikh sistemakh [Analysis and modeling of distributions in hereditary stochastic systems]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 8(1):2–11. doi: 10.14357/19922264140101. EDN: RYYFEF.
4. Sinitsyn, I. N., I. V. Sergeev, V. I. Sinitsyn, E. R. Korepanov, and V. V. Belousov. 2014. Matematicheskoe obespechenie parametricheskogo modelirovaniya raspredeleniy v integrodifferentsial'nykh stokhasticheskikh sistemakh [Distributions parametrical modeling software for integrodifferential stochastic systems]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 24(1):4–45. doi: 10.14357/08696527140101. EDN: SJHVJF.
5. Sinitsyn, I. N. 2014. Analiticheskoe modelirovanie raspredeleniy s invariantnoy meroy v negaussovskikh differentsial'nykh i privodimykh k nim ereditarnykh stokhasticheskikh sistemakh [Analytical modeling of distributions with invariant measure in non-Gaussian differential and reducible to differential hereditary stochastic systems]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 8(2):2–14. doi: 10.14357/19922264140201. EDN: SFRWKH.
6. Sinitsyn, I. N., and V. I. Sinitsyn. 2014. Normal'nye i ellipsoidal'nye raspredeleniya v integrodifferentsial'nykh stokhasticheskikh sistemakh [Normal and ellipsoidal distributions in integrodifferential stochastic systems]. *Sistemy komp'yuternoy matematiki i ikh prilozheniya* [Systems of computer mathematics and their applications]. Smolensk: SmolGU. 15:196–197. EDN: SMHJZX.

7. Sinitsyn, I. N., V. I. Sinitsyn, and E. R. Korepanov. 2014. Analiticheskoe modelirovanie ereditarnykh stokhasticheskikh sistem so slozhnymi nelineynostyami [Analytical modeling of hereditary stochastic systems with complex nonlinearities]. *Sovremennyye problemy prikladnoy matematiki, informatiki, avtomatizatsii, upravleniya* [Recent developments in applied mathematics, computer science, automation, and control]. Moscow: IPI RAN. 29–34.
8. Sinitsyn, I. N., I. V. Sergeev, V. I. Sinitsyn, E. R. Korepanov, and V. V. Belousov. 2014. Analiticheskoe komp'yuternoe modelirovanie v ereditarnykh stokhasticheskikh sistemakh s avtokorrelirovannymi shumami [Analytical computer modeling in hereditary stochastic systems with autocorrelated noise]. *Kibernetika i vysokie tekhnologii XXI veka* [Cybernetics and high technology of the XXI century]. Voronezh: SAKVOEE. 543–551. EDN: UKHELH.
9. Sinitsyn, I. N., E. R. Korepanov, and V. V. Belousov. 2015. Razvitie matematicheskogo obespecheniya analiticheskogo i statisticheskogo modelirovaniya ereditarnykh stokhasticheskikh sistem [Development of analytical and statistical modeling for hereditary stochastic systems]. *Identifikatsiya sistem i zadachi upravleniya* [System identification and control problems]. Moscow: IPU RAN. 1275–1297. EDN: TQGEJF.
10. Sinitsyn, I. N. 2021. Analiticheskoe modelirovanie i fil'tratsiya protsessov v integrodifferentsial'nykh stokhasticheskikh sistemakh, ne razreshennykh otnositel'no proizvodnykh [Analytical modeling and filtering for integrodifferential systems with unsolved derivatives]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 31(1):37–56. doi: 10.14357/08696527210104. EDN: PLYOSF.
11. Sinitsyn, I. N. 2017. Analiticheskoe modelirovanie shirokopolosnykh protsessov v stokhasticheskikh sistemakh, ne razreshennykh otnositel'no proizvodnykh [Analytical modeling of wide band processes in stochastic systems with unsolved derivatives]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 11(1):3–10. doi: 10.14357/19922264170101. EDN: YOCMVL.
12. Sinitsyn, I. N. 2017. Parametricheskoe analiticheskoe modelirovanie protsessov v stokhasticheskikh sistemakh, ne razreshennykh otnositel'no proizvodnykh [Parametric analytical modeling of wide band processes in stochastic systems with unsolved derivatives]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 27(1):21–45. doi: 10.14357/08696527170102. EDN: YODCZL.
13. Sinitsyn, I. N. 2021. Normal'nye suboptimal'nye fil'try dlya differentsial'nykh stokhasticheskikh sistem, ne razreshennykh otnositel'no proizvodnykh [Normal suboptimal filtering for differential stochastic systems with unsolved derivatives]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 15(1):3–10. doi: 10.14357/19922264210101. EDN: UPEHRI.
14. Sinitsyn, I. N. 2024. Analiticheskoe modelirovanie stokhasticheskikh sistem, ne razreshennykh otnositel'no proizvodnykh, so sluchaynymi parametrami [Analytical modeling of stochastic systems with random parameters and unsolved derivatives]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 34(1):4–22. doi: 10.14357/08696527240101. EDN: ZPTXJI.

15. Sinitsyn, I. N. 2024. Statisticheskoe modelirovanie differentsial'nykh stokhasticheskikh sistem, ne razreshennykh otnositel'no proizvodnykh [Statistical modeling of differential stochastic systems with unsolved derivatives]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 18(3):12–20.
16. Sinitsyn, I. N. 2024. Metody veroyatnostnogo i statisticheskogo modelirovaniya neyavnykh stokhasticheskikh sistem [Probabilistic and statistical modeling methods for implicit stochastic systems]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 34(3):48–66.
17. Kolmanovskiy, V. B., and V. R. Nosov. 1981. *Ustoychivost' i periodicheskie rezhimy reguliruemyykh sistem s posledstviem* [Stability and periodic modes of regulated systems with consequences]. Moscow: Nauka. 448 p.
18. Azbelev, N. V., V. P. Maksimov, and L. F. Rakhmatulina. 1991. *Vvedenie v teoriyu funktsional'no-differentsial'nykh uravneniy* [Introduction to the theory of functional differential equations]. Moscow: Nauka. 280 p.

Received March 4, 2024

Contributor

Sinitsyn Igor N. (b. 1940) — Doctor of Science in technology, professor, Honored scientist of RF, principal scientist, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119333, Russian Federation; sinitsin@dol.ru

НЕЙРОСЕТЕВОЙ СИНТЕЗ ОПТИМАЛЬНОЙ ЛИНЕЙНОЙ СТОХАСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПО КРИТЕРИЮ МИНИМУМА СРЕДНЕКВАДРАТИЧНОЙ ОШИБКИ*

И. Н. Синицын¹, В. И. Синицын², Э. Р. Корепанов³, Т. Д. Конашенкова⁴

Аннотация: Разработан новый метод синтеза оптимальной линейной стохастической системы (СтС) по критерию минимума среднеквадратичной ошибки (СКО) с применением нейросетевых технологий. На вход системы подается одномерный входной сигнал в виде суммы полезного сигнала и аддитивной гауссовской помехи, независимой от случайных параметров полезного сигнала. На выходе системы требуется получить известное преобразование полезного сигнала. Предлагается архитектура трехслойной вейвлет-нейронной сети (ВНС) с одним скрытым слоем. Функции активации скрытого слоя задаются на основе выбранного ортонормированного базиса вейвлетов с компактными носителями. Алгоритм обучения с обратным распространением ошибки методом наискорейшего спуска используется в процессе функционирования ВНС. Построен СКО-оптимальный оператор системы. Получена формула для СКО-оптимальной оценки выходного стохастического процесса (СтП) в виде линейной комбинации базисных вейвлет-функций. Приведен иллюстративный пример.

Ключевые слова: вейвлет; вейвлет-нейронная сеть; каноническое разложение; моделирование; оптимальная оценка; оптимальный оператор; среднеквадратичная оценка; стохастический процесс; стохастическая система

DOI: 10.14357/08696527240307

EDN: FVQWBN

1 Введение

В задачах анализа и обработки СтП удобно применять канонические разложения (КР), которые представляют СтП в виде линейной комбинации детерминированных функций со случайными коэффициентами [1, 2]. В [3, 4]

*Работа выполнялась с использованием инфраструктуры Центра коллективного пользования «Высокопроизводительные вычисления и большие данные» (ЦКП «Информатика») ФИЦ ИУ РАН (г. Москва).

¹Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук, sinitsin@dol.ru

²Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук, vsinitsin@ipiran.ru

³Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук, ekoeranov@ipiran.ru

⁴Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук, tkonashenkova64@mail.ru

предложен рекуррентный метод построения КР СтП, заданного на конечном промежутке времени математическим ожиданием и ковариационной функцией, на основе ортонормированного базиса вейвлетов с компактными носителями (далее — ВЛКР). В [5] построено КР СтП на основе ВНС (далее — КРВНС). Каноническое разложение СтП на основе ВНС представляет СтП в виде линейной комбинации базисных вейвлет-функций с компактными носителями [6], что упрощает выполнение различных математических операций над СтП.

На практике часто возникает задача проектирования системы, обладающей наибольшей возможной точностью при заданных условиях. Такие системы называются оптимальными с точки зрения выбранного критерия оптимальности. Развитием методов непосредственного определения оптимальных систем занимается теория оптимальных систем. В качестве примера можно привести задачу проектирования оптимальной следящей системы, предназначенной для воспроизведения некоторой переменной величины. Очевидно, что подобные задачи актуальны всегда, поэтому естественно для их решения максимально использовать последние достижения различных разделов математики.

В [7–10] на основе ВЛКР построены линейные операторы, оптимальные по критерию минимума СКО и сложно-статистическому критерию, в виде наборов формальных правил, описывающих реакцию оператора системы на базисные вейвлет-функции. Набор формальных правил задается после решения системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ), которая выписывается на основе заданного операторного уравнения, связывающего ковариационную функцию входного сигнала системы и совместную ковариационную функцию входного и выходного сигналов системы.

В работах [11–14] описано решение задачи синтеза оптимальной по байесову критерию (БК) нестационарной линейной СтС, описываемой уравнениями В. С. Пугачёва, методом ВЛКР. На вход системы поступает СтП в виде полезного сигнала и аддитивной нормально распределенной помехи. Выходной сигнал содержит заданное преобразование полезного сигнала и аддитивную нормально распределенную случайную помеху. Оценка выходного СтП, оптимальная по БК, находится из условия минимума математического ожидания заданной функции потерь. На основе ВЛКР случайных помех получена формула для условной плотности вероятности выходного СтП относительно входного СтП, наблюдаемого на конечном промежутке времени. Для построения БК-оптимальной оценки выходного СтП необходимо решить задачу вариационного исчисления аналитически или приближенно.

В настоящей работе предлагается решение задачи синтеза СКО-оптимальной нестационарной линейной СтС, описываемой уравнениями В. С. Пугачёва, с применением нейросетевых технологий [15–17], которые позволяют решить задачу без нахождения плотности вероятности выходного СтП системы [11–14] или без выписывания СЛАУ [7–10].

В разд. 2 приведена постановка задачи. В разд. 3 приведено описание и обоснование метода построения КРВНС случайной помехи из состава входного

сигнала системы. В разд. 4 дано описание и обоснование процесса моделирования входного сигнала на основе КРВНС случайной помехи из его состава. Раздел 5 посвящен алгоритму нахождения СКО-оптимальной оценки выходного СтП нестационарной линейной СтС на основе трехслойной ВНС с одним скрытым слоем. Функции активации скрытого слоя строятся на основе ортонормированного базиса вейвлетов с компактными носителями, выбранного для построения КРВНС случайной помехи из состава входного СтП системы. Обучение ВНС с обратной связью осуществляется методом наискорейшего спуска. В разд. 6 приведен иллюстративный пример.

2 Постановка задачи

Пусть стохастические одномерные действительные СтП $Z(t)$ и $W(t)$ ($t \in [t_0, t_k]$) заданы на вероятностном пространстве $(\mathcal{L}^2[t_0, t_k], \mathcal{A}, \mathcal{P})$. Здесь $\mathcal{L}^2[t_0, t_k]$ — гильбертово пространство функций $\xi(t)$ ($t \in [t_0, t_k]$) с нормой

$$\|\xi\| = \left[\int_{t_0}^{t_k} |\xi(t)|^2 dt \right]^{1/2};$$

$\mathcal{A}$ — σ -алгебра в $\mathcal{L}^2[t_0, t_k]$; $\mathcal{P}(\xi)$ — вероятность события ξ .

Рассмотрим СтС, описываемую уравнениями В.С. Пугачёва. На вход СтС поступает СтП $Z(t)$ в виде суммы полезного сигнала $S(t)$ и нормально распределенной случайной помехи $X(t)$ с нулевым математическим ожиданием и известной ковариационной функцией

$$K_X(t_1, t_2) = \mathbf{M} \left[X(t_1) \overline{X(t_2)} \right] \quad (t_1, t_2 \in [t_0, t_k]),$$

$$K_X(t_1, t_2) \in \mathcal{L}^2([t_0, t_k] \times [t_0, t_k]).$$

Полезный сигнал $S(t)$ представляет собой линейную комбинацию заданных случайных параметров U_r ($r = \overline{1, N_U}$):

$$S(t) = \sum_{r=1}^{N_U} U_r \xi_r(t),$$

где $\xi_1(t), \dots, \xi_{N_U}(t)$ — известные структурные функции; $\xi_1(t), \dots, \xi_{N_U}(t) \in \mathcal{L}^2[t_0, t_k]$; $U = [U_1 \ U_2 \ \dots \ U_{N_U}]^T$ — N_U -мерная случайная величина (СВ) с заданной плотностью вероятности $f(u)$, не зависящая от случайной помехи $X(t)$. Итак, входной СтП имеет вид:

$$Z(t) = \sum_{r=1}^{N_U} U_r \xi_r(t) + X(t). \quad (1)$$

На выходе системы требуется получить СтП $W(t)$, представляющий собой заданное преобразование полезного сигнала $W(t) = P_t[S(t)]$:

$$W(t) = \sum_{r=1}^{N_U} U_r \zeta_r(t).$$

Здесь $\zeta_1(t), \dots, \zeta_{N_U}(t)$ — также известные функции, $\zeta_1(t), \dots, \zeta_{N_U}(t) \in \mathcal{L}^2[t_0, t_k]$.

Требуется найти оптимальную СтС с оператором P_t^* , выходной СтП которой $W^*(t) = P_t^*[Z(t)]$ обеспечивал бы минимум квадратичного функционала $\min M[(W(t) - W^*(t))^2]$. Систему с оператором P_t^* , обеспечивающим минимум этого функционала, будем называть оптимальной по критерию минимума СКО СтС (далее — СКО-оптимальной СтС), а $W^*(t)$ — СКО-оптимальной оценкой СтП $W(t)$.

Для применения технологии искусственных нейронных сетей (ИНС) надо смоделировать N_Z независимых реализаций входного СтП $\{z^i(t)\}_{i=1}^{N_Z}$, наблюдаемого на заданном промежутке времени $[t_0, t_k]$, и соответствующее им множество независимых значений выходного СтП $\{w_i(t)\}_{i=1}^{N_Z}$. В ответ на каждую реализацию входного СтП $z_i(t)$ СКО-оптимальная СтС выдает оценку $w_i^*(t)$. Тогда согласно закону больших чисел оценка $M[(W(t) - W^*(t))^2]$ вычисляется по формуле:

$$E(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N_Z} (w_i(t) - w_i^*(t))^2.$$

Модель входного СтП $Z(t)$ строится на основе КРВНС случайной помехи $X(t)$ [5].

3 Построение канонического разложения стохастического процесса на основе вейвлет-нейронной сети случайной помехи $X(t)$

Реализации $x(t)$ случайной помехи $X(t)$ принадлежат пространству $\mathcal{L}^2[t_0, t_k]$. В пространстве $\mathcal{L}^2[t_0, t_k]$ зададим ортонормированный базис вейвлетов с компактными носителями вида

$$\{\varphi_{00}(t), \psi_{jk}(t)\}, \quad (2)$$

где $\varphi_{00}(t) = \varphi(t)$ — масштабирующая функция; $\psi_{00}(t) = \psi(t)$ — материнский вейвлет, $\psi_{jk}(t) = \sqrt{2^j} \psi(2^j t - k)$ — вейвлеты уровня j ($j = 1, 2, \dots$; $k = 0, 1, 2^j - 1$). Для удобства представим вейвлет-базис (2) в виде

$$g_1(t) = \varphi_{00}(t), \quad g_2(t) = \psi_{00}(t);$$

$$g_v(t) = \psi_{jk}(t), \quad j = 1, 2, \dots; \quad k = 0, 1, 2^j - 1; \quad v = 2^j + k + 1. \quad (3)$$

Каноническое разложение СтП на основе ВНС случайной помехи $X(t)$ будем искать в виде

$$X(t) = \sum_{v=1}^{\infty} V_v g_v(t), \quad (4)$$

где V_v — некоррелированные СВ с нулевыми математическими ожиданиями и дисперсиями D_v . Согласно прямой теореме Пугачёва, КР (4) соответствует КР ковариационной функции

$$K_X(t_1, t_2) = \sum_{v=1}^{\infty} D_v g_v(t_1) g_v(t_2). \quad (5)$$

И обратно, согласно обратной теореме Пугачёва, КР ковариационной функции (5) соответствует КР случайной помехи $X(t)$ (4).

Параметры КРВНС (4) случайной помехи $X(t)$ удовлетворяют соотношениям [2]:

$$V_v = \int_{t_0}^{t_k} a_v(t) X(t) dt; \quad (6)$$

$$g_v(t) = \frac{1}{D_v} \int_{t_0}^{t_k} K_X(t, \tau) a_v(\tau) d\tau; \quad (7)$$

$$\int_{t_0}^{t_k} g_v(\tau) a_\mu(\tau) d\tau = \delta_{v\mu},$$

где функции $a_\mu(t)$ находятся из условия некоррелированности СВ V_v . При подстановке (4) в (6) и (5) в (7) получаем

$$a_\mu(t) = g_\mu(t).$$

Для построения КРВНС ковариационной функции $K_X(t_1, t_2)$ в пространстве $\mathcal{L}^2([t_0, t_k] \times [t_0, t_k])$ определим двумерный ортонормированный вейвлет-базис в виде тензорного произведения двух вейвлет-базисов вида (2) для случая, когда масштабирование по обоим переменным происходит одинаково:

$$\Phi^A(t_1, t_2) = \varphi_{00}(t_1) \varphi_{00}(t_2); \quad \Psi^H(t_1, t_2) = \varphi_{00}(t_1) \psi_{00}(t_2);$$

$$\Psi^B(t_1, t_2) = \psi_{00}(t_1) \varphi_{00}(t_2); \quad \Psi_{jkn}^D(t_1, t_2) = \psi_{jk}(t_1) \psi_{jn}(t_2),$$

где $j = 1, 2, \dots; k, n = 0, 1, \overline{2^j - 1}$.

Из условия $K_X(t_1, t_2) \in \mathcal{L}^2([t_0, t_k] \times [t_0, t_k])$ следует, что

$$\|K_X(t_1, t_2)\|^2 = \left[\int_{t_0}^{t_k} \int_{t_0}^{t_k} |K_X(t_1, t_2)|^2 dt_1 dt_2 \right]^{1/2} = const$$

и существует единственный вейвлет-ряд

$$a^x \Psi^A(t_1, t_2) + h^x \Psi^H(t_1, t_2) + b^x \Psi^B(t_1, t_2) + \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{k=0}^{2^j-1} \sum_{n=0}^{2^j-1} d_{jkn}^x \Psi_{jkn}^D(t_1, t_2), \quad (8)$$

сходящийся в среднеквадратичном к $K_X(t_1, t_2)$, при этом коэффициенты определяются формулами:

$$\begin{aligned} a^x &= \int_{t_0}^{t_k} \int_{t_0}^{t_k} K_X(t_1, t_2) \Phi^A(t_1, t_2) dt_1 dt_2; \\ h^x &= \int_{t_0}^{t_k} \int_{t_0}^{t_k} K_X(t_1, t_2) \Psi^H(t_1, t_2) dt_1 dt_2; \\ b^x &= \int_{t_0}^{t_k} \int_{t_0}^{t_k} K_X(t_1, t_2) \Psi^B(t_1, t_2) dt_1 dt_2; \\ d_{jkn}^x &= \int_{t_0}^{t_k} \int_{t_0}^{t_k} K_X(t_1, t_2) \Psi_{jkn}^D(t_1, t_2) dt_1 dt_2. \end{aligned}$$

Если от вейвлет-базиса (2) с мультииндексом перейти к вейвлет-базису (3) со скалярным индексом, то вейвлет-ряд (8) перепишется в виде вейвлет-ряда

$$\sum_{v=1}^{\infty} \sum_{\mu=1}^{\infty} k_{v\mu} g_v(t_1) g_{\mu}(t_2) \quad (9)$$

с коэффициентами $k_{11} = a^x$, $k_{12} = h^x$, $k_{21} = b^x$, $k_{22} = d_{000}^x$ и $k_{v\mu} = d_{jkn}^x$ ($v = 2^j + k + 1$; $\mu = 2^j + n + 1$; $j = 1, 2, \dots$; $k, n = 0, \overline{1, 2^j - 1}$).

Задав для вейвлет-базисов (2) и (3) максимальный уровень вейвлет-разрешения J и тем самым ограничив количество базисных функций числом $L = 2^{J+1}$, аппроксимируем ковариационную функцию конечным отрезком вейвлет-ряда:

$$K_X^L(t_1, t_2) = \sum_{v=1}^L k_{vv} g_v(t_1) g_v(t_2). \quad (10)$$

Согласно равенству Парсеваля,

$$\|K_X(t_1, t_2)\|^2 = \sum_{v=1}^{\infty} \sum_{\mu=1}^{\infty} k_{v\mu}^2.$$

Отсюда

$$\begin{aligned} \|K_X(t_1, t_2) - K_X^L(t_1, t_2)\|^2 &= \sum_{v=1}^{\infty} \sum_{\mu=1}^{\infty} k_{v\mu}^2 - \sum_{v=1}^L k_{vv}^2 = \\ &= \|K_X(t_1, t_2)\|^2 - \sum_{v=1}^L k_{vv}^2 = \varepsilon(L). \end{aligned} \quad (11)$$

Из условия $\|K_X(t_1, t_2)\|^2 = \text{const}$ следует, что оценку остатка вейвлет-ряда $\varepsilon(L)$ можно сделать сколь угодно малой за счет выбора L , т. е. $\varepsilon(L) \rightarrow 0$ при $L \rightarrow \infty$ для любых $t_1, t_2 \in [t_0, t_k]$.

Из неравенства

$$\int_{t_0}^{t_k} \int_{t_0}^{t_k} (K_X(t_1, t_2) - K_X^L(t_1, t_2))^2 dt_1 dt_2 \leq \varepsilon(L)$$

следует, что последовательность функций $K_X^L(t_1, t_2) \rightarrow K_X(t_1, t_2)$ при $L \rightarrow \infty$ для любых $t_1, t_2 \in [t_0, t_k]$, т. е. для любого $\varepsilon^K = \varepsilon^K(L) > 0$ существует такое число L , равное количеству базисных функций (3), что выполняется неравенство

$$|K_X(t_1, t_2) - K_X^L(t_1, t_2)| \leq \varepsilon^K(L).$$

Для нахождения приближенных значений коэффициентов k_{vv} ($v = \overline{1, L}$) в разложении (10) воспользуемся технологией ВНС. Оценку неизвестных коэффициентов k_{vv} обозначим через D_v^L ($v = \overline{1, L}$) и будем находить D_v^L ($v = \overline{1, L}$) из условия минимума СКО:

$$\min \left(K_X(t_1, t_2) - \sum_{v=1}^L D_v^L g_v(t_1) g_v(t_2) \right)^2.$$

В [5] разработана архитектура трехслойной ВНС. Активационные функции скрытого слоя равны $g_v(t_1)g_v(t_2)$ ($v = \overline{1, L}$). Задача построения КР ковариационной функции $K_X(t_1, t_2)$ сводится к задаче аппроксимации функции $K_X(t_1, t_2)$ вейвлет-разложением (ВЛР):

$$K_X^L(t_1, t_2) = \sum_{v=1}^L D_v^L(t_1) g_v(t_1) g_v(t_2). \quad (12)$$

Для нахождения неизвестных параметров D_v^L ($v = \overline{1, L}$) в (12) задается множество маркированных примеров $\{[t_1^i \ t_2^i]^T, K_X(t_1^i, t_2^i)\}_{i=1}^N$. Согласно закону больших чисел, оценка СКО в (11) вычисляется через функцию стоимости

$$E(D_v^L) = \frac{1}{2N} \sum_{i=1}^N \left(K_X(t_1^i, t_2^i) - \sum_{v=1}^L D_v^L g_v(t_1^i) g_v(t_2^i) \right)^2. \quad (13)$$

Неизвестные параметры D_v^L ($v = \overline{1, L}$) находятся из условия минимума функции стоимости (13) по отношению к весовым коэффициентам D_v^L ($v = \overline{1, L}$) методом наискорейшего спуска. Исходные значения $D_v^L(0) = 0$ ($v = \overline{1, L}$). Далее значения $D_v^L(n)$ ($v = \overline{1, L}$) меняются при каждой итерации n по формуле

$$D_v^L(n+1) = D_v^L(n) - \eta g_v(n) \quad (v = \overline{1, L}).$$

Здесь

$$g_v(n) = -\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N g_v(t_1^i) g_v(t_2^i) \left(K_X(t_1^i, t_2^i) - \sum_{\mu=1}^L D_\mu^L(n) g_\mu(t_1^i) g_\mu(t_2^i) \right) \quad (v = \overline{1, L}),$$

где $\eta = \text{const}$ — параметр скорости обучения, $0 < \eta < 1$. Процесс обучения ВНС проводится от итерации к итерации, пока весовые коэффициенты D_v^L ($v = \overline{1, L}$) не стабилизируются около значения D_v^{L*} ($v = \overline{1, L}$), а $E(D_v^L(n))$ не сойдется к некоторому минимальному значению

$$E_{\min} = E(D_v^{L*}) = \frac{1}{2N} \sum_{i=1}^N \left(K_X(t_1^i, t_2^i) - \sum_{v=1}^L D_v^{L*} g_v(t_1^i) g_v(t_2^i) \right)^2. \quad (14)$$

Скорость сходимости зависит от выбора параметра скорости обучения η .

В итоге получен приближенный метод нахождения КРВНС ковариационной функции $K_X(t_1, t_2)$ и КРВНС случайной помехи $X(t)$ для $t \in [t_0, t_k]$. Дано обоснование метода и доказано следующее утверждение.

Утверждение 1. Пусть выполняются условия:

- (1) случайная помеха $X(t)$ на промежутке времени $[t_0, t_k]$ имеет нулевое математическое ожидание и известную конечную ковариационную функцию $K_X(t_1, t_2) \in \mathcal{L}^2([t_0, t_k] \times [t_0, t_k])$;
- (2) реализации случайной помехи $X(t)$ принадлежат пространству $\mathcal{L}^2[t_0, t_k]$;
- (3) в пространстве $\mathcal{L}^2[t_0, t_k]$ задан ортонормированный вейвлет-базис $\{g_v(t)\}$, порожденный вейвлетами с компактными носителями;
- (4) для вейвлет-базиса $\{g_v(t)\}$ задан максимальный уровень вейвлет-разрешения J .

Тогда

(1) приближенному КРВНС ковариационной функции

$$K_X^L(t_1, t_2) = \sum_{v=1}^L D_v^{L*} g_v(t_1) g_v(t_2) \quad (15)$$

соответствует приближенное КРВНС случайной помехи

$$X^L(t) = \sum_{v=1}^L V_v^L g_v(t), \quad (16)$$

где V_v^L — некоррелированные СВ с нулевыми математическими ожиданиями и дисперсиями D_v^{L*} ($v = \overline{1, L}$);

- (2) значения D_v^{L*} ($v = \overline{1, L}$) находятся методом наискорейшего спуска при обучении трехслойной ВНС с активационными функциями скрытого слоя, равными $g_v(t_1) g_v(t_2)$ ($v = \overline{1, L}$);
- (3) точность аппроксимации ковариационной функции $K_X(t_1, t_2)$ ее КРВНС (15) и случайной помехи $X(t)$ соответствующим КРВНС (16) вычисляется по формуле (14).

4 Моделирование входного стохастического процесса $Z(t)$ с помощью канонического разложения на основе вейвлет-нейронной сети случайной помехи $X(t)$

Рассмотрим СВ

$$Z_v = \int_{t_0}^{t_k} g_v(t) Z(t) dt \quad (v = 1, 2, \dots). \quad (17)$$

Из условия $\xi_1(t), \dots, \xi_{N_U}(t) \in \mathcal{L}^2[t_0, t_k]$ следует, что

$$\|\xi_r(t)\|^2 = \left[\int_{t_0}^{t_k} |\xi_r(t)|^2 dt \right]^{1/2} = const \quad (r = \overline{1, N_U})$$

и для каждой функции $\xi_r(t)$ ($r = \overline{1, N_U}$) существует единственный вейвлет-ряд

$$\xi_r(t) = \sum_{v=1}^{\infty} \alpha_{vr} g_v(t),$$

сходящийся в среднеквадратичном к $\xi_r(t)$ ($r = \overline{1, N_U}$), при этом коэффициенты определяются формулами

$$\alpha_{vr} = \int_{t_0}^{t_k} g_v(\tau) \xi_r(\tau) d\tau. \quad (18)$$

Подставляя (1) в (17) и принимая во внимание (18) и (4), получим

$$Z_v = \sum_{r=1}^{N_U} \alpha_{vr} U_r + V_v \quad (v = 1, 2, \dots).$$

Если ввести вектор

$$\alpha_v = [\alpha_{v1} \ \alpha_{v2} \ \dots \ \alpha_{vN_U}]^T,$$

то

$$Z_v = \alpha_v^T U + V_v \quad (v = 1, 2, \dots). \quad (19)$$

Таким образом, СВ Z_v ($v = 1, 2, \dots$) являются функциями векторной СВ U и соответствующих СВ V_v .

На основании (19) и (4) имеем ВЛР входного СтП $Z(t)$:

$$Z(t) = \sum_{v=1}^{\infty} Z_v g_v(t) = \sum_{v=1}^{\infty} \alpha_v^T U g_v(t) + \sum_{v=1}^{\infty} V_v g_v(t). \quad (20)$$

Формулы (17) и (20) устанавливают взаимно однозначное соответствие между СтП $Z(t)$ ($t \in [t_0, t_k]$) и совокупностью СВ Z_v ($v = 1, 2, \dots$). Каждой данной реализации СтП $Z(t)$ в силу (17) соответствуют определенные возможные значения СВ Z_v ($v = 1, 2, \dots$). Наоборот, каждой совокупности СВ Z_v ($v = 1, 2, \dots$) соответствует определенная реализация СтП $Z(t)$. В итоге доказано следующее утверждение.

Утверждение 2. Пусть выполняются условия утверждения 1, а также:

- (1) входной СтП $Z(t)$ ($t \in [t_0, t_k]$) СтС описывается уравнением (1);
- (2) структурные функции $\xi_2(t), \dots, \xi_{N_U}(t) \in \mathcal{L}^2[t_0, t_k]$;
- (3) случайный вектор $U = [U_1 \ U_2 \ \dots \ U_{N_U}]^T$ задан плотностью вероятности $f(u)$;
- (4) задано КРВНС случайной помехи $X(t)$ вида (4) и соответствующее КРВНС ковариационной функции $K_X(t_1, t_2)$ — (5).

Тогда между СтП $Z(t)$ ($t \in [t_0, t_k]$) и совокупностью СВ Z_v ($v = 1, 2, \dots$) формулы (17) и (20) устанавливают взаимно однозначное соответствие.

Задав для вейвлет-базисов (2) и (3) максимальный уровень вейвлет-разрешения J , согласно утверждению 1, можно построить приближенное КРВНС случайной помехи $X(t)$ вида (16).

Структурные функции $\xi_1(t), \dots, \xi_{N_U}(t)$ аппроксимируем конечными отрезками вейвлет-рядов:

$$\xi_r^L(t) = \sum_{v=1}^L \alpha_{vr} g_v(t) \quad (r = \overline{1, N_U}).$$

Согласно равенству Парсеваля,

$$\|\xi_r(t)\|^2 = \sum_{v=1}^{\infty} \alpha_{vr}^2 \quad (r = \overline{1, N_U}).$$

Отсюда

$$\|\xi_r(t) - \xi_r^L(t)\|^2 = \|\xi_r(t)\|^2 - \sum_{v=1}^L \alpha_{vr}^2 = \varepsilon_r(L).$$

Из условия

$$\|\xi_r(t)\|^2 = \text{const} \quad (r = \overline{1, N_U})$$

следует, что оценку остатка вейвлет-ряда $\varepsilon_r(L)$ можно сделать сколь угодно малой за счет выбора L , т. е. $\varepsilon_r(L) \rightarrow 0$ при $L \rightarrow \infty$ для любых $t \in [t_0, t_k]$. Из неравенства

$$\int_{t_0}^{t_k} (\xi_r(t) - \xi_r^L(t))^2 dt \leq \varepsilon_r(L)$$

следует, что последовательность функций $\xi_r^L(t) \rightarrow \xi_r(t)$ при $L \rightarrow \infty$ для любых $t \in [t_0, t_k]$, т. е. для любого $\varepsilon_r^{\xi}(L) > 0$ существует такое число L , равное количеству базисных функций (3), что выполняется неравенство

$$|\xi_r(t) - \xi_r^*(t)| \leq \varepsilon_r^{\xi}(L),$$

или

$$\left| \sum_{v>L} \alpha_{vr} g_v(t) \right| \leq \varepsilon_r^{\xi}(L) \quad (r = \overline{1, N_U}). \quad (21)$$

В итоге СтП $Z(t)$ будет соответствовать конечная совокупность СВ

$$Z_v^L = \sum_{r=1}^{N_U} \alpha_{vr} U_r + V_v^L \quad (v = \overline{1, L})$$

и вейвлет-разложение

$$\begin{aligned} Z^L(t) &= \sum_{v=1}^L Z_v^L g_v(t) = \sum_{v=1}^L \sum_{r=1}^{N_U} (\alpha_{vr} U_r + V_v^L) g_v(t) = \\ &= \sum_{v=1}^L \sum_{r=1}^{N_U} \alpha_{vr} U_r g_v(t) + X^L(t). \end{aligned} \quad (22)$$

Рассмотрим множество СВ $\{Z^L(t)\}$ для $t \in [t_0, t_k]$. Покажем, что $Z^L(t) \xrightarrow{\text{с.к.}} Z(t)$ при $L \rightarrow \infty$. Действительно,

$$\begin{aligned} \mathbb{M} (Z(t) - Z^L(t))^2 &= \mathbb{M} \left(\left(\sum_{v=1}^{\infty} \sum_{r=1}^{N_U} \alpha_{vr} U_r g_v(t) + \sum_{v=1}^{\infty} V_v g_v(t) \right) - \right. \\ &\quad \left. - \left(\sum_{v=1}^L \sum_{r=1}^{N_U} \alpha_{vr} U_r g_v(t) + \sum_{v=1}^L V_v g_v(t) \right) \right)^2 = \\ &= \mathbb{M} \left(\sum_{v>L} \sum_{r=1}^{N_U} \alpha_{vr} U_r g_v(t) + \sum_{v>L} V_v g_v(t) \right)^2 = \\ &= \mathbb{M} \left(\left(\sum_{v>L} \sum_{r=1}^{N_U} \alpha_{vr} U_r g_v(t) \right)^2 + 2 \sum_{v>L} \sum_{r=1}^{N_U} \alpha_{vr} U_r g_v(t) \sum_{v>L} V_v g_v(t) + \right. \\ &\quad \left. + \left(\sum_{v>L} V_v g_v(t) \right)^2 \right). \end{aligned}$$

Второе слагаемое в последней сумме под знаком математического ожидания равно нулю, так как случайные параметры U_r ($r = \overline{1, N_U}$) и помеха $X(t) = \sum_{v=1}^{\infty} V_v g_v(t)$ независимы. Отсюда

$$\mathbb{M} (Z(t) - Z^L(t))^2 = \sum_{r=1}^{N_U} \sum_{p=1}^{N_U} \gamma_{rp} \sum_{v>L} \alpha_{vr} g_v(t) \sum_{\mu>L} \alpha_{\mu p} g_{\mu}(t) + \sum_{v>L} D_v g_v^2(t).$$

Будем считать, что случайный вектор $U = [U_1 U_2 \dots U_{N_U}]^T$ имеет конечные первый и второй моменты, тогда $\gamma_{rp} = \mathbb{M} U_r U_p = \text{const}$. Согласно (9) и (22),

$$\mathbb{M} (Z(t) - Z^L(t))^2 \leq \sum_{r=1}^{N_U} \sum_{p=1}^{N_U} \gamma_{rp} \varepsilon_r^{\xi}(L) \varepsilon_p^{\xi}(L) + \varepsilon^K(L).$$

Оценки остатков вейвлет-рядов (9) и (21) можно сделать сколь угодно малыми за счет выбора L , т. е. $\varepsilon_r(L) \rightarrow 0$ ($r = \overline{1, N_U}$), $\varepsilon^K(L) \rightarrow 0$ при $L \rightarrow \infty$ для любых $t \in [t_0, t_k]$, поэтому $M(Z(t) - Z^L(t))^2 \rightarrow 0$ при $L \rightarrow \infty$ для любых $t \in [t_0, t_k]$.

В итоге доказано следующее утверждение.

Утверждение 3. Пусть выполняются условия утверждений 1 и 2, а также случайный вектор $U = [U_1 \ U_2 \ \dots \ U_{N_U}]^T$ имеет конечные первый и второй моменты. Тогда последовательность СтП

$$Z^L(t) = \sum_{v=1}^L \sum_{r=1}^{N_U} \alpha_{vr} U_r g_v(t) + \sum_{v=1}^L V_v^L g_v(t)$$

сходится в среднеквадратичном к СтП $Z(t)$ при $L \rightarrow \infty$ для каждого фиксированного $t \in [t_0, t_k]$.

5 Построение оценки среднеквадратичной ошибки выходного стохастического процесса $W(t)$ на основе вейвлет-нейронной сети

Согласно утверждениям 2 и 3, процесс моделирования N_Z реализаций входного СтП $\{Z^i(t)\}_{i=1}^{N_Z}$, наблюдаемого на заданном промежутке времени $[t_0, t_k]$, состоит в моделировании N_Z совокупностей СВ $\{Z_v^{Li}\}_{i=1}^{N_Z}$. На выходе СтС должна получить соответствующее множество реализаций требуемого выходного СтП $\{W_i(t)\}_{i=1}^{N_Z}$. Таким образом, на вход ВНС подается обучающаяся выборка $\{([t \ Z_1^{Li} \ Z_2^{Li} \ \dots \ Z_L^{Li}]^T, W_i(t))\}_{i=1}^{N_Z}$.

Обобщая опыт синтеза оптимальных по различным БК СтС, описываемых уравнениями В. С. Пугачёва, [11–14], в качестве модели СКО-оптимального оператора рассмотрим линейную композицию базисных вейвлет-функций (3) со случайными коэффициентами Z_v^L и неизвестными весовыми коэффициентами w_v^L :

$$W^{L*}(t) = \sum_{v=1}^L w_v^L Z_v^L g_v(t).$$

Тогда активационные функции нейронов скрытого слоя примут вид:

$$G_v^L(t) = Z_v^L g_v(t) \quad (v = \overline{1, L}).$$

Пусть $w^L = [w_1^L \ w_2^L \ \dots \ w_L^L]^T$ — вектор весовых коэффициентов, $y^L = [y_1^L \ y_2^L \ \dots \ y_{N_Z}^L]^T$ — выходной сигнал ВНС,

$$y_i^L = \sum_{v=1}^L w_v^L Z_v^{Li} g_v(t) = \sum_{v=1}^L w_v^L G_v^{Li}(t). \quad (23)$$

Выходной сигнал y_i^L для каждого i -го примера сравнивается с соответствующим желаемым откликом системы $d^i = W_i(t)$ ($i = \overline{1, N_Z}$) и вычисляется ошибка $e^{Li} = d^i - y_i^L$. Функция стоимости задается в виде СКО для всего набора примеров:

$$E(w^L) = \frac{1}{2N_Z} \sum_{i=1}^{N_Z} (e^{Li})^2 = \frac{1}{2N_Z} \sum_{i=1}^{N_Z} \left(d^i - \sum_{v=1}^L w_v^L G_v^{Li}(t) \right)^2.$$

Обучение ВНС происходит посредством интерактивного процесса корректировки синаптических весов w_v^L ($v = \overline{1, L}$) методом наискорейшего спуска. Начиная с исходного значения $w^L(0)$, генерируется последовательность векторов коэффициентов $w^L(1), w^L(2), \dots$, таких что при переходе от n -й итерации алгоритма к $(n+1)$ -й итерации значение функции стоимости уменьшается:

$$E(w^L(n+1)) < E(w^L(n)).$$

Корректировка вектора весов выполняется в направлении максимального уменьшения функции стоимости, т. е. в направлении, противоположном вектору градиентов

$$\nabla E(w^L) = \left[\frac{\partial E}{\partial w_1^L} \quad \frac{\partial E}{\partial w_2^L} \quad \dots \quad \frac{\partial E}{\partial w_L^L} \right]^T,$$

$$\frac{\partial E}{\partial w_l^L} = -\frac{1}{N_Z} \sum_{i=1}^{N_Z} G_l^{Li}(t) \left(d^i - \sum_{v=1}^L w_v^L G_v^{Li}(t) \right) \quad (l = \overline{1, L}).$$

Для удобства обозначим градиент

$$\nabla E(w^L) = q^L(n).$$

Корректировка весов осуществляется по формуле

$$w^L(n+1) = w^L(n) - \eta q^L(n).$$

Здесь $\eta = const$ — параметр скорости обучения, $0 < \eta < 1$. Процесс обучения проводится от итерации к итерации, пока синаптические веса не стабилизируются около оптимального значения

$$w^{L*} = \left[w_1^{L*} \quad w_2^{L*} \quad \dots \quad w_L^{L*} \right]^T,$$

а СКО не сойдется к некоторому минимальному значению $E_{\min}^L$ [15].

В результате имеем СКО-оптимальную систему с выходным процессом

$$W^{L*}(t) = \sum_{v=1}^L w_v^{L*} Z_v^L g_v(t),$$

или для $G^L(t) = [G_1^L(t) \ G_2^L(t) \ \dots \ G_L^L(t)]^T$ в матричном виде

$$W^{L*}(t) = \left(w^{L*} \right)^T G^L(t).$$

Отсюда СКО-оптимальный оператор принимает вид:

$$P_t^* = \left[w_1^{L*} g_1(t) \ w_2^{L*} g_2(t) \ \dots \ w_L^{L*} g_L(t) \right]^T.$$

Если ввести обозначение $Z^L = [Z_1^L \ Z_2^L \ \dots \ Z_L^L]^T$, то СКО-оптимальная оценка примет вид:

$$W^*(t) = (P_t^*)^T Z^L.$$

6 Пример

Найти СКО-оптимальную оценку для экстраполяции полезного сигнала, представляющего собой линейную функцию времени:

$$Z(t) = U_1 + U_2 t + X(t), \quad W(t + \Delta) = U_1 + U_2(t + \Delta), \quad t \in [t_k - T, t_k].$$

Помеха $X(t)$ распределена нормально, имеет нулевое математическое ожидание и ковариационную функцию

$$K_X(t_1, t_2) = D \exp \{ -\alpha |t_2 - t_1| + \beta(t_2 + t_1) \}.$$

Векторный случайный параметр $U = [U_1 \ U_2]^T$ с нулевым математическим ожиданием задан нормальной плотностью

$$f(u_1, u_2) = \frac{\sqrt{c_{11}c_{22} - c_{12}^2}}{2\pi} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \sum_{p,q=1}^2 c_{pq} u_p u_q \right\},$$

где c_{pq} — элементы матрицы K_u^{-1} , обратной к ковариационной матрице K_u случайного вектора U .

Исходные данные: $t_k \in [8; 16]$, $T = 8$, $\Delta = 1$; $D = 1$, $\alpha = 1$, $\beta = 0,001$; ковариационная матрица случайного вектора U :

$$K_u = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

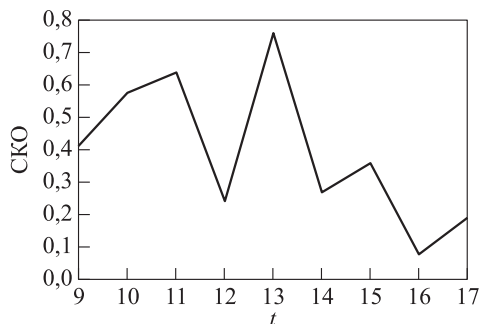


Рис. 1 График значений СКО для $J = 2$ и $L = 8$

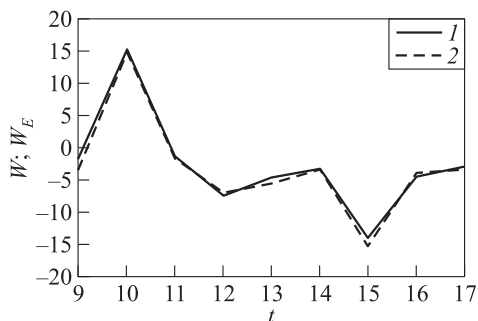


Рис. 2 График сигнала $W(t)$ и его оценки $W_E(2)$ для $J = 2$ и $L = 8$

Для моделирования случайной помехи $X(t)$ задается ортонормированный базис Хаара с максимальным уровнем вейвлет-разрешения J и числом базисных функций $L = 1^{J+1}$. Для проведения вычислительных экспериментов разработано инструментальное программное обеспечение в среде MATLAB. Алгоритм обучения используется в процессе функционирования ВНС. Вычислительные эксперименты показали, что оптимальное значение параметра скорости обучения $\eta = 0,001$.

На рис. 1 и 2 приведены результаты вычислительных экспериментов для базиса Хаара при $J = 2$ и $L = 8$ в точках $(t_k + 1) \in [9; 17]$. На рис. 1 изображен график значений СКО. На рис. 2 приведен график сигнала W и его оценки W_E , вычисленной по формуле

$$W^*(t_k + \Delta) = \sum_{v=1}^L w_v^* Z_v g_v(t_k + \Delta).$$

Вычислительные эксперименты показали, что СКО уменьшается при увеличении числа базисных функций и максимального уровня вейвлет-разрешения базиса Хаара. При $J = 2$ и $L = 8$ СКО не превышает 0,76 при изменении сигнала от -14 до 15 ; при $J = 4$ и $L = 32$ СКО не превышает 0,49 при изменении сигнала от -22 до 20 .

Оценим точность оптимальных линейных систем, найденных различными приближенными методами, по формуле

$$\eta_{\min}(t) = \mathbf{M} [(W^*(t) - W(t))^2].$$

Значения $\eta_{\min}(t)$ приведены в таблице, где введены следующие обозначения: метод 1 — оптимальная оценка $W^*(t)$ вычисляется по формуле (23); метод 2 — оптимальная оценка $W^*(t)$ вычисляется на основе решения СЛАУ [7–10]; метод 3 — оптимальная оценка $W^*(t)$ находится из условия минимума условного

Значения $\eta_{\min}(t)$ для различных методов

t	Метод		
	1	2	3
9	0,9038	0,8782	0,8965
11	0,9948	0,7668	0,7940
12	0,8311	0,7274	0,7431
13	0,6077	0,6753	0,6962
15	0,3486	0,5809	0,6168
17	0,1659	0,5494	0,5553
18	0,1488	0,5364	0,5301

математического ожидания функции потерь после определения условной плотности вероятности выходного СтП относительно входного СтП [11–14].

Сравнительный анализ нового метода построения оценки выходного СтП системы, описываемой уравнениями В. С. Пугачёва, с приближенными методами, описанными в работах [7–14], показали, что все методы дают одинаковый порядок точности вычислений. Но предлагаемый метод проще в исполнении, так как не требует предварительных аналитических выкладок. Увеличивая число базисных функций и максимальный уровень вейвлет-разрешения базиса вейвлетов, можно добиться необходимой точности моделирования выходного СтП системы.

7 Заключение

В работе предлагается новый приближенный метод построения СКО-оптимальной оценки скалярного выходного СтП нестационарной линейной СтС, описываемой уравнениями В. С. Пугачёва. В основе метода лежат нейросетевые технологии, позволяющие найти минимум математического ожидания функции потерь без нахождения распределения выходного СтП. Для решения задачи задается трехслойная ВНС. Входной СтП задается совокупностью СВ, которая подается на первый слой ВНС. Совокупность СВ входного СтП строится на основе КРВНС случайной помехи из состава входного сигнала. Функции активации скрытого слоя равны произведению входной СВ и соответствующей базисной вейвлет-функции заданного ортонормированного базиса вейвлетов с компактными носителями. Весовые коэффициенты связывают функции активации скрытого слоя и выходные сигналы ВНС. Для обучения ВНС используется обратный алгоритм. Оптимальные значения весовых коэффициентов находятся методом наискорейшего спуска при оптимальном значении параметра скорости обучения $\eta = 0,001$. Определен вид СКО-оптимального оператора и найдена СКО-оптимальная оценка выходного СтП в виде линейной комбинации базисных вейвлет-функций.

Сравнительный анализ с другими приближенными методами, разработанными авторами, показал, что все методы построения СКО-оптимальной оценки

выходного СтП дают одинаковую вычислительную точность. Преимущество предлагаемого метода заключается в отсутствии предварительных трудоемких аналитических выкладок.

Полученные результаты допускают обобщение на случай векторных входного и выходного СтП и нелинейных структурных функций, описывающих поведение системы.

Литература

1. *Пугачёв В. С.* Теория случайных функций и её применение к задачам автоматического управления. — М.: Физматгиз, 1962. 884 с.
2. *Синицын И. Н.* Канонические представления случайных функций. Теория и применения. — 2-е изд. — М.: ТОРУС ПРЕСС, 2023. 816 с.
3. *Синицын И. Н., Сергеев И. В., Корепанов Э. Р., Конашенкова Т. Д.* Инструментальное программное обеспечение анализа и синтеза стохастических систем высокой доступности (IV) // Системы высокой доступности, 2017. Т. 13. № 3. С. 55–69. EDN: ZSQHLR.
4. *Синицын И. Н., Сергеев И. В., Корепанов Э. Р., Конашенкова Т. Д.* Инструментальное программное обеспечение анализа и синтеза стохастических систем высокой доступности (V) // Системы высокой доступности, 2018. Т. 14. № 1. С. 59–70. EDN: YVXNBW.
5. *Синицын И. Н., Сергеев И. В., Корепанов Э. Р., Конашенкова Т. Д.* Моделирование нестационарного стохастического процесса посредством его канонического разложения на основе вейвлет-нейронной сети // Системы и средства информатики, 2024. Т. 34. № 2. С. 21–39. doi: 10.14357/08696527240202. EDN: YFHFIF.
6. *Добеши И.* Десять лекций по вейвлетам / Пер. с англ. — Москва, Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2004. 464 с. (*Daubechies I.* Ten lectures on wavelets. — Philadelphia, PA, USA: Society for Industrial and Applied Mathematics, 1992. 352 p.)
7. *Синицын И. Н., Синицын В. И., Корепанов Э. Р., Конашенкова Т. Д.* Оптимизация линейных стохастических систем на основе вейвлет канонических разложений // Автоматика и телемеханика, 2020. № 11. С. 136–154.
8. *Синицын И. Н., Сергеев И. В., Корепанов Э. Р., Конашенкова Т. Д.* Инструментальное программное обеспечение анализа и синтеза стохастических систем высокой доступности (XI) // Системы высокой доступности, 2021. Т. 17. № 1. С. 25–40. doi: 10.18127/j20729472-202101-03. EDN: GNUATK.
9. *Синицын И. Н., Сергеев И. В., Корепанов Э. Р., Конашенкова Т. Д.* Инструментальное программное обеспечение анализа и синтеза стохастических систем высокой доступности (XII) // Системы высокой доступности, 2021. Т. 17. № 2. С. 26–44. doi: 10.18127/j20729472-202102-03. EDN: HQGBJG.
10. *Синицын И. Н., Сергеев И. В., Корепанов Э. Р., Конашенкова Т. Д.* Инструментальное программное обеспечение анализа и синтеза стохастических систем высокой доступности (XIII) // Системы высокой доступности, 2021. Т. 17. № 3. С. 39–58. doi: 10.18127/j20729472-202103-04. EDN: RPESHX.
11. *Синицын И. Н., Сергеев И. В., Корепанов Э. Р., Конашенкова Т. Д.* Инструментальное программное обеспечение анализа и синтеза стохастических систем высокой

- доступности (XV) // Системы высокой доступности, 2022. Т. 18. № 1. С. 47–61. doi: 10.18127/j20729472-202201-05. EDN: ZKKSQQ.
12. *Sinitsyn I., Sinitsyn V., Korepanov E., Konashenkova T.* Bayes synthesis of linear nonstationary stochastic systems by wavelet canonical expansions // *Mathematics*, 2022. Vol. 10. Iss. 9. Art. 1517. 14 p. doi: 10.3390/math10091517.
13. *Синицын И. Н., Сергеев И. В., Корепанов Э. Р., Конашенкова Т. Д.* Инструментальное программное обеспечение анализа и синтеза стохастических систем высокой доступности (XVI) // Системы высокой доступности, 2022. Т. 18. № 2. С. 58–77. doi: 10.18127/j20729472-202202-04. EDN: HKABED.
14. *Синицын И. Н., Сергеев И. В., Корепанов Э. Р., Конашенкова Т. Д.* Инструментальное программное обеспечение анализа и синтеза стохастических систем высокой доступности (XVII) // Системы высокой доступности, 2023. Т. 19. № 2. С. 5–24. doi: 10.18127/j20729472-202302-01. EDN: PCUHWI.
15. *Хайкин С.* Нейронные сети: полный курс / Пер. с англ. — 2-е изд. — СПб.: Диалектика, 2020. 1104 с. (*Haykin S.* Neural networks. A comprehensive foundation. — 2nd ed. — Prentice-Hall of India Pvt. Ltd., 1999. 842 p.)
16. *Терехов С. А.* Вейвлеты и нейронные сети // Научная сессия МИФИ-2001: III Всеросс. научн.-техн. конф. «Нейроинформатика-2001»: Лекции по нейроинформатике. — М.: МИФИ, 2001. С. 142–181.
17. *Veitch D.* Wavelet neural networks and their application in the study of dynamical system // *Networks*, 2005. Vol. 1. No. 8. P. 313–320.

Поступила в редакцию 10.06.24

NEURAL NETWORK SYNTHESIS OF AN OPTIMAL LINEAR STOCHASTIC SYSTEM ACCORDING TO THE CRITERION OF MINIMUM MEAN SQUARE ERROR

I. N. Sinitsyn, V. I. Sinitsyn, E. R. Korepanov, and T. D. Konashenkova

Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119133, Russian Federation

Abstract: The paper is devoted to the new synthesis method for linear optimal stochastic systems according to the criterion of minimum mean square error (MSE) and neural network technology. It is supposed that one-dimensional input signal is the sum of known signal and additive Gaussian noise. Noise is independent of signal parameters. At output, it is necessary to perform corresponding input transformation. The paper describes architecture of three-layer wavelet neural network (WNN) with one reserved layer. The activation function of reserved layer is described using orthonormal wavelet basis with compact carrier. For WNN functioning, a tutoring algorithm based on the method of quick descend is used. The MSE optimal operator is constructed. The MSE estimate is presented in the form of linear combination of basis wavelet functions. An illustrative example is given. The basic results are formulated and discussed.

Keywords: canonical expansion; mean square estimate; modeling; optimal estimate; optimal system; stochastic process; stochastic system; wavelet; wavelet-neural network

DOI: 10.14357/08696527240307

EDN: FVQWBN

Acknowledgments

The research was carried out using the infrastructure of the Shared Research Facilities “High Performance Computing and Big Data” (CKP “Informatics”) of FRC CSC RAS (Moscow).

References

1. Pugachev, V. S. 1962. *Teoriya sluchaynykh funktsiy i ee primeneniye k zadacham avtomaticheskogo upravleniya* [Theory of random functions and its application to automatic control problems]. Moscow: Fizmatgiz. 884 p.
2. Sinitsyn, I. N. 2023. *Kanonicheskie predstavleniya sluchaynykh funktsiy. Teoriya i primeneniya* [Canonical expansions of random functions. Theory and applications]. 2nd ed. Moscow: TORUS PRESS. 816 p.
3. Sinitsyn, I. N., I. V. Sergeev, E. R. Korepanov, and T. D. Konashenkova. 2017. Instrumental'noe programmnoe obespechenie analiza i sinteza stokhasticheskikh sistem vysokoy dostupnosti (IV) [Software tools for analysis and synthesis of stochastic systems with high availability (IV)]. *Sistemy vysokoy dostupnosti* [Highly Available Systems] 13(3):55–69. EDN: ZSQHLR.
4. Sinitsyn, I. N., I. V. Sergeev, E. R. Korepanov, and T. D. Konashenkova. 2018. Instrumental'noe programmnoe obespechenie analiza i sinteza stokhasticheskikh sistem vysokoy dostupnosti (V) [Software tools for analysis and synthesis of stochastic systems with high availability (V)]. *Sistemy vysokoy dostupnosti* [Highly Available Systems] 14(1):59–70. EDN: YVXNBW.
5. Sinitsyn, I. N., I. V. Sergeev, E. R. Korepanov, and T. D. Konashenkova. 2024. Modelirovaniye nestatsionarnogo stokhasticheskogo protsessa posredstvom ego kanonicheskogo razlozheniya na osnove veyvlet-neyronnoy seti [Nonstationary stochastic process modeling by canonical expansion and wavelet neutral network]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 34(2):21–39. doi: 10.14357/08696527240202. EDN: YFHFIN.
6. Daubechies, I. 1992. *Ten lectures on wavelets*. Philadelphia, PA: Society for Industrial and Applied Mathematics. 352 p.
7. Sinitsyn, I. N., V. I. Sinitsyn, E. R. Korepanov, and T. D. Konashenkova. 2020. Optimization of linear stochastic systems based on canonical wavelet expansions. *Automat. Rem. Contr.* 81(11):2046–2061. doi: 10.1134/S0005117920110077. EDN: EOJMHD.
8. Sinitsyn, I. N., I. V. Sergeev, E. R. Korepanov, and T. D. Konashenkova. 2021. Instrumental'noe programmnoe obespechenie analiza i sinteza stokhasticheskikh sistem vysokoy dostupnosti (XI) [Software tools for analysis and synthesis of stochastic systems with high availability (XI)]. *Sistemy vysokoy dostupnosti* [Highly Available Systems] 17(1):25–40. doi: 10.18127/j20729472-202101-03. EDN: GNUATK.

9. Sinitsyn, I. N., I. V. Sergeev, E. R. Korepanov, and T. D. Konashenkova. 2021. Instrumental'noe programmnoe obespechenie analiza i sinteza stokhasticheskikh sistem vysokoy dostupnosti (XII) [Software tools for analysis and synthesis of stochastic systems with high availability (XII)]. *Sistemy vysokoy dostupnosti* [Highly Available Systems] 17(2):26–44. doi: 10.18127/j20729472-202102-03. EDN: HQGBJG.
10. Sinitsyn, I. N., I. V. Sergeev, E. R. Korepanov, and T. D. Konashenkova. 2021. Instrumental'noe programmnoe obespechenie analiza i sinteza stokhasticheskikh sistem vysokoy dostupnosti (XIII) [Software tools for analysis and synthesis of stochastic systems with high availability (XIII)]. *Sistemy vysokoy dostupnosti* [Highly Available Systems] 17(3):39–58. doi: 10.18127/j20729472-202103-04. EDN: RPECHX.
11. Sinitsyn, I. N., I. V. Sergeev, E. R. Korepanov, and T. D. Konashenkova. 2022. Instrumental'noe programmnoe obespechenie analiza i sinteza stokhasticheskikh sistem vysokoy dostupnosti (XV) [Software tools for analysis and synthesis of stochastic systems with high availability (XV)]. *Sistemy vysokoy dostupnosti* [Highly Available Systems] 18(1):47–61. doi: 10.18127/j20729472-202201-05. EDN: ZKKSQQ.
12. Sinitsyn, I., V. Sinitsyn, E. Korepanov, and T. Konashenkova. 2022. Bayes synthesis of linear nonstationary stochastic systems by wavelet canonical expansions. *Mathematics* 10(9):1517. 14 p. doi: 10.3390/math10091517.
13. Sinitsyn, I. N., I. V. Sergeev, E. R. Korepanov, and T. D. Konashenkova. 2022. Instrumental'noe programmnoe obespechenie analiza i sinteza stokhasticheskikh sistem vysokoy dostupnosti (XVI) [Software tools for analysis and synthesis of stochastic systems with high availability (XVI)]. *Sistemy vysokoy dostupnosti* [Highly Available Systems] 18(2):58–77. doi: 10.18127/j20729472-202202-04. EDN: HKABED.
14. Sinitsyn, I. N., I. V. Sergeev, E. R. Korepanov, and T. D. Konashenkova. 2023. Instrumental'noe programmnoe obespechenie analiza i sinteza stokhasticheskikh sistem vysokoy dostupnosti (XVII) [Software tools for analysis and synthesis of stochastic systems with high availability (XVII)]. *Sistemy vysokoy dostupnosti* [Highly Available Systems] 19(2):5–24. doi: 10.18127/j20729472-202302-01. EDN: PCUHWI.
15. Haykin, S. 1999. *Neural networks. A comprehensive foundation*. 2nd ed. Prentice-Hall of India Pvt. Ltd. 842 p.
16. Terekhov, S. A. 2001. Veyvlety i neyronnye seti [Wavelets and neural networks]. *Nauchnaya sessiya MIFI-2001: III Vseross. nauchn.-tekhn. konf. "Neyroinformatika-2001": leksii po neyroinformatike* [Scientific session MEPhI-2001: 3rd All-Russian Scientific and Technical Conference "Neuroinformatics-2001": Lectures on neuroinformatics]. Moscow: MIFI. 142–181.
17. Veitch, D. 2005. Wavelet neural networks and their application in the study of dynamical system. *Networks* 1(8):313–320.

Received June 10, 2024

Contributors

Sinitsyn Igor N. (b. 1940) — Doctor of Science in technology, professor, Honored scientist of RF, principal scientist, Federal Research Center "Computer Science and Control" of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119133, Russian Federation; sinitsin@dol.ru

Sinitsyn Vladimir I. (b. 1968) — Doctor of Science in physics and mathematics, principal scientist, Federal Research Center "Computer Science and Control" of

the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119133, Russian Federation; vsinitsin@ipiran.ru

Korepanov Eduard R. (b. 1966) — Candidate of Science (PhD) in technology, leading scientist, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119133, Russian Federation; ekorepanov@ipiran.ru

Konashenkova Tatiana D. (b. 1964) — Candidate of Science (PhD) in physics and mathematics, scientist, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119133, Russian Federation; tkonashenkova64@mail.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВХОДНОГО ПОТОКА РАБОЧИХ НАГРУЗОК ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО КЛАСТЕРА LANL MUSTANG

*М. П. Кривенко*¹

Аннотация: Статистический анализ — обязательный элемент построения математической модели исследуемого объекта. Системы массового обслуживания (СМО) как объект исследований обладают специфическими особенностями, из-за которых приходится выходить за рамки общей теории стохастических процессов. В статье рассматривается построение моделей входного потока многопроцессорных систем на основе трассировки реальной рабочей загрузки кластера Mustang, полученной в рамках проекта Atlas (www.project-atlas.org). К особенностям данных Mustang можно отнести большой период наблюдений, внушительный объем собранных сведений, широкое поле изысканий из-за упрощенного характера предшествующих исследований и уже сделанных нечетких выводов, комбинирование фрагментов с разными интенсивностями потока, наличие стационарных и нестационарных участков, неприменимость модели простого пуассоновского потока. Как решение возникающих проблем для стационарных фрагментов данных предлагается использовать модель ветвящегося процесса Пуассона (Branching Poisson Process, BPP). Известные методы оценивания параметров модели дополнены процедурой уточнения оценок и формализованными приемами подтверждающего анализа. Вследствие больших объемов обрабатываемых данных важным становится построение эффективных алгоритмов вычисления характеристик потоков и сглаживания выборочных показателей.

Ключевые слова: репозиторий трассировок; кластер LANL Mustang; ветвящийся пуассоновский процесс; статистический анализ последовательностей событий

DOI: 10.14357/08696527240308

EDN: FRSPMK

1 Введение

Статистический анализ — обязательный элемент построения математической модели реальной системы. Модель практически бесполезна, если не связана со своим прообразом посредством анализа эмпирических данных, оценки параметров и проверки соответствующих гипотез. Однако в теории массового обслуживания статистический анализ отодвигается на второй план по двум основным причинам [1]. В отличие от анализа временных рядов, априорные предположения относительно входных потоков и дисциплины обслуживания обычно уже включены в условия, при которых исследуется поведение системы. В результате место остается только для подтверждающих исследований. При этом стохастические

¹Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук, mkcrivenko@ipiran.ru

процессы, лежащие в основе СМО, — это частные случаи более общей теории статистического вывода, а обработка данных о протекающих процессах обычно может быть выполнена с помощью существующих процедур. Все это снижает актуальность статистического анализа, придает ему второстепенный характер.

Но СМО как объект исследований обладают специфическими особенностями, из-за которых приходится выходить за рамки общей теории стохастических процессов. В первую очередь это касается вопросов идентификации моделей, включающей четыре важнейших этапа.

Сбор данных, для которого как пример специфичности можно привести принятие решения: наблюдать за системой в течение определенного периода времени или пока не произойдет определенное число событий.

При формировании моделей массового обслуживания важную роль играет удобство наблюдения и информативность исследуемых характеристик, что подчас приводит к многовариантности решения однотипных задач (примером могут служить разнообразные определения стабильности и крайне немногочисленные результаты их сопоставления).

Подчас одной из основных проблем при сборе необходимых статистических данных о функционировании СМО становится отсутствие полной информации либо из-за невозможности ее получить (описаны уже свершившиеся события, структура системы скрыта или сложна), либо из-за недопустимо высоких затрат. Понятно, что в этом случае приходится искать решение возникающих задач в сложившихся условиях, но если состав недостающей информации вскрывается в ходе анализа данных, то может стать обоснованием для изменения порядка сбора исходной информации (соответствующий пример с ветвящимся пуассоновским процессом будет рассмотрен далее).

Тестирование стационарности во времени, в рамках которого приходится принимать решение о том, как работать с циклическими трендами, когда процесс, который представляется нестационарным, если его рассматривать на всем периоде наблюдения, оказывается кусочно-стационарным — типичная ситуация для реальных потоков СМО.

Тестирование независимости, когда, в частности, становятся востребованными процедуры анализа зависимости разнородных элементов СМО и возникает вопрос, что делать в ситуациях, когда при ограниченных объемах исходных данных допущения о независимости не выполняются.

Выбор распределения — компромисса между преимуществами сложности модели и способностью аналитически извлекать из нее информацию. Так, в теории массового обслуживания типичные случайные величины не являются нормально распределенными, в то время как множество используемых тестов основано именно на этом предположении. Эта общая для прикладного статистического анализа проблема, в частности, может решаться за счет использования непараметрических тестов или привлечения асимптотических результатов. Но препятствия при применении и сомнения в правомерности таких подходов применительно к СМО чаще всего остаются.

Рассмотрим далее построение моделей входного потока многопроцессорных систем на основе трассировки реальной рабочей загрузки системы, зафиксированной в соответствующих журналах. Достоинство производственных журналов заключается в их реалистичности. Однако они не свободны от недостатков [2]: неуверенности в достоверности представляемой информации, наличия ошибок или сомнительных данных, существенных колебаний характеристик нагрузок в зависимости от происхождения журналов. Подобные проблемы ограничивают степень надежности, с которой можно делать выводы из прошлых рабочих нагрузок, чтобы предсказывать будущее, или делать выводы из одной конфигурации оборудования, пользовательской базы и планировщика о других. Но все сомнения уходят на второй план, когда с помощью исследования конкретных данных удастся обратить внимание на неожиданные особенности функционирования систем, выявить недостатки существующих процедур анализа данных и предложить новые решения, сформулировать пожелания относительно методов сбора информации.

2 Источники данных для моделирования

Несмотря на наличие в литературе трассировок рабочей нагрузки (например, [3]), они подчас носят разрозненный характер, следуют неканоническим форматам, опускают полезные для исследователей характеристики.

Для предотвращения неадекватных исследований рабочих нагрузок и преодоления организационных трудностей с 2018 г. получил развитие проект Atlas (www.project-atlas.org) — программа партнерства, инициированного Университетом Карнеги–Меллона и Лос-Аламосской национальной лабораторией (Los Alamos National Laboratory, LANL). Соответствующий репозиторий содержит общедоступные трассировки. Согласно правилам сайта проекта Atlas, при использовании его данных необходимо давать ссылки на [4, 5].

В табл. 1 дана общая характеристика кластеров, анонсированных в рамках проекта Atlas. Цель авторов проекта Atlas состоит в том, чтобы анализировать, моделировать и публиковать такие журналы, чтобы другие исследователи могли их использовать. Анализ существующих рабочих нагрузок показывает, что трассировки LANL и TwoSigma значительно отличаются от трассировок кластера Google, которые наиболее часто используются в современной литературе, что подчеркивает необходимость разнообразия данных, обеспечить которое пытается проект Atlas.

На момент написания данной статьи реальный доступ возможен лишь к LANL Trinity и LANL Mustang. Ознакомиться с обоими вариантам TwoSigma предлагается через www.pdl.cmu.edu/ATLAS, но фактически это ничего не дающая отсылка снова на сайт проекта Atlas. Причина в том, что репозиторий в настоящее время находится в стадии интенсивной разработки.

Наибольший интерес с позиций разведочного статистического анализа данных представляет трассировка для LANL Mustang: большой период наблюдений,

Таблица 1 Аппаратные характеристики представленных в проекте Atlas кластеров

Платформа	Год формирования	Длительность формирования	Число узлов (Nodes)	Число процессоров в узле (Node CPUs)	Объем оперативной памяти (RAM)
LANL Trinity	2018	3 мес.	9408	32	128 ГБ
LANL Mustang	2011–2016	5 лет	1600	24	64 ГБ
TwoSigma A	2016	9 мес.	872	24	256 ГБ
TwoSigma B			441	24	256 ГБ
Google (10 вариантов)	2012	29 дней для каждого варианта	от 1 до 6732	от 0,25 до 1,0 относительно самого большого узла	от 0,03 до 1,0 относительно самого большого узла

внушительный объем собранных сведений, широкое поле изысканий из-за упрощенного характера предшествующих исследований и уже сделанных нечетких выводов. Mustang — кластер высокопроизводительных вычислений, спроектирован как экономичный ресурс общего назначения для большого числа пользователей; использовался учеными, инженерами и разработчиками программного обеспечения в LANL; он был выделен этим пользователям с детализацией физических узлов. Кластер состоял из 1600 идентичных вычислительных узлов с общим объемом 38 400 ядер AMD Opteron 6176 с тактовой частотой 2,3 ГГц и 102 ТБ оперативной памяти. Далее речь пойдет об обработке версии данных журнала под названием LANL Mustang trace FAQ version 1.0 Beta (обозначения сайта проекта Atlas), далее называемой просто данными Mustang.

Данные Mustang охватывают 61 мес. функционирования кластера с октября 2011 г. по ноябрь 2016 г. Собираемые данные включали поля меток времени для этапов задания от отправки до завершения, свойств задания (пользователь и объем требуемых ресурсов), состояния завершения задания и бюджета времени для каждого задания, превышение которого приводило к прекращению выполнения задания.

Несмотря на то что используемая версия данных прошла редактирование (от состояния Raw до Formatted, согласно сайту проекта), обработку пришлось начать с очистки. Для нее использовались три фильтра: «временной», «ресурсный» и «упорядоченности». Состояние определенного поля данных можно охарактеризовать как без ошибок (далее — код «0»), с некритической ошибкой (например, значение пропущено, но может быть восстановлено с помощью другого поля; код «1»), с критической ошибкой (например, нарушено условие неубывания значений временных меток, код «2»). Если перечисленные состояния фиксировать для группы временных характеристик (код «Т») и ресурсных (код «J»), то итоговая таблица встретившихся комбинаций примет вид табл. 2.

Таблица 2 Таблица сопряженности состояний полей данных и статуса заданий

T	J	Статус задания		
		Отменено (CANCELLED)	Завершено (COMPLETED)	Снято из-за превышения бюджета времени (TIMEOUT)
0	0	43 798	1 796 924	149 655
0	1	2 272	18 802	2520
0	2	3187	1844	0
1	0	86 389	7581	0
1	1	91	0	0
1	2	0	0	0
2	0	3	0	0
2	1	0	0	109
2	2	0	0	0

Допустив возможность обрабатывать данные, сформированные правильно или с некритическими ошибками, пришлось отбросить 5143 строки журнала трассировки (соответствуют клеткам табл. 2 полученным при возникновении какой-либо ошибки с кодом 2), что составляет 0,2%.

3 Основные методы анализа данных

Тестирование стационарности. Рассчитывать при имеющейся большой длительности формирования данных на неизменность их характеристик не приходится. Поэтому в первую очередь визуально вся исходная последовательность была разделена на три части, поименованные как M1, M2, M3 (табл. 3). Каждая из них имела примерно одинаковые интенсивности поступления запросов, но явно отличающиеся друг от друга.

Тестирование стационарности для каждой части в отдельности основывалось на гипотезе о равномерном распределении моментов наступления событий на

Таблица 3 Характеристики фрагментов очищенных данных

Имя	Число событий	Время начала фрагмента	Время окончания фрагмента	Длительность фрагмента в секундах (днях)	Интенсив- ность потока событий	Максималь- ная длина серии одинаковых T_{in}
M1	145 081	3 636	58 592 906	58 589 270 (678)	0,0025	160
M1s	10 321	47 503 972	51 999 832	4 495 860 (52)	0,0023	4
M2	1 238 230	58 592 906	81 639 293	23 046 387 (266)	0,0537	779
M2s	221 593	59 000 067	62 999 971	3 999 904 (46)	0,0554	305
M3	724 721	81 639 453	158 870 694	77 231 241 (893)	0,0094	1 973
M3s	19 865	107 801 163	112 499 510	4 698 347 (32)	0,0042	32

периоде наблюдения (тест U) и на применении линейного регрессионного анализа к интервалам между событиями (тест R); полученные результаты без сомнений свидетельствовали в пользу гипотезы о наличии тренда. Для целей последующего анализа опять же визуальным путем методом проб и ошибок «внутри» $M1$, $M2$ и $M3$ были выделены фрагменты, похожие на стационарные (назовем их соответственно $M1s$, $M2s$ и $M3s$), к которым были применены указанные тесты. Результаты в основном опять же говорили о наличии тренда, что вызвало некоторые сомнения в корректности применяемых методов. Они только возросли в ходе экспериментов со случайными перестановками элементов исходных данных. Наиболее существенным фактором, искажающим предположения общепринятых критериев статистического анализа последовательностей событий (к которым, безусловно, относятся указанные тесты U и R), оказалось совпадение отдельных значений T_{in} (в качестве примера см. последний столбец табл. 3). Причем их может быть достаточно много, и относятся они для одной и той же серии как к одному и тому же пользователю, так и к разным. Для того чтобы пояснить, какие действия позволили исправить положение дел, придется напомнить суть теста R [6, разд. 3.2].

Пусть исследуется постепенное изменение интенсивности поступления событий. Выбрав некоторое целое l , сформируем Y_1 — время от начала наблюдения до l -го события, Y_2 — время от l -го до $2l$ -го события и т. д., при этом «лишние» (общее число событий не кратно l) по тому или иному правилу отбрасываем. Если процесс простой пуассоновский, то Y_i являются независимыми и

$$E(\ln Y_i) = -\ln \lambda + e_i; \quad \text{Var}(\ln Y_i) = v_l,$$

где e_i и v_l — известные постоянные, не зависящие от λ , в частности

$$v_l \cong \frac{1}{l - 0,5}.$$

Делается допущение, что каждому y_i можно сопоставить независимую случайную величину z_i (в данной статье это центр интервала y_i):

$$\ln \lambda_i = \alpha + \beta z_i.$$

Таким образом получаем линейную модель

$$E(\ln Y_i) = -(\alpha' + \beta z_i); \quad \text{Var}(\ln Y_i) = v_l,$$

где $\alpha' = \alpha - e_i$; β — неизвестные параметры, подлежащие оцениванию; v_l — известная постоянная. Таким образом можно получить оценки параметров, проверить нулевую гипотезу $\beta = 0$, провести анализ адекватности принятой модели и обосновать рост эффективности оценки тренда с увеличением числа объединяемых интервалов.

Особенности данных Mustang создали проблему с самого начала применения критерия: из-за наличия серий нулевых интервалов оказались неопределенными отдельные значения $\ln y_i$. Ее решение заключалось в увеличении l . Несмотря на то что требуемые значения оказались достаточно большими (см. последний

Таблица 4 Результаты тестирования стационарности (α^* — критический уровень значимости; n — число объединенных интервалов)

Имя	Критерий U	Критерий R'		
	$\alpha^*, \%$	$\alpha^*, \%$	l	n
M1	0,00	0,00	260	558
M1s	13,98	25,11	100	103
M2	0,00	0,14	870	1423
M2s	0,00	96,20	400	553
M3	0,00	0,00	2070	350
M3s	60,47	6,17	130	152

столбец табл. 3), это полностью согласовывалось с ростом эффективности оценки тренда с увеличением l и не беспокоило благодаря большим объемам исходных данных с точки зрения размерностей получающихся значений статистики. Следующее, что проявилось из-за несоответствия предположения о простом пуассоновском потоке и реальными характеристиками, — конкретное значение v_l . Преодолеть это стало возможным, переведя дисперсию зависимой переменной в оцениваемые параметры регрессионного анализа. Кстати, похожую, по сути, правку можно провести и в случае статистики U , заменив дисперсию ее предельного распределения на оценку, посчитанную, например, методом перепроверки. Результаты применения критериев U и R' (дисперсия — дополнительный параметр регрессионного анализа) отражены в табл. 4.

Анализ стационарных фрагментов. Специфика пакетного образования потока заявок привела к модели ветвящегося пуассоновского процесса (BPP), который складывается из последовательности основных событий (поступление на обработку отдельного пакета заданий), разделенных случайными величинами $Z_1, Z_2, \dots$. Каждое из основных событий порождает вспомогательную последовательность событий (приемка на обработку отдельного задания из пакета), содержащую случайное (возможно, нулевое) число S событий, разделенных случайными величинами $Y_1, \dots, Y_S$. Вспомогательные процессы независимы друг от друга и имеют одинаковую природу. Наблюдается полный процесс $\{X_i\}$ так, что два типа событий неразличимы. В основу статистического вывода для введенной модели положим следующие дополнительные предположения и верные, согласно [6], соотношения.

1. Основной поток есть пуассоновский с интенсивностью λ , а вспомогательный — процесс восстановления, обрывающийся в момент наступления S -го события, откуда, в частности, следует, что

$$E(X) = \frac{1}{\lambda(1 + E(S))}. \quad (1)$$

2. Для больших x_{th} условное распределение величины $X - x_{\text{th}}$ при условии, что X больше, чем x_{th} , оказывается показательным распределением с параметром λ . Также для $x \gg E(Y)$ имеем

$$\ln R_X(x) \simeq -\ln(1 + E(S)) - \lambda E(Y)E(S) - \lambda t, \quad (2)$$

т. е. безусловная функция надежности $R_X(x)$ величины X имеет показательный распределенный хвост.

3. При $t \rightarrow \infty$ для асимптотического значения тангенса угла наклона кривой дисперсии $V(t)$ верно

$$V(t) \approx \lambda t E((S + 1)^2),$$

что демонстрирует независимость от распределения величины Y . Для конкретности сделаем дополнительные предположения о распределении величины S : основное событие может наступать без последствий или порождать с вероятностью r по крайней мере одно вспомогательное событие с G последующими. Для G примем геометрическое распределение с параметром p . Для описанной схемы ветвящегося процесса восстановления, просто следуя определению математического ожидания, получаем

$$E(S) = \frac{r}{p}. \quad (3)$$

Это не совпадает с формулой (15) из [6, разд. 7.4]. Соответственно, несколько иной вид принимает асимптотическое значение коэффициента наклона кривой дисперсии

$$V(t) \approx \lambda t \left(1 + E(S) \frac{2 + p}{p} \right). \quad (4)$$

Полученные соотношения позволяют сформулировать

Алгоритм оценивания параметров ВРР

1. Получить интегральную интенсивность входного потока $\tilde{m}$.
2. Построить и провести анализ эмпирической функции надежности. Согласно (2) ее логарифм имеет линейный хвост, что позволяет визуально определить порог x_{th} , задающий левую границу этого линейного участка, и подсчитать среднее значение избытков. Это даст оценку $\tilde{E}(Z)$ и согласно (1) приведет к оценке

$$\tilde{E}(S) = \tilde{m} \tilde{E}(Z) - 1.$$

В результате будет получена прямая с коэффициентом наклона

$$-\tilde{\lambda} = -\frac{1}{\tilde{E}(Z)},$$

проходящая через точку $(x_{th}, \ln R_X(x))$ и отсекающая отрезок $\tilde{h}$ по вертикальной оси. Это позволит согласно (2) получить уравнение

$$-\ln(1 + \tilde{E}(S)) - \tilde{\lambda}\tilde{E}(Y)\tilde{E}(S) = \tilde{h}$$

для оценки $\tilde{E}(Y)$. Помощь в определении x_{th} может оказать проверка того факта, что условное распределение избытков есть показательное и, следовательно, их последовательные суммы должны быть равномерно распределены на соответствующем периоде наблюдения. Последнее формально поверяется, например с помощью критерия Колмогорова–Смирнова.

3. Построить и провести анализ кривой дисперсии. Соотношение (4) указывает на наличие при больших значениях t линейного правого линейного хвоста, угол наклона которого совместно с (3) позволяет оценить параметры r и p вспомогательного процесса. Дополнительную сложность вносит процесс оценивания самой кривой дисперсии: обычно после относительно длительного периода времени с линейным поведением правого хвоста график кривой дисперсии перестает походить на линейный. Поэтому вместо интервала с бесконечной правой границей приходится визуальнo задавать не только левую, но и правую границы интервала линейности, что позволяет определиться с коэффициентом наклона $\tilde{v}$ и получить оценки: $\tilde{p}$ из уравнения

$$\tilde{\lambda} \left(1 + \tilde{E}(S) \frac{2 + \tilde{p}}{\tilde{p}} \right) = \tilde{v},$$

после чего $\tilde{r}$ из

$$\tilde{E}(S) = \frac{\tilde{r}}{\tilde{p}}.$$

Формализовать выделение интервала линейности можно путем изолирования нулевых значений сглаженной 2-й производной.

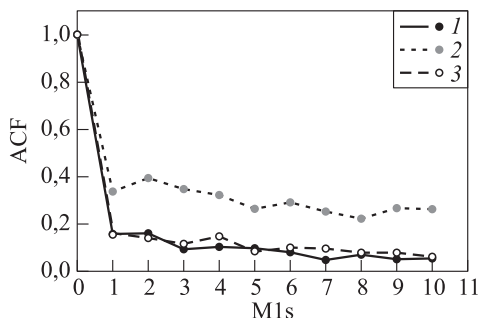
Применительно к исследуемым стационарным фрагментам входного потока описанная последовательность процедур привела к оценкам параметров модели, данным в табл. 5, которые позволяют моделировать реальные стационарные фрагменты входного потока.

Таблица 5 Оценки параметров BPP

Имя	$\tilde{E}(Z)$	$\tilde{E}(S)$	$\tilde{E}(Y)$	$\tilde{r}$	$\tilde{p}$
M1s	7390	16,0	753,0	$3,60 \cdot 10^{-2}$	$2,25 \cdot 10^{-3}$
M2s	428	22,7	25,9	$3,24 \cdot 10^{-3}$	$1,42 \cdot 10^{-4}$
M3s	2030	7,6	297,0	$1,67 \cdot 10^{-2}$	$2,20 \cdot 10^{-3}$

Замечание. Для ВРР значения пяти оценок параметров $\tilde{E}(Z)$, $\tilde{E}(S)$, $\tilde{E}(Y)$, $\tilde{r}$ и $\tilde{p}$ строятся при фиксированном $\tilde{m}$ на основе всего трех характеристик: коэффициента наклона линейного хвоста логарифма функции надежности; $\tilde{h}$ — величины отсечения по вертикальной оси линейного хвоста логарифма функции надежности; $\tilde{v}$ — коэффициента наклона линейного хвоста кривой дисперсии.

Сама обработка данных подтвердила ненадежность отдельных этапов исследования потоков событий, и в первую очередь это касалось визуализации. Несмотря на то что в статье были предложены и апробированы дополнительные приемы формализации анализа, оставались сомнения при задействовании таких понятий, как «асимптотически» или «линейный правый хвост», тем более что подчас графики анализируемых процессов не отвечали сложившимся представлениям (в частности, крайне «неожиданным» поведением отличалась эмпирическая функция надежности). Понятно, что соответствующие вопросы могут быть частично сняты после анализа адекватности принятой модели. Учитывая, что подгонка параметров ВРР основывалась на характеристиках первого порядка, разумно обратиться к более сложным показателям: далее использовалось поведение автокорреляционной функции (autocorrelation function, ACF). В принципе, зная параметры ВРР, ее значения можно найти теоретически, но только после привлечения численного интегрирования. Поэтому ACF оценивалась по смоделированной для заданных параметров реализации процесса. Эксперименты показали, что эталонные $ACF_{st}(M1s, M2s, M3s)$ существенно отличались от $ACF_{est}(M1s, M2s, M3s)$, полученных на основе данных табл. 5. Поэтому, используя среднеквадратичное различие первых десяти значений $ACF_{est}(\dots)$ и $ACF_{st}(\dots)$ в качестве целевой функции, методом перебора подбирались улучшенные оценки параметров ВРР и оценивались значения соответственно $ACF_{imp}(\dots)$. При переборе использовались следующие существенные моменты: значение $\tilde{m}$ для определенного набора данных остается неизменным, управ-



Автокорреляционные функции исходных данных (ACF_{st}) (1) на основе оценок параметров ВРР (ACF_{est}) (2) и на основе улучшенных оценок параметров ВРР (ACF_{imp}) (3) для фрагмента M1s

лять построением вариантов ВРР согласно сделанному ранее замечанию можно с помощью трех характеристик, из которых выбор значения $\tilde{v}$ из вида кривой дисперсии не вызывал никаких сомнений и поэтому оставался фиксированным для определенного набора данных. Описанная процедура улучшения не претендует на статус оптимальной, но она свидетельствует, что с ее помощью удастся добиться более адекватных оценок параметров модели наблюдаемого процесса (см. для примера рисунок). Кроме того, продемонстрировано, что модель ВРР в части стационарных фрагментов демонстрирует свою жизнеспособность.

4 Вычислительные аспекты

Большие объемы исходных данных и необходимость прибегать к методу статистических испытаний требуют обратить внимание на способы вычисления требуемых характеристик.

Оценивание кривой дисперсии. Кривая дисперсии целочисленного процесса $\{N_t\}$ определяется как

$$V(t) = E(N_t^2) - \{E(N_t)\}^2.$$

Рассмотрим один из возможных способов оценивания кривой дисперсии. На периоде времени $[0, t_0]$ наблюдается поток N событий. Для оценивания кривой дисперсии интервал наблюдения $[0, t_0]$ делится на k одинаковых подынтервалов длиной τ , $k\tau = t_0$, в каждом из которых подсчитывается число событий n_i , $i = \overline{1, k}$, $\sum_{i=1}^k n_i = N$.

Требуемая оценка строится на основе $C_i(\tau)$ — коэффициента ковариации между n_i в интервалах длины τ , разделенных $(i - 1)$ такими же интервалами. Для них в качестве оценки принимается [6, разд. 5.4]:

$$\tilde{C}_i(\tau) = \frac{1}{k-i} \sum_{j=1}^{k-i} n_j n_{j+i} - \frac{1}{(k-i)^2} \sum_{j=1}^{k-i} n_j \sum_{j=1}^{k-i} n_{j+i}, \quad i = \overline{0, k-1}.$$

Тогда

$$\tilde{V}(t) \equiv \tilde{V}(r\tau) = r\tilde{C}_0(\tau) + 2 \sum_{j=1}^{r-1} (r-j)\tilde{C}_j(\tau), \quad r = \overline{1, k}.$$

Найдем $S_l = \sum_{j=1}^{k-l} n_j$ последовательно для $l = k-1, k-2, \dots, 0$, что дает

$$S_l = S_{l+1} + n_{k-l}. \quad (5)$$

Аналогично получаем для $S_l^+ = \sum_{j=1}^{k-l} n_{j+l}$:

$$S_l^+ = S_{l+1}^+ + n_{l+1}. \quad (6)$$

Подобные сокращения вычислений в случае $S_l^{\times} = \sum_{j=1}^{k-l} n_j n_{j+l}$ осуществить не удастся, так как с уменьшением индекса изменяется состав множителей.

Таким образом, с помощью рекуррентных формул (5) и (6) значения $\tilde{C}_i(\tau)$ можно вычислить последовательно от больших значений индекса к меньшим.

Выявление линейного правого хвоста кривой дисперсии. Визуальный анализ данных становится эффективней, если он сопровождается одновременно выразительными и формализованными средствами. Обоснование линейности хорошо визуализируется поведением второй производной: участку линейности должны соответствовать приблизительно нулевые значения. Поскольку объектом анализа выступает оценка, линейность будет проявляться не на полуинтервале, как в теоретическом случае, а для области, ограниченной справа некоторым критическим значением t_{cr} , причем здесь не помогает даже большой объем анализируемых данных.

За основу примем равенство нулю второй производной для точек предполагаемого линейного правого хвоста, оценка которой имеет вид:

$$\tilde{y}''(x_i) = \tilde{y}_i'' = \frac{y_{i-1} - 2y_i + y_{i+1}}{h^2}.$$

Для сглаживания оценки применим скользящее среднее для $2k + 1$ соседних оценок. Изменив порядок двойного суммирования, обнаруживаем, что для вычисления среднего оценки в i -й точке необходимы только крайние слагаемые: y_{i-k-1} , y_{i-k} , y_{i+k} и y_{i+k+1} соответственно с коэффициентами 1, -1 , -1 и 1.

5 Заключение

Анализ входного потока на основе трассировки реальной рабочей загрузки кластера Mustang привел к развитию методов статистического анализа данных и выявил ряд особенностей наблюдаемых процессов.

Неприемлемость модели простого пуассоновского потока послужила причиной уточнения привычных тестов стационарности, фактически сводящегося к пересчету дисперсии соответствующих статистик по выборке. Сложности интерпретации особенностей характеристик интервалов и времен поступления событий вынудили дополнить визуальный анализ формализованными приемами подтверждающего анализа и обратиться к процедурам уточнения оценок параметров модели при обосновании адекватности модели. Большие объемы исходных данных потребовали дополнительного внимания к вычислительным аспектам, позволив существенным образом снизить временную сложность алгоритмов.

Привлечение ВРР позволило описать нюансы данных, оставив в силе аналитические возможности предложенной модели. Возникающие сложности с ее применением частично могут быть сняты, если скорректировать ведение журнала нагрузок и детализировать состав и структуру взаимосвязей поступающих заявок.

Литература

1. *Bhat U. N., Rao S. S.* Statistical analysis of queueing systems // *Queueing Syst.*, 1987. Vol. 1. Iss. 3. P. 217–247. doi: 10.1007/BF01149536.
2. *Talby D., Feitelson D., Raveh A.* A co-plot analysis of logs and models of parallel workloads // *ACM T. Model. Comput. S.*, 2007. Vol. 17. No. 3. Art. 12. 27 p. doi: 10.1145/1243991.124399.
3. *Feitelson D. G., Tsafir D., Krakov D.* Experience with using the parallel workloads archive // *J. Parallel Distr. Com.*, 2014. Vol. 74. Iss. 10. P. 2967–2982. doi: 10.1016/j.jpdc.2014.06.013.
4. *Amvrosiadis G., Kuchnik V., Park J. W., Cranor C., Ganger G. R., Moore E., DeBardeleben N.* The Atlas cluster trace repository // *USENIX Winter*, 2018. Vol. 43. No. 4. P. 29–35.
5. *Amvrosiadis G., Park J. W., Ganger G. R., Gibson G. A., Baseman E., DeBardeleben N.* On the diversity of cluster workloads and its impact on research results // *USENIX Annual Technical Conference Proceedings*. — Boston, MA, USA: USENIX Association, 2018. P. 533–546.
6. *Кокс Д., Льюис П.* Статистический анализ последовательностей событий / Пер. с англ. — М.: Мир, 1969. 312 с. (*Cox D. R., Lewis P. A. W.* The statistical analysis of series of events. — New York, NY, USA: John Wiley, 1966. 285 p.)

Поступила в редакцию 03.07.24

MODELING OF THE INPUT FLOW OF LANL MUSTANG COMPUTING CLUSTER WORKLOADS

M. P. Krivenko

Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119133, Russian Federation

Abstract: Statistical analysis is an indispensable element in the construction of a mathematical model of the object under study. Queueing systems as an object of research have specific features that make it necessary to go beyond the general theory of stochastic processes. The article discusses the construction of the models of the input flow of multiprocessor systems based on the trace of the real workload of the Mustang cluster obtained as a part of the Atlas project (www.project-atlas.org). Mustang data features include a long observation period, an impressive amount of data collected, a wide field of research due to the simplified nature of previous studies and fuzzy conclusions already made, the combination of fragments with different flow intensities, the presence of stationary and nonstationary areas, and the inapplicability of the simple Poisson flow model. As a solution to the problems that arise for stationary data fragments, it is proposed to use the branching Poisson process model. The well-known methods of estimating the model parameters are supplemented by the procedure for refining estimates and formalized methods of confirmatory

analysis. Given the large amounts of data being processed, it is important to build effective algorithms for calculating the characteristics of streams and smoothing out sample indicators.

Keywords: trace repository; LANL Mustang cluster; branching Poisson process (BPP); statistical analysis of series of events

DOI: 10.14357/08696527240308

EDN: FRSPMK

References

1. Bhat, U.N., and S.S. Rao. 1987. Statistical analysis of queueing systems. *Queueing Syst.* 1(3):217–247. doi: 10.1007/BF01149536.
2. Talby, D., D. Feitelson, and A. Raveh. 2007. A co-plot analysis of logs and models of parallel workloads. *ACM T. Model. Comput. S.* 17(3):12. 27 p. doi: 10.1145/1243991.124399.
3. Feitelson, D. G., D. Tsafir, and D. Krakov. 2014. Experience with using the parallel workloads archive. *J. Parallel Distr. Com.* 74(10):2967–2982. doi: 10.1016/j.jpdc.2014.06.013.
4. Amvrosiadis, G., V. Kuchnik, J.W. Park, C. Cranor, G.R. Ganger, E. Moore, and N. DeBardeleben. 2018. The Atlas cluster trace repository. *USENIX Winter* 43(4):29–35.
5. Amvrosiadis, G., J.W. Park, G.R. Ganger, G.A. Gibson, E. Baseman, and N. DeBardeleben. 2018. On the diversity of cluster workloads and its impact on research results. *USENIX Annual Technical Conference Proceedings*. Boston, MA: USENIX Association. 533–546.
6. Cox, D. R., and P. A. W. Lewis. 1966. *The statistical analysis of series of events*. New York, NY: John Wiley. 285 p.

Received July 3, 2024

Contributor

Krivenko Michail P. (b. 1946) — Doctor of Science in technology, professor, leading scientist, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119333, Russian Federation; mkrivenko@ipiran.ru

РЕАЛИЗАЦИЯ СУММИРУЮЩИХ САМОСИНХРОННЫХ СЧЕТЧИКОВ

*Ю. А. Степченков¹, Ю. Г. Дьяченко², Н. В. Морозов³, Д. Ю. Степченков⁴,
Д. Ю. Дьяченко⁵*

Аннотация: Статья посвящена проблеме реализации самосинхронных (СС) двоичных счетчиков. Самосинхронные схемы представляют собой схемотехнический базис, альтернативный синхронному базису при реализации цифровых устройств. Самосинхронный базис обеспечивает устойчивое функционирование цифрового устройства при любых задержках реализующих его логических элементов. Основой для этого служат двухфазная дисциплина работы и индикация всех переключений схемы, требующие некоторой аппаратной избыточности. В части допустимых условий эксплуатации — напряжения питания и температуры окружающей среды — СС-схемы обладают значительным преимуществом в сравнении с синхронными аналогами. Последовательные СС-счетчики в меньшей степени избыточны, чем комбинационные СС-схемы, из-за более простой индикаторной подсхемы. Их синтез достаточно просто формализуется на основе готовых счетных СС-триггеров. Однако для реализации СС-предустановки счетчиков необходимо соблюдать определенную последовательность формирования их входов. Статья обсуждает схемотехнический базис реализации суммирующих СС-счетчиков и предлагает оптимальные по аппаратным затратам технические решения, обеспечивающие СС-предустановку счетчика.

Ключевые слова: самосинхронная схема; двоичный счетчик; индикация; предустановка; аппаратные затраты; быстродействие; анализ на самосинхронность

DOI: 10.14357/08696527240309

EDN: PUYHSS

1 Введение

Повышение уровня технологичности и автоматизации промышленного производства и рост риска технологических катастроф делают актуальной задачу создания управляющих и вычислительных систем, сохраняющих работоспособ-

¹Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук, YStepchenkov@ipiran.ru

²Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук, diaura@mail.ru

³Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук, NMorozov@ipiran.ru

⁴Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук, stepchenkov@mail.ru

⁵Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук, diaden87@gmail.com

ность в условиях различного рода неблагоприятных воздействий и нестабильного напряжения питания. Уровень надежности цифровой аппаратуры в значительной мере определяется ее компонентным базисом реализации, который в настоящее время практически полностью представлен синхронными схемами.

Альтернативу синхронным схемам составляет СС-схемотехника [1–10]. По своим характеристикам СС-схемы идеально подходят для реализации высоконадежных вычислительных и управляющих систем. Они «естественно надежны», поскольку гарантируют сохранение работоспособности при изменении условий окружающей среды в предельно широком диапазоне значений напряжения питания и температуры окружающей среды, характеризуются бестестовой самодиагностикой, повышенной сбоеустойчивостью [11] и улучшенной энергетической эффективностью [12, 13].

Двоичные счетчики занимают значительное место в синхронной цифровой аппаратуре [14]. Синхронные двоичные счетчики традиционно реализуются на триггерах D-типа [15]. Реализация аналогичного подхода в СС-базисе наталкивается на проблему индикации многоразрядного счетчика [16].

Логические синтезаторы (например, Yosys [17]) по умолчанию реализуют счетчик с помощью регистра хранения и комбинационной схемы, вычисляющей новое состояние счетчика. В СС-исполнении после десинхронизации [18] такой счетчик оказывается слишком избыточным и медленным из-за громоздкой индикаторной подсхемы.

Схемотехнические решения СС-счетчиков, предлагаемые наиболее известной зарубежной методологией проектирования СС-схем NULL Convention Logic (NCL) [19–21], оказываются в несколько раз более сложными, чем типовые схемы, созданные в соответствии с методологией В. И. Варшавского [22].

Самосинхронные счетчики с минимальными аппаратными затратами известны [1, 2]. Однако не все они могут быть эффективно реализованы в современной технологии комплементарный металл–диэлектрик–полупроводник (КМДП) субмикронного уровня из-за ограничения на максимальную длину цепочек транзисторов в принципиальных схемах логических ячеек. Кроме того, не полностью решена проблема СС-предустановки многоразрядного счетчика. Поэтому решение проблемы технической реализации СС-счетчиков с СС-предустановкой в базисе КМДП-технологии становится актуальной задачей.

Данная статья посвящена вопросу реализации суммирующего двоичного СС-счетчика в КМДП-базисе с опциональной СС-предустановкой. Она предлагает реализацию счетного СС-триггера, служащего основой для построения счетчика, а также рассматривает принципы построения окружения, обеспечивающего самосинхронность предустановки счетчика.

2 Разряд самосинхронного счетчика

Двоичный СС-счетчик строится на счетном триггере, как и синхронный аналог [23]. Базовая схема разряда СС-счетчика с входами сброса и установки

представлена на рис. 1. Здесь Т — счетный вход с нулевым спейсером; С и Р — входы сброса и установки соответственно с активным низким уровнем; Q и QB — информационный бифазный выход; I — выход частичной индикации; ОТ — счетный выход. Переключение разряда в новое состояние происходит в рабочей фазе при высоком уровне входа Т.

Принципиальная схема элемента NAN4 в КМДП-базисе содержит четыре последовательно соединенных транзистора n-типа. В цифровых КМДП-схемах, изготавливаемых по нанометровой технологии, рекомендуется ограничивать число последовательно соединенных транзисторов тремя. На рис. 2 показана схема разряда СС-счетчика, удовлетворяющая этому ограничению. Она содержит дополнительный вход WE, разрешающий СС-предустановку низким уровнем. Входы предустановки С и Р имеют высокий активный уровень. Выходы I и ОТ образуют парафазный сигнал с единичным спейсером. Это позволяет упростить индикацию СС-счетчика [2].

Варианты разряда СС-счетчика с одним входом предустановки получаются из схем рис. 1 и 2 исключением из них ненужного входа.

Моделирование последовательных двоичных СС-счетчиков на основе схем рис. 1 и 2, в которых выход ОТ предыдущего разряда подключен к входу Т следующего разряда, показало, что их быстродействие практически одинаково. По числу КМДП-транзисторов схема рис. 2 на 10% проще схемы на рис. 1, но имеет дополнительный вход WE.

3 Многоразрядный самосинхронный счетчик

Многоразрядный счетчик может быть параллельным или последовательным. В синхронной схемотехнике параллельные счетчики обычно более быстрые, чем последовательные, так как их разряды обновляют свое состояние одновременно по активному фронту общего счетного сигнала. Однако в параллельном СС-счетчике значительно усложняется индикаторная подсхема и замедляется формирование общего индикаторного выхода.

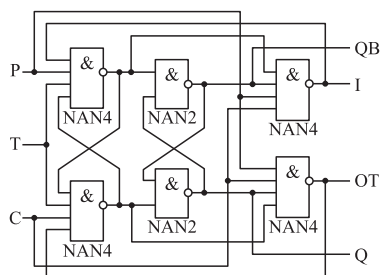


Рис. 1 Разряд СС-счетчика с предустановкой низким уровнем

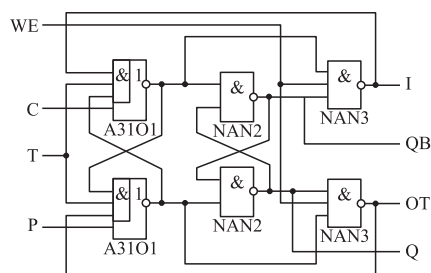


Рис. 2 Схема разряда СС-счетчика с предустановкой высоким уровнем

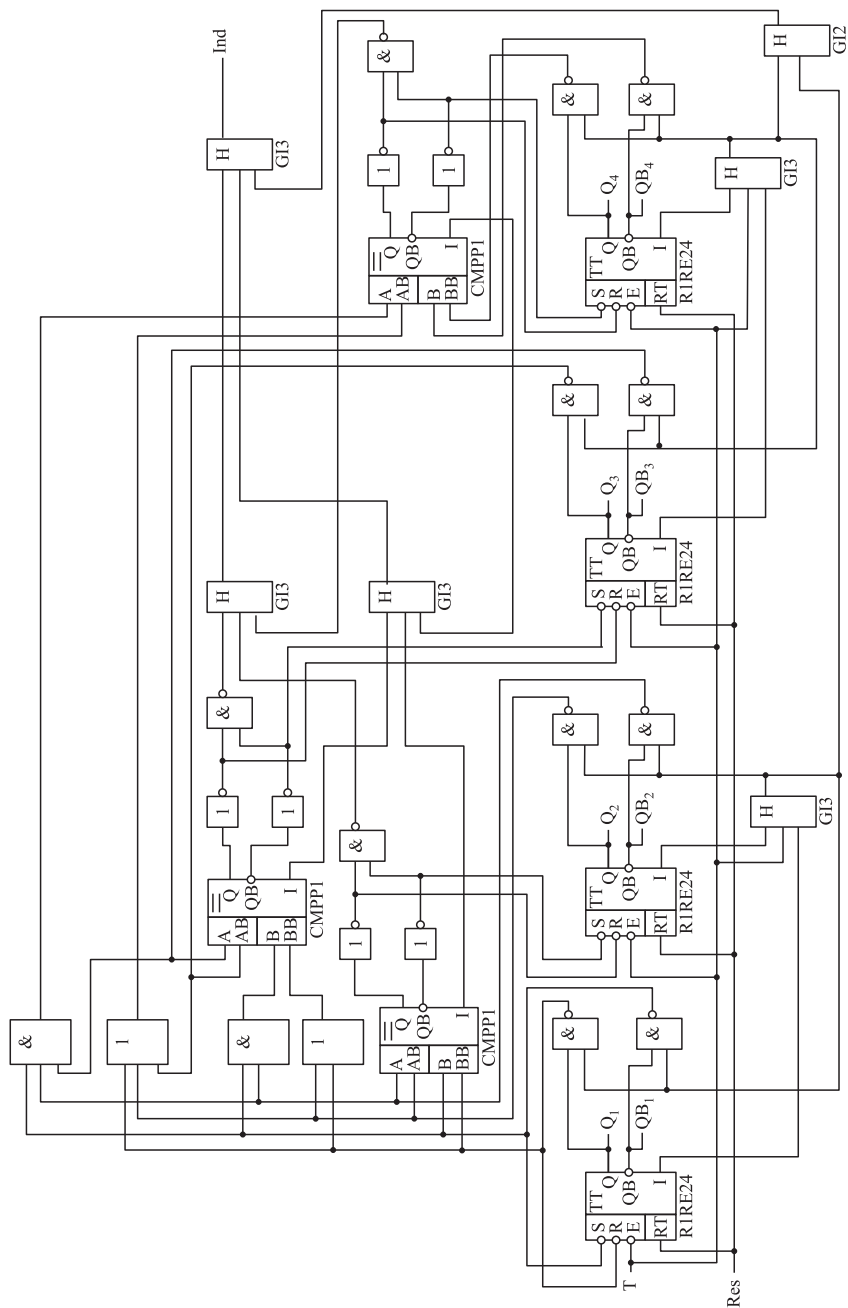


Рис. 3 Параллельный СС-счетчик

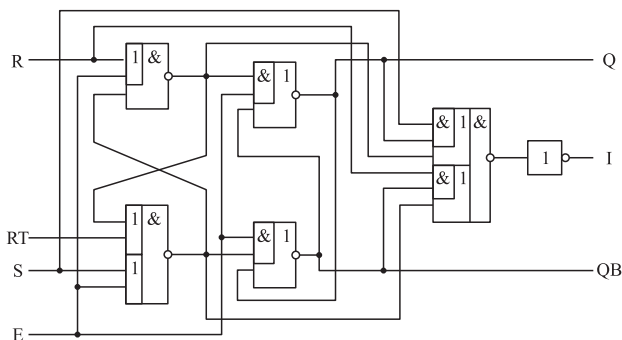


Рис. 4 Схема триггера R1RE24

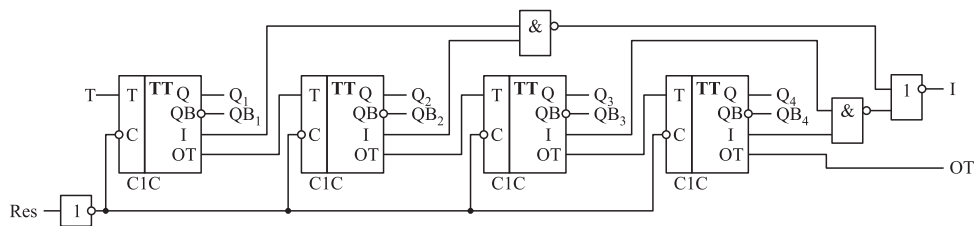


Рис. 5 Последовательный СС-счетчик C1C4 на триггере C1C

В качестве примера на рис. 3 показана схема параллельного четырехразрядного двоичного СС-счетчика с асинхронным сбросом на RS-триггере R1RE24, изображенном на рис. 4. Рисунок 5 демонстрирует схему четырехразрядного последовательного СС-счетчика на триггере C1C, полученном из схемы на рис. 1 удалением входа установки R. Сравнение параллельного и последовательного вариантов СС-счетчика показывает, что сложность параллельного счетчика почти в 2,5 раза выше сложности последовательного варианта, а быстродействие в 1,7 раза ниже. При увеличении разрядности СС-счетчика преимущество последовательного счетчика в сравнении с параллельным растет.

Таким образом, для реализации двоичного СС-счетчика целесообразно использовать последовательный вариант его реализации. Помимо всего прочего, последовательный СС-счетчик обеспечивает простую параметризацию по числу разрядов. Индикаторная подсхема выполняет функцию логического «И» от выходов I всех разрядов и выхода OT последнего (старшего) разряда:

$$\text{Ind} = \text{OT}_N \wedge \left(\bigwedge_{k=1}^N I_k \right), \quad (1)$$

где N — разрядность счетчика. Формула (1) допускает любую декомпозицию без нарушения самосинхронности счетчика. При построении многоразрядных

СС-счетчиков на основе четырехразрядного блока С1С4 выход ОТ предыдущего блока подключается ко входу Т следующего блока, а их индикаторные выходы I объединяются в один индикаторный выход в соответствии с формулой (1), где N — число четырехразрядных блоков.

4 Процедура предустановки самосинхронного счетчика

Предустановка двоичного СС-счетчика может быть асинхронной или самосинхронной. Асинхронная предустановка не требует подтверждения ее завершения и используется, как правило, для инициализации СС-счетчика при включении питания или при рестарте схемы.

Самосинхронная предустановка схем на рис. 1 и 2 выполняется с помощью специальной процедуры в рабочей фазе счетчика. После подтверждения счетчиком завершения переключения в новое состояние схема управления СС-счетчиком сохраняет рабочее значение счетного входа Т и формирует активный уровень на входе предустановки. Окружение СС-счетчика проверяет успешное завершение предустановки и переводит счетный вход в спейсер.

Рисунок 6 показывает реализацию четырехразрядного СС-счетчика с СС-сбросом, иницируемым по достижении счетчиком состояния «1010». Здесь С1С4 — четырехразрядный СС-счетчик, изображенный на рис. 5; Т — счетный вход; REn, REnB — парафазный вход разрешения сброса с единичным спейсером, состояние REn = 1, REnB = 0 запускает сброс; ОТ — счетный выход; Ind — индикаторный выход; Q_i , QB_i — информационный бифазный выход i -го разряда счетчика. Обведенные штрихпунктирными линиями подсхемы форми-

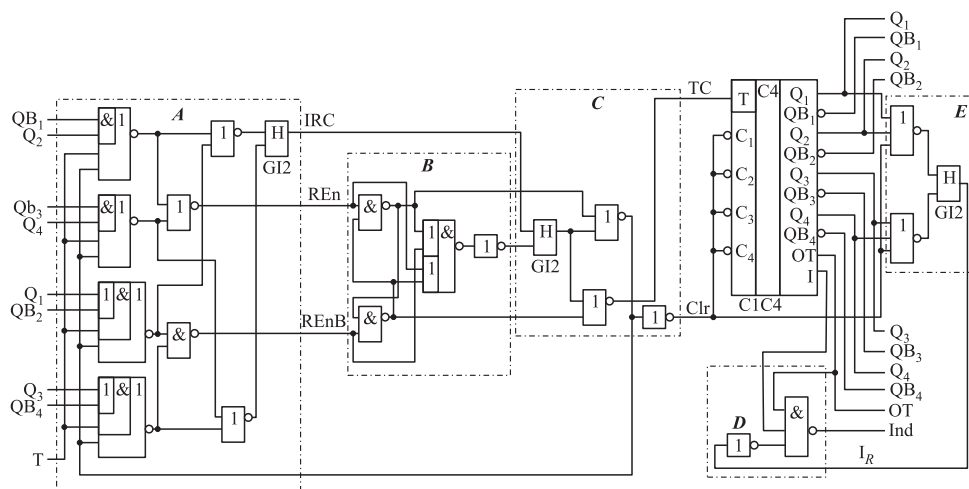


Рис. 6 Самосинхронный счетчик с СС-сбросом

руют сигналы, необходимые для реализации процедуры СС-сброса. Подсхема *A* проверяет выполнение условия перехода в режим сброса счетчика. Подсхема *B* реализует триггер режима работы счетчика: сброс или счет. Подсхема *C* формирует счетный вход и вход сброса счетчика. Подсхема *D* объединяет индикаторы режимов счета и сброса в общий индикаторный выход Ind. Подсхема *E* индицирует успешное завершение сброса счетчика.

Процедура СС-предустановки счетчика инициируется либо некоторым состоянием самого счетчика, либо внешним сигналом. В данном случае вход сброса и счетный вход СС-счетчика С1С4 формируются как результат проверки достижения счетчиком состояния $\{Q_4, Q_3, Q_2, Q_1\} = \text{«1010»}$. При использовании другого инициатора сброса счетчика подсхема *A* заменяется соответствующей подсхемой, формирующей сигналы управления процедурой сброса.

RS-триггер режима (подсхема *B*) переключает режимы работы счетчика и задерживает его счетный вход ТС в рабочем значении на время сброса.

Подсхема индикации сброса реализует систему функций

$$I_j = \overline{Q_{2j-1} + Q_{2j} + Clr}, \quad j = \overline{1, N/2}; \quad (2)$$

$$I_R = I_1 \cdots I_{N/2} + I_R(I_1 + \cdots + I_{N/2}), \quad (3)$$

где *Clr* — сигнал сброса счетчика; *N* — разрядность счетчика (в данном случае *N* = 4); *I_j* — частичные индикаторы; *I_R* — индикатор режима СС-сброса. Формула (2) реализует индикацию сброса на элементах с ограничением: не более трех последовательно соединенных КМДП-транзисторов. Формула (3) реализуется подсхемой из гистерезисных триггеров (Г-триггеров [2]).

На рис. 7 показана реализация СС-счетчика с СС-записью. Здесь С1СР4 — четырехразрядный счетчик, аналогичный схеме на рис. 5, но на триггере С1СР (см. рис. 1); Т — счетный вход; D*, DB* — парафазный с единичным спейсером или бифазный вход данных; WE, nWE — парафазный с единичным спейсером или бифазный вход разрешения записи; ОТ — счетный выход; Ind — индикаторный выход; Q*, QB* — информационный бифазный выход. Обведенные штрихпунктирными линиями подсхемы формируют сигналы, необходимые для запуска процедуры СС-записи и ее индикации. Подсхема *A* формирует счетный вход четырехразрядного СС-счетчика С1СР4 и входы его предустановки, а также сигнал WrEnB, управляющий выходным индикатором счетчика. Подсхема *B* индицирует СС-запись в счетчик. Подсхема *C* объединяет индикаторы режимов счета и сброса в общий индикаторный выход Ind.

Подсхема индикации СС-записи реализует систему логических функций

$$I_j = \overline{(Q_j + C_j)(QB_j + P_j)}, \quad j = \overline{1, N};$$

$$I_W = I_1 \cdots I_N + I_W(I_1 + \cdots + I_N),$$

где *C_j* и *P_j* — входы сброса и установки *j*-го разряда счетчика соответственно; *I_j* — частичные индикаторы; *N* — разрядность счетчика (в данном случае

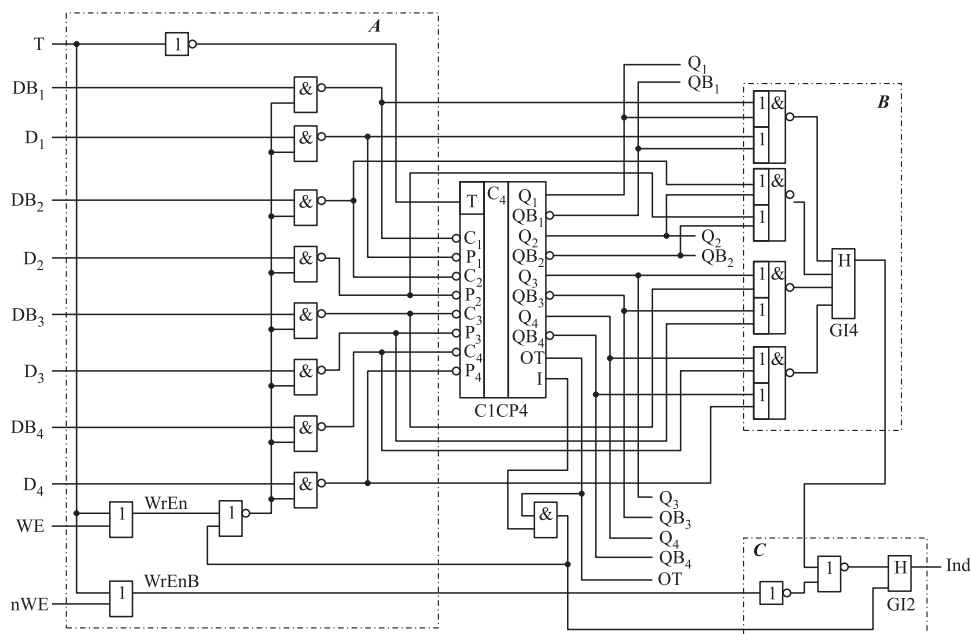


Рис. 7 Самосинхронный счетчик с СС-записью

$N = 4$); I_W — индикатор режима СС-записи. Отметим, что благодаря особенностям схемы СС-счетчика, индикация выходов подсхемы *A*, формирователя счетного входа и входов предустановки счетчика нужна только в режиме записи и реализуется подсхемой *B*, что существенно упрощает индикаторную подсхему СС-счетчика на рис. 7.

Таким образом, счетчики С1С4 и С1СР4 могут использоваться для реализации СС-счетчика с асинхронной и самосинхронной предустановкой. Самосинхронная предустановка индицируется окружением счетчика.

Описанные принципы реализации СС-предустановки СС-счетчиков были проверены программой событийного анализа цифровых схем на самосинхронность АСПЕКТ [24], подтвердившей корректность их вариантов.

5 Заключение

Базисом реализации многоразрядных СС-счетчиков служит разряд счетчика с входами сброса и установки. Самосинхронные счетчики с различными опциями предустановки получаются удалением ненужных входов сброса и установки.

Для реализации многоразрядного СС-счетчика целесообразно использовать последовательную структурную схему, поскольку она характеризуется мень-

шими аппаратными затратами и более высоким быстродействием в сравнении с параллельной структурной схемой.

Реализация СС-предустановки требует организации специального сценария, включающего поддержание счетного входа в рабочей фазе, формирование активного уровня входов предустановки и индикацию успешного завершения предустановки. Сценарий организуется окружением СС-счетчика. Схемотехническая реализация самого СС-счетчика инвариантна к типу предустановки: асинхронной или самосинхронной.

Литература

1. Варшавский В. И., Кишиневский М. А., Мараховский В. Б. и др. Автоматное управление асинхронными процессами в ЭВМ и дискретных системах. — М.: Наука, 1986. 400 с. doi:10.13140/RG.2.1.2230.6644.
2. Kishinevsky M., Kondratyev A., Taubin A., Varshavsky V. Concurrent hardware: The theory and practice of self-timed design. — J. Wiley & Sons, 1994. 386 p.
3. Taubin A., Cortadella J., Lavagno L., Kondratyev A., Peeters A. Design automation of real-life asynchronous devices and systems // Foundations Trends Electronic Design Automation, 2007. Vol. 2. No. 1. P. 1–133. doi: 10.1561/10000000006.
4. Плеханов Л. П. Основы самосинхронных электронных схем. — М.: Бином. Лаборатория знаний, 2013. 208 с.
5. Jiang W., Sha E. H.-M., Zhuge Q., Yang L., Chen X., Hu J. On the design of time-constrained and buffer-optimal self-timed pipelines // IEEE T. Comput. Aid. D., 2019. Vol. 38. No. 8. P. 1515–1528. doi: 10.1109/TCAD.2018.2846642.
6. Chau C., Hunt W. A., Kaufmann M., Roncken M., Sutherland I. A hierarchical approach to self-timed circuit verification // 25th Symposium (International) on Asynchronous Circuits and Systems Proceedings. — IEEE, 2019. P. 105–113. doi: 10.1109/ASYNC.2019.00022.
7. Bingham N., Manohar R. Self-timed adaptive digit-serial addition // IEEE T. VLSI Syst., 2019. Vol. 27. No. 9. P. 2131–2141. doi: 10.1109/TVLSI.2019.2918441.
8. Sparsø J. Introduction to asynchronous circuit design. — Copenhagen, Denmark: DTU Compute, Technical University of Denmark, 2020. 275 p. https://backend.orbit.dtu.dk/ws/files/215895041/JSPA_async_book_2020_PDF.pdf.
9. Skorniyakova A. Y., Vikhorev R. V. Self-timed LUT layout simulation // Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Proceedings. — IEEE, 2020. P. 176–179. doi: 10.1109/EIConRus49466.2020.9039374.
10. Kushnerov A., Medina M., Yakovlev A. Towards hazard-free multiplexer based implementation of self-timed circuits // 27th Symposium (International) on Asynchronous Circuits and Systems Proceedings. — Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2021. P. 17–24. doi: 10.1109/ASYNC48570.2021.00011.
11. Соколов И. А., Степченко Ю. А., Рождественский Ю. В., Дьяченко Ю. Г. Приближенная оценка эффективности синхронной и самосинхронной методологий в задачах проектирования сбоеустойчивых вычислительно-управляющих систем // Автоматика и телемеханика, 2022. № 2. С. 122–132. doi: 10.31857/S0005231022020088. EDN: PYRRXN.

12. Плеханов Л. П., Степченко Ю. А. Экспериментальная проверка некоторых свойств строго самосинхронных схем // Системы и средства информатики, 2006. Вып. 16. С. 476–485. EDN: KZUWOX.
13. Степченко Ю. А., Петрухин В. С., Дьяченко Ю. Г. Опыт разработки самосинхронного ядра микроконтроллера на базовом матричном кристалле // Нано- и микросистемная техника, 2006. Вып. 5. С. 29–36. EDN: IAGLLN.
14. Hennessy J. L., Patterson D. A. Computer architecture: A quantitative approach. — 6th ed. — San Mateo, CA, USA: Morgan Kaufmann, 2019. 936 p.
15. Harris D., Harris S. L. Digital design and computer architecture. — Elsevier, 2013. 690 p.
16. Степченко Ю. А., Дьяченко Ю. Г., Морозов Н. В., Степченко Д. Ю., Дьяченко Д. Ю. Формализация синтеза самосинхронных счетчиков // Системы и средства информатики, 2024. Т. 34. № 2. С. 67–83. doi: 10.14357/08696527240205. EDN: KDIEQJ.
17. Yosys Open Synthesis Suite. <https://yosyshq.net/yosys>.
18. Степченко Ю. А., Хилько Д. В., Дьяченко Ю. Г., Морозов Н. В., Степченко Д. Ю., Орлов Г. А. Методика десинхронизации при синтезе самосинхронных схем // Системы и средства информатики, 2024. Т. 34. № 1. С. 33–43. doi: 10.14357/08696527240103. EDN: XGZCWU.
19. Fant K. M., Brandt S. A. NULL convention logic. — Maitland, FL, USA: Theseus Logic Inc., 1997. Technical Report. 40 p.
20. Fant K. M. Logically determined design: Clockless system design with NULL convention logic. — New York, NY, USA: John Wiley, 2005. 292 p.
21. Smith S. C., Jia Di. Designing asynchronous circuits using NULL convention logic (NCL) // Synthesis Lectures Digital Circuits Systems, 2009. Vol. 4. No. 1. P. 61–73.
22. Соколов И. А., Степченко Ю. А., Бобков С. Г., Захаров В. Н., Дьяченко Ю. Г., Рождественский Ю. В., Сурков А. В. Базис реализации супер-ЭВМ эксафлопсного класса // Информатика и её применения, 2014. Т. 8. Вып. 1. С. 45–70. doi: 10.14357/1992264140106. EDN: RYYFGD.
23. Степченко Ю. А., Степченко Д. Ю., Дьяченко Ю. Г., Морозов Н. В., Плеханов Л. П. Замена синхронных триггеров самосинхронными аналогами в процессе десинхронизации схемы // Системы и средства информатики, 2023. Т. 33. № 4. С. 4–15. doi: 10.14357/08696527230401. EDN: VPLSHI.
24. Рождественский Ю. В., Морозов Н. В., Рождественскене А. В. Подсистема событийного анализа самосинхронных схем АСПЕКТ // Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем. — М.: ИППМ РАН, 2010. С. 26–31.

Поступила в редакцию 27.04.24

SELF-TIMED UP COUNTER IMPLEMENTATION

*Yu. A. Stepchenkov, Yu. G. Diachenko, N. V. Morozov, D. Yu. Stepchenkov,
and D. Yu. Diachenko*

Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119133, Russian Federation

Abstract: The article is devoted to the problem of self-timed (ST) binary up counter implementation. The ST circuits are an alternative to the synchronous ones when implementing digital units. The ST basis ensures stable operation of a digital unit regardless of any delays in the internal logical cells. A two-phase operating discipline and full indication of all circuit's switches provide such behavior but they require some hardware redundancy. In terms of permissible operating conditions including supply voltage and ambient temperature, ST circuits have a significant advantage over synchronous counterparts. Sequential ST counters are less redundant than combinational ST circuits due to the simpler indication subcircuit. Their synthesis is quite simply formalized on the ready-made counting ST flip-flops basis. However, to implement their ST preset, one should perform a certain time sequence of their inputs. The article considers the circuitry basis for the ST up counter implementation and proposes optimal circuitry solutions in terms of hardware complexity that provide ST counter preset.

Keywords: self-timed circuit; binary counter; indication; preset; hardware complexity; performance; self-timed analysis

DOI: 10.14357/08696527240309

EDN: PUYHSS

References

1. Varshavskiy, V. I., M. A. Kishinevsky, V. B. Marakhovsky, *et al.* 1986. *Avtomatnoe upravlenie asinkhronnymi protsessami v EVM i diskretnykh sistemakh* [Automata control of asynchronous processes in computers and discrete systems]. Moscow: Nauka. 400 p. doi:10.13140/RG.2.1.2230.6644.
2. Kishinevsky, M., A. Kondratyev, A. Taubin, and V. Varshavsky. 1994. *Concurrent hardware: The theory and practice of self-timed design*. New York, NY: J. Wiley & Sons. 386 p.
3. Taubin, A., J. Cortadella, L. Lavagno, A. Kondratyev, and A. Peeters. 2007. Design automation of real-life asynchronous devices and systems. *Foundations Trends Electronic Design Automation* 2(1):1–133. doi: 10.1561/10000000006.
4. Plekhanov, L. P. 2013. *Osnovy samosinkhronnykh elektronnykh skhem* [Basics of self-timed electronic circuits]. Moscow: Binom. Laboratoriya znaniy [Binom. Laboratory of knowledge]. 208 p.
5. Jiang, W., E. H.-M. Sha, Q. Zhuge, L. Yang, X. Chen, and J. Hu. 2019. On the design of time-constrained and buffer-optimal self-timed pipelines. *IEEE T. Comput. Aid. D* 38(8):1515–1528. doi: 10.1109/TCAD.2018.2846642.

6. Chau, C., W. A. Hunt, M. Kaufmann, M. Roncken, and I. Sutherland. 2019. A hierarchical approach to self-timed circuit verification. *25th Symposium (International) on Asynchronous Circuits and Systems Proceedings*. IEEE. 105–113. doi: 10.1109/ASYNC.2019.00022.
7. Bingham, N., and R. Manohar. 2019. Self-timed adaptive digit-serial addition. *IEEE T. VLSI Syst.* 27(9):2131–2141. doi: 10.1109/TVLSI.2019.2918441.
8. Sparsø, J. 2020. *Introduction to asynchronous circuit design*. Copenhagen, Denmark: DTU Compute, Technical University of Denmark. 275 p. Available at: https://backend.orbit.dtu.dk/ws/files/215895041/JSPA_async_book_2020_PDF.pdf (accessed October 21, 2024).
9. Skorniyakova, A. Y., and R. V. Vikhorev. 2020. Self-timed LUT layout simulation. *Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Proceedings*. IEEE. 176–179. doi: 10.1109/EIConRus49466.2020.9039374.
10. Kushnerov, A., M. Medina, and A. Yakovlev. 2021. Towards hazard-free multiplexer based implementation of self-timed circuits. *27th Symposium (International) on Asynchronous Circuits and Systems Proceedings*. Piscataway, NJ: IEEE. 17–24. doi: 10.1109/ASYNC48570.2021.00011.
11. Sokolov, I. A., Yu. A. Stepchenkov, Yu. V. Rogdestvenski, and Yu. G. Diachenko. 2022. Approximate evaluation of the efficiency of synchronous and self-timed methodologies in problems of designing failure-tolerant computing and control systems. *Automat. Rem. Contr.* 83(2):264–272. doi: 10.1134/S0005117922020084.
12. Plekhanov, L. P., and Yu. A. Stepchenkov. 2006. Eksperimental'naya proverka nekotorykh svoystv strogo samosinkhronnykh skhem [Experimental verification of some properties of strictly self-timed circuits]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 16:476–485. EDN: KZUWOX.
13. Stepchenkov, Yu. A., Yu. G. Diachenko, and V. S. Petrukhin. 2006. Opyt razrabotki samosinkhronnogo yadra mikrokontrollera na bazovom matrichnom kristalle [Experience in self-timed microcontroller core design on basic gate-array]. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika* [Nano- and Microsystems Technology] 5:29–36. EDN: IAGLLN.
14. Hennessy, J. L., and D. A. Patterson. 2019. *Computer architecture: A quantitative approach*. 6th ed. San Mateo, CA: Morgan Kaufmann. 936 p.
15. Harris, D., and S. L. Harris. 2013. *Digital design and computer architecture*. Elsevier. 690 p.
16. Stepchenkov, Yu. A., Yu. G. Diachenko, N. V. Morozov, D. Yu. Stepchenkov, and D. Yu. Diachenko. 2024. Formalizatsiya sinteza samosinkhronnykh schetchikov [Self-timed counter synthesis formalization]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 34(2):67–83. doi: 10.14357/08696527240205. EDN: KDIEOJ.
17. Yosys open synthesis suite. Available at: <https://yosyshq.net/yosys> (accessed August 31, 2024).
18. Stepchenkov, Yu. A., D. V. Khilko, Yu. G. Diachenko, N. V. Morozov, D. Yu. Stepchenkov, and G. A. Orlov. 2024. Metodika desinkhronizatsii pri sinteze samosinkhronnykh skhem [Desynchronization methodology at self-timed circuit synthesis]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 34(1):33–43. doi: 10.14357/08696527240103. EDN: XGZCWU.
19. Fant, K. M., and S. A. Brandt. 1997. NULL convention logic. Maitland, FL: Theseus Logic Inc. Technical Report. 40 p.

20. Fant, K. M. 2005. *Logically determined design: Clockless system design with NULL convention logic*. New York, NY: John Wiley. 292 p.
21. Smith, S. C., and Di Jia. 2009. Designing asynchronous circuits using null convention logic (NCL). *Synthesis Lectures Digital Circuits Systems* 4(1):61–73.
22. Sokolov, I. A., Yu. A. Stepchenkov, S. G. Bobkov, V. N. Zakharov, Yu. G. Diachenko, Yu. V. Rozhdestvenskiy, and A. V. Surkov. 2014. Bazis realizatsii super-EVM eksaflopsnogo klassa [Implementation basis of exaflops class supercomputer]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 8(1):45–70. doi: 10.14357/19922264140106. EDN: RYYFGD.
23. Stepchenkov, Yu. A., D. Yu. Stepchenkov, Yu. G. Diachenko, N. V. Morozov, and L. P. Plekhanov. 2023. Zamena sinkhronnykh triggerov samosinkhronnymi analogami v protsesse desinkhronizatsii skhemy [Replacing synchronous triggers with self-timed counterparts during circuit desynchronization]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 33(4):4–15. doi: 10.14357/08696527230401. EDN: VPLSHI.
24. Rogdestvenski, Y. V., N. V. Morozov, and A. V. Rozhdestvenskene. 2010. Podsystema sobytiynogo analiza samosinkhronnykh skhem ASPEKT [ASPECT: A suite of self-timed event-driven analysis]. *Problemy razrabotki perspektivnykh mikro- i nanoelektronnykh sistem* [Problems of the perspective micro- and nanoelectronic systems development]. Moscow: IPPM RAN. 26–31.

Received April 27, 2024

Contributors

Stepchenkov Yuri A. (b. 1951) — Candidate of Science (PhD) in technology, head of department, leading scientist, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119133, Russian Federation; YStepchenkov@ipiran.ru

Diachenko Yuri G. (b. 1958) — Candidate of Science (PhD) in technology, senior scientist, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119133, Russian Federation; diaura@mail.ru

Morozov Nikolai V. (b. 1956) — senior scientist, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119133, Russian Federation; NMorozov@ipiran.ru

Stepchenkov Dmitri Yu. (b. 1973) — senior scientist, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119133, Russian Federation; stepchenkov@mail.ru

Diachenko Denis Yu. (b. 1987) — engineer-researcher, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119133, Russian Federation; diaden87@gmail.com

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ В АВИАТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЕ РОССИИ

*И. В. Урюпин*¹

Аннотация: Статья посвящена практической реализации методики моделирования эффективности в авиатранспортной системе (АТС). Авиатранспортная система — важная составляющая социально-экономического развития любой страны, а инструменты моделирования и анализа состояния таких сложных систем позволяют решать широкий спектр задач от оценки качества деятельности до оптимизации управления и прогнозирования результатов. Основное внимание уделено разработке программного комплекса ситуационного моделирования качества пассажирских перевозок АТС РФ и спроса на них. Предложенный вариант программного комплекса позволяет оценить ее функционирование по разным критериям эффективности. Описаны ключевые реализованные функциональные блоки — модуль оценки качества авиатранспортной сети для пассажира и модуль оценки потенциала изменения спроса на перевозки при замещении существующих типов самолетов перспективными воздушными суднами (ВС). Разработанные компоненты оперируют доступной для сбора или приобретения статистической информацией об авиаперевозках посредством спроектированной базы данных (БД).

Ключевые слова: математическое моделирование; авиатранспортная система; программный комплекс; база данных

DOI: 10.14357/08696527240310

EDN: VMQRRH

1 Введение

Развитие транспортных систем способствует как экономическому росту, так и повышению уровня мобильности для всех групп населения любого государства. В настоящее время задачи в области транспорта затрагивают самые разные тематики, а одним из ключевых методов исследований служит математическое моделирование. Решений, опирающихся на данный инструмент, известно и используется много, и они продолжают появляться, пополняя имеющийся инструментарий новыми актуальными средствами. Например, в области железнодорожных [1] и водных [2] перевозок, безопасности на транспорте [3], авиастроения при начальных стадиях проектирования [4, 5] ВС.

При исследовании транспортных систем, в частности авиационной, также применяется ситуационное математическое моделирование [6, 7], которое позво-

¹Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук, uryupin93@yandex.ru

ляет оценить текущее и будущее состояние системы. Для оценки эффективности АТС используются различные критерии и показатели качества, характеризующие как процессы, связанные с перевозками и функционированием аэропортов, так и деятельность АТС в целом [8, 9]. К таким показателям, например, можно отнести: время и стоимость перевозки, число перевезенных пассажиров, спрос на авиаперевозки и авиатехнику, коммерческую загрузку, связность и транспортную доступность сети [10, 11] и др.

В настоящее время частично перечень показателей и их целевые значения определены в Транспортной стратегии РФ [12]. Однако говорить о широкой практике их применения для оценки качества транспортных систем в РФ в целом не приходится, а функционально состоятельные средства моделирования и автоматизации аналитики, позволяющие оценить разные показатели эффективности АТС по доступным и неконфиденциальным источникам информации, отсутствуют.

Существующие разработки программных комплексов по моделированию процессов в АТС имеют ограниченный функционал, привязанный к потребностям непосредственного эксплуатанта системы. Например, для аэропортов есть приложения, позволяющие моделировать такие процессы, как движение пассажиров в терминале, движение самолетов по аэродрому и в воздушном пространстве или программы оценки эксплуатационных расходов как для отдельных линий, так и для сетей [13, 14]. Такие средства разрабатываются индивидуально для каждой компании и не становятся коммерческими продуктами для широкого пользования. Для авиаперевозчиков существуют программные инструменты планирования маршрутной сети, позволяющие получать оценки возможного числа пассажиров на маршруте/сети маршрутов [15]. К этой же категории можно отнести комплексы отраслевого программного обеспечения, позволяющие осуществлять прогнозирование. Подобные комплексы не являются коммерческими продуктами, а относятся к закрытым разработкам различных компаний, таких как Airbus, Boeing, FAA и др.

Наличие не аффилированного ни с какими вендорами в отрасли программного комплекса, решающего различные классы задач по оценке деятельности и прогнозированию в АТС РФ, может быть очень полезно органам государственной власти для комплексной оценки разных критериев эффективности и рационального развития непосредственных участников системы.

В статье предложен вариант практического решения такой задачи. В основе представленного программного комплекса ситуационного моделирования процессов, протекающих в АТС РФ, лежит БД, спроектированная с учетом открытой и доступной статистической информации об авиаперевозках. Помимо БД основное внимание уделяется главным функциональным модулям комплекса. Обсуждаются и демонстрируются разные аспекты реализации модулей оценки качества авиатранспортной сети для пассажира и оценки потенциала изменения спроса на перевозки при замещении существующих типов самолетов перспективными ВС.

2 Методики и математические модели функциональных модулей

Описание комплекса начинается с двух главных модулей как наиболее функционально значимых. Более технологический блок, связанный с проектированием БД комплекса, описан в следующем разделе. Детали реализации технических и служебных элементов комплекса ограничены иллюстративным представлением графического интерфейса.

Модуль показателей транспортного стандарта (МПТС). В комплексе реализована оригинальная модель, описывающая качество АТС для пассажира с помощью двух взаимосвязанных показателей — покрытия сети NC и гарантированного времени перелета TS , названных «показателями транспортного стандарта», алгоритм определения которых подробно представлен в [16]. Кратко, первый показатель определяется как

$$NC = \frac{N}{P - 1} \cdot 100\%. \quad (1)$$

второй — гарантированное минимальное время, которое пассажир должен потратить на перелет в конкретную дату $date_0$ из пункта A_0 аэропортовой сети до любой другой A_i , $i = \overline{1, N}$, достижимой в принципе напрямую или не более чем за k пересадок:

$$TS(A_0, date_0) = \max \min T_{ij}^k(A_0, A_{ij}, date_0), \\ k = \overline{0, K}; K \in \mathbb{Z}_+; i = \overline{1, N}; j = \overline{1, M}; N, M \in \mathbb{N}. \quad (2)$$

В (1) и (2) $N \subseteq P$ — число достижимых пунктов полета из A_0 на расчетную дату $date_0$ с заданными параметрами качества транспортной услуги: временем на пересадку $t_{transfer}$ и максимально допустимом числе пересадок k ; T_{ij}^k — время, затрачиваемое на перелет с не более чем k пересадками при $A_0 \rightarrow A_{ij}$. Индекс j допускает вероятную множественность маршрутов $A_0 \rightarrow A_i$ на дату $date_0$ с одинаковым числом пересадок k .

В качестве исходных данных для поиска описанных выше показателей могут использоваться данные центра расписания и тарифов транспортной клиринговой палаты (ЦРТ ТКП) [17], содержащие информацию о прямых рейсах ($k = 0$). Алгоритм получения маршрута с $k > 0$ пересадками использует декартово произведение таблицы прямых рейсов самой с собой k раз с учетом таких ограничений, как соответствие аэропорта прибытия аэропорту вылета, совпадение даты прилета с датой вылета, исключение циклов одного или нескольких сегментов в маршруте и проверка стыковки двух рейсов относительно временного интервала пересадочного окна с учетом попадания окна на переход между сутками.

Для всех рейсов с не более чем k пересадками и удовлетворяющих ограничениям применяется выборка, позволяющая оставить только минимальные по

времени рейсы для всех связанных аэропортов. Далее, согласно (2), из полученного множества минимальных по времени рейсов, допускающих не более чем k пересадок, выбирается самый продолжительный. Одновременно вычисляется значение показателя покрытия сети (1). Пара связанных значений (TS, N) будет отражать значение достигнутого транспортного стандарта для каждого конкретного аэропорта вылета A_0 .

Модуль оценки внедрения авиатехники (МОВА). Здесь также применена оригинальная модель, предложенная в работе [18]. В качестве меры оценки эффекта от внедрения новой авиатехники служит приращение пассажиропотока на линиях из-за снижения цены билета за счет изменения себестоимости ВС. Для оценки изменения пассажиропотока использована математическая модель ценовой эластичности спроса, представляющая собой линейную регрессию [19], которая отражает зависимость годового пассажиропотока от численности населения, а также средних взвешенных значений душевого дохода и тарифа на авиаперевозки, скорректированных на индекс потребительских цен [18]. Данные о средних тарифах могут быть получены путем построения дополнительной регрессионной модели зависимости тарифов от дальности перевозки.

Задача оценки эффекта сводится к поиску максимального прироста объема перевозок пассажиров среди применяемых на линии типов ВС при полном их замещении новыми. Тогда прирост пассажиропотока между аэропортами A и B для i -го ВС может быть найден по формуле:

$$\Delta PAX_{AB_i} = \frac{(Z - Z_i)L_{AB}S_i LF N_i}{P_i} E(L_{AB}, \Delta Fare),$$

$$i = 0, 1, \dots, P_i \neq 0, Z_i \neq 0,$$

где Z — себестоимость в новом типе ВС (руб./ккм); Z_i — себестоимость i -го ВС на линии AB (руб./ккм); D_{AB} — кратчайшее расстояние между координатами двух аэропортов A и B (ортодромия); S_i — число кресел в i -м ВС на линии AB ; LF — коэффициент загрузки; P_i — тариф i -го ВС на линии AB ; N_i — число рейсов, совершенных i -м ВС на линии AB ; E — коэффициент эластичности спроса, зависящий от относительного изменения тарифа $\Delta Fare$ и протяженности маршрута L_{AB} [18]. Максимальное значение прироста пассажиропотока на линии AB определяется формулой:

$$\Delta PAX_{AB}^* = \max(i \Delta PAX_{AB_i}), \quad i = 0, 1, \dots \quad (3)$$

Поиск максимума в (3) осуществляется перебором всех ВС, применяемых на линии и удовлетворяющих ограничению на число кресел. При поиске ΔPAX^* для всего массива линий максимум ищется для каждой отдельно взятой линии, а дополнительным критерием выборки линий служит диапазон дальностей, на которых новый тип ВС планируется использовать.

3 Программная реализация

Программное обеспечение, реализующее описанные модули, разработано в среде объектно-ориентированного программирования С# [20]. В основе работы программы лежит разработанная в SQL Server Management Studio БД, предназначенная для хранения статистической информации о маршрутах, типах и характеристиках эксплуатируемых ВС и пунктах полета. База данных представляет собой группу связанных таблиц: TableFlights, TableAirport, CityCode, TablePlane и TableLine, а также включает временные таблицы Temp, предназначенные для загрузки статистической информации в базу (рис. 1).

Таблицы TableAirport, CityCode и TablePlane представляют собой сформированные по открытым источникам словари, содержащие информацию об аэропортах РФ и их характеристиках, о населенных пунктах и о типах ВС. Таблица TableFlights предназначена для хранения информации о расписании рейсов, а также информации об удельной себестоимости перевозки на линии для конкретного типа ВС. Импорт данных в таблицу происходит следующим образом: на вход в БД поступает текстовый файл ЦРТ ТКП [17] с расписанием прямых рейсов. С помощью временных таблиц Temp данные текстового файла распределяются по БД согласно сформированной структуре. В случае отсутствия в каком-либо из словарей данных из импортированного файла происходит автоматическое расширение словаря. Таблица TableLine содержит информацию о линиях, формируемых на основе расписания из таблицы TableFlights. Функционал разработанной программы позволяет импортировать как текстовые файлы для наполнения таблиц БД, так и вносить необходимые корректировки в уже загруженные данные. Интерфейс программы представляет собой наборы вкладок, направленных как на решение конкретных задач по оценке деятельности

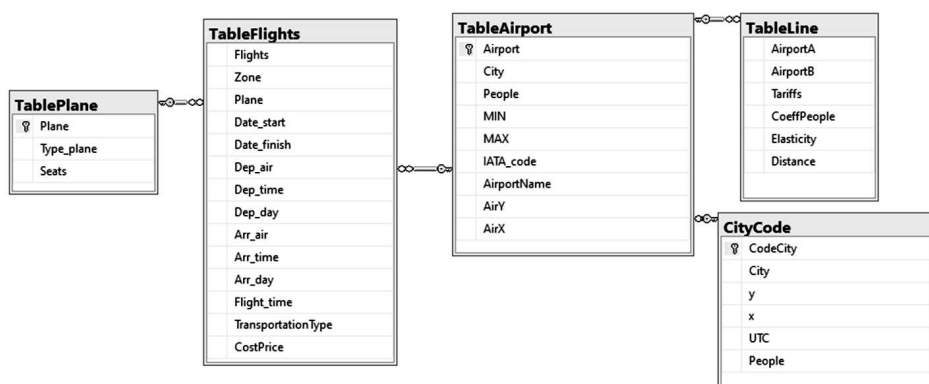


Рис. 1 Организация БД

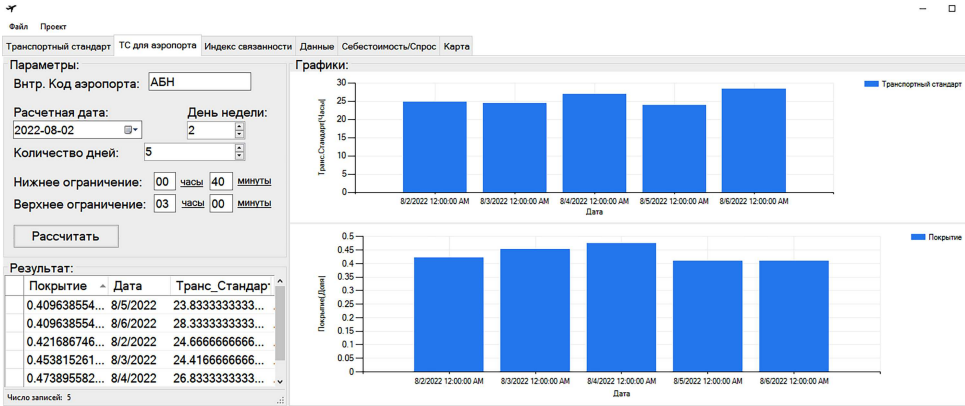


Рис. 2 Вкладка оценки качества АТС РФ для пассажира

в АТС РФ, так и на работу с загруженными данными. Интерфейс МПТС проиллюстрирован на рис. 2. Функционал вкладки позволяет рассчитать показатели (TS, N) как для конкретного аэропорта, так и для всех аэропортов в АТС РФ. Интерфейс программы позволяет задавать расчетную дату, интервал пересадочного окна. Результаты расчетов представляются в виде таблицы и аналитических графиков.

Интерфейс МОВА (рис. 3) реализован в виде двух вкладок. Первая вкладка предназначена для корректировки и дополнения данных по тарифам. Также функционал допускает внесение корректировок по диапазонам ценовой эластич-

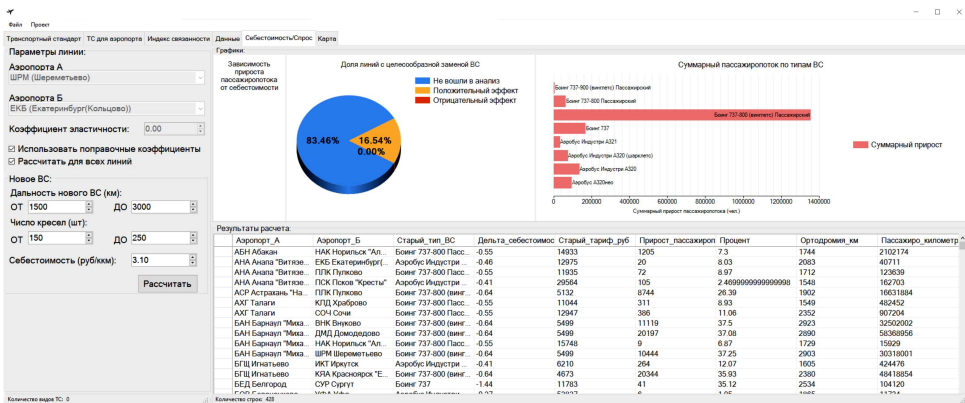


Рис. 3 Вкладка оценки эффекта от внедрения новой техники

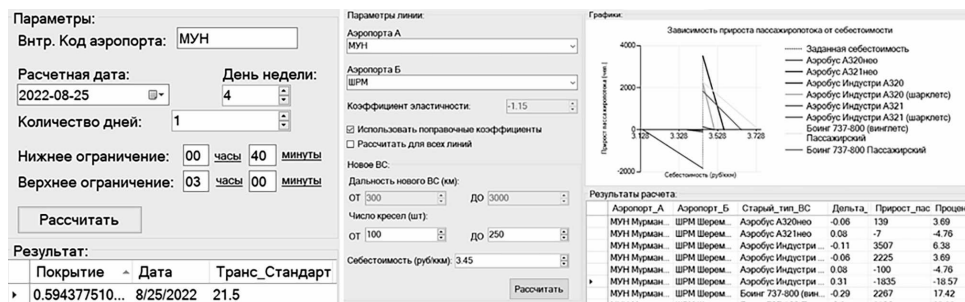


Рис. 4 Примеры расчетов МПТС и МОВА

ности спроса и ее перерасчет для промежуточных значений. Вторая вкладка позволяет оценить потенциал изменения спроса на перевозки при внедрении нового типа ВС. В качестве входных параметров расчета служат маршрут (для линии), себестоимость нового типа ВС, пассажироместимость, диапазон дальности планируемых полетов (для АТС). Результат расчета также представляется в виде таблиц и аналитических графиков.

Работа представленного комплекса, по данным расписания 2022 г., демонстрируется на примерах оценки показателей транспортного стандарта для аэропорта «Мурманск» и изменения пассажиропотока на линии «Мурманск»–«Шереметьево» при замещении текущих ВС перспективным с заданной себестоимостью. Результаты расчетов представлены на рис. 4.

4 Заключение

Статья посвящена разработке универсального программного комплекса, позволяющего проводить оценку деятельности и функционирования АТС РФ по различным критериям качества. Результат представляет интерес для разных участников рынка АТС, так как может быть использован для повышения эффективности управления всеми процессами в АТС в целом. Для данной цели в среде SQL Server спроектирована и реализована БД для хранения статистической информации об авиационных перевозках, рейсах, типах ВС, пунктах полета и аэродромах РФ. Разработаны ключевые программные модули оценки качества авиатранспортной сети для пассажира и оценки потенциала изменения спроса на перевозки при замещении существующих типов самолетов перспективными ВС. Дальнейшее развитие комплекса видится как в расширении его алгоритмического обеспечения и пополнения функционала, например за счет задач оценки прямых эксплуатационных расходов перспективных ВС, экономической и транспортной доступности, так и расширении БД за счет подключения дополнительных источников информации.

Литература

1. Газизуллина Р. К., Стенина М. М., Стрижов В. В. Прогнозирование объемов железнодорожных грузоперевозок по парам веток // Системы и средства информатики, 2015. Т. 25. № 1. С. 142–154. doi: 10.14357/08696527150109. EDN: UCMGVD.
2. Бронштейн Е. М., Копылов И. Е. Алгоритмическое обеспечение оптимизационной задачи доставки груза водным транспортом // Системы и средства информатики, 2016. Т. 26. № 4. С. 114–123. doi: 10.14357/08696527160410. EDN: XAKZDN.
3. Борисов А. В., Босов А. В., Жуков Д. В., Иванов А. В., Сушко Д. В. Информационные аспекты обеспечения безопасности на транспорте: онтология предметной области, модели и варианты использования // Системы и средства информатики, 2020. Т. 30. № 1. С. 126–134. doi: 10.14357/08696527200111. EDN: EWOSY.
4. Вышинский Л. Л., Флеров Ю. А. Теоретические основы формирования весового облика самолета // Информатика и её применения, 2021. Т. 15. Вып. 4. С. 93–102. doi: 10.14357/19922264210413. EDN: UGQQLU.
5. Вышинский Л. Л., Флеров Ю. А. Модели синтеза компоновочной схемы в задаче формирования облика самолета // Информатика и её применения, 2024. Т. 18. Вып. 1. С. 61–70. doi: 10.14357/19922264240109. EDN: DSPGKV.
6. Janic M. Air transport system analysis and modelling. — Boca Raton, CA, USA: CRC Press, 2000. 318 p.
7. Albayati R. S., Zehawi R. N. System dynamic model for simulating aviation demand: Baghdad international airport as a case study // Mathematical Modelling Engineering Problems, 2022. Vol. 9. No. 5. P. 1289–1297. doi: 10.18280/mmep.090517.
8. Baron A. Air transport efficiency and its measures // Prace Instytutu Lotnictwa, 2010. No. 3(205). P. 119–132.
9. Скипин Д. Л., Гущина А. С., Лобанова Э. В. Оценка эффективности выполнения авиаперевозок // Экономический анализ: теория и практика, 2018. Т. 17. № 3. С. 575–585. doi: 10.24891/ea.17.3.575. EDN: YTDMMBO.
10. Burghouwt G., Redondi R. Connectivity in air transport networks: An assessment of models and applications // J. Transp. Econ. Policy, 2013. Vol. 47. No. 1. P. 35–53.
11. Uryupin I. V. Defining standard of access to domestic air travel // World Transport Transportation, 2023. Vol. 21. No. 3. P. 66–73. doi: 10.30932/1992-3252-2023-21-3-6.
12. Транспортная стратегия РФ на период до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года: Распоряжение Правительства РФ от 27.11.2021 № 3363-р. <https://rosavtodor.gov.ru/file/8157401>.
13. Jeppesen total airspace and airport modeler (TAAM). <https://www2.jeppesen.com/airspace-solutions/total-airspace-and-airport-modeler>.
14. Airport research center. Cast software. <https://arc.de/cast-simulation-software>.
15. Sabre. Products. <https://www.sabre.com/products>.
16. Урюпин И. В., Сухарев А. А., Власенко А. О. Методика оценки качества пассажирской авиатранспортной системы Российской Федерации // Информационные технологии и вычислительные системы, 2023. № 3. С. 79–92. doi: 10.14357/20718632230309. EDN: SBYSPI.

17. Центр расписания и тарифов. Транспортная клиринговая палата. <https://www.tch.ru/ru-ru/Stc-and-statistics/Statistics/Pages/Statistics.aspx>.
18. Урюпин И. В., Сухарев А. А. Моделирование ценовой эластичности спроса на авиационные перевозки в условиях ограниченности статистических данных // Информатика и её применения, 2024. Т. 18 (в печати).
19. Richmond S. B. Forecasting air passenger traffic by multiple regression analysis // J. Air Law Commerce, 1955. Vol. 22. P. 434–444.
20. Liberty J. Programming C#: Building .NET applications with C. — 4th ed. — O'Reilly Media, Inc. 2005. 619 p.

Поступила в редакцию 09.05.24

DEVELOPMENT OF A SOFTWARE PACKAGE FOR MODELING EFFICIENCY IN THE RUSSIAN AIR TRANSPORT SYSTEM

I. V. Uryupin

Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119133, Russian Federation

Abstract: The article is devoted to the practical implementation of a technique for modeling efficiency in an air transport system (ATS). Air transport system is an important component of the socioeconomic development of any country and tools for modeling and analyzing the state of such complex systems allow solving a wide range of tasks — from assessing the quality of activities to optimizing management and forecasting results. The main attention is paid to the development of a software package for situational modeling of the quality of passenger transportation of the ATS of the Russian Federation and demand for them. The proposed version of the software package allows one to evaluate its functioning according to various efficiency criteria. The key implemented functional blocks are described: the module for assessing the quality of the air transport network for passengers and the module for assessing the potential for changes in demand for transportation when replacing existing types of aircraft with promising aircraft. The developed components operate with statistical information about air transportation available for collection or acquisition through a designed database.

Keywords: mathematical modeling; air transport system; software package; database

DOI: 10.14357/08696527240310

EDN: VMQRRH

References

1. Gazizullina, R. K., M. M. Stenina, and V. V. Strijov. 2015. Prognozirovanie ob’emov zheleznodorozhnykh gruzoperevozok po param vetok [Large capacity of railway cargo

- transportation forecasting]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 25(1):142–154. doi: 10.14357/08696527150109. EDN: UCMGVD.
2. Bronshtein, E. M., and I. E. Kopylov. 2016. Algoritmicheskoe obespechenie optimizatsionnoy zadachi dostavki gruzha vodnym transportom [Algorithmic software of the optimization problem for cargo delivering by water transport]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 26(4):114–123. doi: 10.14357/08696527160410. EDN: XAKZDN.
 3. Borisov, A. V., A. V. Bosov, D. V. Zhukov, A. V. Ivanov, and D. V. Sushko. 2020. Informatsionnye aspekty obespecheniya bezopasnosti na transporte: ontologiya predmetnoy oblasti, modeli i varianty ispol'zovaniya [Information aspects of security in transport: Ontology of the subject area, models, and cases]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 30(1):126–134. doi: 10.14357/08696527200111. EDN: EWOSY.
 4. Vyshinsky, L. L., and Yu. A. Flerov. 2021. Teoreticheskie osnovy formirovaniya vesovogo oblika samoleta [Theoretical foundation of formation of aircraft weight appearance]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 15(4):93–102. doi: 10.14357/19922264210413. EDN: UGQQLU.
 5. Vyshinsky, L. L., and Yu. A. Flerov. 2024. Modeli sinteza komponovochnoy skhemy v zadache formirovaniya oblika samoleta [Synthesis models of layout scheme in the task of forming an aircraft image]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 18(1):61–70. doi: 10.14357/19922264240109. EDN: DSPGKV.
 6. Janic, M. 2000. *Air transport system analysis and modelling*. Boca Raton, CA: CRC Press. 318 p.
 7. Albayati, R. S., and R. N. Zehawi. 2022. System dynamic model for simulating aviation demand: Baghdad international airport as a case study. *Mathematical Modelling Engineering Problems* 9(5):1289–1297. doi: 10.18280/mmep.090517.
 8. Baron, A. 2010. Air transport efficiency and its measures. *Prace Instytutu Lotnictwa* 3(205):119–132.
 9. Skipin, D. L., A. S. Gushchina, and E. V. Lobanova. 2018. Otsenka effektivnosti vypolneniya aviaperevozok [Assessment of air transportation performance]. *Ekonomicheskii analiz: teoriya i praktika* [Economic Analysis: Theory and Practice] 17(3):575–585. doi: 10.24891/ea.17.3.575. EDN: YTDMMBO.
 10. Burghouwt, G., and R. Redondi. 2013. Connectivity in air transport networks: An assessment of models and applications. *J. Transp. Econ. Policy* 47(1):35–53.
 11. Uryupin, I. V. 2023. Defining standard of access to domestic air travel. *World Transport Transportation* 21(3):66–73. doi: 10.30932/1992-3252-2023-21-3-6.
 12. Transportnaya strategiya RF na period do 2030 goda s prognozom na period do 2035 goda: Rasporyazhenie Pravitel'stva RF ot 27.11.2021 No. 3363-r [Transport strategy of the Russian Federation for the period up to 2030 with a forecast for the period up to 2035 (approved by the Order of the Government of the Russian Federation dated 27.11.2021 No. 3363-r)]. Available at: <https://rosavtodor.gov.ru/file/8157401> (accessed September 12, 2024).
 13. Jeppesen total airspace and airport modeler (TAAM). Available at: <https://ww2.jeppesen.com/airspace-solutions/total-airspace-and-airport-modeler> (accessed September 12, 2024).
 14. Airport research center. Cast software. Available at: <https://arc.de/cast-simulation-software> (accessed September 12, 2024).

15. Sabre. Products. Available at: <https://www.sabre.com/products> (accessed September 12, 2024).
16. Uryupin, I. V., A. A. Sukharev, and A. O. Vlasenko. 2023. Metodika otsenki kachestva passazhirskoy aviatransportnoy sistemy Rossiyskoy Federatsii [Methodology for assessing the quality of the passenger air transport system of the Russian Federation]. *Informatsionnye tekhnologii i vychislitel'nye sistemy* [J. Information Technologies Computing Systems] 3:79–92. doi: 10.14357/20718632230309. EDN: SBYSPM.
17. Tsentras raspisaniya i tarifov. Transportnaya kliringovaya palata [Schedule and tariff center. Transport clearing house]. Available at: <https://www.tch.ru/ru-ru/Stc-and-statistics/Statistics/Pages/Statistics.aspx> (accessed September 12, 2024).
18. Uryupin, I. V., and A. A. Sukharev. 2024 (in press). Modelirovanie tsenovoy elastichnosti sprosa na aviatsionnye perevozki v usloviyakh ogranichenosti statisticheskikh dannykh [Modeling the price elasticity of demand on passenger air transportation in Russia with limited statistical data]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 18.
19. Richmond, S. B. 1955. Forecasting air passenger traffic by multiple regression analysis. *J. Air Law Commerce* 22(4):434–444.
20. Liberty, J. 2005. *Programming C#: Building .NET applications with C*. 4th ed. O'Reilly Media, Inc. 619 p.

Received May 9, 2024

Contributor

Uryupin Ilya V. (b. 1993) — Candidate of Science (PhD) in physics and mathematics, junior scientist, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119333, Russian Federation; uryupin93@yandex.ru

ОНЛАЙН-ЭНЦИКЛОПЕДИИ: АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ РАЗВИТИЯ

В. Д. Ильин¹

Аннотация: Предложен подход к изучению онлайн-энциклопедий как S-символьных систем знаний. Онлайн-энциклопедия рассматривается как обновляемая совокупность гипермедийных информационных ресурсов, оформленная в виде веб-сайта и объединенная правилами их создания, изменения, классификации, поиска и пользования. Правила определяют функциональные требования к программному обеспечению онлайн-энциклопедии (как веб-системе), реализованному в виде движка онлайн-энциклопедии. Приведены результаты сравнительного анализа концептуальных, организационных и технологических основ трех современных российских универсальных онлайн-энциклопедий (Большой российской энциклопедии (БРЭ) электронных версий 2017 и 2022 гг., Руниверсалис и Рувики). Приведены примеры удачных и ошибочных решений, влияющих на перспективы развития онлайн-энциклопедий. Среди неотложных организационных проблем выделена задача привлечения экспертов к созданию и рецензированию энциклопедических ресурсов. Для ее решения (при существующей системе оценки результативности научной деятельности сотрудников исследовательских и образовательных учреждений) целесообразно учитывать экспертные публикации в российских онлайн-энциклопедиях.

Ключевые слова: онлайн-энциклопедия; веб-система; S-символьная система знаний; гипермедийные информационные ресурсы; движок онлайн-энциклопедии; экспертные публикации онлайн-энциклопедий

DOI: 10.14357/08696527240311

EDN: SFPZBB

1 Введение

В XXI в. неуклонно усиливается зависимость продуктивности интеллектуальной деятельности от качества, доступности и технологий пользования информационными ресурсами (статьями онлайн-энциклопедий, электронных библиотек и др.) [1]. Достоверные и адекватно представленные энциклопедические ресурсы имеют особое значение в просвещении и образовании.

В течение почти 2000 лет развития энциклопедического дела *энциклопедии* [2] неизменно занимают одну из ключевых позиций в процессах познания. Концептуальным прообразом универсальных энциклопедий XX в. можно считать созданный во Франции в XVIII в. (по инициативе книгоиздателя Луи Бретона) справочник, получивший название «*Энциклопедия, или Толковый словарь*

¹Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук, vdilyin@yandex.ru

наук, искусств и ремесел»¹. Авторами статей были Вольтер², Монтескье³, Дидро⁴ и другие знаменитые философы-просветители того времени. Ключевую роль в составлении, систематизации и редактировании статей сыграл Дидро (из 35 томов первые 28 составлены им).

В наши дни в России функционируют три универсальных онлайн-энциклопедии (БРЭ (представленная версиями 2017⁵ и 2022 гг.⁶), Руниверсалис⁷ и Рувики⁸).

Предмет и методология исследований. Какими свойствами должны обладать статьи онлайн-энциклопедий, чтобы считаться достоверными ресурсами? Как технологии создания, изменения, классификации, поиска и пользования влияют на эффективность энциклопедического контента? Ответы на эти и связанные с ними вопросы предполагают исследование онлайн-энциклопедий как интерактивных систем знаний [3] массового применения. Для повышения эффективности исследований целесообразно применять разработанную в теории *S-символов* [4–7] методологию представления этих систем как *S-систем знаний* (см. разд. 2).

Результативность методологического и технологического обеспечения процессов построения и применения энциклопедических ресурсов во многом зависит и от результатов своевременной модернизации инфраструктурных средств *символьно-кодowo-сигнальной среды (S-среды)* [4–7]. Эти средства необходимы для реализации технологий *облачных вычислений* [8], *цифровых двойников* (англ. Digital Twins) [9] и *семантического веба (Semantic Web)* [10].

Авторитетный источник. Принято считать, что понятие *авторитетный источник (АИ)* применимо к изданиям (включая энциклопедии), которые содержат *достоверные информационные ресурсы* [11], созданные и отрецензированные *экспертами*. Косвенным подтверждением квалификационных статусов авторов и рецензентов могут быть списки их научных трудов, относящихся к теме статьи.

Статьи АИ-энциклопедий рассматриваются как *источники научно-признанных сведений*. Ссылки на них размещают авторы книг и статей в различных журналах. На них ссылаются преподаватели школ, вузов и других образовательных учреждений. Статьи АИ-энциклопедий служат важным источником знаний для занимающихся самообразованием.

¹Энциклопедия, или Толковый словарь наук, искусств и ремёсел // Рувики. https://ru.ruwiki.ru/w/index.php?title=Энциклопедия,_или_Толковый_словарь_наук,_искусств_и_ремёсел&oldid=129932929.

²Вольтер // Руниверсалис. <https://руни.рф/index.php?title=Вольтер&oldid=13121072>.

³Монтескье // Рувики. https://ru.ruwiki.ru/w/index.php?title=Монтескье,_Шарль_Луи_de&oldid=1186263521.

⁴Дидро // Руниверсалис. https://руни.рф/index.php?title=Дидро,_Дени&oldid=17583856.

⁵Большая российская энциклопедия 2004–2017. <https://old.bigenc.ru/>.

⁶Портал. Большая российская энциклопедия. <https://bigenc.ru/>.

⁷Руниверсалис. <https://руни.рф/Руниверсалис>.

⁸Рувики // Рувики. <https://ru.ruwiki.ru/wiki/Рувики>.

Формализованная запись и разметка текста. Для записи определений, замечаний и примеров в статье используются средства языка *TSM-комплекса* (*TSM: textual symbolic modeling*) [4–7].

Средства выделения фрагментов текста, применяемые в статье:

□ ⟨фрагмент текста⟩ □ ≈ определение (символ ≈ заменяет слово «означает»);

◇ ⟨фрагмент текста⟩ ◇ ≈ замечание;

○ ⟨фрагмент текста⟩ ○ ≈ пример.

Первые вхождения названий понятий и наиболее важные фрагменты текста выделены курсивом.

2 Онлайн-энциклопедии: S-представление систем понятий и знаний

□ Будем рассматривать *онлайн-энциклопедию* как *S-систему знаний* [4–7], представленную совокупностью *гипермедийных информационных ресурсов* [11], которая оформлена в виде веб-сайта и объединена правилами создания, обновления, классификации, поиска и пользования ресурсами. Правила определяют функциональные требования к программному обеспечению онлайн-энциклопедии (как *веб-системе*¹ [12]), реализованному в виде *движка онлайн-энциклопедии*. □

Чтобы повысить, прежде всего, качество научно-технических статей, целесообразно применять формализованное представление систем понятий и знаний, предложенное в *теории S-символов* [4–7]. Для этого необходимо расширить функционал инструментальных систем онлайн-энциклопедий средствами интерактивного создания соответствующих шаблонов [13, 14]. В режиме чтения контент должен иметь привычный для пользователей вид. Режим вывода S-представления систем понятий и знаний целесообразно сделать опциональным.

□ *Определение S-системы понятий должно быть представлено в виде пары ⟨S-модель системы понятий⟩, ⟨спецификация применимости определения S-системы понятий⟩.*

⟨S-модель системы Sc понятий⟩ ≈ ⟨множество S^{Sc} понятий⟩, ⟨семейство rel(S^{Sc}) связей на S^{Sc}⟩.

⟨Спецификация применимости определения S-системы понятий⟩ ≈ ⟨область применимости (одна или несколько областей знаний, в которых определение применимо)⟩, ⟨тип корреспондента [кому адресовано определение (неспециалист, эксперт и т. д.)]⟩, ⟨стадия применимости (начальное изучение, изучение концептуальных оснований и т. д.)⟩.

Для определения нового понятия необходимо описать его связь с одной или несколькими ранее определенными S-системами понятий. □

□ *S-система знаний* представлена в виде триады ⟨sa ≈ S-модель системы Sc понятий⟩, ⟨set^{ling} ≈ S-модель совокупности языков S-сообщений, интер-

¹ *Веб-системы* — основанный на клиент-серверных технологиях класс программных средств для разработки веб-ресурсов.

претируемых на ca), $\langle set^{intr} \approx S$ -модель совокупности интерпретаторов на ca S-сообщений, составленных на языках из set^{lng}). $\square$

◇ Обязательным свойством статей онлайн-энциклопедии принято считать способ изложения и представления материала, рассчитанный на пользователей, имеющих разный уровень подготовленности (от начального до экспертного). Поэтому целесообразно иметь шаблоны для создания контента, ориентированного на разные уровни подготовленности пользователя. ◇

3 Современные российские универсальные онлайн-энциклопедии: Большая российская энциклопедия (электронные версии 2017 и 2022 годов), Руниверсалис и Рувикс

Рассмотрим некоторые *результаты анализа*¹, характеризующие качество энциклопедических ресурсов и уровень инструментальных средств, используемых для их создания, изменения, классификации, поиска и пользования.

3.1 Большая российская энциклопедия (электронные версии 2017 и 2022 годов)

По умолчанию БРЭ считается государственным источником энциклопедических ресурсов, так как все работы оплачиваются из государственного бюджета. Основная часть статей создается и рецензируется авторами, считающимися экспертами в той области знаний, к которой отнесена статья. Выбор авторов и рецензентов — прерогатива научных редакций БРЭ.

Они же занимаются и редактированием содержания и стиля изложения статей.

Большая российская энциклопедия версии 2017 г. содержит расширенные и обновленные статьи, опубликованные в 35-томном издании БРЭ [15]. Предполагалось, что БРЭ версии 2022 г. будет совершеннее предшественницы. Но достичь этого пока не удалось из-за критических ошибок разного типа (включая организационные и технологические, рассматриваемые далее). В итоге бюджетные средства на продолжение работ в 2024 г. до сих пор (июль 2024 г.) не выделены.

Большая российская энциклопедия версии 2017 г. условно может быть отнесена к АИ-энциклопедии. Условно потому, что выбор авторов и рецензентов осуществлялся сотрудниками редакций, не являющихся экспертами. А БРЭ версии 2022 г. не может быть отнесена к АИ-энциклопедии не только потому, что заметно выросло число опубликованных статей, авторов которых нельзя назвать экспертами. Признаком недостаточной квалификации специалистов, занимающихся размещением материалов на веб-сайте, служит то, что статьи, ранее

¹Получены на основе опыта автора, участвующего в создании экспертных статей в БРЭ (более 20 статей по информатике и вычислительной технике) и Руниверсалис (более 30 статей и авторских текстов).

опубликованные в БРЭ версии 2017 г., бесследно исчезают, а с их URL (uniform resource locator) делаются перенаправления на другие статьи БРЭ версии 2022 г.

○ Приведу два примера таких нарушений. Статья «Порт в информатике», опубликованная в БРЭ версии 2017 г., стала недоступаемой, а с ее URL https://old.bigenc.ru/technology_and_technique/text/3958338 сделано перенаправление на статью «Порт (*франц.* port, от *лат.* porta — вход, ворота), участок берега (моря, озера,...» в БРЭ версии 2022 г., которая имеет URL <https://bigenc.ru/c/port-8e2825>. Статья «Символ в информатике (s-символ)» в БРЭ версии 2017 г. исчезла, а с ее URL https://old.bigenc.ru/technology_and_technique/text/3958296 сделано перенаправление на статью БРЭ версии 2022 г. (о символах в литературе, искусстве и других областях деятельности). В статье «Символьное моделирование (s-моделирование)»¹, опубликованной в БРЭ версии 2017 г., осталась гиперссылка на статью «Символ в информатике (s-символ)». При наведении на нее курсора всплывает начало дефиниции, а при активации гиперссылки открывается статья БРЭ версии 2022 г. о символах в литературе, искусстве и других областях деятельности, не относящихся к информатике.² ○

□ Чтобы обеспечить возможность надежных и непротиворечивых ссылок (на статью онлайн-энциклопедии) в научных, образовательных и других публикациях, каждая опубликованная *версия статьи онлайн-энциклопедии должна иметь уникальный URL (постоянную ссылку)*. □

В БРЭ версии 2022 г. предусмотрена возможность (выбрав пункт меню «Цитировать») скопировать в буфер обмена основные атрибуты статьи, включая URL.

3.2 Руниверсалис

Руниверсалис — онлайн-энциклопедия на русском языке, реализующая принцип коллективного создания статей (российский аналог проекта *Wikipedia*³) [16]. Начало реализации проекта — 9 июня 2022 г. Руководитель Павел Фролов. Средства государственного бюджета и частных компаний не используются. Проект пользуется серверами и средствами информационной защиты российской информационно-технологической (ИТ) компании *EdgeЦентр*⁴, которая представила их по собственной инициативе в августе 2022 г. В июне 2024 г. общее число статей превысило 3 млн, из них более 8 тыс. оригинальных (не

¹Ильин В. Д. Символьное моделирование (s-моделирование) // БРЭ версии 2017 г. https://old.bigenc.ru/technology_and_technique/text/4010980.

²Примеры соответствуют состоянию БРЭ обеих версий на 10.07.2024.

³Wikipedia // Wikipedia. <https://en.wikipedia.org/wiki/Wikipedia>.

⁴EdgeЦентр. <https://руни.рф/EdgeЦентр>.

перенесенных из Википедии и *Викисловаря*¹). Перенесенные статьи проверены и отредактированы.

Тип онлайн-энциклопедии — *вики*². Веб-системные средства — *вики-движок*³.

Требование иметь постоянную ссылку для каждой версии статьи выполняется довольно рационально. На странице текущей версии статьи необходимо выбрать в меню пункт «Инструменты», среди опций которого находится «Постоянная ссылка». ○ Постоянная ссылка версии статьи «Интернет», созданной в результате изменения, сделанного 05.07.2024 в 13:58, — <https://руни.рф/index.php?title=Интернет&oldid=24393939>. ○

Основные отличия от проекта Wikipedia. Возможность создания и изменения контента имеют только зарегистрированные пользователи, прошедшие элементарную онлайн-проверку на готовность пользоваться средствами вики-движка. Их называют *участниками*.

Если основной автор статьи — *эксперт*, указываются краткие сведения о нем с гиперссылкой, позволяющей перейти к статье об авторе-эксперте. В ней представлены и сведения, характеризующие его квалификационный уровень (включая список научных трудов).

Авторам-экспертам предоставлена возможность публиковать не только авторские статьи, но и тексты, оформляемые как подстраницы веб-страницы статьи об авторе.

Приветствуется экспертное рецензирование статей. Рецензии публикуются с указанием сведений о рецензенте (аналогично сведениям об авторе-эксперте).

3.3 Рувики

Онлайн-энциклопедия Рувики представляет собой концептуальный и технологический аналог *Википедии*. Руководитель проекта Владимир Медейко (в русскоязычной *Википедии* был одним из администраторов и директором некоммерческого партнерства *Викимедиа РУ*⁴). Проект пользуется финансовой поддержкой коммерческой организации. Реализуется на российской ИТ-инфраструктуре и серверах, размещенных в России.

Бета-версия Рувики стала доступной 24 июня 2023 г., а редактирование статей — 1 августа 2023 г. Полнофункциональная работа Рувики началась 15 января 2024 г. К середине 2024 г. число статей достигло 2 млн (в основном перенесенных из Википедии). Контент Рувики создается экспертами и пользователями-энтузиастами. Существует возможность аудиовоспроизведения текста (на веб-страницах статей размещена соответствующая гипертекстовая кнопка). Часть статей переведена на языки народов России.

¹Викисловарь // Руниверсалис. <https://руни.рф/Викисловарь>.

²Вики // Руниверсалис. <https://руни.рф/Вики>.

³Вики-движок // Рувики. <https://ru.ruwiki.ru/wiki/Вики-движок>.

⁴Викимедиа РУ // Руниверсалис. https://руни.рф/Викимедиа_РУ.

4 Об увеличении числа и повышении качества экспертных статей

Анализ качества статей по информатике и вычислительной технике в современных онлайн-энциклопедиях позволяет заключить, что, как правило, достоверность не может быть обеспечена, если статьи не написаны (или отредактированы) экспертами. Есть основания полагать, что этот вывод применим и к статьям из других областей знаний. Поэтому привлечение высококвалифицированных специалистов научных и образовательных учреждений к созданию ресурсов российских онлайн-энциклопедий — постоянно актуальная задача комплексной проблемы повышения качества энциклопедических статей. Поиск подходов к ее решению предполагает необходимость дальнейших исследований.

□ При существующей системе оценки результативности научной деятельности целесообразно учитывать экспертные публикации в российских энциклопедических изданиях¹. Справка об авторе-эксперте должна содержать сведения об опубликованных в научных изданиях трудах по теме статьи, ученой степени и звании. □

◇ Апробацию онлайн-энциклопедических публикаций целесообразно осуществлять на основе неограниченного по времени экспертного рецензирования (с публикацией рецензий и справок о рецензентах). ◇

5 Заключение

1. Результаты исследований онлайн-энциклопедий дают основания полагать, что качество публикуемых в них материалов может быть существенно повышено путем применения технологий изготовления и использования шаблонов для формализованного описания систем понятий и знаний, предложенного в теории S-символов.
2. Приведен обзор некоторых результатов сравнительного анализа трех универсальных онлайн-энциклопедий (БРЭ электронных версий 2017 и 2022 гг., Руниверсалис и Рувики).
3. Для решения проблемы привлечения высококвалифицированных специалистов к созданию и рецензированию энциклопедических ресурсов (при существующей системе оценки результативности научной деятельности сотрудников исследовательских и образовательных учреждений) целесообразно учитывать публикации в российских онлайн-энциклопедиях.

Автор благодарен Павлу Фролову (руководителю проекта *Руниверсалис* [16]), сделавшему ряд полезных замечаний при обсуждении идеи статьи, разд. 3 и ключевых определений.

Литература

1. Jonscher C. Information resources and economic productivity // Inf. Econ. Policy, 1983. Vol. 1. Iss. 1. P. 13–35. doi: 10.1016/0167-6245(83)90016-1.

¹С указанием места работы в сведениях об авторе.

2. Encyclopaedia Britannica, 2024. <https://www.britannica.com/topic/encyclopaedia>.
3. Knowledge technology and systems. toward establishing knowledge systems science / Ed. Y. Nakamori. — Singapore: Springer, 2023. 287 p. doi: 10.1007/978-981-99-1075-5.
4. Ильин В. Д. Теория S-символов: концептуальные основания // Системы и средства информатики, 2023. Т. 33. № 1. С. 126–134. doi: 10.14357/08696527230112. EDN: OCIEKY.
5. Ильин В. Д. Теория S-символов: формализация знаний об S-задачах // Системы и средства информатики, 2023. Т. 33. № 2. С. 124–131. doi: 10.14357/08696527230212. EDN: ACFEQB.
6. Ильин В. Д. Теория S-символов: сетевой табс-решатель S-задач // Системы и средства информатики, 2023. Т. 33. № 3. С. 141–148. doi: 10.14357/08696527230312. EDN: EJHIQJ.
7. Ильин В. Д. Теория S-символов: классы базовых S-задач // Системы и средства информатики, 2023. Т. 33. № 4. С. 139–148. doi: 10.14357/08696527230413. EDN: YLGBME.
8. Xiaoyu W., Zhengming G. Research and development of data security multidimensional protection system in cloud computing environment // Conference (International) on Advance in Ambient Computing and Intelligence Proceedings. — Ottawa, ON, Canada: IEEE, 2020. P. 67–70. doi: 10.1109/ICAACI50733.2020.00019.
9. Semeraro C., Lezoche M., Panetto H., Dassisti M. Digital twin paradigm: A systematic literature review // Comput. Ind., 2021. Vol. 130. Art. 103469. 23 p. doi: 10.1016/j.compind.2021.103469.
10. What is the Semantic Web? — W3C, 2024. <https://www.w3.org/RDF/FAQ>.
11. Ильин В. Д. Конструирование целевых информационных ресурсов // Современные информационные технологии и ИТ-образование, 2023. Т. 19. № 2. С. 333–339. doi: 10.25559/sitito.019.202302.333-339. EDN: ZSNATQ.
12. Kulesza R., de Sousa M. F., de Araújo, et al. Evolution of Web Systems architectures: A roadmap // Special topics in multimedia, IoT and Web technologies / Eds. V. Roesler, E. Barrère, R. Willrich. — Cham: Springer, 2020. P. 3–21. doi: 10.1007/978-3-030-35102-1_1.
13. Carvalho F. M., Duarte L. Modern type-safe template engines (Part 1). — Dzone, 2018. <https://dzone.com/articles/modern-type-safe-template-engines>.
14. Carvalho F. M., Duarte L., Gouesse J. Text Web templates considered harmful // Web information systems and technologies / Eds. A. Bozzon, F. J. Domínguez Mayo, J. Filipe. — Lecture notes in business information processing ser. — Cham: Springer, 2020. Vol. 399. P. 69–95. doi: 10.1007/978-3-030-61750-9_4.
15. Большая российская энциклопедия: в 35 т. <https://greatbook.ru>.
16. Фролов П. С. Кто знает, что бы сейчас было, не стори Александрийская библиотека? // Российская газета. Лента новостей, 2.06.2023. <https://rg.ru/2023/06/02/pavel-frolov-otechestvennaia-viki-enciklopediia-runiversalis-sravnialas-russkoiazychnoj-vikipediej-po-kolichestvu-statej.html>.

Поступила в редакцию 12.07.24

ONLINE ENCYCLOPEDIAS: URGENT DEVELOPMENT CHALLENGES

V. D. Ilyin

Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119133, Russian Federation

Abstract: An approach to study of online encyclopedias as S-symbolic knowledge systems is proposed. The online encyclopedia is considered as an updatable collection of hypermedia information resources designed in the form of a web site and united by the rules of creation, modification, classification, search, and use of resources. The rules define the functional requirements for the online encyclopedia software (as a web system) implemented as an online encyclopedia engine. The results of a comparative analysis of the conceptual, organizational, and technological foundations of three modern Russian universal online encyclopedias (The Great Russian Encyclopedia (electronic versions 2017 and 2022), Runiversalis, and Ruwiki) are presented. The examples of successful and erroneous decisions affecting the prospects for the development of online encyclopedias are given. Among urgent organizational problems, the task of attracting experts to create and review encyclopedic resources is highlighted. To solve it (with the existing system of evaluating the effectiveness of scientific activities of employees of research and educational institutions), it is advisable to take into account expert publications in Russian online encyclopedias.

Keywords: online encyclopedia; web system; S-symbolic knowledge system; hypermedia information resources; online encyclopedia engine; expert publications of online encyclopedias

DOI: 10.14357/08696527240311

EDN: SFPZBB

Acknowledgments

The author is grateful to Pavel Frolov (head of the Runiversalis project [16]) who made a number of useful comments when discussing the idea of the article, section 3, and key definitions.

References

1. Jonscher, C. 1983. Information resources and economic productivity. *Inf. Econ. Policy* 1(1):13–35. doi: 10.1016/0167-6245(83)90016-1.
2. Encyclopaedia Britannica. 2024. Available at: <https://www.britannica.com/topic/encyclopaedia> (accessed September 12, 2024).
3. Nakamori, Y., ed. 2023. *Knowledge technology and systems. Toward establishing knowledge systems science*. Singapore: Springer. 287 p. doi: 10.1007/978-981-99-1075-5.

4. Ilyin, V. D. 2023. Teoriya S-simvolov: Kontseptual'nye osnovaniya [Theory of S-symbols: Conceptual foundations]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 33(1):126–134. doi: 10.14357/08696527230112. EDN: OCIEKY.
5. Ilyin, V. D. 2023. Teoriya S-simvolov: Formalizatsiya znaniy ob S-zadachakh [Theory of S-symbols: Formalization of knowledge about S-problems]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 33(2):124–131. doi: 10.14357/08696527230212. EDN: ACFEQB.
6. Ilyin, V. D. 2023. Teoriya S-simvolov: setevoy tabs-reshatel' S-zadach [Theory of S-symbols: Network tabs-solver of S-problems]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 33(3):141–148. doi: 10.14357/08696527230312. EDN: EJHIQJ.
7. Ilyin, V. D. 2023. Teoriya S-simvolov: klassy bazovykh S-zadach [Theory of S-symbols: The classes of basic S-problems]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 33(4):139–148. doi: 10.14357/08696527230413. EDN: YLGBME.
8. Xiaoyu, W., and G. Zhengming. 2020. Research and development of data security multidimensional protection system in cloud computing environment. *Conference (International) on Advance in Ambient Computing and Intelligence Proceedings*. Ottawa, ON: IEEE. 67–70. doi: 10.1109/ICAACI50733.2020.00019.
9. Semeraro, C., M. Lezoche, H. Panetto, and M. Dassisti. 2021. Digital twin paradigm: A systematic literature review. *Comput. Ind.* 130:103469. 23 p. doi: 10.1016/j.compind.2021.103469.
10. What is the semantic web? 2024. W3C. Available at: <https://www.w3.org/RDF/FAQ> (accessed September 12, 2024).
11. Ilyin, V. D. 2023. Konstruirovanie tselevykh informatsionnykh resursov [Constructing of targeted information resources]. *Sovremennye informatsionnye tekhnologii i IT-obrazovanie* [Modern Information Technologies and IT-Education] 19(2):333–339. doi: 10.25559/sitito.019.202302.333-339. EDN: ZSNATQ.
12. Kulesza, R., M. F. de Sousa, de Araújo, *et al.* 2020. Evolution of web systems architectures: A roadmap. *Special topics in multimedia, IoT and Web technologies*. Eds. V. Roesler, E. Barrère, and R. Willrich. Cham: Springer. 3–21. doi: 10.1007/978-3-030-35102-1_1.
13. Carvalho, F. M., and L. Duarte. 2018. Modern type-safe template engines (Part 1). DZone. Available at: <https://dzone.com/articles/modern-type-safe-template-engines> (accessed September 12, 2024).
14. Carvalho, F. M., L. Duarte, and J. Gouesse. 2020. Text web templates considered harmful. *Web information systems and technologies*. Eds. A. Bozzon, F. J. Domínguez Mayo, and J. Filipe. Lecture notes in business information processing ser. Cham: Springer. 399:69–95. doi: 10.1007/978-3-030-61750-9_4.
15. Bol'shaya rossiyskaya entsiklopediya [The Great Russian Encyclopedia]. 35 vols. Available at: <https://greatbook.ru> (accessed September 12, 2024).

16. Frolov, P. S. 2023. Kto znaet, chto by seychas bylo, ne sgori Aleksandriyskaya biblioteka? [Who knows what would have happened now if the Library of Alexandria had not burned down?]. *Rossiyskaya gazeta* [Rossiyskaya Gazeta]. News feed dated 02.06.2023. Available at: <https://rg.ru/2023/06/02/pavel-frolov-otechestvennaia-viki-enciklopediia-runiversalis-sravniat-s-russkoiazыchnoj-vikipediej-po-kolichestvu-statej.html> (accessed September 12, 2024).

Received July 12, 2024

Contributor

Ilyin Vladimir D. (b. 1937) — Doctor of Science in technology, professor, senior scientist, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119133, Russian Federation; vdilyin@yandex.ru

Гаврилов Виктор Евдокимович (р. 1950) — главный специалист Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Грушо Александр Александрович (р. 1946) — доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Грушо Николай Александрович (р. 1982) — кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Дьяченко Денис Юрьевич (р. 1987) — инженер-исследователь Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Дьяченко Юрий Георгиевич (р. 1958) — кандидат технических наук, старший научный сотрудник Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Забезжайло Михаил Иванович (р. 1956) — доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Зацаринный Александр Алексеевич (р. 1951) — доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Ильин Владимир Дмитриевич (р. 1937) — доктор технических наук, профессор, старший научный сотрудник Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Кириков Игорь Александрович (р. 1955) — кандидат технических наук, директор Калининградского филиала Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Конашенкова Татьяна Дмитриевна (р. 1964) — кандидат физико-математических наук, научный сотрудник Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Корепанов Эдуард Рудольфович (р. 1966) — кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Кривенко Михаил Петрович (р. 1946) — доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Листопад Сергей Викторович (р. 1984) — кандидат технических наук, старший научный сотрудник Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Морозов Николай Викторович (р. 1956) — старший научный сотрудник Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Синицын Владимир Игоревич (р. 1968) — доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Синицын Игорь Николаевич (р. 1940) — доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, главный научный сотрудник Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Смирнов Дмитрий Владимирович (р. 1984) — бизнес-партнер по ИТ департамента безопасности ПАО «Сбербанк России»

Степченко Дмитрий Юрьевич (р. 1973) — старший научный сотрудник Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Степченко Юрий Афанасьевич (р. 1951) — кандидат технических наук, заведующий отделом, ведущий научный сотрудник Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Тимонина Елена Евгеньевна (р. 1952) — доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Урюпин Илья Вадимович (р. 1993) — кандидат физико-математических наук, младший научный сотрудник Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Правила подготовки рукописей статей для публикации в журнале «Системы и средства информатики»

Журнал «Системы и средства информатики» публикует теоретические, обзорные и дискуссионные статьи, посвященные научным исследованиям и разработкам в области информационных технологий.

Журнал издается на русском языке. По специальному решению редколлегии отдельные статьи могут печататься на английском языке.

Тематика журнала охватывает следующие направления:

- информационно-телекоммуникационные системы и средства их построения;
- архитектура и программное обеспечение вычислительных машин, комплексов и сетей;
- методы и средства защиты информации.

1. В журнале печатаются статьи, содержащие результаты, ранее не опубликованные и не предназначенные к одновременной публикации в других изданиях.

Публикация предоставленной автором(ами) рукописи не должна нарушать положений глав 69, 70 раздела VII части IV Гражданского кодекса, которые определяют права на результаты интеллектуальной деятельности и средства индивидуализации, в том числе авторские права, в РФ.

Ответственность за нарушение авторских прав, в случае предъявления претензий к редакции журнала, несут авторы статей.

Направляя рукопись в редакцию, авторы сохраняют свои права на данную рукопись и при этом передают учредителям и редколлегии журнала неисключительные права на издание статьи на русском языке (или на языке статьи, если он отличен от русского) и на перевод ее на английский язык, а также на ее распространение в России и за рубежом. Каждый автор должен представить в редакцию подписанный с его стороны «Лицензионный договор о передаче неисключительных прав на использование произведения», текст которого размещен по адресу <http://www.ipiran.ru/publications/licence.doc>. Этот договор может быть представлен в бумажном (в 2-х экз.) или в электронном виде (отсканированная копия заполненного и подписанного документа).

Редколлегия вправе запросить у авторов экспертное заключение о возможности публикации представленной статьи в открытой печати.

2. К статье прилагаются данные автора (авторов) (см. п. 8). При наличии нескольких авторов указывается фамилия автора, ответственного за переписку с редакцией.
3. Редакция журнала осуществляет экспертизу присланных статей в соответствии с принятой в журнале процедурой рецензирования.

Возвращение рукописи на доработку не означает ее принятия к печати.

Доработанный вариант с ответом на замечания рецензента необходимо прислать в редакцию.

4. Решение редколлегии о публикации статьи или ее отклонении сообщается авторам. Редколлегия может также направить авторам текст рецензии на их статью. Дискуссия по поводу отклоненных статей не ведется.

5. Редактура статей высылается авторам для просмотра. Замечания к редакции должны быть присланы авторами в кратчайшие сроки.
6. Рукопись предоставляется в электронном виде в форматах MS WORD (.doc или .docx) или ЛАТЭХ (.tex), дополнительно — в формате .pdf, на дискете, лазерном диске или электронной почтой. Предоставление бумажной рукописи необязательно.
7. При подготовке рукописи в MS Word рекомендуется использовать следующие настройки.

Параметры страницы: формат — А4; ориентация — книжная; поля (см): внутри — 2,5, снаружи — 1,5, сверху и снизу — 2, от края до нижнего колонтитула — 1,3.

Основной текст: стиль — «Обычный», шрифт — Times New Roman, размер — 14 пунктов, абзацный отступ — 0,5 см, 1,5 интервала, выравнивание — по ширине.

Рекомендуемый объем рукописи — не выше 10 страниц указанного формата. При превышении указанного объема редколлегия вправе потребовать от автора сокращения объема рукописи.

Сокращения слов, помимо стандартных, не допускаются. Допускается минимальное количество аббревиатур.

Все страницы рукописи нумеруются.

Шаблоны оформления представлены в интернете:

http://www.ipiran.ru/journal/template_iiep_ssi_2024.zip

8. Статья должна содержать следующую информацию на **русском и английском языках**:

- название статьи;
- Ф.И.О. авторов, на английском можно только имя и фамилию;
- место работы, с указанием города и страны и электронного адреса каждого автора;
- сведения об авторах, в соответствии с форматом, образцы которого представлены на страницах:
http://www.ipiran.ru/journal/collected/2019_29_03_rus/authors.asp и
http://www.ipiran.ru/journal/collected/2019_29_03_eng/authors.asp;
- аннотация (не менее 100 слов на каждом из языков). Аннотация — это краткое резюме работы, которое может публиковаться отдельно. Она является основным источником информации в информационных системах и базах данных. Английская аннотация должна быть оригинальной, может не быть дословным переводом русского текста и должна быть написана хорошим английским языком. В аннотации не должно быть ссылок на литературу и, по возможности, формул;
- ключевые слова — желательно из принятых в мировой научно-технической литературе тематических тезаурусов. Предложения не могут быть ключевыми словами.
- источники финансирования работы (ссылка на гранты, проекты, поддерживающие организации и т. п.).

9. Требования к спискам литературы.

Ссылки на литературу в тексте статьи нумеруются (в квадратных скобках) и располагаются в каждом из списков литературы в порядке первых упоминаний.

Списки литературы представляются в двух вариантах:

- (1) **Список литературы к русскоязычной части.** Русские и английские работы — на языке и в алфавите оригинала.
- (2) **References.** Русские работы и работы на других языках — в латинской транслитерации с переводом на английский язык; английские работы и работы на других языках — на языке оригинала.

Необходимо для составления списка “References” пользоваться размещенной на сайте <http://www.translit.net/ru/bgn/> бесплатной программой транслитерации русского текста в латиницу.

Список литературы “References” приводится полностью отдельным блоком, повторяя все позиции из списка литературы к русскоязычной части, независимо от того, имеются или нет в нем иностранные источники. Если в списке литературы к русскоязычной части есть ссылки на иностранные публикации, набранные латиницей, они полностью повторяются в списке “References”.

Примеры ссылок на различные виды публикаций в списке “References”:

Описание статьи из журнала:

Zhang, Z., and D. Zhu. 2008. Experimental research on the localized electrochemical micromachining. *Russ. J. Electrochem.* 44(8):926–930. doi:10.1134/S1023193508080077.

Описание статьи из электронного журнала:

Swaminathan, V., E. Lepkoswka-White, and B. P. Rao. 1999. Browsers or buyers in cyberspace? An investigation of electronic factors influencing electronic exchange. *JCMC* 5(2). Available at: <http://www.ascusc.org/jcmc/vol5/issue2/> (accessed April 28, 2011).

Описание материалов конференций:

Usmanov, T. S., A. A. Gusmanov, I. Z. Mullagalin, R. Ju. Muhametshina, A. N. Chervyakova, and A. V. Sveshnikov. 2007. Osobennosti proektirovaniya razrabotki mestorozhdeniy s primeneniem gidrorazryva plasta [Features of the design of field development with the use of hydraulic fracturing]. *Trudy 6-go Mezhdunarodnogo Simpoziuma “Novye resursosberegayushchie tekhnologii nedropol’zovaniya i povyshe-niya neftegazootdachi”* [6th Symposium (International) “New Energy Saving Subsoil Technologies and the Increasing of the Oil and Gas Impact” Proceedings]. Moscow. 267–272.

Описание книги (монографии, сборники):

Lindorf, L. S., and L. G. Mamikonians, eds. 1972. *Ekspluatatsiya turbogeneratorov s neposredstvennym okhlazhdeniem* [Operation of turbine generators with direct cooling]. Moscow: Energy Publs. 352 p.

Описание переводной книги (в списке литературы к русскоязычной части необходимо указать: / Пер. с англ. — после названия книги, а в конце ссылки указать оригинал книги в круглых скобках):

1. В русскоязычной части:

Тимошенко С. П., Янг Д. Х., Уивер У. Колебания в инженерном деле / Пер. с англ. — М.: Машиностроение, 1985. 472 с. (*Timoshenko S. P., Young D. H., Weaver W.* Vibration problems in engineering. — 4th ed. — New York, NY, USA: Wiley, 1974. 521 p.)

2. В англоязычной части:

Timoshenko, S. P., D. H. Young, and W. Weaver. 1974. *Vibration problems in engineering*. 4th ed. New York, NY: Wiley. 521 p.

Описание неопубликованного документа:

Latypov, A. R., M. M. Khasanov, and V. A. Baikov. 2004. Geology and production (NGT GiD). Certificate on official registration of the computer program No. 2004611198. (In Russian, unpubl.)

Описание интернет-ресурса:

Pravila tsitirovaniya istochnikov [Rules for the citing of sources]. Available at: <http://www.scribd.com/doc/1034528/> (accessed February 7, 2011).

Описание диссертации или автореферата диссертации:

Semenov, V. I. 2003. Matematicheskoe modelirovanie plazmy v sisteme kompaktnyy tor [Mathematical modeling of the plasma in the compact torus]. Moscow. D.Sc. Diss. 272 p.

Kozhunova, O. S. 2009. Tekhnologiya razrabotki semanticheskogo slovary informat-ionnogo monitoringa [Technology of development of semantic dictionary of information monitoring system]. PhD Thesis. Moscow: IPI RAN. 23 p.

Описание ГОСТа:

GOST 8.586.5-2005. 2007. Metodika vypolneniya izmereniy. Izmerenie raskhoda i kolichstva zhidkostey i gazov s pomoshch'yu standartnykh suzhayushchikh ustroystv [Method of measurement. Measurement of flow rate and volume of liquids and gases by means of orifice devices]. Moscow: Standardinform Publ. 10 p.

Описание патента:

Bolshakov, M. V., A. V. Kulakov, A. N. Lavrenov, and M. V. Palkin. 2006. Sposob orientirovaniya po krenu letatel'nogo apparata s opticheskoy golovkoy samonavedeniya [The way to orient on the roll of aircraft with optical homing head]. Patent RF No. 2280590.

10. Присланные в редакцию материалы авторам не возвращаются.

11. При отправке файлов по электронной почте просим придерживаться следующих правил:

- указывать в поле subject (тема) название журнала и фамилию автора;
- указывать в тексте письма название статьи, авторов и журнал, в который направляется статья;
- использовать attach (присоединение);
- в состав электронной версии статьи должны входить: файл, содержащий текст статьи, и файл(ы), содержащий(е) иллюстрации.

12. Журнал «Системы и средства информатики» является некоммерческим изданием. Плата за публикацию не взимается, гонорар авторам не выплачивается.

Адрес редакции журнала «Системы и средства информатики»:

Москва 119333, ул. Вавилова, д. 44, корп. 2, ФИЦ ИУ РАН

Тел.: +7 (499) 135-86-92 Факс: +7 (495) 930-45-05

e-mail: ssi@frccsc.ru (Стригина Светлана Николаевна)

<http://www.ipiran.ru/journal/collected>

Requirements for manuscripts submitted to Journal “Systems and Means of Informatics”

Journal “Systems and Means of Informatics” publishes theoretical, review, and discussion articles on the research and development in the field of information technology.

The journal is published in Russian. By a special decision of the editorial board, some articles can be published in English.

Topics covered include the following areas:

- information and communication systems and tools of their design;
- architecture and software of computational complexes and networks; and
- methods and tools of information protection.

1. The Journal publishes original articles which have not been published before and are not intended for simultaneous publication in other editions. An article submitted to the Journal must not violate the Copyright law. Sending the manuscript to the Editorial Board, the authors retain all rights of the owners of the manuscript and transfer the nonexclusive rights to publish the article in Russian (or the language of the article, if not Russian) and its distribution in Russia and abroad to the Founders and the Editorial Board. Authors should submit a letter to the Editorial Board in the following form:

Agreement on the transfer of rights to publish:

“We, the undersigned authors of the manuscript “. . . ,” pass to the Founder and the Editorial Board of the Journal “Systems and Means of Informatics” the nonexclusive right to publish the manuscript of the article in Russian (or in English) in both print and electronic versions of the Journal. We affirm that this publication does not violate the Copyright of other persons or organizations.

Author(s) signature(s): (name(s), address(es), date).”

This agreement should be submitted in paper form or in the form of a scanned copy (signed by the authors).

The Editorial Board has the right to request from the authors an official expert conclusion that the submitted article has no classified data prohibited for publication.

2. A submitted article should be attached with **the data on the author(s)** (see item 8). If there are several authors, the contact person should be indicated who is responsible for correspondence with the Editorial Board and other authors about revisions and final approval of the proofs.
3. The Editorial Board of the Journal examines the article according to the established reviewing procedure. If authors receive their article for correction after reviewing, it does not mean that the article is approved to be published. The corrected article should be sent to the Editorial Board for the subsequent review and approval.
4. The decision on the article publication or its rejection is communicated to the authors. The Editorial Board may also send the reviews on the submitted articles to the authors. Any discussion upon the rejected articles is not possible.
5. The edited articles will be sent to the authors for proofread. The comments of the authors to the edited text of the article should be sent to the Editorial Board as soon as possible.
6. The manuscript of the article should be presented electronically in the MS WORD (.doc or .docx) or L^AT_EX (.tex) formats, and additionally in the .pdf format. All documents may be sent by e-mail or provided on a CD or diskette. A hard copy submission is not necessary.

7. The recommended typesetting instructions for manuscript.

Pages parameters: format A4, portrait orientation, document margins (cm): left — 2.5, right — 1.5, above — 2.0, below — 2.0, footer 1.3.

Text: font — Times New Roman, font size — 14, paragraph indent — 0.5, line spacing — 1.5, justified alignment.

The recommended manuscript size: not more than 10 pages of the specified format. If the specified size exceeded, the editorial board is entitled to require the author to reduce the manuscript.

Use only standard abbreviations. Avoid abbreviations in the title and abstract. The full term for which an abbreviation stands should precede its first use in the text unless it is a standard unit of measurement.

All pages of the manuscript should be numbered.

The templates for the manuscript typesetting are presented on site:

http://www.ipiran.ru/journal/template_jiep_ssi_2024.zip

8. Articles should enclose data both in **Russian and English**:

- title;
- author's name and surname;
- affiliation — organization, its address with ZIP code, city, country, and official e-mail address;
- data on authors according to the format (see site):
http://www.ipiran.ru/journal/collected/2019_29_03_rus/authors.asp and
http://www.ipiran.ru/journal/collected/2019_29_03_eng/authors.asp;
- abstract (not less than 100 words) both in Russian and in English. Abstract is a short summary of the article that can be published separately. The abstract is the main source of information on the article and it could be included in leading information systems and data bases. The abstract in English has to be an original text and should not be an exact translation of the Russian one. Good English is required. In abstracts, avoid references and formulae.
- Indexing is performed on the basis of keywords. The use of keywords from the internationally accepted thematic Thesauri is recommended.
Important! Keywords must not be sentences.
- Acknowledgments.

9. References. Russian references have to be presented both in English translation and in Latin transliteration (refer <http://www.translit.net/ru/bgn/>).

Please take into account the following examples of Russian references appearance:

Article in journal:

Zhang, Z., and D. Zhu. 2008. Experimental research on the localized electrochemical micromachining. *Russ. J. Electrochem.* 44(8):926–930. doi:10.1134/S1023193508080077.

Journal article in electronic format:

Swaminathan, V., E. Lepkoswka-White, and B.P. Rao. 1999. Browsers or buyers in cyberspace? An investigation of electronic factors influencing electronic exchange. *JCMC* 5(2). Available at: <http://www.ascusc.org/jcmc/vol5/issue2/> (accessed April 28, 2011).

Conference proceedings:

Usmanov, T. S., A. A. Gusmanov, I. Z. Mullagalin, R. Ju. Muhametshina, A. N. Chervyakova, and A. V. Sveshnikov. 2007. Osobennosti proektirovaniya razrabotki mestorozhdeniy s primeneniem gidrorazryva plasta [Features of the design of field development with the use of hydraulic fracturing]. *Trudy 6-go Mezhdunarodnogo Simpoziuma "Novye resursoberegayushchie tekhnologii nedropol'zovaniya i povyshe-niya neftegazootdachi"* [6th Symposium (International) "New Energy Saving Subsoil Technologies and the Increasing of the Oil and Gas Impact" Proceedings]. Moscow. 267–272.

Books and other monographs:

Lindorf, L. S., and L. G. Mamikonians, eds. 1972. *Ekspluatatsiya turbogenera-torov s neposredstvennym okhlazhdeniem* [Operation of turbine generators with direct cooling]. Moscow: Energy Publ. 352 p.

Dissertation and Thesis:

Kozhunova, O. S. 2009. Tekhnologiya razrabotki semanticheskogo slovaryia informat-sionnogo monitoringa [Technology of development of semantic dictionary of information monitoring system]. Moscow: IPI RAN. PhD Thesis. 23 p.

State standards and patents:

GOST 8.586.5-2005. 2007. Metodika vypolneniya izmereniy. Izmerenie raskhoda i kolichestva zhidkostey i gazov s pomoshch'yu standartnykh suzhayushchikh ustroystv [Method of measurement. Measurement of flow rate and volume of liquids and gases by means of orifice devices]. M.: Standardinform Publ. 10 p.

Bolshakov, M. V., A. V. Kulakov, A. N. Lavrenov, and M. V. Palkin. 2006. Spособ orientirovaniya po krenu letatel'nogo apparata s opticheskoy golovkoy samonavedeniya [The way to orient on the roll of aircraft with optical homing head]. Patent RF No. 2280590.

References in Latin transcription are presented in the original language.

References in the text are numbered according to the order of their first appearance; the number is placed in square brackets. All items from the reference list should be cited.

10. Manuscripts and additional materials are not returned to Authors by the Editorial Board.
11. Submissions of files by e-mail must include:
 - the journal title and author's name in the "Subject" field;
 - the article title, authors' names, and the journal title, whereto the paper is being submitted, in the text of the e-mail;
 - an article and additional materials have to be attached using the "attach" function;
 - an electronic version of the article should contain the file with the text and a separate file with figures.
12. "System and Means of Informatics" journal is not a profit publication. There are no charges for the authors as well as there are no royalties.

Editorial Board address:

FRC CSC RAS, 44, block 2, Vavilov Str., Moscow 119333, Russia

Ph.: +7 (499) 135 86 92, Fax: +7 (495) 930 45 05

e-mail: ssi@frccsc.ru (to Svetlana Strigina)

http://www.ipiran.ru/english/journal_systems.asp