

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

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

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

д.т.н. В. Н. Захаров

д.ф.-м.н. В. И. Синицын

проф., д.ф.-м.н. А. И. Зейфман

проф., д.т.н. И. Н. Синицын

проф., д.т.н. В. Д. Ильин

проф., д.ф.-м.н. В. Г. Ушаков

проф., д.т.н. К. К. Колин

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

проф., д.ф.-м.н. В. Ю. Королев

к.ф.-м.н. С. А. Христочевский

д.ф.-м.н. Р. В. Разумчик

Редакция

к.ф.-м.н. Е. Н. Арутюнов

С. Н. Стригина

© Федеральный исследовательский центр «Информатика
и управление» Российской академии наук, 2025

Журнал включен в базу данных Russian Science Citation Index (RSCI),
интегрированную с Web of Science, и в «Белый список» научных журналов

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 35 № 3 Год 2025

СОДЕРЖАНИЕ

Реализация функциональности синхронных триггеров в самосинхронном базисе <i>Ю. Г. Дьяченко, Л. П. Плеханов, Н. В. Морозов, Д. Ю. Степченков, Г. А. Орлов, Д. Ю. Дьяченко</i>	3
Особенности практической реализации метода аугментации малых объектов на основе сетей сверхвысокого разрешения <i>П. О. Архипов, С. Л. Филиппских, М. В. Цуканов</i>	17
Нейросетевой байесовский синтез многомерной линейной стохастической системы <i>И. Н. Сеницын, В. И. Сеницын, Э. Р. Корепанов, Т. Д. Конашенкова</i>	33
Типовые модели системы наблюдения для задач отслеживания и навигации беспилотных движущихся объектов <i>И. В. Урюпин</i>	54
Унимодальность взвешенной суммы частных критериев модели $G/M/1$ с обновлением и двухпороговым RED-подобным алгоритмом <i>Я. М. Агаларов</i>	71
ARIMA-моделирование последовательности времен пребывания в системе массового обслуживания <i>М. П. Кривенко</i>	90
Модель автоматизированной системы имитации атак на основе машинного обучения <i>М. М. Греков</i>	105
Обезличивание пользовательских данных с привлечением доверенного центра деперсонализации <i>А. В. Ладиков</i>	117
Эволюция концептуальных подходов к интеграции инфокоммуникационных и управляющих систем как основы перспективных организационных систем <i>А. А. Зацаринный, С. В. Козлов</i>	130
ИСТОРИЯ. ПАМЯТНЫЕ ДАТЫ. СОБЫТИЯ	
К 85-летию заслуженного деятеля науки Российской Федерации И. Н. Сеницына <i>И. А. Соколов, В. Н. Захаров, С. Я. Шоргин, Э. Р. Корепанов, В. И. Сеницын</i>	145
Об авторах	160
Правила подготовки рукописей статей	162
Requirements for manuscripts	166

РЕАЛИЗАЦИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНОСТИ СИНХРОННЫХ ТРИГГЕРОВ В САМОСИНХРОННОМ БАЗИСЕ*

*Ю. Г. Дьяченко¹, Л. П. Плеханов², Н. В. Морозов³, Д. Ю. Степченков⁴,
Г. А. Орлов⁵, Д. Ю. Дьяченко⁶*

Аннотация: Статья рассматривает вопросы разработки самосинхронных (СС) триггеров на основе исходного описания функционирования их синхронных аналогов на поведенческом уровне. Анализируются опции синхронных триггеров и их соответствие особенностям поведения СС-триггеров. Предлагается метод преобразования синхронного поведенческого описания триггера в СС-аналог с учетом специфики работы СС-схем. Асинхронные сброс и установка синхронного триггера остаются асинхронными и в СС-аналоге, они не индицируются. Синхронные сброс и установка преобразуются в СС-сброс и СС-установку соответственно. Их успешное завершение индицируется. Показано, что СС-сброс и СС-установку целесообразно реализовывать с помощью предварительного микширования сигналов сброса и установки с информационным входом триггера. Подстановка СС-триггера вместо синхронного прототипа осуществляется с использованием шаблонов, обеспечивающих адекватность замены, оптимальность аппаратной реализации и самосинхронность результирующей схемы.

Ключевые слова: самосинхронные схемы; триггер; Verilog-описание; диапазон работоспособности; регистр; элементная база; робототехническая система

DOI: 10.14357/08696527250301

EDN: SYFOCX

1 Введение

Последовательностные цифровые схемы играют важную роль в робототехнических системах. Их основу составляют триггеры. Поэтому последовательностные схемы часто называют триггерными схемами. К их числу относятся одиночные триггеры, регистры хранения, регистры сдвига, счетчики [1]. Современная

* Исследование выполнено в рамках гранта Российского научного фонда (проект 25-29-20207).

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

²Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук, lplekhanov@inbox.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, Orlov.jaja@gmail.com

⁶Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук, diaden87@gmail.com

методология проектирования синхронных схем, в том числе и автоматизированного, основана на использовании двухтактных триггеров. Они обеспечивают бесконфликтную синхронизацию процесса обработки данных [2].

Самосинхронные схемы свободны от глобальной синхронизации [3]. Работа СС-схемы базируется на запрос-ответном взаимодействии частей схемы в рамках двухфазной дисциплины: рабочая фаза, в которой данные реально обрабатываются, чередуется со спейсерной фазой, служащей для подготовки к следующей рабочей фазе [4, 5]. Благодаря этому СС-схемы обладают предельно широким диапазоном работоспособности и повышенной сбоеустойчивостью [6]. Они служат перспективной элементной базой для реализации цифровых устройств и робототехнических систем, работающих в экстремальных условиях.

Триггеры в СС-схеме, аналогично своим синхронным аналогам, выполняют разные функции: разряд регистра хранения; разряд счетчика; разряд регистра сдвига; хранитель флага состояния или признака операции. Однако их поведение специфично, и его соответствие поведению синхронных триггеров не всегда очевидно. В связи с этим при проектировании СС-схем, содержащих элементы с памятью, возникает задача корректной СС-реализации функции хранения, адекватной заданному алгоритму обработки данных схемой. При автоматизированном синтезе СС-схемы на основе исходного синхронного описания она преобразуется в задачу замены синхронных триггеров СС-аналогами. Эта задача решается в рамках этапа десинхронизации исходного синхронного описания синтезируемой схемы [7].

Вопросы автоматизации синтеза асинхронных схем вообще и СС-схем в частности активно исследуются научным сообществом [8–17]. Однако решение задачи замены синхронных триггеров СС-аналогами при этом оказывается половинчатым. Например, в работах [8, 9, 11, 13–17] синхронные схемы преобразуются в асинхронные со связанными данными (bundled-data) с эмуляцией задержки переключения схемы дополнительной цепочкой логических элементов вместо реального контроля завершения переключения. В [15] каждый двухтактный синхронный триггер замещается парой одноктактных триггеров без индикации, а в [1, 11, 14, 16] триггеры остаются синхронными, лишь их тактовый сигнал становится локальным и формируется окружением. В [12, 13] двухтактные синхронные триггеры в регистрах ступеней конвейера заменяются одноктактными триггерами с ограничениями по установке и удержанию входных сигналов, не актуальными в действительно СС-схемах. В [10] предлагается синтезировать глобально асинхронные локально синхронные схемы на основе локальных тактовых генераторов без замены синхронных триггеров. Таким образом, предлагаемые известные решения не отвечают требованиям, предъявляемым к СС-схемам, работа которых не зависит от задержек элементов. Поэтому формализация процедуры реализации триггеров и последовательностных устройств на их основе в базисе СС-схемотехники актуальна.

Данная статья анализирует особенности функционирования синхронных триггеров, предлагает принципы реализации СС-триггеров, обеспечивающих

адекватную функциональность, и дает рекомендации по их применению. Особенности реализации СС-счетчиков уже были подробно рассмотрены в [18]. В данной статье представлены принципы и методика реализации триггеров, выполняющих функции хранителей признаков операций и разрядов регистров хранения и сдвига.

2 Опции синхронных триггеров

Особенности функционирования синхронного триггера описываются Verilog-моделью его поведения. Пример поведенческого Verilog-описания двухтактного триггера в общем виде показан на рис. 1, где clk — тактовый сигнал, по переднему фронту которого значение информационного входа D фиксируется в триггере; $F_R(R_1, \dots, R_n)$ — функция асинхронного сброса триггера; $F_S(S_1, \dots, S_m)$ — функция асинхронной установки триггера; $F_W(E_1, \dots, E_k)$ — функция разрешения записи; Q — выход триггера.

Представленное на рис. 1 Verilog-описание синхронного двухтактного триггера не универсально. Запись в триггер может выполняться по заднему фронту (переключению из 1 в 0) сигнала clk , переменные типа R_i , S_j и E_l могут отсутствовать. К обязательным относятся переменные типа clk , D и Q .

Возможные варианты опций двухтактного синхронного триггера представлены в таблице. Цифры в ее клетках указывают число вариантов, отличающихся

```
always @(posedge clk, R1, ..., Rn, S1, ..., Sm) begin
  if (FR(R1, ..., Rn))    Q <= 0;
  else if (FS(S1, ..., Sm)) Q <= 1;
  else if (FW(E1, ..., Ek)) Q <= D;
end
```

Рис. 1 Verilog-описание синхронного триггера с асинхронной предустановкой

Опции двухтактного синхронного триггера

Активный фронт тактового входа	Тип записи	Тип предустановки	Без сброса и установки	Асинхронная предустановка			Синхронная предустановка		
				Сброс	Установка	Сброс и установка	Сброс	Установка	Сброс и установка
Передний	Безусловная	Безусловная	1	2	2	4	2	2	4
		По условию	—	2	2	4	2	2	4
	По условию	Безусловная	2	4	4	8	4	4	8
Задний	Безусловная	Безусловная	1	2	2	4	2	2	4
		По условию	—	2	2	4	2	2	4
	По условию	Безусловная	2	4	4	8	4	4	8
		По условию	—	4	4	8	4	4	8

сочетаниями значений активных уровней сигналов или функций, разрешающих предустановку и запись в триггер. Предустановка по условию означает использование функций F_R и/или F_S для описания соответствующих условий вместо одиночных сигналов сброса и установки. Запись по условию отражает использование функции F_W или одиночного сигнала для разрешения записи информационного входа в триггер по активному фронту тактового сигнала.

Анализ результатов синтеза синхронных триггерных схем типовыми логическими синтезаторами (например, Yosys [19]) показывает, что Verilog-описание, содержащее функции F_R , F_S или F_W , синтезатор преобразует в триггер с безусловными опциями предустановки и упрощенным разрешением записи и комбинационное окружение, формирующее функции F_R , F_S и F_W .

3 Специфика самосинхронных триггеров

Роль организаторов взаимодействия функциональных блоков и частей СС-схемы играют локальные сигналы управления, формируемые на основе индикаторных сигналов, подтверждающих завершение переключения СС-схемы в текущую фазу работы [4]. Однако непосредственная формальная замена тактового входа сигналом управления при преобразовании синхронного триггера в СС-аналог не всегда необходима.

Самосинхронные комбинационные схемы используют парафазное со спейсером (ПФС) кодирование информационных сигналов [4], которое обеспечивает передачу не только бита информации, но и текущей фазы сигнала: рабочей или спейсерной. Эта особенность позволяет использовать информационный ПФС-вход триггера в качестве регулятора записи в СС-триггер вместо дополнительного входа управления и вынуждает реализовывать информационные ПФС-выходы в СС-триггерах, взаимодействующих с комбинационным окружением.

Адекватная реализация СС-аналога синхронного триггера предполагает воспроизведение такой же функциональности с точки зрения предустановки и условий записи. Асинхронные сброс и установка, инициируемые глобальными сигналами, остаются асинхронными и в СС-триггере. Они не требуют индикации завершения предустановки и реализуются минимальными аппаратными затратами. Пример реализации двухтактного триггера FF0R0 с ПФС-входом (R, S) и выходом (Q, QB) с нулевым спейсером и с входом асинхронного сброса AR и его символическое изображение показаны на рис. 2 [20]. Дополнительные аппаратные затраты на реализацию в нем асинхронного сброса равны 5% от общей сложности схемы триггера.

Однако для определения состояния всех ячеек триггера активным уровнем входа $AR = 1$ информационный ПФС-вход (R, S) в схеме на рис. 2 должен находиться в спейсерном состоянии ($R = S = 0$). Если в соответствии с алгоритмом работы схемы выполнение этого условия не гарантируется во время включения питания схемы или ее начального сброса, необходимо использовать принудительную предустановку. Пример такого СС-триггера показан на рис. 3. При

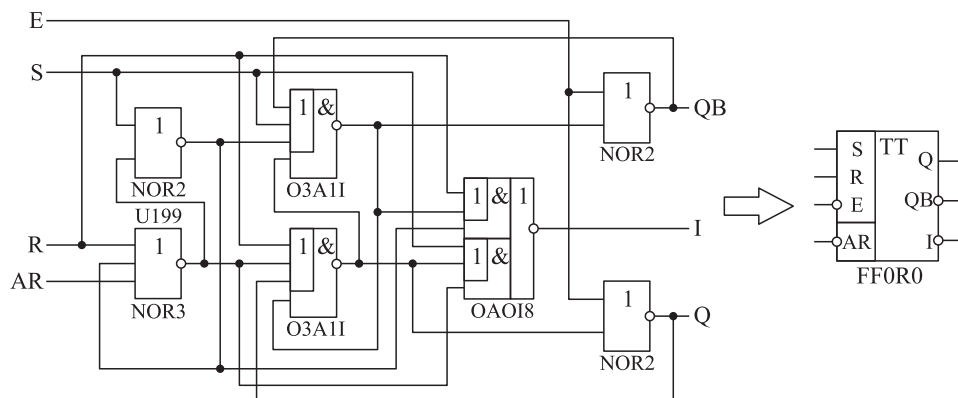


Рис. 2 Схема двухтактного СС-триггера FF0R0 с асинхронным сбросом и его символ

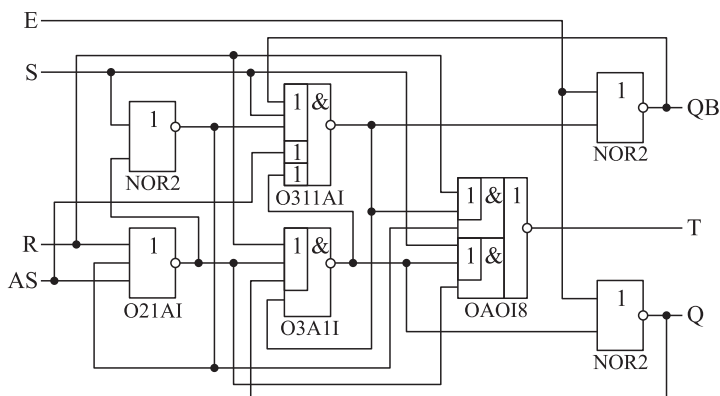


Рис. 3 Схема двухтактного СС-триггера FF0FS0 с принудительной установкой

$AS = 0$ выходы всех его элементов устанавливаются в определенное состояние независимо от значений остальных входов.

При преобразовании синхронного триггера в СС-аналог синхронные сброс и установка преобразуются в СС-предустановку, требующую подтверждения ее успешного завершения индикаторной подсхемой. Результат преобразования СС-триггера FF0R0 с асинхронным сбросом в триггер FF0C0 с входом СС-сброса С показан на рис. 4. Он отличается от схемы на рис. 2 дополнительным элементом NOR2, формирующим индикатор режима СС-сброса I2 и более сложным индикатором режима записи и хранения I1.

Самосинхронный сброс в FF0C0 реализуется при спейсере на входе Е ($E = 1$) и требует организации специального сценария сброса:

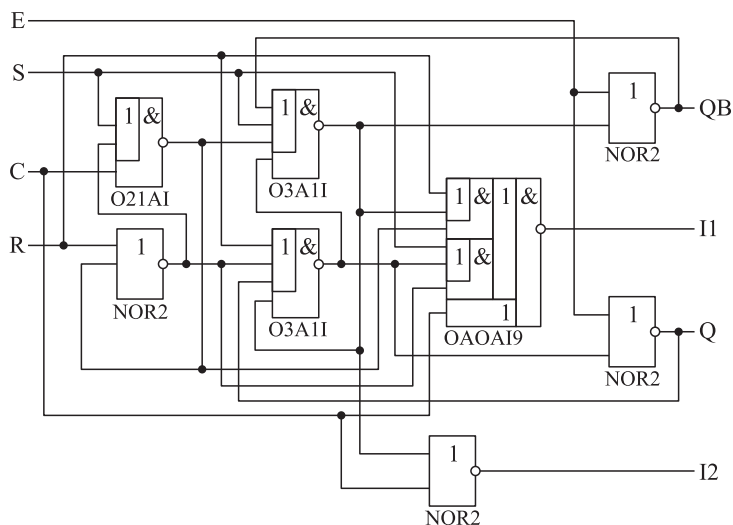


Рис. 4 Схема двухтактного СС-триггера FF0C0 с СС-сбросом

- подтверждение переключения триггера в спейсер ($I1 = 1$);
- формирование активного значения входа СС-сброса ($C = 0$);
- подтверждение завершения сброса индикаторным выходом $I2 = 1$;
- разрешение переключения триггера в рабочую фазу.

Такой сценарий технически реализуем. Однако он требует дополнительных аппаратных затрат и тормозит работу СС-схемы. Рисунок 5 показывает альтернативный вариант реализации СС-сброса на основе триггера FF0R0. Он основан на интерпретации сути синхронного сброса: по активному фронту тактового сигнала в синхронный триггер записывается ноль вместо значения его информационного входа.

Парафазный сигнал СС-сброса (C , $\overline{C}$) в схеме на рис. 5 формирует информационный ПФС-вход триггера FF0R0 вместе с информационным ПФС-сигналом (R, S). Парафазные сигналы (C , $\overline{C}$) и (R, S) имеют единичный спейсер. Самосинхронный сброс реализуется как запись соответствующего состояния в триггер в рабочей фазе при $C = 1$, $\overline{C} = 0$. Такой подход позволяет выполнить СС-сброс и СС-установку без необходимости организации специальной процедуры и объединить индикаторные выходы режимов записи и сброса ($I1$ и $I2$ на рис. 4) в общий выход I . Вход асинхронного сброса AR гарантирует однозначное определение состояния триггера FF0R0 при включении питания схемы.

Особое место в СС-схемотехнике занимают триггеры, играющие роль разрядов регистра хранения, например в регистре ступени конвейера. Они, как прави-

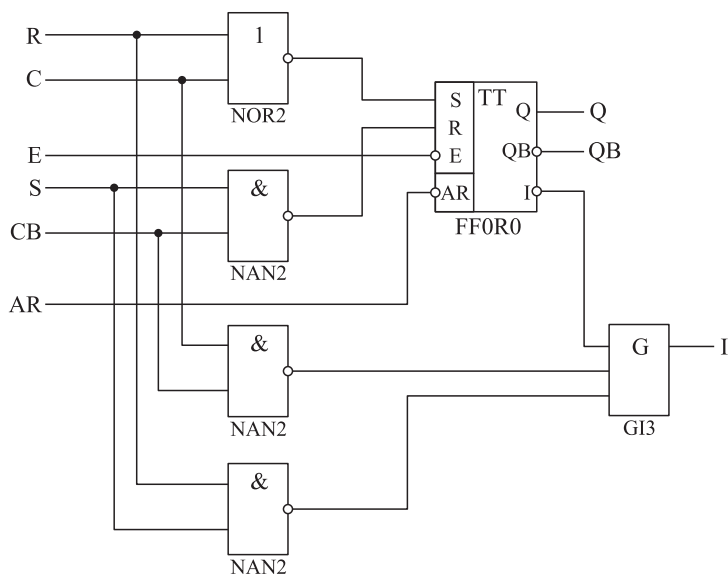


Рис. 5 Схема двухтактного СС-триггера FF0R0 с СС-сбросом, обеспечиваемым окружением

ло, не имеют синхронной предустановки. Их целесообразно реализовывать на паре гистерезисных триггеров [6], как показано на рис. 6.

Таким образом, функциональность синхронного триггера может быть воспроизведена в СС-триггере различными способами. При этом прямое преобразование синхронного триггера в СС-реализацию путем замены синхронных входов и выходов выводами с СС-кодированием далеко не всегда приводит к оптимальному результату из-за чрезмерной избыточности аппаратных затрат.

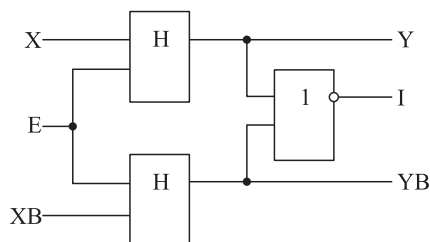


Рис. 6 Разряд СС-регистра хранения на гистерезисных триггерах

4 Методика преобразования синхронного триггера в самосинхронный аналог

Преобразование синхронного двухтактного триггера в СС-реализацию на основе его исходного Verilog-описания включает следующие шаги:

- определение активного фронта тактового входа;
- определение функционального назначения входов триггера (сброс, установка, разрешение записи) и их типа (асинхронный, синхронный);
- реализация функций сброса F_R , установки F_S и разрешения записи F_W в виде комбинационного окружения триггера;
- подбор СС-аналога в соответствии с количественным и качественным составом входов предустановки синхронного прототипа с помощью библиотеки шаблонов триггеров;
- формирование индикаторной подсхемы.

Активный фронт тактового входа определяется по его атрибуту в заголовке процедурного блока `always`: `posedge` — передний фронт, переключение сигнала из 0 в 1; `negedge` — задний фронт, переключение сигнала из 1 в 0. В СС-аналоге тактовый вход с атрибутом `posedge` замещается входом разрешения записи (входом управления) с высоким активным уровнем, а с атрибутом `negedge` — входом управления с низким активным уровнем.

Вход предустановки синхронный, если его имени нет в заголовке (в списке чувствительности) блока `always`. Синхронная предустановка преобразуется в СС-предустановку, а асинхронная остается такой же и в СС-триггере.

Библиотека шаблонов содержит типовые реализации СС-триггеров с опциями сброса, установки, разрешения записи и т. д. Вариабельность опций (например, асинхронный сброс низким или высоким уровнем) реализуется дополнительными инверторами на соответствующих входах СС-триггера.

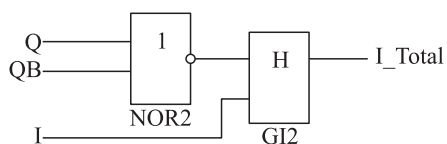


Рис. 7 Дополнительная индикаторная подсхема для СС-триггера FF0R0

Самосинхронный триггер имеет индикаторный выход, индицирующий, как правило, все ячейки внутри триггера и информационный выход. В некоторых случаях информационный выход не индицируется триггером в расчете на то, что он будет проиндицирован следующей схемой, например регистром ступени конвейера. В частности, в триггерах, схемы которых показаны на рис. 2–5, ПФС-выход (Q, QB) внутри триггера не индицируется. Для таких СС-триггеров необходима дополнительная индикаторная подсхема, формирующая общий индикатор `I_Total`, как показывает рис. 7 для случая ПФС-выхода (Q, QB) с нулевым спейсером и индикаторного выхода I с единичным спейсером.

Применение описанной методики повышает эффективность синтеза триггерной СС-схемы на основе синхронной схемы или ее поведенческого Verilog-описания за счет сокращения аппаратных затрат на реализацию как функциональной части триггера, так и его индикаторной подсхемы.

5 Методика самосинхронной реализации синхронного регистра

Поведенческое Verilog-описание последовательностного синхронного устройства, в том числе и регистра, аналогично описанию триггера и основывается на процедурном блоке `always`. Методика реализации синхронного регистра в СС-базисе включает следующие этапы:

- определение типа регистра: хранения или сдвига;
- в случае регистра хранения замена `always`-блока совокупностью n разрядов СС-регистра хранения с реализацией одного разряда схемой на рис. 6 и общими входами разрешения записи и предустановки, где n — разрядность регистра, вытекающая из исходного Verilog-описания;
- в случае регистра сдвига замена `always`-блока шаблоном n -разрядного СС-регистра сдвига с учетом опций предустановки и параллельной записи в регистр, указанных в исходном Verilog-описании.

В настоящее время типовое решение для регистра сдвига, предлагаемое синхронными логическими синтезаторами, базируется на регистре хранения и его комбинационном окружении. В СС-базисе такая реализация оказывается слишком аппаратно затратной и медленной. Сравнительный анализ показывает, что СС-регистры сдвига, построенные с использованием готовых шаблонов, на 21% проще и на 34% быстрее вариантов, полученных с помощью формальной конверсии синтезированного синхронного аналога в СС-реализацию.

6 Заключение

Преобразование триггера с условными опциями предустановки в триггер с безусловными опциями и комбинационное окружение, формирующее функции условий предустановки и записи, сокращает число вариантов двухтактных синхронных триггеров с различной функциональностью, заменяемых СС-триггерами при синтезе СС-схем, в 2 раза.

Адекватная реализация СС-аналога синхронного триггера предполагает воспроизведение такой же функциональности с точки зрения предустановки и условий записи. Асинхронные сброс и установка остаются асинхронными и в СС-триггере, а синхронные преобразуются в СС-опции.

Самосинхронные сброс и установка требуют организации специального сценария сброса и установки в спейсерной фазе, в значительной степени усложняющего СС-схему и приостанавливающего ее работу, при встраивании сигналов СС-сброса и установки непосредственно в триггер. Реализация же СС-сброса и установки как записи соответствующего состояния в триггер в рабочей фазе уменьшает сложность схемы и ускоряет ее работу.

Предложенные методики преобразования синхронного триггера и регистра в СС-аналог с помощью СС-шаблонов позволяют формализовать эту процедуру

и повысить эффективность автоматизированного синтеза СС-схем по исходному синхронному поведенческому описанию схемы, выражающуюся в сокращении аппаратных затрат и повышении быстродействия синтезированного устройства.

Литература

1. *Hennessy J. L., Patterson D. A.* Computer architecture: A quantitative approach. — 6th ed. — San Mateo, CA, USA: Morgan Kaufmann, 2019. 936 p.
2. *Harris D., Harris S., L.* Digital design and computer architecture. — North Holland: Elsevier, 2013. 690 p. doi: 10.1016/C2011-0-04377-6.
3. *Muller D., Bartky W.* A theory of asynchronous circuits // Symposium (International) on the Theory of Switching Proceedings. — Cambridge, MA, USA: Harvard University Press, 1959. Vol. 29. P. 204–243.
4. *Kishinevsky M., Kondratyev A., Taubin A., Varshavsky V.* Concurrent hardware: The theory and practice of self-timed design. — New York, NY, USA: John Wiley & Sons, 1994. 368 p.
5. *Sparsø J.* Introduction to asynchronous circuit design. — Copenhagen, Denmark: DTU Compute, Technical University of Denmark, 2020. 275 p. https://backend.orbit.dtu.dk/ws/portalfiles/portal/215895041/JSPA_async_book_2020_PDF.pdf.
6. *Захаров В. Н., Степченко Ю. А., Дьяченко Ю. Г., Морозов Н. В., Плеханов Л. П., Степченко Д. Ю.* Свойства и оптимизация самосинхронных схем // Системы и средства информатики, 2025. Т. 35. № 1. С. 149–169. doi: 10.14357/08696527250108. EDN: QPTSAO.
7. *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.
8. *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: 10.1561/1000000006.
9. *Andrikos N., Lavagno L., Pandini D., Sotiriou P.* A fully-automated desynchronization flow for synchronous circuits // 44th Annual Design Automation Conference Proceedings. — New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2007. P. 982–985. doi: 10.1145/1278480.1278722.
10. *Oliveira D. L., Duarte G. C., Batista G. C., Cardoso N. N. M.* Converting synchronous digital systems to asynchronous systems using local-clock // 27th Conference (International) on Electronics, Electrical Engineering and Computing Proceedings. — IEEE, 2020. Art. 9220269. 4 p. doi: 10.1109/INTERCON50315.2020.9220269.
11. *Wu H., Su Z., Zhang J., Wei S., Wang Z., Chen H.* A design flow for click-based asynchronous circuits design with conventional EDA tools // IEEE T. Comput. Aid. D., 2021. Vol. 40. No. 11. P. 2421–2425. doi: 10.1109/TCAD.2020.3038337.
12. *Li Z., Huang Y., Tian L., Zhu R., Xiao S., Yu Z.* A low-power asynchronous RISC-V processor with propagated timing constraints method // IEEE T. Circuit — II, 2021. Vol. 68. No. 9. P. 3153–3157. doi: 10.1109/TCSII.2021.3100524.
13. *Semba S., Saito H.* RTL conversion method from pipelined synchronous RTL models into asynchronous ones // IEEE Access, 2022. Vol. 10. P. 28949–28964. doi: 10.1109/ACCESS.2022.3158487.

14. *Semba S., Saito H.* A design support tool set for interface circuits between synchronous and asynchronous modules // IEEE Access, 2023. Vol. 11. P. 13408–13420. doi: 10.1109/ACCESS.2023.3243224.
15. *Wang J., Xiao S., Luo J., Li B., Zhou L., Yu Z.* An end-to-end bundled-data asynchronous circuits design flow: From RTL to GDS // IEEE T. VLSI Syst., 2024. Vol. 33. No. 1. P. 154–167. doi: 10.1109/TVLSI.2024.3464870.
16. *Zhang Jil., Huo D., Zhang Jia., et al.* ANP-I: A 28-nm 1.5-pJ/SOP asynchronous spiking neural network processor enabling Sub-0.1- μ J/Sample on-chip learning for Edge-AI applications // IEEE J. Solid-St. Circ., 2024. Vol. 59. Iss. 8. P. 2717–2729. doi: 10.1109/JSSC.2024.3357045.
17. *Huang H., Zhang J., Huo D., Sun Q., Rhee W., Chen H.* An asynchronous RISC-V processor utilizing a chisel-based desynchronization flow // Symposium (International) on Circuits and Systems Proceedings. — IEEE, 2025. Art. 11043907. 5 p. doi: 10.1109/ISCAS56072.2025.11043907.
18. *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. 66–82. doi: 10.14357/08696527240205. EDN: KDIEOJ.
19. Yosys Open Synthesis Suite. <https://yosyshq.net/yosys>.
20. *Захаров В. Н., Степченко Ю. А., Дьяченко Ю. Г., Плеханов Л. П., Морозов Н. В., Дьяченко Д. Ю.* Самосинхронный двухтактный триггер с парафазными входными и выходными сигналами с нулевым спейсером. Патент на изобретение № 2835382 с приоритетом от 13.09.24. Опубл. 12.02.2025, бюл. № 6. EDN: DQXPYF.

Поступила в редакцию 10.04.2025

Принята к публикации 15.09.2025

IMPLEMENTATION OF SYNCHRONOUS FLIP-FLOP AND LATCH FUNCTIONALITY IN A SELF-TIMED BASIS

Yu. G. Diachenko, L. P. Plekhanov, N. V. Morozov, D. Yu. Stepchenkov, G. A. Orlov, and D. Yu. Diachenko

Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119333, Russian Federation

Abstract: The article considers the self-timed (ST) flip-flop development issues based on the original description of their synchronous counterparts functioning at the behavioral level. The options of synchronous flip-flops and their compliance with the ST flip-flop’s behavioral features are analyzed. The implementations of some typical ST flip-flops with preset options are represented. A method for converting synchronous flip-flop behavioral description into an ST counterpart taking into account the ST circuit operation specifics is proposed. Asynchronous reset and set of the synchronous flip-flop remain asynchronous in the ST counterpart as well, they are not indicated. Synchronous reset and set are transformed into ST

reset and ST set, respectively. Their successful completion is indicated. The paper shows that it is advisable to implement ST reset and ST set by preliminary mixing of reset and set signals with the flip-flop information input. Substitution of the ST flip-flop instead of the synchronous prototype is carried out using templates that ensure the replacement adequacy, the optimality of the hardware implementation, and the self-timing of the resulting circuit.

Keywords: self-timed circuit; flip-flop, Verilog description; operating range; register; element base; robotic system

DOI: 10.14357/08696527250301

EDN: SYFOCX

Acknowledgments

The research was supported by the Russian Science Foundation (project No. 25-29-20207).

References

1. Hennessy, J. L., and D. A. Patterson. 2019. *Computer architecture: A quantitative approach*. 6th ed. Morgan Kaufmann. 936 p.
2. Harris, D., and S. L. Harris. 2013. *Digital design and computer architecture*. North Holland: Elsevier. 690 p. doi: 10.1016/C2011-0-04377-6.
3. Muller, D. E., and W. C. Bartky. 1959. A theory of asynchronous circuits. *Symposium (International) on the Theory of Switching Proceedings*. Cambridge, MA: Harvard University Press. 29:204–243.
4. Kishinevsky, M., A. Kondratyev, A. Taubin, and V. Varshavsky. 1994. *Concurrent hardware: The theory and practice of self-timed design*. New York, NY: John Wiley & Sons. 368 p.
5. Sparsø, J. 2020. *Introduction to asynchronous circuit design*. Copenhagen, Denmark: DTU Compute, Technical University of Denmark. 275 p. Available at: https://back-end.orbit.dtu.dk/ws/files/215895041/JSPA_async_book_2020_PDF.pdf (accessed October 6, 2025).
6. Zakharov, V. N., Yu. A. Stepchenkov, Yu. G. Diachenko, N. V. Morozov, L. P. Plekhanov, and D. Yu. Stepchenkov. 2025. Svoystva i optimizatsiya samosinkhronnykh skhem [Properties and optimization of self-timed circuits]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 35(1):149–169. doi: 10.14357/08696527250108. EDN: QPTSAO.
7. 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.
8. 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: 10.1561/1000000006.
9. Andrikos, N., L. Lavagno, D. Pandini, and P. Sotiriou. 2007. A fully-automated desynchronization flow for synchronous circuits. *44th Annual Design Automation*

- Conference Proceedings*. New York, NY: Association for Computing Machinery. 982–985. doi: 10.1145/1278480.1278722.
10. Oliveira, D. L., G. C. Duarte, G. C. Batista, and N. N. M. Cardoso. 2020. Converting synchronous digital systems to asynchronous systems using local-clock. *27th Conference (International) on Electronics, Electrical Engineering and Computing Proceedings*. IEEE. Art. 9220269. 4 p. doi: 10.1109/INTERCON50315.2020.9220269.
 11. Wu, H., Z. Su, J. Zhang, S. Wei, Z. Wang, and H. Chen. 2021. A design flow for click-based asynchronous circuits design with conventional EDA tools. *IEEE T. Comput. Aid. D.* 40(11):2421–2425. doi: 10.1109/TCAD.2020.3038337.
 12. Li, Z., Y. Huang, L. Tian, R. Zhu, S. Xiao, and Z. Yu. 2021. A low-power asynchronous RISC-V processor with propagated timing constraints method. *IEEE T. Circuits — II* 68(9):3153–3157. doi: 10.1109/TCSII.2021.3100524.
 13. Semba, S., and H. Saito. 2022. RTL conversion method from pipelined synchronous RTL models into asynchronous ones. *IEEE Access* 10:28949–28964. doi: 10.1109/ACCESS.2022.3158487.
 14. Semba, S., and H. Saito. 2023. A design support tool set for interface circuits between synchronous and asynchronous modules. *IEEE Access* 11:13408–13420. doi: 10.1109/ACCESS.2023.3243224.
 15. Wang, J., S. Xiao, J. Luo, B. Li, L. Zhou, and Z. Yu. 2024. An end-to-end bundled-data asynchronous circuits design flow: From RTL to GDS. *IEEE T. VLSI Syst.* 33(1):154–167. doi: 10.1109/TVLSI.2024.3464870.
 16. Zhang, Jil., D. Huo, Jia. Zhang, *et al.* 2024. ANP-I: A 28-nm 1.5-pJ/SOP asynchronous spiking neural network processor enabling Sub-0.1- μ J/Sample on-chip learning for Edge-AI applications. *IEEE J. Solid-St. Circ.* 59(8):2717–2729. doi: 10.1109/JSSC.2024.3357045.
 17. Huang, H., J. Zhang, D. Huo, Q. Sun, W. Rhee, and H. Chen. 2025. An asynchronous RISC-V processor utilizing a chisel-based desynchronization flow. *Symposium (International) on Circuits and Systems Proceedings*. IEEE. Art. 11043907. 5 p. doi: 10.1109/ISCAS56072.2025.11043907.
 18. 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):66–82. doi: 10.14357/08696527240205. EDN: KDIEOJ.
 19. Yosys open synthesis suite. Available at: <https://yosyshq.net/yosys> (accessed October 6, 2025).
 20. Zakharov, V. N., Yu. A. Stepchenkov, Yu. G. Diachenko, L. P. Plekhanov, N. V. Morozov, and D. Yu. Diachenko. 2025. Samosinkhronnyy dvukhtaktnyy trigger s parafaznymi vkhodnymi i vykhodnymi signalami s nulevym speyserom [Self-timed push-pull trigger with paraphase input and output signals with zero spacer]. Patent RF No. 2835382. EDN: DQXPYF.

Received April 10, 2025

Accepted September 15, 2025

Contributors

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

Plekhanov Leonid P. (b. 1943) — 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; lplekhanov@inbox.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

Orlov Georgii A. (b. 1994) — junior scientist, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119133, Russian Federation; Orlov.jaja@gmail.com

Diachenko Denis Yu. (b. 1987) — research engineer, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119133, Russian Federation; diaden87@gmail.com

ОСОБЕННОСТИ ПРАКТИЧЕСКОЙ РЕАЛИЗАЦИИ МЕТОДА АУГМЕНТАЦИИ МАЛЫХ ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ СЕТЕЙ СВЕРХВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ*

П. О. Архипов¹, С. Л. Филиппских², М. В. Цуканов³

Аннотация: Рассмотрены ограничения современных методов аугментации данных при работе с изображениями, полученными с беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в условиях высокой плотности и малого размера объектов. Предложен специализированный метод контекстной аугментации малых объектов (Contextual Small-Object Augmentation, CSOA), ориентированный на интеллектуальное размещение визуально улучшенных объектов в релевантные зоны изображения с сохранением пространственного реализма. В частности, рассмотрен модуль аугментации данных, основанный на применении сетей сверхвысокого разрешения для повышения качества визуального восприятия малых объектов. Для этого были выбраны несколько нейросетевых моделей сверхвысокого разрешения: RCAN, Real-ESRGAN и SwinIR. Проведена оценка их влияния на точность детектирования и классификации объектов моделью SSD MobileNet V2 FPNLite 320×320 , обученной на различных версиях эталонного датасета VisDrone. Результаты детектирования сравнивались с моделью, обученной на базовом датасете, в соответствии с протоколом оценки библиотеки COCO Evaluation Metrics. Экспериментальные исследования показали, что применение сетей сверхвысокого разрешения в задаче аугментации значительно повышает точность детектирования малых объектов. При этом сохраняется вычислительная эффективность исходной модели.

Ключевые слова: детектирование объектов; классификация объектов; трансформер; сверточная нейронная сеть; генеративно-сопоставительная сеть; аугментация данных

DOI: 10.14357/08696527250302

EDN: TAETAC

1 Введение

На сегодняшний день различные архитектуры нейронных сетей широко применяются в задачах компьютерного зрения и демонстрируют высокие результаты

*Работа выполнена 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, agraul@mail.ru

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

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

при решении таких проблем, как сегментация изображений, обнаружение и классификация объектов [1, 2]. Однако эффективное обучение нейронных сетей требует большого объема размеченных данных, поскольку нейросетевые модели включают множество параметров, которые необходимо настраивать в процессе обучения [1].

Одним из распространенных подходов к борьбе с переобучением стало применение методов аугментации данных (data augmentation) [3, 4], предполагающих создание новых обучающих примеров путем разнообразных трансформаций исходных изображений. Эти методы позволяют расширить обучающую выборку без необходимости вручную собирать дополнительные данные, повышая надежность и адаптивность моделей [3].

Для ряда практических задач [4–8], связанных с анализом аэрофотоснимков, полученных при помощи БПЛА, требуется автоматическая обработка изображений с большим числом объектов небольшого размера. При этом на одном снимке могут одновременно присутствовать сотни таких элементов, что значительно усложняет их точное обнаружение и корректную классификацию.

Таким образом, особую значимость приобретает применение интеллектуальных методов аугментации, ориентированных не только на количественное расширение наборов данных, но и на улучшение визуальных характеристик изображений. К таким улучшениям можно отнести повышение контрастности, фокусировку на информативных участках, корректировку масштаба и фильтрацию шума. Данные подходы позволяют сделать целевые объекты более заметными и структурно различимыми, что способствует более эффективному извлечению признаков и, как следствие, повышает точность работы моделей в задачах детектирования и классификации.

Целью данной работы ставится описание специализированного метода аугментации данных, направленного на интеллектуальное преобразование изображений, и его практическое применение при обучении нейросетевых моделей детектирования и классификации объектов.

2 Методы аугментации данных

Современные подходы к аугментации данных в задачах компьютерного зрения можно условно разделить на три обобщенные группы [9], каждая из которых по-своему влияет на характеристики обучающих изображений и на эффективность обучения нейросетевых моделей.

Первая группа включает пространственные преобразования [10], которые базируются на простых геометрических трансформациях. Вторая категория аугментации связана с искажением цветовых характеристик изображений [10]. Третья и наиболее активно развивающаяся группа методов направлена на добавление, удаление или модификацию визуальной информации в обучающих примерах. Эти методы включают такие алгоритмы, как CutOut [11], CutMix [12], Random Erasing [13], GridMask [9], MixUp [14], SaliencyMix [15],

PuzzleMix [16], Select-Mosaic [3] и InstaBoost [17]. Их задача заключается в усилении обобщающей способности модели путем усложнения обучающей выборки. Это достигается за счет генерации новых, синтетических комбинаций исходных изображений или их фрагментов.

Несмотря на эффективность этих подходов в стандартных задачах, связанных с наземными изображениями, они демонстрируют значительные ограничения при работе с аэрофотоснимками, полученными при помощи БПЛА. В частности, методы, основанные на наложении и смешивании изображений, зачастую снижают различимость малых объектов (например, Select-Mosaic и InstaBoost) либо частично или полностью маскируют их на фоне сцены (как это происходит при использовании MixUp, CutOut, CutMix, GridMask и Random Erasing). Такие методы, как PuzzleMix, могут нарушать пространственную логику сцены, размещая объекты в семантически некорректных местах. Это особенно критично для аэрофотосъемки, где плотность и малый масштаб объектов играют ключевую роль в точности детектирования.

Таким образом, существующие универсальные методы аугментации, как правило, не адаптированы к специфике данных, получаемых в процессе аэрофотосъемки. Им недостает чувствительности к масштабу объектов, геометрической согласованности и учета контекстной информации, присущей изображениям с высокой плотностью мелких элементов. Эти ограничения подчеркивают необходимость в разработке специализированных стратегий аугментации, способных сохранять пространственный реализм и усиливать информативность изображений, что критично для повышения эффективности обучения нейросетей в условиях, характерных для аэрофотосъемки.

3 Обобщенная схема специализированного метода аугментации данных

В данной работе предлагается метод контекстной аугментации малых объектов (CSOA), направленный на повышение точности обнаружения и классификации объектов небольшого размера на аэрофотоснимках, полученных с БПЛА. Ключевая идея заключается в намеренном увеличении как количества, так и разнообразия малых объектов на обучающих изображениях за счет их интеллектуальной вставки в контекстно релевантные области сцены. При этом объекты масштабируются и визуально улучшаются для лучшего восприятия нейросетевыми моделями.

В [18] было показано, что вставка объектов в случайные области изображения может положительно повлиять на качество детектирования. Однако при работе с аэрофотоснимками возникает специфическая проблема: малые объекты на таких изображениях часто распределены неравномерно или вовсе отсутствуют. Простое случайное размещение может нарушать логическую структуру сцены, поэтому в предлагаемом методе используется контекстно-осведомленное размеще-

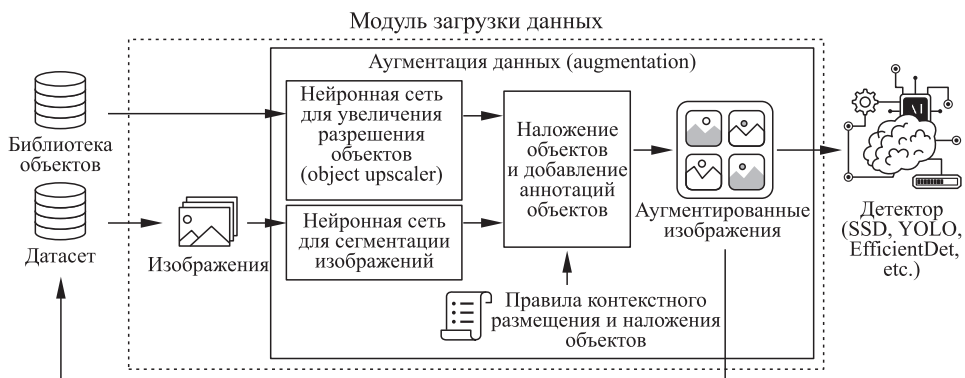


Рис. 1 Обобщенная схема специализированного метода аугментации данных

ние объектов. В частности, вставка осуществляется в семантически подходящие зоны: например, автомобили размещаются на дорогах и парковках, а люди — на пешеходных дорожках или открытых пространствах.

Метод CSOA состоит из последовательных шагов (рис. 1): выбор базового изображения; выборка объектов из библиотеки; увеличение разрешения и улучшение визуального качества объектов (object upscaler); определение зон вставки; масштабирование и вставка объектов; обновление аннотаций. Все этапы автоматизированы и интегрированы в обучающий конвейер модели.

Один из ключевых принципов предлагаемого метода заключается в предварительном повышении визуального качества вставляемых объектов. Этот принцип реализуется с помощью модуля object upscaler, в котором используется специализированная нейросетевая модель сверхвысокого разрешения (SR-сеть, super-resolution network), которая масштабирует объекты с низким разрешением и восстанавливает потерянный высокочастотный контент изображений (более резкие градиенты краев, угловые соединения, микротекстуры и т. д.), подавляет остаточные шумы и артефакты интерполяции. Таким образом, детектор получает небольшие объекты, которые выглядят «четче» (отличительные признаки объектов соответствующего класса становятся более выраженными). Это приводит к заметно более высокой точности детектирования и классификации.

4 Методы увеличения разрешения и их оценка

На сегодняшний день доступен широкий спектр архитектур нейронных сетей сверхвысокого разрешения: SR-сети, основанные на сверточных нейронных сетях (CNN) (например, FSRCNN [19], RCAN [20]); глубокие генеративно-сопоставительные сети (например, ESRGAN [21], Real-ESRGAN [22]); модели на основе трансформеров (например, SwinIR [23]). Каждая из архитектур обеспечивает свой баланс между точностью границ, подавлением артефактов и числом

параметров. Поскольку результаты работы SR-сетей качественно различаются (например, генеративно-сопоставительные сети (GAN) могут «галлюцинировать» текстуры, в то время как для трансформеров характерно высокое пиковое отношение сигнала к шуму (PSNR, Peak Signal-to-Noise Ratio) [24]), то невозможно априори предположить, какая архитектура лучше всего подходит для метода аугментации объектов небольшого размера.

SR-сети принято характеризовать двумя метриками: PSNR и Structural Similarity Index (SSIM) [24].

PSNR служит классической метрикой оценки качества изображений, которая основана на измерении среднеквадратичной ошибки (MSE) между исходным и искаженным изображениями. Она измеряется в децибелах и показывает соотношение между максимально возможным значением пикселя и уровнем искажения. Метрика PSNR вычисляется по формуле:

$$\text{PSNR} = 10 \lg \left(\frac{\text{MAX}_I^2}{\text{MSE}} \right).$$

Здесь

$$\text{MSE} = \frac{1}{mn} \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} |I(i, j) - K(i, j)|^2,$$

где I и K — исходное и искаженное изображения соответственно; m и n — ширина и высота изображений; MAX_I — максимальное значение пикселя (например, 255 для 8-битного изображения).

Несмотря на широкое использование и простоту реализации, метрика PSNR слабо коррелирует с визуальным восприятием человека, так как не учитывает пространственные и визуальные особенности изображения. Поэтому для более точного моделирования визуального восприятия была разработана перцептивная метрика SSIM [24]. В ее основе лежит оценка сходства между двумя изображениями по трем критериям: яркости, контрасту и структуре. Метрика SSIM позволяет лучше отразить визуальные искажения, воспринимаемые человеком, и широко применяется в таких задачах, как сжатие, восстановление и создание изображений. Полученные значения SSIM варьируются в диапазоне $[0, 1]$, где 0 указывает на полное отличие, а 1 — на полное совпадение изображений. Метрика SSIM вычисляется по формуле

$$\text{SSIM}(x, y) = \frac{(2\mu_x\mu_y + C_1)(2\sigma_{xy} + C_2)}{(\mu_x^2 + \mu_y^2 + C_1)(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + C_2)},$$

где x и y — фрагменты оригинального и искаженного изображений соответственно; μ_x и μ_y — средние значения интенсивности; σ_x^2 и σ_y^2 — дисперсии (контрасты); σ_{xy} — ковариация между x и y (структурное сходство); C_1 и C_2 — малые положительные константы, предотвращающие деление на ноль при малых значениях знаменателя.

Учитывая вышеизложенное, можно заключить, что PSNR отлично подойдет для тех случаев, когда важно точное совпадение с оригинальным изображением (например, спутниковые снимки). Метрика SSIM подходит для оценки визуального качества (например, обработка фотографий и масштабирование).

В рамках настоящего исследования для оценки применимости различных подходов к сверхвысокому разрешению были выбраны по одной модели каждого типа нейросетевых архитектур, которые наиболее широко используются и активно поддерживаются в рамках экосистемы PyTorch: RCAN (CNN), Real-ESRGAN (GAN) и SwinIR (трансформер).

RCAN (Residual Channel Attention Network) — это глубокая сверточная нейронная сеть с современной архитектурой, ориентированной на восстановление мелких деталей изображения [20].

Real-ESRGAN (Real-Enhanced Super-Resolution GAN) представляет собой улучшенную SR-сеть ESRGAN [21], основанную на архитектуре GAN и ориентированную на работу с реальными ухудшениями характеристик (degradation), характерными для фотографий и видеоконтента [22].

Несмотря на улучшения, примененные в Real-ESRGAN, высокие значения PSNR и SSIM не всегда гарантируют объективное качество изображений. Как и в ESRGAN, где оптимизация под PSNR привела к сглаживанию и потере текстур, модель Real-ESRGAN также демонстрирует более низкий PSNR по сравнению с другими подходами [19, 20], несмотря на более реалистичный визуальный результат [21].

Модель SwinIR (Swin Transformer for Image Restoration) — одна из первых трансформер-архитектур, специально адаптированных для задач восстановления изображений: SR, удаление шума (denoising) и устранение артефактов JPEG-сжатия [23].

Пример работы SR-сетей RCAN, Real-ESRGAN и SwinIR представлен на рис. 2.

В табл. 1 приведены значения PSNR и SSIM для нейросетевых моделей RCAN, Real-ESRGAN и SwinIR. Данные рассчитаны для эталонного набора данных Set5 с коэффициентом масштабирования, равным 4 [23].

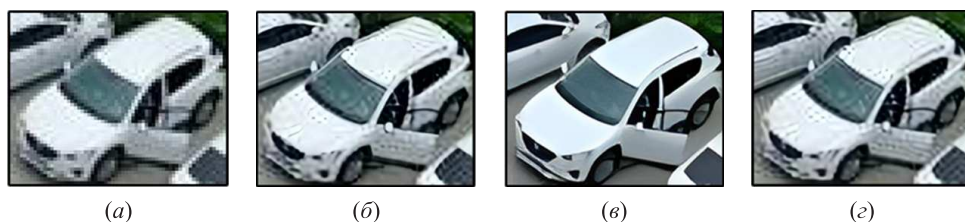


Рис. 2 Пример работы SR-сетей: (а) исходный объект; (б) RCAN; (в) Real-ESRGAN; (г) SwinIR

Таблица 1 Значения PSNR и SSIM для нейросетевых моделей RCAN, Real-ESRGAN и SwinIR

SR-сети	PSNR	SSIM
RCAN	32,63	0,9002
Real-ESRGAN	26,22	0,7655
SwinIR	32,72	0,7655

5 Аугментация данных с помощью SR-сети

Для того чтобы выбрать конкретную SR-сеть для метода аугментации CSOA, необходимо было оценить влияние каждой архитектуры на точность детектирования и классификации объектов. В качестве детектора была выбрана модель SSD MobileNet V2 FPNLite 320×320 [25]. Данная модель легковесна (может запускаться на энергоэффективных устройствах с нейронным процессором (Neural Processing Unit, NPU)) и доступна во многих открытых репозиториях (например, TensorFlow 2 Detection Model Zoo [26], Hailo Model Zoo [27] и RKNN Model Zoo [28]). SSD MobileNet V2 снабжена простым конвейером аугментации данных (зеркальное отображение и случайное кадрирование изображений), который не вносит серьезных изменений во внешний вид объектов. Чтобы изолировать влияние SR-сетей, модель SSD-MobileNetV2 FPNLite (320×320) обучена на наборе данных VisDrone с шагом масштабирования объектов SR-сетью и без него. Ключевые этапы эксперимента:

- (1) обучение базового детектора. SSD MobileNetV2 FPNLite — компактный и легковесный детектор, подходящий для обработки входных данных с низким разрешением (320×320 пикселей) и запуска на энергоэффективных устройствах с NPU. У большинства одноступенчатых детекторов точность обнаружения и классификации небольших и более крупных объектов заметно различаются [29]. По этой причине модель SSD MobileNetV2 FPNLite хорошо подходит на роль базового детектора: улучшения от сверхвысокого разрешения изображений должны проявиться особенно ярко для объектов небольшого размера (т. е. именно там, где базовая точность детектирования MobileNetV2 самая низкая);
- (2) аугментация данных с помощью SR-сети, состоящая из двух последовательных шагов:
 - для каждого изображения из обучающего набора данных необходимо извлечь данные разметки из файла аннотации, в которых содержатся координаты ограничивающих рамок всех объектов (координаты центра, ширина и высота — $[x_i, y_i, w_i, h_i]$);



Рис. 3 Пример аугментации данных с помощью SR-сети

- каждый объект извлекается по координатам ограничивающей рамки и пропускается через SR-сеть. Результат работы сети — улучшенное изображение объекта в более высоком разрешении. Затем объект масштабируется под исходный размер ограничивающей рамки и помещается обратно на исходное изображение датасета. Файл аннотации остается без изменений, так как размеры объектов и места расположения остаются прежними. Процесс аугментации фактически заменяет все изображения объектов на их более четкую версию (рис. 3);
- (3) обучение нейросетевой модели SSD MobileNetV2 FPNLite на обновленном наборе данных.

6 Экспериментальные исследования

Для экспериментов с нейросетевыми моделями был выбран набор данных VisDrone, который служит эталонным датасетом для задачи детектирования и классификации объектов на аэрофотоснимках. Датасет VisDrone характеризуется большим числом объектов и высокой плотностью аннотации (около 0,48 млн ограничивающих рамок 12 различных классов) [30]. Два свойства делают набор данных подходящим для задач исследования:

- (1) большая плотность объектов на один кадр (среднее значение — 53 объекта). Это приводит к частым межобъектным окклюзиям на многолюдных улицах и перекрестках;
- (2) преобладание объектов небольшого размера. Примерно 63% (306 тыс. из 488 тыс.) ограничивающих рамок размером (ширина или высота) менее 32 пикселей и почти 90% рамок занимают менее 0,3% площади изображений [31].

Таблица 2 Точность детектирования и классификации объектов SSD MobileNetV2 FPNLite при обучении на различных данных

Модели	mAP	mAP_small	mAP_medium	mAP_large
Базовая модель	0,031	0,004	0,044	0,150
RCAN $\times 2$	0,041	0,014	0,048	0,149
RCAN $\times 4$	0,041	0,014	0,049	0,152
RCAN $\times 8$	0,043	0,015	0,051	0,150
Real-ESRGAN $\times 2$	0,038	0,010	0,044	0,152
Real-ESRGAN $\times 4$	0,035	0,008	0,044	0,148
Real-ESRGAN $\times 8$	0,036	0,009	0,045	0,150
SwinIR $\times 2$	0,045	0,015	0,051	0,150
SwinIR $\times 4$	0,047	0,016	0,050	0,152
SwinIR $\times 8$	0,050	0,017	0,051	0,152

Различные архитектуры сетей сверхвысокого разрешения имеют характерные особенности, заложенные при проектировании моделей: сверточные модели SR-сетей оптимизированы для максимизации значений PSNR/SSIM и могут снабжать детектор «чистыми», свободными от шумов деталями [20]; GAN нацелены на перцептивный реализм, часто «галлюцинируя» острые края и текстуры, которые могут создавать более сильные паттерны активации в ранних слоях детектора [22]; трансформеры фиксируют связи между далеко разнесенными пикселями, что позволяет им лучше восстанавливать формы и контуры объектов [23]. Чтобы определить, какая архитектура сетей сверхвысокого разрешения больше всего подходит для аугментации объектов, были дополнительно сформированы 9 версий датасета VisDrone с помощью трех SR-сетей с разными коэффициентами масштабирования (2, 4 и 8): RCAN, Real-ESRGAN и SwinIR. На каждой версии набора данных VisDrone была обучена модель SSD MobileNetV2 FPNLite. Все параметры обучения были зафиксированы. Изменялись только архитектуры SR-сетей для аугментации данных и коэффициенты масштабирования. Результаты экспериментов (в соответствии с протоколом оценки библиотеки COCO Evaluation Metrics) представлены в табл. 2.

Из экспериментальных данных можно сделать вывод о том, что основной прирост при использовании всех моделей SR-сетей идет за счет повышения точности детектирования и классификации небольших объектов. Показатели при работе со средними и большими объектами повышаются незначительно. В остальном эксперименты показывают четкие различия между тремя семействами SR-сетей.

Трансформер SwinIR стабильно обеспечивает наибольший прирост в точности детектирования и классификации: mAP растет с 0,032 до 0,045–0,050. Показатели mAP и mAP_small стабильно повышаются при увеличении коэффициента масштабирования с 2 до 8.

CNN-модель RCAN дает чуть меньший прирост показателей mAP и mAP_small (с 0,032 до 0,041–0,043 и с 0,004 до 0,014–0,015 соответствен-

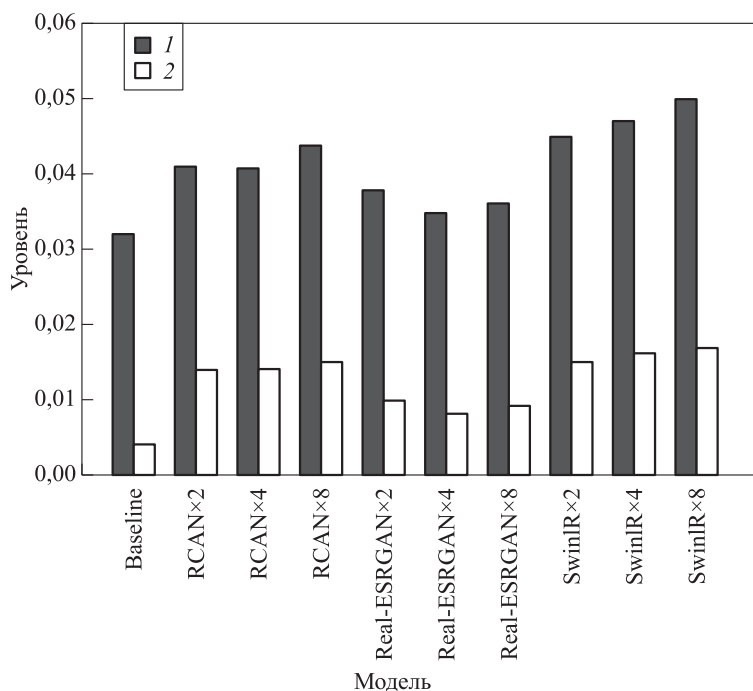


Рис. 4 Влияние SR-сетей на точность детектирования и классификации объектов: 1 — mAP; 2 — mAP_small

но). Основной эффект достигается при коэффициенте масштабирования 2. Это свидетельствует о том, что после восстановления градиентов краев дальнейшее повышение коэффициента масштабирования незначительно увеличивает точность детектирования и классификации.

Генеративно-сопоставительная модель Real-ESRGAN при коэффициенте масштабирования 2 улучшает показатели mAP и mAP_small слабее других сетей. Дальнейшее повышение коэффициента масштабирования негативно сказывается на точности работы модели SSD MobileNetV2 FPNLite. Самые гладкие и приятные для человеческого глаза текстуры уменьшают точность детектирования и классификации объектов.

Сравнение показателей mAP и mAP_small представлено на рис. 4.

7 Заключение

В представленной работе приведены особенности практической реализации метода аугментации малых объектов на основе сетей сверхвысокого разрешения, подтверждающие, что включение SR-сетей в аугментацию данных значительно повышает эффективность обнаружения и классификации объектов.

Полученные результаты согласуются с уже известными оценками PSNR/SSIM различных классов SR-сетей [23]: SwinIR (32,72 дБ/0,9021) и RCAN (32,63 дБ/0,9002) лидируют по показателю пиксельной точности; модель Real-ESRGAN (26,22 дБ/0,7655), ориентированная на перцептивный реализм, характеризуется более низкими показателями. Высокие PSNR и SSIM приводят к улучшению точности детектирования и классификации объектов только при отсутствии артефактов. В свою очередь, гладкие текстуры, характерные для генеративно-сопоставительных сетей, могут ввести детектор в заблуждение.

В результате экспериментальных исследований, представленных в статье, можно сделать вывод о том, что: модель SwinIR с коэффициентом масштабирования 4 или 8 лучше всего подходит для аугментации небольших объектов на аэрофотоснимках; RCAN с коэффициентом масштабирования 2 можно использовать в качестве легковесной альтернативы в случае дефицита вычислительных ресурсов; модели на основе GAN можно использовать только после дополнительной регуляризации.

Литература

1. *Ferlitsch A.* Deep learning patterns and practices. — Manning Publications Co., 2021. 472 p.
2. *Foster D.* Generative deep learning. — 2nd ed. — O'Reilly Media, 2023. 453 p.
3. *Zhang H., Zhang S., Zou R.* Select-mosaic: Data augmentation method for dense small object scenes. — Cornell University, 2024. 6 p. arXiv:2406.05412v1 [cs.CV].
4. *Arkhipov P. O., Philippskih S. L., Tsukanov M. V.* A method for creating realistic synthetic images using a generative deep learning model for classifying anomalies in panoramas // Pattern Recognition Image Analysis, 2024. Vol. 34. No. 3. P. 805–809. doi: 10.1134/S105466182470069X. EDN: FEXJQE.
5. *Arkhipov P. O., Philippskih S. L.* Building an ensemble of convolutional neural networks for classifying panoramic images // Pattern Recognition Image Analysis, 2022. Vol. 32. No. 3. P. 511–514. doi: 10.1134/S1054661822030051. EDN: CHGJXU.
6. *Архипов П. О., Трофименков А. К., Цуканов М. В., Носова Н. Ю.* Исследование методов детектирования ключевых точек при создании панорамных изображений // Системы и средства информатики, 2022. Т. 32. № 2. С. 92–104. doi: 10.14357/08696527220209. EDN: RQCSHV.
7. *Архипов П. О., Филиппских С. Л.* Распознавание аномалий на разновременных панорамах с использованием нейросетевого метода консолидации моделей // Системы и средства информатики, 2023. Т. 33. № 2. С. 13–24. doi: 10.14357/08696527230202. EDN: TSMYNA.
8. *Прохорец И. О., Степанов А. С.* Картографирование земель сельскохозяйственного назначения Хабаровского края методами машинного обучения с использованием изображений Sentinel-2 // Системы и средства информатики, 2024. Т. 34. № 1. С. 57–69. doi: 10.14357/08696527240105. EDN: YEZNXD.
9. *Chen P., Liu S., Zhao H., Wang X., Jia J.* GridMask data augmentation. — Cornell University, 2024. 9 p. arXiv:2001.04086v3 [cs.CV].

10. GitHub — mdbloice/Augmentor. <https://github.com/mdbloice/Augmentor>.
11. DeVries T., Taylor G. W. Improved regularization of convolutional neural networks with cutout. — Cornell University, 2017. 8 p. arXiv:1708.04552v2 [cs.CV].
12. Yun S., Han D., Oh S.J., Chun S., Choe J., Yoo Y. CutMix: Regularization strategy to train strong classifiers with localizable features // IEEE/CVF Conference (International) on Computer Vision Proceedings. — IEEE, 2019. P. 6022–6031. doi: 10.1109/ICCV.2019.00612.
13. Zhong Z., Zheng L., Kang G., Li S., Yang Y. Random erasing data augmentation // AAAI Conference on Artificial Intelligence. — AAAI Press, 2020. P. 13001–13008. doi: 10.1609/aaai.v34i07.7000.
14. Zhang H., Cissé M., Dauphin Y. N., Lopez-Paz D. Mixup: Beyond empirical risk minimization. — Cornell University, 2018. 13 p. arXiv:1710.09412 [cs.LG].
15. Uddin A. F. M. S., Monira M. S., Shin W., Chung T., Bae S.-H. SaliencyMix: A saliency guided data augmentation strategy for better regularization. — Cornell University, 2021. 12 p. arXiv:2006.01791 [cs.LG].
16. Kim J., Choo W., Song H. O. Puzzle Mix: Exploiting saliency and local statistics for optimal mixup // 37th Conference (International) on Machine Learning Proceedings, 2020. P. 5275–5285.
17. Fang H., Sun J., Wang R., Gou M., Li Y.-L., Lu C. InstaBoost: Boosting instance segmentation via probability map guided copy-pasting // IEEE/CVF Conference (International) on Computer Vision Proceedings. — IEEE, 2019. P. 682–691. doi: 10.1109/ICCV.2019.00077.
18. Ghiasi G., Cui Y., Srinivas A., Qian R., Lin T.-Y., Cubuk E. D., Le Q. V., Zoph B. Simple copy-paste is a strong data augmentation method for instance segmentation // IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Proceedings. — IEEE, 2021. P. 2918–2928. doi: 10.1109/CVPR46437.2021.00294.
19. Dong C., Loy C. C., Tang X. Accelerating the super-resolution convolutional neural network // Computer vision / Eds. B. Leibe, J. Matas, N. Sebe, M. Welling. — Lecture notes in computer science ser. — Cham: Springer, 2016. Vol. 9906. P. 391–407. doi: 10.1007/978-3-319-46475-6_25.
20. Zhang Y., Li K., Li K., Wang L., Zhong B., Fu Y. Image super-resolution using very deep residual channel attention networks // Computer vision / Eds. V. Ferrari, M. Hebert, C. Sminchisescu, Y. Weiss. — Lecture notes in computer science ser. — Cham: Springer, 2018. Vol. 11211. P. 294–310. doi: 10.1007/978-3-030-01234-2_18.
21. Wang X., Yu K., Wu S., Gu J., Liu Y., Dong C., Qiao Y., Loy C. C. ESRGAN: Enhanced super-resolution generative adversarial networks // Computer vision / Eds. L. Leal-Taixé, S. Roth. — Lecture notes in computer science ser. — Cham: Springer, 2019. Vol. 11133. P. 63–79. doi: 10.1007/978-3-030-11021-5_5.
22. Wang X., Xie L., Dong C., Shan Y. Real-ESRGAN: Training real-world blind super-resolution with pure synthetic data // IEEE/CVF Conference (International) on Computer Vision Workshops Proceedings. — IEEE, 2021. P. 1905–1914. doi: 10.1109/ICCVW54120.2021.00217.
23. Liang J., Cao J., Sun G., Zhang K., Van Gool L., Timofte R. SwinIR: Image restoration using swin transformer // IEEE/CVF Conference (International)

- on Computer Vision Workshops Proceedings. — IEEE, 2021. P. 1833–1844. doi: 10.1109/ICCVW54120.2021.00210.
24. Hore A., Ziou D. Image quality metrics: PSNR vs. SSIM // 20th Conference (International) on Pattern Recognition Proceedings. — IEEE, 2010. P. 2366–2369. doi: 10.1109/ICPR.2010.579.
25. Howard A. G., Zhu M., Chen B., Kalenichenko D., Wang W., Weyand T., Andreetto M., Adam H. MobileNets: Efficient convolutional neural networks for mobile vision applications. — Cornell University, 2017. 9 p. arXiv:1704.04861v1 [cs.CV].
26. TensorFlow 2 Detection Model Zoo. https://github.com/tensorflow/models/blob/master/research/object_detection/g3doc/tf2_detection_zoo.md.
27. Hailo Model Zoo. https://github.com/hailo-ai/hailo_model_zoo/blob/master/docs/public_models.
28. RKNN Model Zoo. https://github.com/airockchip/rknn_model_zoo.
29. Chiu Y.-C., Tsai C.-Y., Ruan M.-D., Shen G.-Y., Lee T.-T. Mobilenet-SSDv2: An improved object detection model for embedded systems // Conference (International) on System Science and Engineering Proceedings. — IEEE, 2020. Art. 9219319. 5 p. doi: 10.1109/ICSSE50014.2020.9219319.
30. Duan C., Wei Z., Zhang C., Qu S., Wang H. Coarse-grained density map guided object detection in aerial images // CVF Conference (International) on Computer Vision Workshops Proceedings. — IEEE, 2021. P. 2789–2798. doi: 10.1109/ICCVW54120.2021.00313.
31. Lee J. C., Yoo J. Y., Kim Y., Moon S. T., Ko J. H. Robust detection of small and dense objects in images from autonomous aerial vehicles // Electron. Lett., 2021. Vol. 57. Iss. 16. P. 611–613. doi: 10.1049/ELL2.12245.

Поступила в редакцию 04.07.2025

Принята к публикации 15.09.2025

DEVELOPMENT OF A SMALL-OBJECT AUGMENTATION METHOD BASED ON SUPER-RESOLUTION NETWORKS

P. O. Arkhipov, S. L. Philippskih, and M. V. Tsukanov

Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119333, Russian Federation

Abstract: The paper examines the limitations of modern data augmentation methods when applied to images captured by unmanned aerial vehicles in scenarios characterized by high object density and small object sizes. A specialized method, Contextual Small-Object Augmentation, is proposed to intelligently place visually enhanced objects into semantically relevant regions of the image while preserving spatial realism. In particular, the study focuses on a data augmentation module that utilizes super-resolution (SR) networks to improve the visual quality of small objects. For this purpose, several state-of-the-art SR neural models — RCAN, Real-ESRGAN, and SwinIR — were selected. Their impact on the accuracy of object detection and classification was evaluated

using the SSD MobileNet V2 FPNLite 320×320 model trained on various versions of the VisDrone benchmark dataset. The detection results were compared against a baseline model trained on the original dataset following the evaluation protocol of the COCO Evaluation Metrics. The experimental results demonstrate that incorporating high-resolution networks into the augmentation pipeline significantly improves the detection accuracy of small objects while maintaining computational efficiency.

Keywords: object detection; object classification; transformer; convolutional neural network; generative adversarial network; data augmentation

DOI: 10.14357/08696527250302

EDN: TAETAC

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. Ferlitsch, A. 2021. *Deep learning patterns and practices*. Manning Publications Co. 472 p.
2. Foster, D. 2023. *Generative deep learning*. 2nd ed. O'Reilly Media. 453 p.
3. Zhang, H., S. Zhang, and R. Zou. 2024. Select-mosaic: Data augmentation method for dense small object scenes. Cornell University. 6 p. Available at: <https://arxiv.org/pdf/2406.05412v1> (accessed October 6, 2025).
4. Arkhipov, P. O., S. L. Philippskih, and M. V. Tsukanov. 2024. A method for creating realistic synthetic images using a generative deep learning model for classifying anomalies in panoramas. *Pattern Recognition Image Analysis* 34(3):805–809. doi: 10.1134/S105466182470069X. EDN: FEXJQE.
5. Arkhipov, P. O., and S. L. Philippskih. 2022. Building an ensemble of convolutional neural networks for classifying panoramic images. *Pattern Recognition Image Analysis* 32(3):511–514. doi: 10.1134/S1054661822030051. EDN: CHGJXU.
6. Arkhipov, P. O., A. K. Trofimenkov, M. V. Tsukanov, and N. Yu. Nosova. 2022. Issledovanie metodov detektirovaniya klyuchevykh tochek pri sozdanii panoramnykh izobrazheniy [Study of methods for detecting key points when creating panoramic images]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 32(2):92–104. doi: 10.14357/08696527220209. EDN: RQCSHV.
7. Arkhipov, P. O., and S. L. Philippskih. 2023. Raspoznavanie anomalii na raznovremennykh panoramakh s ispol'zovaniem neyrosetevogo metoda konsolidatsii modeley [Recognition of anomalies on multitime panoramas using the neural network method of model amalgamation]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 33(2):13–24. doi: 10.14357/08696527230202. EDN: TSMYNA.
8. Prokhorets, I. O., and A. S. Stepanov. 2024. Kartografirovaniye zemel' sel'skokhozyaystvennogo naznacheniya Khabarovskogo kraya metodami mashinnogo obucheniya s ispol'zovaniem izobrazheniy Sentinel-2 [Mapping of the Khabarovsk Region arable lands by machine learning using Sentinel-2 images]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 34(1):57–69. doi: 10.14357/08696527240105. EDN: YEZNXD.

9. Chen, P., S. Liu, H. Zhao, X. Wang, and J. Jia. 2024. GridMask data augmentation. Cornell University. 9 p. Available at: <https://arxiv.org/pdf/2001.04086v3> (accessed October 6, 2025).
10. GitHub — mdbloice/Augmentor. Available at: <https://github.com/mdbloice/Augmentor> (accessed October 6, 2025).
11. DeVries, T., and G.W. Taylor. 2017. Improved regularization of convolutional neural networks with cutout. Cornell University. 8 p. Available at: <https://arxiv.org/pdf/1708.04552v2> (accessed October 6, 2025).
12. Yun, S., D. Han, S.J. Oh, S. Chun, J. Choe, and Y. Yoo. 2019. CutMix: Regularization strategy to train strong classifiers with localizable features. *IEEE/CVF Conference (International) on Computer Vision Proceedings*. IEEE. 6022–6031. doi: 10.1109/ICCV.2019.00612.
13. Zhong, Z., L. Zheng, G. Kang, S. Li, and Y. Yang. 2020. Random erasing data augmentation. *AAAI Conference on Artificial Intelligence*. AAAI Press. 13001–13008. doi: 10.1609/aaai.v34i07.7000.
14. Zhang, H., M. Cissé, Y.N. Dauphin, and D. Lopez-Paz. 2018. Mixup: Beyond empirical risk minimization. Cornell University. 13 p. Available at: <https://arxiv.org/pdf/1710.09412> (accessed October 6, 2025).
15. Uddin, A. F. M. S., M. S. Monira, W. Shin, T. Chung, and S.-H. Bae. 2021. SaliencyMix: A saliency guided data augmentation strategy for better regularization. Cornell University. 12 p. Available at: <https://arxiv.org/pdf/arXiv:2006.01791> (accessed October 6, 2025).
16. Kim, J., W. Choo, and H. O. Song. 2020. Puzzle mix: Exploiting saliency and local statistics for optimal mixup. *37th Conference (International) on Machine Learning Proceedings*. 5275–5285.
17. Fang, H., J. Sun, R. Wang, M. Gou, Y.-L. Li, and C. Lu. 2019. InstaBoost: Boosting instance segmentation via probability map guided copy-pasting. *IEEE/CVF Conference (International) on Computer Vision Proceedings*. IEEE. 682–691. doi: 10.1109/ICCV.2019.00077.
18. Ghiasi, G., Y. Cui, A. Srinivas, R. Qian, T.-Y. Lin, E. D. Cubuk, Q. V. Le, and B. Zoph. 2021. Simple copy-paste is a strong data augmentation method for instance segmentation. *IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Proceedings*. IEEE. 2918–2928. doi: 10.1109/CVPR46437.2021.00294.
19. Dong, C., C. C. Loy, and X. Tang. 2016. Accelerating the super-resolution convolutional neural network. *Computer vision*. Eds. B. Leibe, J. Matas, N. Sebe, and M. Welling. Lecture notes in computer science ser. Cham: Springer. 9906:391–407. doi: 10.1007/978-3-319-46475-6_25.
20. Zhang, Y., K. Li, K. Li, L. Wang, B. Zhong, and Y. Fu. 2018. Image super-resolution using very deep residual channel attention networks. *Computer vision*. Eds. V. Ferrari, M. Hebert, C. Sminchisescu, and Y. Weiss. Lecture notes in computer science ser. Cham: Springer. 11211:294–310. doi: 10.1007/978-3-030-01234-2_18.
21. Wang, X., K. Yu, S. Wu, J. Gu, Y. Liu, C. Dong, Y. Qiao, and C. C. Loy. 2019. ESRGAN: Enhanced super-resolution generative adversarial networks. *Computer vision*. Eds. L. Leal-Taixé and S. Roth. Lecture notes in computer science ser. Cham: Springer. 11133:63–79. doi: 10.1007/978-3-030-11021-5_5.
22. Wang, X., L. Xie, C. Dong, and Y. Shan. 2021. Real-ESRGAN: Training real-world blind super-resolution with pure synthetic data. *IEEE/CVF Conference (In-*

- ternational) on Computer Vision Workshop Proceedings. IEEE. 1905–1914. doi: 10.1109/ICCVW54120.2021.00217.
23. Liang, J., J. Cao, G. Sun, K. Zhang, L. Van Gool, and R. Timofte. 2021. SwinIR: Image restoration using Swin Transformer. *IEEE/CVF Conference (International) on Computer Vision Workshop Proceedings*. IEEE. 1833–1844. doi: 10.1109/ICCVW54120.2021.00210.
 24. Hore, A., and D. Ziou. 2010. Image quality metrics: PSNR vs. SSIM. *Conference (International) on Pattern Recognition Proceedings*. IEEE. 2366–2369. doi: 10.1109/ICPR.2010.579.
 25. Howard, A. G., M. Zhu, B. Chen, D. Kalenichenko, W. Wang, T. Weyand, M. Andreetto, and H. Adam. 2017. MobileNets: Efficient convolutional neural networks for mobile vision applications. Cornell University. 9 p. Available at: <https://arxiv.org/pdf/1704.04861v1> (accessed October 6, 2025).
 26. TensorFlow 2 detection model zoo. Available at: https://github.com/tensorflow/models/blob/master/research/object_detection/g3doc/tf2_detection_zoo.md (accessed October 6, 2025).
 27. Hailo model zoo. Available at: https://github.com/hailo-ai/hailo_model_zoo/tree/master/docs/public_models (accessed October 6, 2025).
 28. RKNN model zoo. Available at: https://github.com/airockchip/rknn_model_zoo (accessed October 6, 2025).
 29. Chiu, Y.-C., C.-Y. Tsai, M.-D. Ruan, G.-Y. Shen and T.-T. Lee. 2020. Mobilenet-SSDv2: An improved object detection model for embedded systems. *Conference (International) on System Science and Engineering Proceedings*. IEEE. Art. 9219319. 5 p. doi: 10.1109/ICSSE50014.2020.9219319.
 30. Duan, C., Z. Wei, C. Zhang, S. Qu, and H. Wang. 2021. Coarse-grained density map guided object detection in aerial images. *CVF Conference (International) on Computer Vision Workshops Proceedings*. IEEE. 2789–2798. doi: 10.1109/ICCVW54120.2021.00313.
 31. Lee, J. C., J. Y. Yoo, Y. Kim, S. T. Moon, and J. H. Ko. 2021. Robust detection of small and dense objects in images from autonomous aerial vehicles. *Electron. Lett.* 57(16):611–613. doi: 10.1049/ ELL2.12245.

Received July 4, 2025

Accepted September 15, 2025

Contributors

Arkhipov Pavel O. (b. 1979) — Candidate of Science (PhD) in technology, director, Orel Branch of the Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119133, Russian Federation; arpaul@mail.ru

Philippskih Sergey L. (b. 1987) — junior scientist, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119133, Russian Federation; philippsl@mail.ru

Tsukanov Maxim V. (b. 1995) — scientist, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119133, Russian Federation; tsukanov.m.v@yandex.ru

НЕЙРОСЕТЕВОЙ БАЙЕСОВСКИЙ СИНТЕЗ МНОГОМЕРНОЙ ЛИНЕЙНОЙ СТОХАСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ*

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

Аннотация: Разработан новый метод синтеза оптимальной многомерной линейной стохастической системы (СтС) по байесовскому критерию (БК), основанному на количественной оценке ошибки оценки выходного стохастического процесса (СтП). Стохастическая система описывается уравнениями В. С. Пугачёва для входного и выходного СтП. В состав векторного входного СтП входит полезный сигнал и аддитивная многомерная нормально распределенная помеха с нулевым математическим ожиданием и известной матрицей ковариационных функций. Случайная помеха не зависит от вектора случайных параметров полезного сигнала. Распределение вектора случайных параметров задано. Построена модель БК-оптимальной оценки выходного СтП на основе вейвлет-канонического разложения (ВЛКР) случайной помехи и вейвлет-разложения входного СтП. Для нахождения неизвестных параметров модели оптимальной оценки выходного СтП разработана архитектура многослойной вейвлет-нейронной сети (ВНС). Обучение ВНС с учителем осуществляется методом обратного распространения ошибки. Получены формулы для математического ожидания, второго начального момента и ковариационной матрицы ошибки БК-оптимальной оценки выходного СтП. Приведен иллюстративный пример.

Ключевые слова: байесовский критерий; вейвлет; вейвлет-нейронная сеть; каноническое разложение; ковариационная матрица; ковариационная функция; моделирование; оптимальная оценка; стохастическая система; стохастический процесс; функция потерь

DOI: 10.14357/08696527250303

EDN: SUNQAL

1 Введение

Байесовский подход остается одним из современных подходов в области синтеза радиотехнических и кибернетических информационных технологий

*Работа выполнена 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

и средств [1–7]. Авторы развивают теорию построения БК-оптимальных нестационарных стохастических систем (СтС) методом канонических разложений (КР) [1, 4, 5]. Рассматриваются СтС, изучение которых ведется на основе математической модели из-за трудности проведения натурных испытаний. Для имитационного моделирования СтП, заданного на конечном промежутке времени, авторы применяют КР СтП, позволяющие свести моделирование СтП к моделированию случайных величин (СВ). Практическое значение решения задачи синтеза БК-оптимальной СтС заключается в основном в том, что оно позволяет найти теоретический оптимум, к которому разработчик должен стремиться при проектировании реальной системы.

В [8, 9] описан рекуррентный метод построения ВЛКР СтП на основе ортонормированного базиса вейвлетов с компактными носителями [10]. С целью уменьшения предварительных трудоемких аналитических выкладок в [11, 12] был разработан нейросетевой алгоритм построения ВЛКР (далее — КРВНС) СтП. В [13–17] дано решение задачи БК-оптимальной нестационарной СтС, описываемой уравнениями В. С. Пугачёва, методом ВЛКР. В [18, 19] решена задача синтеза оптимальной нестационарной линейной одномерной СтС по критерию минимума среднеквадратичной ошибки (СКО) и по энергетическому критерию на основе КРВНС СтП и с применением нейросетевых технологий (НТ) [20]. В [18] был проведен сравнительный анализ нового метода построения оценки выходного СтП системы, описываемой уравнениями В. С. Пугачёва, на основе КРВНС и НТ с приближенными методами, применяемыми КР без НТ. Анализ показал, что все методы дают одинаковый порядок точности вычислений, но применение НТ позволяет избежать трудоемких аналитических выкладок.

В настоящей работе нейросетевой подход синтеза одномерной оптимальной СтС применен для синтеза многомерной оптимальной СтС. В разд. 2 дана постановка задачи. Рассматривается многомерная нестационарная линейная СтС, описываемая уравнениями В. С. Пугачёва для входного и требуемого выходного СтП. В состав входного СтП входит аддитивная случайная помеха с нулевым математическим ожиданием и заданной матрицей ковариационных функций. Оптимальная по БК оценка выходного СтП находится из условия минимума математического ожидания функции потерь, зависящей от количественной ошибки оценки выходного СтП. В разд. 3 описан алгоритм нахождения БК-оптимальной оценки выходного СтП на основе многослойной ВНС [20–22]. Входными данными ВНС служит совокупность СВ, которая формируется методом КРВНС. Модель БК-оптимальной оценки выходного СтП строится в виде линейной комбинации входных СВ с коэффициентами, заданными детерминированными координатными функциями. Неизвестные параметры координатных функций находятся методом обратного распространения ошибки [20]. Получены формулы для математического ожидания и ковариационной матрицы ошибки БК-оптимальной оценки выходного СтП. В разд. 4 приведен иллюстративный пример.

2 Постановка задачи

Рассмотрим СтС, описываемую уравнениями В. С. Пугачёва. На вход СтС поступает векторный СтП

$$Z(t) = [Z_1(t) Z_2(t) \cdots Z_{N_Z}(t)]^T, \quad t \in [t_0, t_k],$$

в виде суммы полезного сигнала

$$S(t) = [S_1(t) S_2(t) \cdots S_{N_Z}(t)]^T$$

и нормально распределенной случайной помехи в виде СтП

$$X(t) = [X_1(t) X_2(t) \cdots X_{N_Z}(t)]^T$$

с нулевым математическим ожиданием и известной матрицей ковариационных функций $K^X(t_1, t_2) = M[X(t_1)X^T(t_2)]$, $t_1, t_2 \in [t_0, t_k]$:

$$Z(t) = S(t) + X(t). \quad (1)$$

Компоненты полезного сигнала $S_h(t)$, $h = \overline{1, N_Z}$, представляют собой линейную комбинацию заданных случайных параметров U_r , $r = \overline{1, N_U}$:

$$S_h(t) = \sum_{r=1}^{N_U} U_r \xi_{hr}(t), \quad (2)$$

где $\xi_{h1}(t), \dots, \xi_{hN_U}(t)$ — известные детерминированные структурные функции. Будем считать, что векторный параметр $U = [U_1 U_2 \cdots U_{N_U}]^T$ — N_U -мерная СВ с заданной плотностью вероятности $f_U(u)$, не зависящая от случайной помехи $X(t)$ и с конечными первыми и вторыми моментами:

$$m_r^U = M[U_r], r = \overline{1, N_U}; \quad \Gamma_{r_1 r_2}^U = M[U_{r_1} U_{r_2}]; \\ K_{r_1 r_2}^U = M[(U_{r_1} - m_{r_1}^U)(U_{r_2} - m_{r_2}^U)], \quad r_1, r_2 = \overline{1, N_U}.$$

Требуемый выходной СтП системы $W(t) = [W_1(t) W_2(t) \cdots W_{N_W}(t)]^T$ задан выражениями для $p = \overline{1, N_W}$, $r = \overline{1, N_U}$

$$W_p(t) = \sum_{r=1}^{N_U} \zeta_{pr}(t) U_r, \quad (3)$$

где $\zeta_{pr}(t)$ — известные детерминированные структурные функции.

Требуется найти оптимальную СтС, выходной СтП которой

$$W^*(t) = [W_1^*(t) W_2^*(t) \dots W_{N_W}^*(t)]^T$$

обеспечивал бы минимум математического ожидания заданной функции потерь $l(W, W^*)$:

$$M[l(W, W^*)] = \min.$$

Величину $M[l(W, W^*)]$ называют средним риском. Критерии минимума среднего риска, соответствующие функциям потерь, зависящим от случайных параметров, обычно называют байесовскими критериями, а СтП $W^*(t)$ — БК-оптимальной оценкой требуемого СтП $W(t)$.

В практических задачах информатики пользуются критерием минимума СКО:

$$l(\Delta) = \text{tr}[\Delta \cdot \Delta^T], \quad \Delta(t) = W(t) - W^*(t).$$

Обобщением критерия СКО выступает сложно-статистический критерий (ССК), когда функция потерь задается в виде известной функции, зависящей от математического ожидания и ковариационной матрицы ошибки

$$l(W, W^*) = f(m^\Delta(t), K^\Delta(t)).$$

Если ошибка распределена нормально, то частным случаем ССК становится критерий максимума вероятности того, что ошибка не выйдет из заданной области $A^\Delta = \{\Delta : |\Delta_p| < a_p(t)(p = \overline{1, N_W})\}$:

$$P(\Delta \in A^\Delta) = \max.$$

В задачах практики часто оказывается полезным БК в виде накопленного ущерба

$$l(\Delta) = 1 - \exp\{-k^2 \Delta \cdot \Delta^T\}, \quad k = \text{const}.$$

Для применения технологии искусственных нейронных сетей (ИНС) надо решить две задачи:

- (1) смоделировать N_N независимых реализаций входного СтП $\{z^i(t)\}_{i=1}^{N_N}$, наблюдаемого на заданном промежутке времени $[t_0, t_k]$, и соответствующее им множество независимых реализаций выходного СтП $\{w^i(t)\}_{i=1}^{N_N}$;
- (2) построить модель оценки $w^{i*}(t)$, которую ИНС будет выдавать в ответ на реализацию входного СтП $z^i(t)$.

Оценка среднего риска вычисляется по формуле

$$E(t) = \frac{1}{N_N} \sum_{i=1}^{N_N} l(w^i(t), w^{i*}(t)).$$

В терминах теории ИНС функция $E(t)$ называется функцией стоимости. Тогда БК-оптимальная оценка $W^*(t)$ находится из условия, что ее реализации будут обеспечивать $\min E(t)$.

3 Основные результаты

Пусть многомерные действительные СтП $Z(t)$ и $W^*(t)$ ($t \in [t_0, t_k]$) заданы на вероятностных пространствах $(H_Z, \mathcal{A}_Z, \mathcal{P}_Z)$ и $(H_W, \mathcal{A}_W, \mathcal{P}_W)$ соответственно. Здесь

$$H_Z = \underbrace{\mathcal{L}^2[t_0, t_k] \times \mathcal{L}^2[t_0, t_k] \times \cdots \times \mathcal{L}^2[t_0, t_k]}_{N_Z};$$

$$H_W = \underbrace{\mathcal{L}^2[t_0, t_k] \times \mathcal{L}^2[t_0, t_k] \times \cdots \times \mathcal{L}^2[t_0, t_k]}_{N_W},$$

где $\mathcal{L}^2[t_0, t_k]$ — гильбертово пространство функций $f(t)$ ($t \in [t_0, t_k]$) с нормой $\|f\| = [\int_{t_0}^{t_k} |f(t)|^2 dt]^{1/2}$; $\mathcal{A}_Z$ — σ -алгебра в H_Z ; $\mathcal{A}_W$ — σ -алгебра в H_W ; $\mathcal{P}_Z(Z(t) = [z_1(t) z_2(t) \cdots z_{N_Z}(t)]^T)$ — вероятность события $Z(t) = [z_1(t) z_2(t) \cdots z_{N_Z}(t)]^T$, $z_h(t) \in \mathcal{L}^2[t_0, t_k]$, $h = \overline{1, N_Z}$; $\mathcal{P}_W(W(t) = [w_1(t) w_2(t) \cdots w_{N_W}(t)]^T)$ — вероятность события $W(t) = [w_1(t) w_2(t) \cdots w_{N_W}(t)]^T$, $w_p(t) \in \mathcal{L}^2[t_0, t_k]$, $p = \overline{1, N_W}$.

Для моделирования входного СтП $Z(t)$ применим метод КР [1, 4, 5]. В пространстве $\mathcal{L}^2[t_0, t_k]$ зададим ортонормированный базис вейвлетов с компактными носителями с максимальным уровнем разрешения J [10]:

$$\{\varphi_{00}(t), \psi_{jk}(t)\}, \quad (4)$$

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 , $j = \overline{1, J}$, $k = \overline{0, 2^j - 1}$. Для удобства вейвлет-базис (4) представляется в виде

$$\begin{aligned} g_1(t) &= \varphi_{00}(t); \quad g_2(t) = \psi_{00}(t); \\ g_v(t) &= \psi_{jk}(t), \quad j = \overline{1, J}, \quad k = \overline{0, 2^j - 1}, \quad v = 2^j + k + 1; \end{aligned}$$

$L = 2^{J+1}$ — число базисных вейвлет-функций. Согласно [12], представим СтП $X(t)$ в виде его КРВНС:

$$\begin{aligned} X^L(t) &= \sum_{v=1}^L V_v^X \kappa_v^L(t); \\ X_h^L(t) &= \sum_{v=1}^L V_v^X \kappa_{vh}^L(t), \quad h = \overline{1, N_Z}, \end{aligned}$$

где V_v^X — некоррелированные СВ с нулевыми математическими ожиданиями и дисперсиями $D_v^X = 1$; $\kappa_v^L(t) = [\kappa_{v1}^L(t) \kappa_{v2}^L(t) \cdots \kappa_{vN_Z}^L(t)]^T$ — векторные координатные функции. Скалярные координатные функции представляют собой линейные комбинации базисных вейвлет-функций

$$\kappa_{vh}^L(t) = \sum_{\mu=1}^L c_{\mu}^{vh} g_{\mu}(t), \quad h = \overline{1, N_Z},$$

или

$$\kappa_{vh}^L(t) = \left(c^{vh} \right)^T g^L(t), \quad h = \overline{1, N_Z},$$

где

$$c^{vh}(t) = [c_1^{vh}(t) c_2^{vh}(t) \cdots c_L^{vh}(t)]^T; \quad g^L(t) = [g_1(t) g_2(t) \cdots g_L(t)]^T.$$

Как известно, СВ V_v^X , $v = \overline{1, L}$, удовлетворяют соотношениям [1, 4, 5]:

$$V_v^X = \int_{t_0}^{t_k} (a_v(t))^T X(t) dt, \quad v = \overline{1, L},$$

где $a_v(t) = [a_{v1}(t) a_{v2}(t) \cdots a_{vN_Z}(t)]^T$ — формирующие функции, которые можно определить бесчисленным множеством способов, при этом на них накладывается только одно условие: чтобы СВ V_v^X , $v = \overline{1, L}$, были некоррелированными. Пусть скалярные функции $a_{vh}(t) \in \mathcal{L}^2[t_0, t_k]$, $v = \overline{1, L}$, $h = \overline{1, N_Z}$, тогда $a_{vh}(t)$ можно аппроксимировать конечными суммами (бесконечных в пространстве $\mathcal{L}^2[t_0, t_k]$) вейвлет-рядов

$$a_{vh}^L(t) = \sum_{\theta=1}^L \alpha_{\theta}^{vh} g_{\theta}(t), \quad (5)$$

где

$$\alpha_{\theta}^{vh} = \frac{1}{LN_Z c_{\theta}^{vh}}. \quad (6)$$

Имеем следующее утверждение.

Утверждение 1. Скалярные формирующие функции $a_{vh}(t) \in \mathcal{L}^2[t_0, t_k]$, $v = \overline{1, L}$, $h = \overline{1, N_Z}$, можно аппроксимировать конечными суммами (бесконечных в пространстве $\mathcal{L}^2[t_0, t_k]$) вейвлет-рядов (5), где неизвестные коэффициенты α_{θ}^{vh} , $v, \theta = \overline{1, L}$, $h = \overline{1, N_Z}$, вычисляются по формулам (6).

Согласно методу координатных функций [1, 4, 5], рассмотрим СВ

$$V_v^Z = \sum_{h=1}^{N_Z} \int_{t_0}^{t_k} a_{vh}^L(t) Z_h(t) dt, \quad v = \overline{1, L}, \quad (7)$$

и аппроксимируем СтП $Z(t)$ разложением по координатным функциям:

$$Z^L(t) = \sum_{v=1}^L V_v^Z \kappa_v^L(t). \quad (8)$$

Последовательность СтП $Z^L(t)$ сходится в среднеквадратичном к СтП $Z(t)$ при $L \rightarrow \infty$ для каждого фиксированного $t \in [t_0, t_k]$. Формулы (7) и (8) устанавливают взаимно однозначное соответствие между СтП $Z^L(t)$ и совокупностью СВ V_v^Z , $v = \overline{1, L}$.

После подстановки в (7) выражения $Z_h(t) = \sum_{r=1}^{N_U} U_r \xi_{hr}(t) + X_h(t)$ получим

$$V_v^Z = \sum_{r=1}^{N_U} U_r \sum_{h=1}^{N_Z} \int_{t_0}^{t_k} a_{vh}^L(t) \xi_{hr}(t) dt + V_v^X, \quad v = \overline{1, L}.$$

Введем обозначения

$$\beta_{vr}^U = \sum_{h=1}^{N_Z} \int_{t_0}^{t_k} a_{vh}^L(t) \xi_{hr}(t) dt,$$

тогда

$$V_v^Z = \sum_{r=1}^{N_U} \beta_{vr}^U U_r + V_v^X, \quad v = \overline{1, L}. \quad (9)$$

Из условия $\xi_{hr}(t) \in \mathcal{L}^2[t_0, t_k]$, $h = \overline{1, N_Z}$, $r = \overline{1, N_U}$, следует, что скалярные функции $\xi_{hr}(t)$ можно аппроксимировать конечными суммами (бесконечных в пространстве $\mathcal{L}^2[t_0, t_k]$) вейвлет-рядов $\xi_{hr}^L(t) = \sum_{v=1}^L \gamma_v^{hr} g_v(t)$ с коэффициентами $\gamma_v^{hr} = \int_{t_0}^{t_k} \xi_{hr}(t) g_v(t) dt$. Тогда

$$\beta_{vr}^U = \sum_{h=1}^{N_Z} \sum_{\theta=1}^L \alpha_{\theta}^{vh} \gamma_{\theta}^{hr}. \quad (10)$$

В итоге доказано следующее утверждение.

Утверждение 2. Стохастический процесс $Z(t)$, $(t \in [t_0, t_k])$ можно аппроксимировать СтП $Z^L(t)$, заданным выражением (8). Между СтП $Z^L(t)$ и совокупностью СВ V_v^Z , $v = \overline{1, L}$, формулы (7) и (8) устанавливают взаимно однозначное соответствие. Случайные величины V_v^Z определяются формулами (9), (10).

Таким образом, процесс моделирования N_N реализаций $\{z^i(t)\}_{i=1}^{N_N}$ входного СтП $Z(t)$, наблюдаемого на заданном промежутке времени $[t_0, t_k]$, состоит в моделировании N_N совокупностей значений $\{v_v^{Zi}\}_{i=1}^{N_N}$ СВ V_v^Z , $v = \overline{1, L}$. На выходе СтС должна получить соответствующее множество значений $\{w^i(t)\}_{i=1}^{N_N}$ требуемого выходного СтП $W(t)$. На вход ВНС подается обучающая выборка $\{([t v_1^{Zi} v_2^{Zi} \dots v_L^{Zi}]^T, w_i(t))\}_{i=1}^{N_N}$.

Обобщая опыт синтеза оптимальных по различным БК линейных СтС, описываемых уравнениями В. С. Пугачёва [13–17], в качестве модели БК-оптимальной оценки выходного СтП системы рассмотрим линейную композицию СВ V_v^Z ($v = \overline{1, L}$) с коэффициентами в виде векторных детерминированных координатных функций $\chi_v^L(t) = [\chi_{v1}^L(t) \chi_{v2}^L(t) \dots \chi_{LN_W}^L(t)]^T$:

$$W^L(t) = \sum_{v=1}^L V_v^Z \chi_v^L(t); \quad W^L(t) = [W_1^L(t) W_2^L(t) \dots W_{N_W}^L(t)]^T;$$

$$W_p^L(t) = \sum_{v=1}^L V_v^Z \chi_{vp}(t), \quad p = \overline{1, N_W}.$$

Будем считать, что скалярные функции $\chi_{vp}^L(t) \in \mathcal{L}^2[t_0, t_k]$, $p = \overline{1, N_W}$, $v = \overline{1, L}$, тогда их можно аппроксимировать конечными суммами (бесконечных в пространстве $\mathcal{L}^2[t_0, t_k]$) вейвлет-рядов

$$\chi_{vp}^L(t) = \sum_{\mu=1}^L \lambda_{\mu}^{vp} g_{\mu}(t),$$

или

$$\chi_{vp}^L(t) = (\lambda^{vp})^T g^L(t),$$

где $\lambda^{vp} = [\lambda_1^{vp} \lambda_2^{vp} \dots \lambda_L^{vp}]^T$ — неизвестные весовые коэффициенты. Если для $v = \overline{1, L}$ ввести матрицы неизвестных коэффициентов

$$\Lambda_v = \begin{bmatrix} \lambda_1^{v1} & \lambda_2^{v1} & \dots & \lambda_L^{v1} \\ \lambda_1^{v2} & \lambda_2^{v2} & \dots & \lambda_L^{v2} \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \lambda_1^{vN_W} & \lambda_2^{vN_W} & \dots & \lambda_L^{vN_W} \end{bmatrix},$$

тогда

$$\chi_v^L(t) = \Lambda_v g^L(t).$$

В ответ на каждую i -ю реализацию входного СтП в виде совокупности значений СВ v_v^{Zi} , $v = \overline{1, L}$, ВНС будет выдавать значение оценки выходного СтП

$$w^{*i}(t) = \sum_{v=1}^L v_v^{Zi} \chi_v^L(t).$$

Архитектуру ВНС, изображенную на рис. 1, можно описать следующим образом:

- входной слой: $t, [v_1^{Zi} v_2^{Zi} \dots v_L^{Zi}]^T, i = \overline{1, N_N}$;
- первый скрытый слой задает пространство признаков в виде вектора базисных вейвлет-функций $g^L(t)$;
- второй скрытый слой вычисляет значения координатных функций $\chi_v^L(t)$, $v = \overline{1, L}$;
- выходной слой вычисляет значение оценки векторного выходного СтП $w^{*i}(t)$ для каждого набора обучения $i = \overline{1, N_N}$.

Вейвлет-нейронная сеть представляет собой многослойный персептрон с четырьмя слоями. Первый слой входных нейронов служит входным слоем и передает в сеть $(LN_N + 1)$ входных сигналов. Второй слой представляет собой первый скрытый слой, содержит один скрытый нейрон, на вход которого поступает только входной сигнал t и вычисляется значение базисного вектора $g^L(t)$ размерности L . Третий слой ВНС является вторым скрытым слоем, содержит L скрытых нейронов и вычисляет значения векторных координатных функций $\chi_v^L(t)$, $v = \overline{1, L}$, размерности N_W . Нейрон второго слоя связан с нейронами третьего слоя синаптическими связями, каждая из которых характеризуется матрицей синаптических весов Λ_v размерности $(N_W \times L)$. Четвертый слой состоит из N_N выходных нейронов, называется выходным слоем и вычисляет значения функций $w^{*i}(t)$, $i = \overline{1, N_N}$. Входными сигналами для каждого i -го выходного нейрона служат сигналы с входных нейронов v_v^{Zi} , $v = \overline{1, L}$, и выходные сигналы $\chi_v^L(t)$, $v = \overline{1, L}$, со скрытых нейронов третьего слоя.

На рис. 1 показано, что узлы входного слоя v_v^{Zi} , $v = \overline{1, L}$, $i = \overline{1, N_N}$, связаны синаптическими связями без весов только с узлами выходного слоя, поэтому ВНС представляет собой неполносвязную сеть.

Для обучения ВНС с учителем применим алгоритм обратного распространения ошибки [20]. Обучаемыми параметрами служат матрицы синаптических весов Λ_v размерности $(N_W \times L)$. Применим пакетный режим обучения, который проводится после подачи в сеть всех N_N наборов обучения, что отражено в структуре сети.

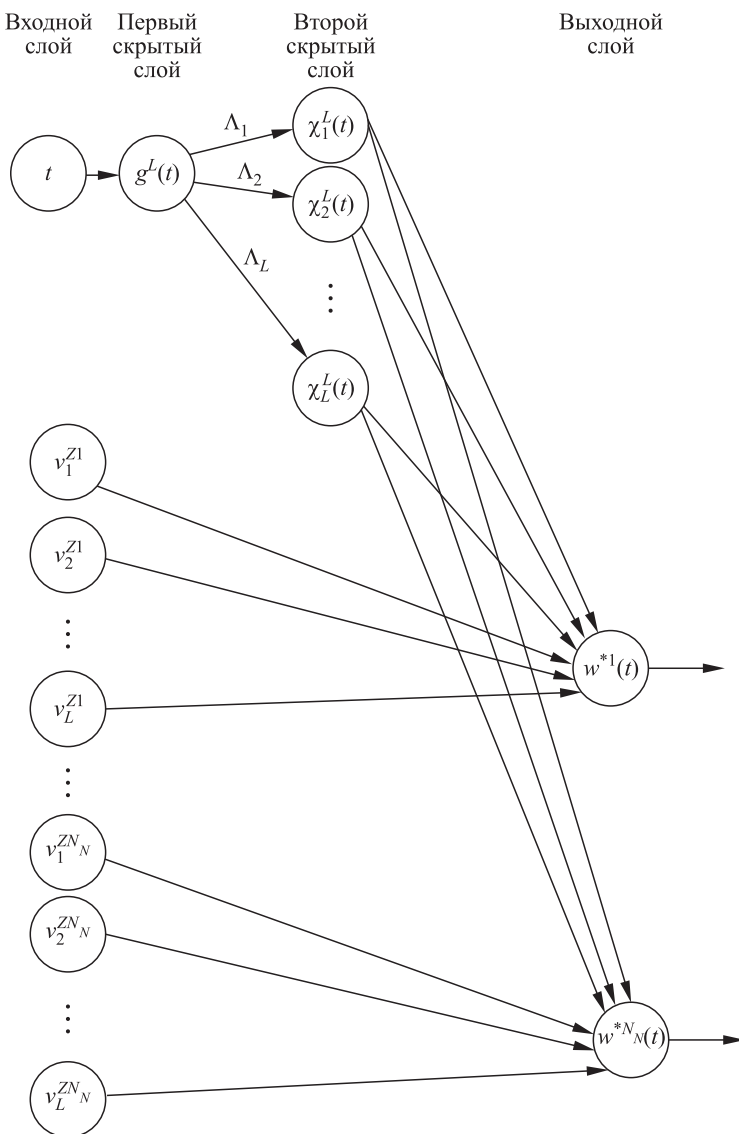


Рис. 1 Архитектура ВНС

Для каждого i -го примера вычисляется значение функции потерь $l(w^i(t), w^{i*}(t))$. Функция стоимости рассматривается как функция, зависящая от весовых коэффициентов λ^{vp} , $p = \overline{1, N_W}$, $v = \overline{1, L}$:

$$E(\lambda^{vp}) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N_N} l(w^i, w^{i*}(\lambda^{vp})). \quad (11)$$

Начиная с исходного значения $\lambda^{vp}(0)$, генерируется последовательность весовых коэффициентов $\lambda^{vp}(1), \lambda^{vp}(2), \dots$, таких что при переходе от n -й итерации алгоритма к $(n+1)$ -й итерации значение функции стоимости (11) уменьшается: $E(\lambda^{vp}(n+1)) < E(\lambda^{vp}(n))$. Корректировка весов осуществляется по формуле

$$\lambda^{vp}(n+1) = \lambda^{vp}(n) - \eta q^{vp}(n), \quad (12)$$

где

$$q^{vp}(n) = \nabla E(\lambda^{vp}(n)), \quad \nabla E(\lambda^{vp}) = \left[\frac{\partial E}{\partial \lambda_1^{vp}} \frac{\partial E}{\partial \lambda_2^{vp}} \dots \frac{\partial E}{\partial \lambda_L^{vp}} \right]^T,$$

$$\frac{\partial E}{\partial \lambda_\mu^{vp}} = \frac{1}{N_N} \sum_{i=1}^{N_N} \frac{\partial l(w^i, w^{i*})}{\partial w_p^{i*}} \frac{\partial w_p^{i*}}{\partial \lambda_\mu^{vp}} = \frac{1}{N_N} \sum_{i=1}^{N_N} \frac{\partial l(w^i, w^{i*})}{\partial w_p^{i*}} v_v^{Z_i} g_\mu(t);$$

$\eta = \text{const}$ — параметр скорости обучения, $0 < \eta < 1$.

Процесс обучения ВНС проводится от итерации к итерации, пока значения весовых коэффициентов не стабилизируются около оптимального значения $\lambda^{vp*} = [\lambda_1^{vp*} \lambda_2^{vp*} \dots \lambda_L^{vp*}]^T$, а функция стоимости не сойдется к некоторому минимальному значению $E_{\min}^L$ [20]. В итоге БК-оптимальная оценка $W^{L*}(t)$ определится выражениями:

$$\left. \begin{aligned} W^{L*}(t) &= \sum_{v=1}^L V_v^Z \chi_v^{L*}(t), \quad W^{L*}(t) = [W_1^{L*}(t) W_2^{L*}(t) \dots W_{N_W}^{L*}(t)]^T; \\ W_p^{L*}(t) &= \sum_{v=1}^L V_v^Z \chi_{vp}^{L*}(t), \quad \chi_{vp}^{L*}(t) = (\lambda^{vp*})^T g^L(t) = \sum_{\mu=1}^L \lambda_\mu^{vp*} g_\mu(t), \\ &\quad p = \overline{1, N_W}. \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

В результате получен алгоритм синтеза БК-оптимальной оценки $W^{L*}(t)$ выходного СтП (3) по результатам наблюдения входного СтП (1) на промежутке времени $[t_0, t_k]$.

Точность БК-оптимальной оценки $W^{L*}(t)$ выходного СтП $W(t)$ оценивается математическим ожиданием, вторым начальным моментом и ковариационной матрицей ошибки

$$\Delta(t) = W(t) - W^{L*}(t), \quad \Delta(t) = [\Delta_1(t) \Delta_2(t) \dots \Delta_{N_W}(t)]^T,$$

где

$$\Delta_p(t) = W_p(t) - W_p^{L*}(t) = \sum_{r=1}^{N_U} U_r \left(\zeta_{pr}(t) - \sum_{v=1}^L \beta_{vr}^U \chi_{vp}^{L*}(t) \right) - \sum_{v=1}^L V_v^X \chi_{vp}^{L*}(t),$$

$$p = \overline{1, N_W}.$$

Алгоритм. Синтез БК-оптимальной оценки выходного СтП

1. Задание множества обучающих примеров $\{([t v_1^{Zi} v_2^{Zi} \dots v_L^{Zi}]^T, w_i(t))\}_{i=1}^{N_N}$.
2. Задание параметра скорости обучения $0 < \eta < 1$.
3. Инициализация весов. При $n = 0$

$$\lambda^{vp}(0) = \lambda_0^{vp}, \quad v = \overline{1, L}, \quad p = \overline{1, N_W}.$$

4. Вычисление функций первого скрытого слоя $g_v(t)$, $v = \overline{1, L}$.
5. Вычисление функций второго скрытого слоя

$$\chi_{vp}^L(n) = (\lambda^{vp}(n))^T g^L(t) = \sum_{\mu=1}^L \lambda_{\mu}^{vp}(n) g_{\mu}(t), \quad p = \overline{1, N_W}, \quad v = \overline{1, L}.$$

6. Вычисление фактического отклика

$$w^{*i} = \sum_{v=1}^L v_v^{Zi} \chi - v^L(n), \quad i = \overline{1, N_N}.$$

7. Вычисление значения функции стоимости по формуле (11). Начиная с третьего шага, проверка условия окончания адаптации весов $E(\lambda^{vp}(n)) = E_{\min}^L$. Если условие выполняется, выход из алгоритма; в противном случае переход к п. 8.
8. Адаптация весов. Изменение весов по формуле (12).
9. Увеличение номера итерации n на 1 и возвращение к п. 5.

Пусть

$$\varepsilon_{pr}^{\zeta}(t, L) = \zeta_{pr}(t) - \sum_{v=1}^L \beta_{vr}^U \chi_{vp}^{L*}(t), \quad p = \overline{1, N_W}, \quad r = \overline{1, N_U},$$

тогда

$$\Delta_p(t) = \sum_{r=1}^{N_U} U_r \varepsilon_{pr}^{\zeta}(t, L) - \sum_{v=1}^L V_v^X \chi_{vp}^{L*}(t), \quad p = \overline{1, N_W}.$$

Утверждение 3. Пусть выполняются утверждения 1 и 2, а БК-оптимальная оценка $W^{L*}(t)$ выходного СтП $W(t)$ вычисляется по формулам (13).

Тогда компоненты математического ожидания ошибки $M[\Delta(t)] = m^\Delta(t) = [m_1^\Delta m_2^\Delta(t) \cdots m_{N_W}^\Delta(t)]^T$ вычисляются по формулам

$$m_p^\Delta(t) = \sum_{r=1}^{N_U} m_r^U \varepsilon_{pr}^\zeta(t, L), \quad p = \overline{1, N_W},$$

компоненты второго начального момента ошибки $\Gamma^\Delta(t) = M[\Delta(t)\Delta^T(t)] = \|\Gamma_{pq}^\Delta(t)\|_{p,q=1}^{N_W}$ — по формулам

$$\Gamma_{pq}^\Delta(t) = \sum_{r_1=1}^{N_U} \sum_{r_2=1}^{N_U} \Gamma_{r_1 r_2}^U \varepsilon_{pr_1}^\zeta(t, L) \varepsilon_{qr_2}^\zeta(t, L) + \sum_{v=1}^L \chi_{vp}^{L*}(t) \chi_{vq}^{L*}(t), \quad p, q = \overline{1, N_W},$$

компоненты ковариационной матрицы ошибки $K^\Delta(t) = M[(\Delta(t) - m_\Delta(t))(\Delta(t) - m_\Delta(t))^T] = \|K_{pq}^\Delta(t)\|_{p,q=1}^{N_W}$ — по формулам

$$K_{pq}^\Delta(t) = \sum_{r_1=1}^{N_U} \sum_{r_2=1}^{N_U} K_{r_1 r_2}^U \varepsilon_{pr_1}^\zeta(t, L) \varepsilon_{qr_2}^\zeta(t, L) + \sum_{v=1}^L \chi_{vp}^{L*}(t) \chi_{vq}^{L*}(t), \quad p, q = \overline{1, N_W}.$$

4 Пример

Найти оптимальный в среднеквадратичном линейный фильтр, предназначенный для воспроизведения двумерного поляризованного сигнала

$$W_1(t) = \beta(U_1 + U_2 t); \quad W_2(t) = \rho(U_1 + U_2 t)$$

по результатам наблюдения:

$$Z_1(t) = \beta(U_1 + U_2 t + X(t)); \quad Z_2(t) = \rho(U_2 + U_2 t + X(t)).$$

Наблюдения проводятся в течение интервала времени длительностью T , предшествующему данному моменту t . Одномерный нормально распределенный СтП $X(t)$ не зависит от СВ $U = [U_1 U_2]^T$, имеет нулевое математическое ожидание и нестационарную ковариационную функцию $K_X(t_1, t_2) = D \exp(-\alpha_1 |t_1 - t_2|) + \alpha_2(t_1 + t_2)$. Двумерная СВ U также задана нормальным распределением с математическим ожиданием $m^U = [m_1^U m_2^U]^T$ и ковариационной матрицей $K^U = \|K_{ij}^U\|_{i,j=1}^2$. Согласно (2) и (3) структурные функции имеют вид:

$$\begin{aligned} \xi_{11}(t) &= \beta, \quad \xi_{12}(t) = \beta t, \quad \xi_{21}(t) = \rho, \quad \xi_{22}(t) = \rho t; \\ \zeta_{11}(t) &= \beta, \quad \zeta_{12}(t) = \beta t, \quad \zeta_{21}(t) = \rho, \quad \zeta_{22}(t) = \rho t, \end{aligned}$$

где β и ρ — масштабные коэффициенты координат сигнала.

Для проведения вычислительных экспериментов разработано инструментальное программное обеспечение (ИПО) «БК-Синтез-ВНС.2» в среде MATLAB на основе ортонормированного базиса вейвлетов Хаара. Алгоритм обучения используется в процессе функционирования ВНС. Экспериментально выбран параметр скорости обучения ВНС $\eta = 0,001$. Исходные данные: $t \in [9, 16]$; $T = 8$; $\beta = 2$; $\rho = 3$; $D = 1$; $\alpha_1 = 1$; $\alpha_2 = 0,01$; $m_1^U = 0$; $m_2^U = 0$; $K_{11}^U = 1$; $K_{22}^U = 1$; $K_{12}^U = 0$; $J = 3$; $L = 16$. На рис. 2–7 приведены результаты вычислительных экспериментов.

На рис. 2 изображен график сигнала $W_1(t)$ и его оценки $W_1^*(t)$, на рис. 3 — график сигнала $W_2(t)$ и его оценки $W_2^*(t)$. На рис. 4 приведен график модуля ошибки $\Delta_1(t) = W_1(t) - W_1^*(t)$, а на рис. 5 — график модуля ошибки $\Delta_2(t) = W_2(t) - W_2^*(t)$. Математические ожидания ошибок воспроизведения компонентов сигнала равны нулю. На рис. 6 и 7 изображены графики дисперсий ошибок $\Delta_1(t)$ и $\Delta_2(t)$ соответственно.

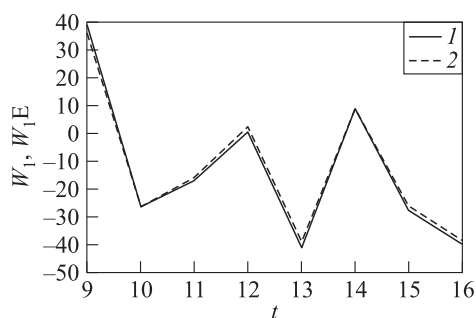


Рис. 2 График сигнала $W_1(t)$ и его оценки $W_1^*(t)$

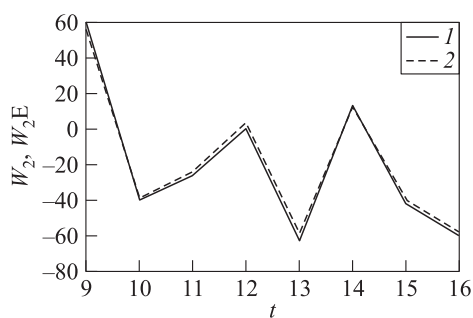


Рис. 3 График сигнала $W_2(t)$ и его оценки $W_2^*(t)$

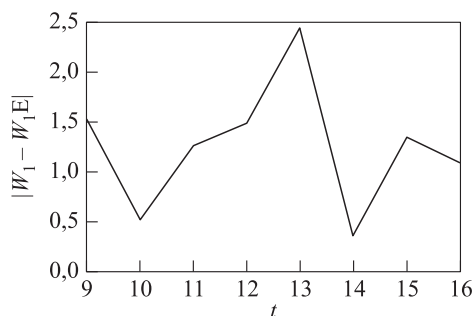


Рис. 4 График модуля ошибки $\Delta_1(t) = W_1(t) - W_1^*(t)$

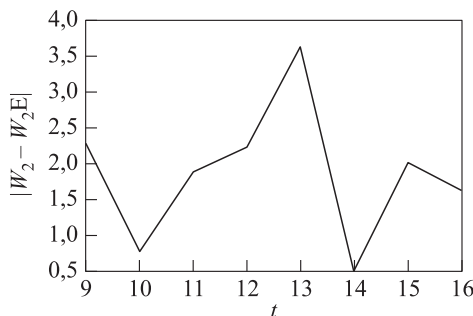
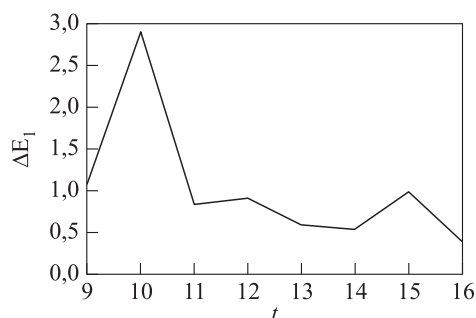
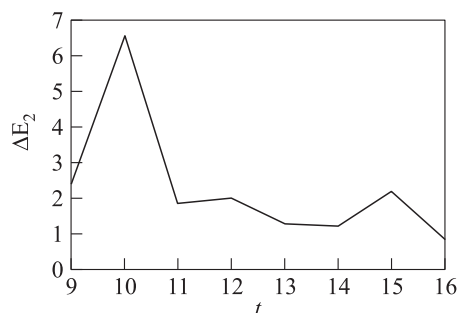


Рис. 5 График модуля ошибки $\Delta_2(t) = W_2(t) - W_2^*(t)$


 Рис. 6 График дисперсии ошибки $\Delta_1(t)$

 Рис. 7 График дисперсии ошибки $\Delta_2(t)$

Вычислительные эксперименты показали, что число обучающих примеров N_N можно брать равным параметру L — числу базисных функций. Увеличение числа примеров не привело к улучшению точности вычисления параметров оценки выходного сигнала. В данном примере $N_N = 16$. При $n \geq 80$ $|E(n+1) - E(n)| \leq 0,0001$. На рис. 2–7 выведены результаты вычислительных экспериментов при $n = 100$.

При изменении выходного сигнала $W_1(t)$ от -41 до 39 модуль абсолютной ошибки оценки выходного СтП $\Delta_1(t) = W_1(t) - W_1^*(t)$ не превышает $2,4$, а дисперсия ошибки D_1 изменяется от $0,4$ до $2,9$. При изменении выходного сигнала $W_2(t)$ от -61 до 60 модуль абсолютной ошибки оценки выходного СтП $\Delta_2(t) = W_2(t) - W_2^*(t)$ не превышает $3,7$, а дисперсия ошибки D_2 изменяется от $0,9$ до $6,6$.

5 Заключение

В работе описан метод приближенного моделирования БК-оптимальной оценки выходного СтП многомерной нестационарной линейной СтС, описываемой уравнениями В. С. Пугачёва для входного и выходного СтП. В основе метода лежит метод КР СтП и нейросетевые технологии. Предлагаемый метод позволяет построить оценку выходного СтП без нахождения условной плотности вероятности выходного СтП относительно наблюдаемого входного СтП. Входной СтП моделируется в виде совокупности СВ, которая подается на вход многослойной ВНС. Выбрана модель БК-оценки выходного СтП в виде линейной комбинации входных СВ с коэффициентами, заданными детерминированными координатными функциями. Координатные функции представлены в виде вейвлет-разложений по заданному ортонормированному базису вейвлетов с неизвестными коэффициентами. Для нахождения неизвестных коэффициентов ВЛР координатных функций разработана многослойная архитектура ВНС. Обучение ВНС осуществляется методом обратного распространения ошибки. Получены

формулы для математического ожидания, второго начального момента и ковариационной матрицы ошибки БК-оценки выходного СтП. В примере в качестве БК взят критерий минимума СКО оценки выходного СтП. На примере проиллюстрирована высокая точность предлагаемого метода.

Результаты допускают применение разработанного метода для решения задачи синтеза скалярных и векторных линейных СтС, оптимальных по функциональному БК.

Литература

1. Пугачёв В. С. Теория случайных функций и её применение к задачам автоматического управления. — М.: Физматгиз, 1962. 884 с.
2. Бакулин М. Г., Крейнделин В. Б., Григорьев В. А., Аксенов В. О., Щесняк А. С. Байесовское оценивание с последовательным отказом и учетом априорных знаний // Радиотехника и электроника, 2020. Т. 65. № 3. С. 257–266. doi: 10.31857/S0033849420030031. EDN: MVWLXS.
3. Ясинский С. А., Григорчук А. Н., Сукачёв В. Н., Добровольский С. Л. Применение байесовского принципа и метода максимального правдоподобия для обнаружения и различения сигналов // Труды ЦНИИС. Санкт-Петербургский филиал, 2022. Т. 1. № 13. С. 106–112. EDN: CGPLYM.
4. Синицын И. Н. Канонические представления случайных функций. Теория и применения. — 2-е изд. — М.: ТОРУС ПРЕСС, 2023. 816 с.
5. Sinitsyn I. N. Developing the theory of stochastic canonic expansions // Pattern Recognition Image Analysis, 2023. Vol. 33. Iss. 4. P. 862–887. doi: 10.1134/S1054661823040429. EDN: QOWFBU.
6. Бирюков И. Д. Совместный квазиоптимальный алгоритм обработки радиосигналов источников радиоизлучения авиационным средством радиотехнического наблюдения // Вестник РАЕН, 2024. Т. 24. № 3. С. 48–58. doi: 10.52531/1682-1696-2024-24-3-48-58. EDN: FVQSXJ.
7. Лютин В. И., Десятириков Ф. А., Беляев А. С., Лютина Е. В., Десятирикова Е. Р. Синтез алгоритма поиска заданного сегмента в последовательности данных конечной длины // Информационные технологии, 2024. Т. 30. № 7. С. 335–341. doi: 10.17587/it.30.335-341. EDN: OFJDPY.
8. 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.
9. 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.
10. 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.)

11. *Синицын И. Н., Синицын В. И., 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: YFHFJN.
12. *Синицын И. Н., Синицын В. И., Корепанов Э. Р., Конашенкова Т. Д.* Алгоритм моделирования векторного стохастического процесса посредством его канонического разложения на основе многослойной вейвлет-нейронной сети // Системы и средства информатики, 2025. Т. 35. № 2. С. 17–30. doi: 10.14357/08696527250202. EDN: TFDTXJ.
13. *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. doi: 10.31857/S0005231020110082. EDN: MZUQYN.
14. *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. EDN: GACWCC.
15. *Sinitsyn I., Sinitsyn V., Korepanov E., Konashenkova T.* Synthesis of nonlinear nonstationary stochastic systems by wavelet canonical expansions // Mathematics, 2023. Vol. 11. Iss. 9. Art. 2059. 18 p. doi: 10.3390/math11092059. EDN: LZQEDA.
16. *Синицын И. Н., Синицын В. И., Корепанов Э. Р., Конашенкова Т. Д.* Синтез оптимальных по функциональным байесовым критериям стохастических систем методом вейвлет канонических разложений // Системы высокой доступности, 2023. Т. 19. № 4. С. 37–50. doi: 10.18127/j20729472-202304-03. EDN: WYQSQT.
17. *Синицын И. Н., Синицын В. И., Корепанов Э. Р., Конашенкова Т. Д.* Байесов синтез многомерной стохастической системы высокой доступности методом вейвлет канонических разложений // Системы высокой доступности, 2024. Т. 20. № 1. С. 55–66. doi: 10.18127/j20729472-202401-06. EDN: OMIDZW.
18. *Синицын И. Н., Синицын В. И., Корепанов Э. Р., Конашенкова Т. Д.* Нейросетевой синтез оптимальной линейной стохастической системы по критерию минимума среднеквадратичной ошибки // Системы и средства информатики, 2024. Т. 34. № 3. С. 87–108. doi: 10.14357/08696527240307. EDN: FVQWBN.
19. *Синицын И. Н., Синицын В. И., Корепанов Э. Р., Конашенкова Т. Д.* Нейросетевой алгоритм синтеза оптимальной линейной стохастической системы высокой доступности по энергетическому критерию // Системы высокой доступности, 2024. Т. 20. № 4. С. 5–14. doi: 10.18127/j20729472-202404-01. EDN: PRWOPG.
20. *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. Limited, 1999. 842 p.)
21. *Терехов С. А.* Вейвлеты и нейронные сети // Научная сессия МИФИ-2001: III Всерос. научн.-техн. конф. «Нейроинформатика-2001»: Лекции по нейроинформатике. — М.: МИФИ, 2001. С. 142–181.
22. *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 26.04.2025

Принята к публикации 15.09.2025

NEURAL NETWORKS BAYES SYNTHESIS OF MULTIDIMENSIONAL LINEAR STOCHASTIC SYSTEM

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 119333, Russian Federation

Abstract: New method of optimal synthesis of multidimensional linear stochastic system on Bayes criterion (BC) based on quantitative estimate of output stochastic process (StP). Stochastic system is described by Pugachev equation for input and output StP. Input StP contains useful signal and random additive multidimensional normal noise with zero mathematical expectation and known matrix of covariance functions. Random noise does not depend upon vector of random parameters of useful signal. Distribution of random vector parameters is known. Model of BC optimal estimate of output StP is constructed on the basis of wavelet canonical expansion (CE) of random noise and wavelet CE of input StP. For finding unknown parameters in optimal output StP estimate, the architecture of multilayer wavelet neural networks (WNN) is developed. The WNN training algorithm for inverse error prevalence by method steepest descent is used. Formulae for mathematical expectation, second initial probabilistic moment, and error covariance matrix of BC optimal estimate of output StP is obtained. Numerical example illustrates CE WNN preference with wavelet CE.

Keywords: Bayes criterion; canonical expansion; covariance function; covariance matrix; modeling; loss function; optimal estimate; stochastic process; stochastic system; wavelet; wavelet-neural network

DOI: 10.14357/08696527250303

EDN: SUNQAL

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. Bakulin, M. G., V. B. Kreyndelin, V. A. Grigoriev, V. O. Aksenov, and A. S. Schesnyak. 2020. Bayesian estimation with successive rejection and utilization of a priori knowledge. *J. Commun. Technol. El.* 65(3):255–264. doi: 10.1134/S1064226920030031. EDN: FUEROQ.
3. Yasinskii, S. A., A. N. Grigorchuk, V. N. Sykashew, and S. L. Dobrovolsky. 2022. *Primeneniye bayesovskogo printsipa i metoda maksimal'nogo pravdopodobiya dlya obnaruzheniya i razlicheniya signalov* [Application of the Bayesian principle and the

- maximum likelihood method for detecting and distinguishing signals]. *Trudy TsNIIS. Sankt-Peterburgskiy filial* [Central Research Institute of Communications. St. Petersburg Branch] 1(13):106–112. EDN: CGPLYM.
4. 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.
 5. Sinitsyn, I. N. 2023. Developing the theory of stochastic canonic expansions and its applications. *Pattern Recognition Image Analysis* 33(4):862–887. doi: 10.1134/S1054661823040429. EDN: QOWFBU.
 6. Biryukov, I. D. 2024. Sovmestnyy kvazioptimal'nyy algoritm obrabotki radiosignalov istochnikov radioizlucheniya aviatsionnym sredstvom radiotekhnicheskogo nablyudeniya [Joint quasi-optimal algorithm for processing radio signals of radio emission sources by aviation radio surveillance facilities]. *Vestnik RAEN* [Bulletin of the Russian Academy of Natural Sciences] 24(3):48–58. doi: 10.52531/1682-1696-2024-24-3-48-58. EDN: FVQSXJ.
 7. Lutin, V. I., F. A. Desyatirikov, A. S. Belyaev, E. V. Lutina, and E. N. Desyatirikov. 2024. Sintez algoritma poiska zadannogo segmenta v posledovatel'nosti dannykh konechnoy dliny [Synthesis of an algorithm for searching a given segment in a data sequence of finite length]. *Informatsionnye tekhnologii* [Information Technologies] 30(7):335–341. doi: 10.17587/it.30.335-341. EDN: OFJDPY.
 8. 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.
 9. 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.
 10. Daubechies, I. 1992. *Ten lectures on wavelets*. Philadelphia, PA: Society for Industrial and Applied Mathematics. 352 p.
 11. Sinitsyn, I. N., V. I. Sinitsyn, E. R. Korepanov, and T. D. Konashenkova. 2024. Modelirovanie nestatsionarnogo stokhasticheskogo protsessa posredstvom ego kanonicheskogo razlozheniya na osnove veyvlet-neyronnoy seti [Nonstationary stochastic process modeling by canonical expansion and wavelet neural network]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 34(2):21–39. doi: 10.14357/08696527240202. EDN: YFHFJN.
 12. Sinitsyn, I. N., V. I. Sinitsyn, E. R. Korepanov, and T. D. Konashenkova. 2025. Algoritmi modelirovaniya vektornogo stokhasticheskogo protsessa posredstvom ego kanonicheskogo razlozheniya na osnove mnogosloynnoy veyvlet-neyronnoy seti [Modeling algorithms for vector stochastic process by canonical expansions based on multilayer wavelet neural network]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 35(2):17–30. doi: 10.14357/08696527250202. EDN: TFDTXJ.
 13. 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: EOJMH D.
14. 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. EDN: GACWCC.
 15. Sinitsyn, I., V. Sinitsyn, E. Korepanov, and T. Konashenkova. 2023. Synthesis of non-linear nonstationary stochastic systems by wavelet canonical expansions. *Mathematics* 11(9):2059. 18 p. doi: 10.3390/math11092059. EDN: LZQEDA.
 16. Sinitsyn, I. N., V. I. Sinitsyn, E. R. Korepanov, and T. D. Konashenkova. 2023. Sintez optimal'nykh po funktsional'nykh beyesovym kriteriyam stokhasticheskikh sistem metodom veyvlet kanonicheskikh razlozheniy [Methodological support of functional Bayes synthesis of stochastic systems based on wavelet canonical expansions]. *Sistemy vysokoy dostupnosti* [Highly Available Systems] 19(4):37–50. doi: 10.18127/j20729472-202304-03. EDN: WYQSQT.
 17. Sinitsyn, I. N., V. I. Sinitsyn, E. R. Korepanov, and T. D. Konashenkova. 2024. Beyesov sintez mnogomernoy stokhasticheskoy sistemy vysokoy dostupnosti metodom veyvlet kanonicheskikh razlozheniy [Bayes synthesis of multidimensional stochastic system with high availability by wavelet canonical expansions]. *Sistemy vysokoy dostupnosti* [Highly Available Systems] 20(1):55–66. doi: 10.18127/j20729472-202401-06. EDN: OMIDZW.
 18. Sinitsyn, I. N., V. I. Sinitsyn, E. R. Korepanov, and T. D. Konashenkova. 2024. Neyrosetevoy sintez optimal'noy lineynoy stokhasticheskoy sistemy po kriteriyu minimuma srednekvadrachnoy oshibki [Neural network synthesis of an optimal linear stochastic system according to the criterion of minimum mean square error]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 34(3):87–108. doi: 10.14357/08696527240307. EDN: FVQWBN.
 19. Sinitsyn, I. N., V. I. Sinitsyn, E. R. Korepanov, and T. D. Konashenkova. 2024. Neyrosetevoy algoritm sinteza optimal'noy lineynoy stokhasticheskoy sistemy vysokoy dostupnosti po energeticheskomu kriteriyu [Neural network algorithm for the synthesis of an optimal linear stochastic system with high availability according to the energy criterion]. *Sistemy vysokoy dostupnosti* [Highly Available Systems] 20(4):5–14. doi: 10.18127/j20729472-202404-01. EDN: PRWOPG.
 20. Haykin, S. 1999. *Neural networks. A comprehensive foundation*. 2nd ed. Prentice-Hall of India Pvt. Ltd. 842 p.
 21. Terekhov, S. A. 2001. Veyvlety i neyronnye seti [Wavelets and neural networks]. *Nauchnaya sessiya MIFI-2001: III Vseros. nauchn.-tekhn. konf. "Neuroinformatika-2001": lektzii po neuroinformatike* [Scientific session MEPhI-2001: 3rd All-Russian Scientific and Technical Conference "Neuroinformatics-2001." Lectures on neuroinformatics]. Moscow: MIFI. 142–181.
 22. Veitch, D. 2005. Wavelet neural networks and their application in the study of dynamical system. *Networks* 1(8):313–320.

Received April 26, 2025

Accepted September 15, 2025

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

ТИПОВЫЕ МОДЕЛИ СИСТЕМЫ НАБЛЮДЕНИЯ ДЛЯ ЗАДАЧ ОТСЛЕЖИВАНИЯ И НАВИГАЦИИ БЕСПИЛОТНЫХ ДВИЖУЩИХСЯ ОБЪЕКТОВ*

И. В. Урюпин¹

Аннотация: Решение навигационных задач посредством фильтрации состояния стохастической динамической системы по косвенным наблюдениям основывается на двух равных по важности моделях. Первая — это модель движения объекта, положение которого требуется оценить. Вторая — это модель наблюдений, особенности которой диктует разнообразие применяемых измерительных средств. В статье дано систематическое изложение вариантов второй модели. Система наблюдений формируется в рамках типового некооперативного сценария, когда за объектом ведет наблюдение независимый комплекс внешних измерителей. Измеряемые в этом сценарии физические величины — это углы направлений (азимут, или пеленг, и возвышение) и дальность. Но воздействие на результаты измерений внешних неконтролируемых факторов, формируемых средой, в которой происходит движение-наблюдение, может быть весьма разнообразным. В статье предлагаются несколько типовых вариантов описания такого воздействия. Первый, стандартный, предполагает простые аддитивные ошибки наблюдений. Во втором эта модель усложняется предположением о коррелированности ошибок измерений с текущим состоянием движущегося объекта. Придает этому варианту физический смысл измерение дальности. В обоих случаях предполагается устойчивое (без сбоев) функционирование комплекса наблюдения. Третий вариант основан на известной модели переключающихся каналов наблюдения и позволяет гибко моделировать выходы из строя части измерителей как кратковременные, так и длительные. Наконец, финальный вариант учитывает особенности использования сонаров — акустических сенсоров, т. е. движение в водной среде. Для иллюстрации разницы в рассмотренных моделях приведены расчеты с использованием оценки положения по прямым измерениям, на которую не влияет модель движения.

Ключевые слова: навигация; отслеживание цели; беспилотные аппараты; стохастическая динамическая система наблюдения; аддитивные возмущения; коррелированные шумы; марковские цепи; акустические сонары

DOI: 10.14357/08696527250304

EDN: BZVNER

*Работа выполнена 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, uryupin93@yandex.ru

1 Введение

Традиционно задачам моделирования поведения различных систем уделяется большое внимание [1–4]. Примером таких систем может служить поведение перемещающихся в пространстве объектов. Для оценки поведения таких объектов разрабатываются системы наблюдения, позволяющие решать задачи отслеживания, навигации и позиционирования.

Представление различных навигационных задач в виде задачи стохастической фильтрации — самый типичный способ их решения. Продолжая обсуждение универсальных моделей стохастических динамических систем наблюдения, начатое в [5] для моделей состояния, в данной статье сфокусируемся на моделях системы наблюдения. При этом имеются в виду те же приложения, т. е. область автономных движущихся объектов. Как и для моделей движения в [5], в данной статье источниками для математического моделирования послужили в основном некооперативные сценарии отслеживания и навигации беспилотных летательных аппаратов [6], автономных подводных аппаратов [7] и беспилотных автомобилей [8]. Под некооперативностью понимается наблюдение за движущимся объектом внешними по отношению к нему измерительными комплексами. Типичный пример такого комплекса — радиолокационная станция (РЛС), чья история насчитывает уже много десятилетий, но использование продолжает оставаться актуальным [9, 10]. Ничто не мешает сейчас использовать РЛС или аналогичные комплексы, размещая их на борту движущегося объекта. Поэтому надо пояснить, что акцент на некооперативное использование сделан с тем, чтобы ограничить физически измеряемые величины углами направления (азимут, или пеленг, и возвышение) и дальностью. Нюансы, которые дают другие измерительные методы, например датчики Доплера или гироскопы, остаются за кооперативным сценарием. Такие устройства способны внести в навигационные задачи совершенно новое качество, что, например, прекрасно демонстрируют задачи позиционирования, решаемые с помощью доплеровских сенсоров, размещенных на подводных аппаратах [11–13]. Предлагаемые в статье модели исходят из самых простых измерений, которые помимо РЛС формируют глобальные навигационные системы [14, 15] или акустические сонары [16, 17].

Такие же измерения могут формироваться «на борту» инерциальными датчиками как результат интегрирования ускорения-скорости. При этом будет решаться задача позиционирования. Это усложнит модели, но в перспективе даст значительный прирост точности [18] и сохранит актуальность предлагаемых моделей.

Ограничившись углами и дальностью, в данной статье более детально обсудим типовые уравнения с аддитивным шумом. Основной вопрос будет вокруг того, как лучше линеаризовать такие измерения для целей фильтрации. Второй аспект в предлагаемых моделях касается вариантов более адекватного моделирования шумов в измерениях, в частности их корреляции с состоянием, и сбоев в каналах наблюдений. И последний аспект — это учет принципиальной особенности сонаров — наличие временной задержки при поступлении измерений [19–22].

2 Измерения с аддитивным шумом. Линейные псевдонаблюдения

Предваряя формирование общих моделей систем наблюдения, обсудим три варианта конкретных измерений, на примере которых выполняется предварительная подготовка данных для фильтрации, известных как псевдонаблюдения. Уравнения, записанные в данном разделе для измерений углов направлений и дальности, преобразованные в форму линейных псевдонаблюдений, в следующем разделе используются в динамических моделях.

Линеаризация — самый распространенный способ выполнить предварительную подготовку к фильтрации, упростить модель так, чтобы затем применять оптимальные методы анализа и синтеза для линейных систем. Однако вне зависимости от того, что именно линеаризуется и какие точки выбираются в качестве опорных, такой простой метод, как правило, оказывается и самым грубым. Одним из немногих удачных вариантов линеаризации, сохранившим актуальность, остается метод линейных псевдонаблюдений. Впервые идея этого метода изложена в работе [23], а всплеск внимания в современных приложениях обеспечила работа [24] и инспирированные ею исследования, начатые в [25].

Применим этот метод к угловым измерениям (азимуту, или пеленгу, и углу возвышения) и дальности с некоторыми усовершенствованиями.

Пусть автономный аппарат ($\mathcal{A}$ — apparatus) имеет координаты $(X_{\mathcal{A}}, Y_{\mathcal{A}}, Z_{\mathcal{A}})$ в системе координат $Oxyz$, связанной с землей (z — высота). Измеритель ($\mathcal{M}$ — meter) имеет координаты $(X_{\mathcal{M}}, Y_{\mathcal{M}}, Z_{\mathcal{M}})$ и выполняет измерения азимута, угла возвышения и дальности в направлении $\overrightarrow{\mathcal{M}\mathcal{A}}$.

Азимут φ . Типовое измерение

$$y_{\varphi} = \varphi + v_{\varphi} = \arctan \left(\frac{Y_{\mathcal{A}} - Y_{\mathcal{M}}}{X_{\mathcal{A}} - X_{\mathcal{M}}} \right) v_{\varphi} \quad (1)$$

азимута содержит аддитивную ошибку — случайную величину v_{φ} с нулевым математическим ожиданием и известной дисперсией $D\{v_{\varphi}\} = \sigma_{\varphi}^2$. Сформируем из этого измерения синус и косинус, ограничившись линейной частью разложения Тейлора для малых v_{φ} :

$$\begin{aligned} y_{\varphi}^{\sin} &= \sin(y_{\varphi}) = \sin(\varphi + v_{\varphi}) \approx \sin(\varphi) + \cos(\varphi)v_{\varphi}; \\ y_{\varphi}^{\cos} &= \cos(y_{\varphi}) = \cos(\varphi + v_{\varphi}) \approx \cos(\varphi) - \sin(\varphi)v_{\varphi}. \end{aligned}$$

Поскольку $E\{(\cos(\varphi))^2\} \leq 1$ и $E\{(\sin(\varphi))^2\} \leq 1$, то при вполне общих условиях аппроксимацию можно упростить, записав

$$\begin{aligned} y_{\varphi}^{\sin} &\approx \sin(\varphi) + v_1; \\ y_{\varphi}^{\cos} &\approx \cos(\varphi) + v_2, \end{aligned}$$

где v_1 и v_2 — независимые случайные величины, $E\{v_1\} = E\{v_2\} = 0$ и $D\{v_1\} = D\{v_2\} = \sigma_\varphi^2$. Тогда получаем:

$$\begin{aligned}\tan(\varphi) &= \frac{Y_{\mathcal{A}} - Y_{\mathcal{M}}}{X_{\mathcal{A}} - X_{\mathcal{M}}} \approx \frac{y_\varphi^{\sin} - v_1}{y_\varphi^{\cos} - v_2}; \\ (Y_{\mathcal{A}} - Y_{\mathcal{M}}) y_\varphi^{\cos} - (X_{\mathcal{A}} - X_{\mathcal{M}}) y_\varphi^{\sin} &\approx (Y_{\mathcal{A}} - Y_{\mathcal{M}}) v_2 - (X_{\mathcal{A}} - X_{\mathcal{M}}) v_1; \\ -Y_{\mathcal{M}} y_\varphi^{\cos} + X_{\mathcal{M}} y_\varphi^{\sin} &\approx (y_\varphi^{\sin}, -y_\varphi^{\cos}) \begin{pmatrix} X_{\mathcal{A}} \\ Y_{\mathcal{A}} \end{pmatrix} + (Y_{\mathcal{A}} - Y_{\mathcal{M}}) v_2 - (X_{\mathcal{A}} - X_{\mathcal{M}}) v_1.\end{aligned}$$

Это и есть псевдонаблюдения, названные линейными, поскольку дают измерения линейной комбинации оцениваемых координат на фоне аддитивного шума.

Окончательно измерение азимута $y_\varphi = \varphi + v_\varphi$ может быть аппроксимировано псевдонаблюдением

$$Y_\varphi = -Y_{\mathcal{M}} y_\varphi^{\cos} + X_{\mathcal{M}} y_\varphi^{\sin}, \quad (2)$$

где $y_\varphi^{\sin} = \sin(y_\varphi)$; $y_\varphi^{\cos} = \cos(y_\varphi)$.

Угол возвышения λ . Измерение

$$y_\lambda = \lambda + v_\lambda = \arctan \left(\frac{Z_{\mathcal{A}} - Z_{\mathcal{M}}}{|X_{\mathcal{A}} - X_{\mathcal{M}}|} \right) \cos(\varphi) + v_\lambda \quad (3)$$

с аддитивной случайной ошибкой v_λ с нулевым средним и дисперсией $D\{v_\lambda\} = \sigma_\lambda^2$ преобразуется аналогично азимуту, исходя из малости ошибки v_λ :

$$\begin{aligned}y_\lambda^{\sin} &= \sin(y_\lambda) \approx \sin(\lambda) + \cos(\lambda) v_\lambda \approx \sin(\lambda) + v_3; \\ y_\lambda^{\cos} &= \cos(y_\lambda) \approx \cos(\lambda) - \sin(\lambda) v_\lambda \approx \cos(\lambda) + v_4\end{aligned}$$

с независимыми v_3 и v_4 , $E\{v_3\} = E\{v_4\} = 0$ и $D\{v_3\} = D\{v_4\} = \sigma_\lambda^2$. Для $\tan(\lambda)$ получаем

$$\tan(\lambda) = \frac{Z_{\mathcal{A}} - Z_{\mathcal{M}}}{|X_{\mathcal{A}} - X_{\mathcal{M}}|} \cos(\varphi) \approx \frac{y_\lambda^{\sin} - v_3}{y_\lambda^{\cos} - v_4}.$$

Рассматривая для простоты случай $X_{\mathcal{A}} > X_{\mathcal{M}}$ и заменяя $\cos(\varphi)$ на $y_\varphi^{\cos} - v_2$, выполняем аналогичные проделанным выше преобразования:

$$\begin{aligned}y_\varphi^{\cos} y_\lambda^{\cos} (Z_{\mathcal{A}} - Z_{\mathcal{M}}) - y_\lambda^{\sin} (X_{\mathcal{A}} - X_{\mathcal{M}}) &\approx (Z_{\mathcal{A}} - Z_{\mathcal{M}}) y_\lambda^{\cos} v_2 - \\ &- (X_{\mathcal{A}} - X_{\mathcal{M}}) v_3 + (Z_{\mathcal{A}} - Z_{\mathcal{M}}) y_\varphi^{\cos} v_4 - (Z_{\mathcal{A}} - Z_{\mathcal{M}}) v_2 v_4.\end{aligned}$$

Поскольку все v_i предполагались независимыми и центрированными, то последним слагаемым также можно пренебречь и записать окончательно

$$-y_\varphi^{\cos} y_\lambda^{\cos} Z_{\mathcal{M}} + y_\lambda^{\sin} X_{\mathcal{M}} \approx -y_\varphi^{\cos} y_\lambda^{\cos} Z_{\mathcal{A}} + y_\lambda^{\sin} X_{\mathcal{A}} + \\ + (Z_{\mathcal{A}} - Z_{\mathcal{M}}) y_\lambda^{\cos} v_2 - (X_{\mathcal{A}} - X_{\mathcal{M}}) v_3 + (Z_{\mathcal{A}} - Z_{\mathcal{M}}) y_\varphi^{\cos} v_4.$$

Таким образом, измерение угла возвышения $y_\lambda = \lambda + v_\lambda$ аппроксимируется псевдонаблюдением

$$Y_\lambda = -y_\varphi^{\cos} y_\lambda^{\cos} Z_{\mathcal{M}} + y_\lambda^{\sin} X_{\mathcal{M}}, \quad (4)$$

где $y_\lambda^{\sin} = \sin(y_\lambda)$; $y_\lambda^{\cos} = \cos(y_\lambda)$; $y_\varphi^{\cos} = \cos(y_\varphi)$.

Дальность r . Измерение

$$y_r = r + v_r = \frac{Z_{\mathcal{A}} - Z_{\mathcal{M}}}{\sin(\lambda)} + v_5 \quad (5)$$

с аддитивной и независимой от предыдущих v_i ошибкой $v_r = v_5$, $E\{v_5\} = 0$, $D\{v_5\} = \sigma_r^2$, преобразуется с помощью аппроксимации угла возвышения $\sin(\lambda) \approx y_\lambda^{\sin} - v_3$:

$$r = y_r - v_5 \approx \frac{Z_{\mathcal{A}} - Z_{\mathcal{M}}}{y_\lambda^{\sin} - v_3}.$$

Поступая аналогично преобразованиям углов, получаем

$$Z_{\mathcal{A}} - Z_{\mathcal{M}} - y_r y_\lambda^{\sin} \approx -y_r v_3 - y_\lambda^{\sin} v_5 + v_3 v_5,$$

где последнее слагаемое по соображениям малости также можно опустить, записав окончательно

$$Z_{\mathcal{M}} + y_r y_\lambda^{\sin} \approx Z_{\mathcal{A}} + y_r v_3 + y_\lambda^{\sin} v_5.$$

Итак, измерение дальности $y_r = d + v_5$ аппроксимируется псевдонаблюдением

$$Y_r = Z_{\mathcal{M}} + y_r y_\lambda^{\sin}, \quad (6)$$

где $y_\lambda^{\sin} = \sin(y_\lambda)$.

Теперь в модели системы наблюдения можно использовать либо исходные «точные» соотношения (1), (3), (5), представленные вектором $y = (y_\varphi, y_\lambda, y_r)'$, либо аппроксимацию — вектор $(Y_\varphi, Y_\lambda, Y_r)'$, объединяющий уравнения (2), (4) и (6):

$$y = \begin{pmatrix} \arctan\left(\frac{Y_{\mathcal{A}} - Y_{\mathcal{M}}}{X_{\mathcal{A}} - X_{\mathcal{M}}}\right) \\ \arctan\left(\frac{Z_{\mathcal{A}} - Z_{\mathcal{M}}}{|X_{\mathcal{A}} - X_{\mathcal{M}}|}\right) \cos(\varphi) \\ \frac{Z_{\mathcal{A}} - Z_{\mathcal{M}}}{\sin(\lambda)} \end{pmatrix} + V, \quad \varphi = \arctan\left(\frac{Y_{\mathcal{A}} - Y_{\mathcal{M}}}{X_{\mathcal{A}} - X_{\mathcal{M}}}\right), \quad \lambda = \arctan\left(\frac{Z_{\mathcal{A}} - Z_{\mathcal{M}}}{|X_{\mathcal{A}} - X_{\mathcal{M}}|}\right), \quad (7)$$

$X = (X_{\mathcal{A}}, Y_{\mathcal{A}}, Z_{\mathcal{A}})'$, $V = (v_{\varphi}, v_2, v_r)'$, или

$$Y = \begin{pmatrix} y_{\varphi}^{\sin} & -y_{\varphi}^{\cos} & 0 \\ y_{\lambda}^{\sin} & 0 & -y_{\varphi}^{\cos} y_{\lambda}^{\cos} \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} X + \begin{pmatrix} X_{\mathcal{M}} - X_{\mathcal{A}} & Y_{\mathcal{A}} - Y_{\mathcal{M}} & 0 \\ 0 & (Z_{\mathcal{A}} - Z_{\mathcal{M}}) y_{\lambda}^{\cos} & X_{\mathcal{M}} - X_{\mathcal{A}} \\ 0 & 0 & y_r \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ (Z_{\mathcal{A}} - Z_{\mathcal{M}}) y_{\varphi}^{\cos} & 0 \\ 0 & 0 & y_{\lambda}^{\sin} \end{pmatrix} V, \quad (8)$$

$X = (X_{\mathcal{A}}, Y_{\mathcal{A}}, Z_{\mathcal{A}})'$, $V = (v_1, v_2, v_3, v_4, v_5)'$, через «'» обозначена операция транспонирования.

3 Общая модель системы наблюдения

Любая из навигационных задач, для которых здесь формируются модели, имеет три компоненты: модель движения (некоторые варианты предложены в [5]), модель измерительного комплекса и алгоритм оценивания. Задача определения положения движущегося объекта формулируется как задача оценивания состояния $X_t \in \mathbb{R}^{p_x}$ дискретной стохастической системы по наблюдениям $y_t \in \mathbb{R}^{q_y}$ (или их аппроксимации $Y_t \in \mathbb{R}^{q_Y}$) вида

$$\left. \begin{aligned} X_t &= \Phi_t^{(1)} X_{t-1} + \Phi_t^{(2)}(X_{t-1}) W_t; \\ y_t &= \psi_t^{(1)}(X_t) + \psi_t^{(2)}(X_t) v_t; \\ Y_t &= \Psi_t^{(1)}(y_t) X_t + \Psi_t^{(2)}(X_t, y_t) V_t, \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

где $t = \overline{1, X_0 = \eta}$.

В предыдущем разделе были заранее описаны варианты формирования Y_t . Итоговая формула (8) прежде всего подчеркивает их линейную форму наличием слагаемого $\Psi_t^{(1)}(y_t) X_t$. Типовые варианты функций $\Phi_t^{(1)}$ и $\Phi_t^{(2)}$ обсуждаются

в статье [5]. Содержание данной статьи — это варианты функций $\psi_t^{(1)}, \psi_t^{(2)}(X_t)$, $\Psi_t^{(1)}$ и $\Psi_t^{(2)}$.

Модель (9) означает, что выполнена дискретизация уравнений движения: дискретным моментам $t = 0, 1, 2 \dots$ отвечают моменты времени с шагом δ [с]: $0, \delta, 2\delta, \dots, t\delta, \dots$. В каждый момент дискретного времени t наблюдателем выполняются измерения. Если измерительный комплекс один, то $q_y = 3$ и наблюдателем формируется вектор $y_t = (y_{\varphi_t}, y_{\lambda_t}, y_{r_t})'$, т. е. измеряются азимут, угол возвышения и дальность до цели, а функции $\psi_t^{(1)}$ и $\psi_t^{(2)}$ определяет (7). Нелинейные измерения могут аппроксимироваться псевдонаблюдениями, т. е. вектором $Y_t = (Y_{\varphi_t}, Y_{\lambda_t}, Y_{r_t})'$, рассчитываемым в соответствии с (2), (8) и (6). В этом случае функции $\Psi_t^{(1)}$ и $\Psi_t^{(2)}$ определяет (8). Заметим, что в рассматриваемых вариантах измерений всегда $q_Y = q_y$, хотя в общем случае размерность псевдонаблюдений может отличаться.

Если в модели объединены q измерительных комплексов, то вектор наблюдений y_t в (9) комбинирует поступающие от них измерения углов и дальности, т. е. $y_t = (y_{\varphi_t}^{(1)}, y_{\lambda_t}^{(1)}, y_{r_t}^{(1)}, \dots, y_{\varphi_t}^{(q)}, y_{\lambda_t}^{(q)}, y_{r_t}^{(q)})'$. При этом получается, что $q_y = 3q$. Таким образом, система наблюдения имеет вид:

$$\left. \begin{aligned} X_t &= \Phi_t^{(1)} X_{t-1} + \Phi_t^{(2)} (X_{t-1}) W_t; \\ y_t^{(i)} &= \psi_t^{(i,1)}(X_t) + \psi_t^{(i,2)}(X_t) v_t^{(i)}; \\ Y_t^{(i)} &= \Psi_t^{(i,1)}(y_t^{(i)}) X_t + \Psi_t^{(i,2)}(X_t, y_t^{(i)}) V_t^{(i)}, \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

где $t = \overline{1, X_0 = \eta}$; $i = \overline{1, q}$.

Чтобы (10) записать в канонической форме (9), нужно обозначить:

- $y_t = ((y_t^{(1)})', \dots, (y_t^{(q)})')'$ — вектор наблюдений, составленный из q групп измерений, в каждой группе $y_t^{(i)} = (y_{\varphi_t}^{(i)}, y_{\lambda_t}^{(i)}, y_{r_t}^{(i)})'$ есть углы φ , λ и дальность r для i -го измерительного комплекса, $v_t^{(i)}$ — вектор ошибок измерений в этой группе;
- $Y_t = ((Y_t^{(1)})', \dots, (Y_t^{(q)})')'$ — вектор псевдонаблюдений, составленный из q групп измерений, каждая группа $Y_t^{(i)} = (Y_t^{(i)}, Y_t^{(i)}, Y_t^{(i)})'$ отвечает соответствующей группе $y_t^{(i)}$, $V_t^{(i)}$ — вектор ошибок измерений в этой группе.

Вектор-функции $\psi_t^{(i,1)}$ и матрицы $\psi_t^{(i,2)}$, $\Psi_t^{(i,1)}$ и $\Psi_t^{(i,2)}$, $i = \overline{1, q}$, определяются для каждой группы наблюдений-псевдонаблюдений, их существование означает независимость наблюдателя (измерительного комплекса), формирующего наблюдения каждой группы, т. е.

$$\psi_t^{(1)} = \left(\left(\psi_t^{(1,1)} \right)', \dots, \left(\psi_t^{(q,1)} \right)' \right)'; \quad \psi_t^{(2)} = \text{diag} \left(\psi_t^{(1,2)}, \dots, \psi_t^{(q,2)} \right);$$

$$\Psi_t^{(1)} = \begin{pmatrix} \Psi_t^{(1,1)} \\ \vdots \\ \Psi_1^{(q,1)} \end{pmatrix}; \quad \Psi_t^{(2)} = \text{diag} \left(\Psi_t^{(1,2)}, \dots, \Psi_t^{(q,2)} \right).$$

4 Измерения, зависящие от состояния

Ковариации ошибок измерений и псевдонаблюдений в модели (10) состоят из блоков вида

$$\text{cov} \left(v_t^{(i)}, v_t^{(i)} \right) = \text{diag} \left\{ \sigma_\varphi^2, \sigma_\lambda^2, \sigma_r^2 \right\};$$

$$\text{cov} \left(V_t^{(i)}, V_t^{(i)} \right) = \text{diag} \left\{ \sigma_\varphi^2, \sigma_\varphi^2, \sigma_\lambda^2, \sigma_\lambda^2, \sigma_r^2 \right\},$$

которые повторяются для каждого из q измерительных комплексов. Это отражает высказанные предположения о независимости каждого типа измерений и каждого измерительного комплекса, что означает отсутствие зависимости от X_t функции $\psi_t^{(2)}$. Это предположение не всегда может оказаться верным, и модель наблюдения потребует усовершенствования. Продемонстрировать такую ситуацию можно на примере измерения дальности y_r , предположив, что $\sigma_r = \sigma_r(r)$. Действительно, будем исходить из следующих соображений. Считать, что при измерении углов ошибка не зависит от текущего положения $\mathcal{A}$, возможно, так как угол всегда измеряется как величина в диапазоне $[0, 2\pi]$, т. е. хотя бы абсолютное значение изменяемой характеристики не меняет масштаба. Ожидать, что дальность будет измеряться с одной и той же ошибкой как для объекта, находящегося рядом (допустим в 100 м), так и для объекта удаленного (в нескольких километрах) уже не следует. Можно сослаться на некоторое усредненное значение, установленное практически, но более правильным представляется измерять ошибку в процентах, т. е. полагать $\sigma_r = \sigma_r(r) = \varepsilon_r r$ для некоторого $0 < \varepsilon_r \ll 1$. При этом никаких изменений в рассуждения о модели псевдонаблюдений вносить не требуется, единственное дополнение — это

$$\psi_t^{(i,2)}(X_t) = \text{diag} \left\{ 1, 1, \varepsilon_r^i r \right\};$$

$$\text{cov} \left(v_t^{(i)}, v_t^{(i)} \right) = \text{diag} \left\{ \sigma_\varphi^2, \sigma_\lambda^2, 1 \right\};$$

$$\text{cov} \left(V_t^{(i)}, V_t^{(i)} \right) = \text{diag} \left\{ \sigma_\varphi^2, \sigma_\varphi^2, \sigma_\lambda^2, \sigma_\lambda^2, 1 \right\}.$$

Такая модель дает возможность интерпретировать качественные оценки дальностей. Например, говоря о «неточных» измерениях дальности, можно положить $\varepsilon_r = 0,1$. Тогда дальность до $\mathcal{A}$, находящегося на расстоянии 10 км, будет характеризоваться ошибкой порядка 1 км, а на расстоянии 100 м — порядка 10 м.

И это действительно плохие измерения. Для точных измерений можно положить $\varepsilon_r = 0,01$. Тогда дальность до $\mathcal{A}$, находящегося на расстоянии 10 км, будет характеризоваться ошибкой порядка 100 м, а на расстоянии 100 м — порядка 1 м.

5 Сбой измерительного комплекса

Выход из строя измерительной аппаратуры — типичная ситуация. Не менее типичны формы влияния сбоев измерителей на результаты наблюдений. В навигации таковыми можно считать формирование измерений с увеличенной ошибкой (выброс) или полный выход из строя измерительного комплекса. Хорошей моделью для таких ситуаций служат давно известные модели систем с переключающимися каналами наблюдения [26, 27].

Процесс сбоев измерительного комплекса описывается марковской цепью Q_t , $t = 1, 2, \dots$, $Q_0 = \theta$. Удобно считать, что

$$Q_t = (Q_{\varphi_t}, Q_{\lambda_t}, Q_{r_t}, Q_{\varphi_t}^v, Q_{\lambda_t}^v, Q_{r_t}^v)' \in \mathbb{R}^6,$$

имея в виду, что элемент Q_{φ_t} отвечает за азимут, Q_{λ_t} — за угол возвышения, Q_{r_t} — за дальность, элементы $Q_{\varphi_t}^v$, $Q_{\lambda_t}^v$ и $Q_{r_t}^v$ — за соответствующие ошибки измерения. Начальное состояние цепи $\theta = (1, 1, 1, 1, 1, 1)'$ соответствует нормальной работе измерительного комплекса, состояние $Q_t = (0, 0, 0, 0, 0, 0)'$ означает полный выход из строя, состояние $Q_t = (1, 1, 1, \Sigma_{\varphi}, \Sigma_{\lambda}, \Sigma_r)'$ означает, что ошибки измерений вместо дисперсий σ_{φ}^2 , σ_{λ}^2 и σ_r^2 имеют дисперсии $\Sigma_{\varphi}^2 \sigma_{\varphi}^2$, $\Sigma_{\lambda}^2 \sigma_{\lambda}^2$ и $\Sigma_r^2 \sigma_r^2$, т. е. порядок ошибки возрастает кратно с коэффициентами Σ_{φ} , Σ_{λ} и Σ_r .

Такую цепь можно предполагать однородной, в матрице переходных вероятностей $\Lambda_t = \Lambda \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ ненулевыми остается только часть элементов. Во-первых, это диагональные элементы, имеющие смысл вероятности сохранения текущего состояния ($\Lambda_{11}, \Lambda_{22}, \Lambda_{33}$), возможно $\Lambda_{33} = 0$, что подразумевает единичный выброс. Во-вторых, это вероятности перехода из нормального состояния в состояние полного выхода из строя и обратно (Λ_{12} и Λ_{21}) и перехода из нормального состояния в состояние увеличенной ошибки и обратно (Λ_{13} и Λ_{31}). При таких обозначениях y_t в (9) примет вид:

$$y_t = \text{diag} \{Q_{\varphi_t}, Q_{\lambda_t}, Q_{r_t}\} \psi_t^{(1)}(X_t) + \text{diag} \{Q_{\varphi_t}^v, Q_{\lambda_t}^v, Q_{r_t}^v\} \psi_t^{(2)}(X_t) v_t. \quad (11)$$

Соответственно, в модели с q измерительными комплексами требуется q цепей $Q_t^{(i)}$, $i = \overline{1, q}$, каждая из которых аналогично (11) войдет в запись (10) для измерительного блока $y_t^{(i)}$.

6 Временные задержки наблюдений

Пусть состояние X_t состоит только из текущих координат аппарата $\mathcal{A}$. Обозначим его через $X_t = (X(t), Y(t), Z(t))'$. Определим для измерительного комплекса $\mathcal{M}$ (с координатами $(X_{\mathcal{M}}, Y_{\mathcal{M}}, Z_{\mathcal{M}})$) величину

$$\tau_t = \min \left\{ T, \frac{\sqrt{(X(t) - X_{\mathcal{M}})^2 + (Y(t) - Y_{\mathcal{M}})^2 + (Z(t) - Z_{\mathcal{M}})^2}}{\delta v_s} \right\}, \quad (12)$$

где v_s — скорость прохождения сигнала в направлении $\overrightarrow{\mathcal{M}\mathcal{A}}$. Если $\mathcal{M}$ — РЛС, то это скорость света; если $\mathcal{M}$ — сонар, то это скорость звука. Радикал в (12) — это дальность, деление с шагом дискретизации δ — это перевод обычного времени в дискретные значения шкалы $t = 1, 2, \dots$, а ограничение сверху величиной T нужно, чтобы формально обозначить начальные условия, ограничив фактически максимальную удаленность $\mathcal{A}$ от $\mathcal{M}$. Если величина $v_s = 300\,000$ км/с, то на расстоянии 1 км величина τ_t будет иметь порядок 10^{-7} с. Такими значениями, конечно, надо пренебрегать. Если $v_s = 1500$ м/с (звук в воде), то на расстоянии 1 км величина τ_t будет равна 0,7 с, на расстоянии 10 км — уже 7 с, и пренебрегать такой задержкой уже не следует. С изменением расстояния (которое наблюдателю не известно точно, а только измеряется с ошибкой) величина τ_t будет меняться. Отражением этого служит следующая модель наблюдения:

$$\left. \begin{aligned} X_t &= \Phi_t^{(1)} X_{t-1} + \Phi_t^{(2)} (X_{t-1}) W_t; \\ y_t &= \psi_t^{(1)} (X_{t-\tau_t}) + \psi_t^{(2)} (X_{t-\tau_t}) v_t; \\ Y_t &= \Psi_t^{(1)} (y_t) X_{t-\tau_t} + \Psi_t^{(2)} (X_{t-\tau_t}, y_t) V_t, \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

где $t = -T, \dots, 0, 1, \dots$, $X_{-T-1} = \eta$.

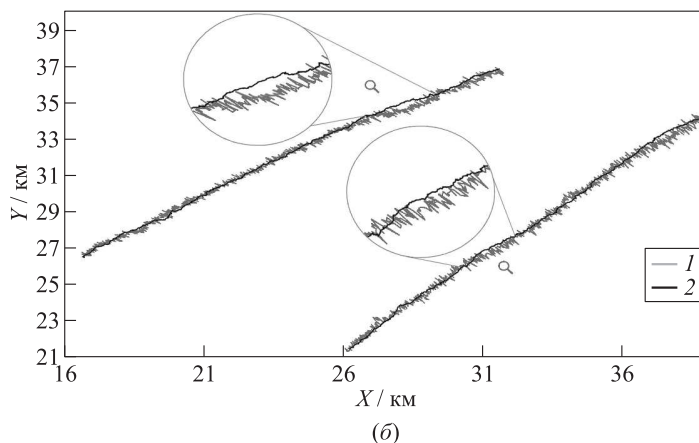
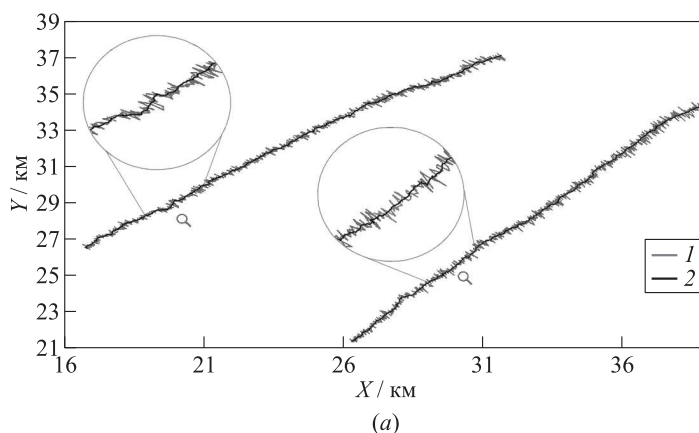
Без псевдонаблюдений эта модель в общем виде подробно изучена в [19–21], алгоритмы, использующие Y_t для решения навигационных задач, — ближайшая перспектива. Отметим, что, как и в предыдущем разделе, модель (13) для одного измерительного комплекса очевидным образом обобщается на случай q комплексов: для этого модель (10) на основании (13) нужно дополнить величинами $\tau_t^{(i)}$, $i = \overline{1, q}$.

7 Численный эксперимент

Используем модель движения из статьи [5], дополнив ее двумя измерительными комплексами с координатами $(5, 0, 0)$ и $(0, 5, 0)$ в системе координат $Oxyz$, связанной с землей. Таким образом, описанное в [5] движение аппарата, обнаруживаемого в случайной точке η с $E\{\eta\} = (30, 30, 1)'$ км и хаотическим

образом направляющегося в сторону начала координат со случайной средней скоростью ≈ 212 км/ч, дополнено системой наблюдения с $q = 2$ измерительными комплексами, расположенными в плоскости $z = 0$ на осях Oy (первый) и Ox (второй).

Движение моделировалось в течение 6 мин. Дискретные моменты времени $t = -T, \dots, 0, \dots, 1000$ отвечают разбиению интервала времени наблюдения с шагом дискретизации $\delta = 0,0001$ ч. Если движущийся объект — это летательный аппарат, а измерительные комплексы — РЛС, то $T = 0$. Второй случай — движение подводного аппарата — дает $T = 105$, потому что максимальное расстояние в момент обнаружения аппарата $t = -T - 1$ до цели составляет ≈ 57 км.



Примеры прямой оценки положения для $T = 0$ (a) и 105 (б) в плоскости Oxy ; измерительные комплексы расположены в плоскости $z = 0$ на осях Oy (1) и Ox (2)

Ошибки измерений характеризуют величины $\sigma_\varphi = \sigma_\lambda = 0,25\pi/180$, т. е. $0,25^\circ$, $\sigma_r = 0,025$ км. Для иллюстрации результатов моделирования системы наблюдения на те же траектории, что приведены в [5], наложены оценки координат по прямым измерениям, а именно: по измерениям $(y_{\varphi_t}, y_{\lambda_t}, y_{r_t})'$ каждого комплекса, пренебрегая ошибкой, вычислены оценки положения (углы и дальность пересчитаны в декартовы координаты), а итоговая оценка, изображенная на рисунке, получена как среднее от двух измерителей.

Разница в информации, которую дают измерения положения движущегося объекта в моделях на рисунке, видна невооруженным глазом, хотя масштаб «скрадывает» отличия. Формальные оценки таковы: среднеквадратичное отклонение оценки положения по прямым измерениям в среднем на интервале наблюдения $t = 0, 1000$ составляет для модели $T = 0$ по осям Ox и $Oy \approx 65$ м, по оси Oz — ≈ 90 м, для модели $T = 105$ — по осям Ox и $Oy \approx 126$ м, по оси Oz — ≈ 94 м. Это вполне ожидаемый результат: скорость по оси Oz очень мала и от учета временной задержки можно отказаться, скорости по осям Ox и Oy велики настолько, что задержка ухудшает качество позиционирования в 2 раза.

8 Заключение

Предложенные в статье модели наблюдения дополняют модели движения, ранее представленные в [5], и могут быть использованы в широком спектре навигационных задач. Но варианты использования ограничены некооперативным сценарием, когда измерения выполняются внешним по отношению к движущемуся объекту наблюдателем, соответственно, измеряться могут только углы положения и дальность. Если навигационные задачи связаны с ориентацией в пространстве, то потребуются иные измерительные инструменты. Для моделей, ориентированных на линеаризацию и псевдолинеаризацию, как продемонстрировано в данной статье, эта тема представляет достаточно интересную перспективу. Имеющиеся же модели могут применяться для разработки эффективных фильтров в таких задачах, как позиционирование и отслеживание целей. Особенно полезно было бы получить действенные алгоритмы оценивания положения в модели с временными задержками наблюдений.

Литература

1. Попова М. С., Стрижов В. В. Выбор оптимальной модели классификации физической активности по измерениям акселерометра // Информатика и её применения, 2015. Т. 9. Вып. 1. С. 76–86. doi: 10.14357/19922264150107. EDN: TVXFFL.
2. Сеницын И. Н. Методы вероятностного и статистического моделирования неявных стохастических систем // Системы и средства информатики, 2024. Т. 34. № 3. С. 48–66. doi: 10.14357/08696527240305. EDN: RTNRUZ.

3. *Кривенко М. П.* Моделирование входного потока рабочих нагрузок вычислительного кластера LANL Mustang // Системы и средства информатики, 2024. Т. 34. № 3. С. 109–122. doi: 10.14357/08696527240308. EDN: FRSPMK.
4. *Урюпин И. В.* Разработка программного комплекса моделирования эффективности в авиатранспортной системе России // Системы и средства информатики, 2024. Т. 34. № 3. С. 136–146. doi: 10.14357/08696527240310. EDN: VMQRRH.
5. *Урюпин И. В.* Об универсальных моделях состояния для задач слежения и навигации беспилотных движущихся объектов // Системы и средства информатики, 2025. Т. 35. № 2. С. 31–44. doi: 10.14357/08696527250203. EDN: WRGXLN.
6. *Mohsan S. A. H., Khan M. A., Noor F., Ullah I., Alsharif M. H.* Towards the unmanned aerial vehicles (UAVs): A comprehensive review // Drones, 2022. Vol. 6. No. 6. Art. 147. 27 p. doi: 10.3390/drones6060147.
7. *Autonomous underwater vehicles: Design and practice (radar, sonar & navigation)* / Ed. F. Ehlers. — London, U.K.: SciTech Publishing, 2020. 590 p.
8. *Burns L. D., Shulgan C.* Autonomy: The quest to build the driverless car — and how it will reshape our world. — New York, NY, USA: HarperCollins, 2018. 368 p.
9. *Bowen E. G.* Radar days. — Boca Raton, CA, USA: CRC Press, 1987. 231 p. doi: 10.1201/9781003069584.
10. *Поляков В. Т.* Посвящение в радиоэлектронику. — М.: Радио и связь, 1988. 352 с. EDN: TXEJTF.
11. *Whitcomb L., Yoerger D., Singh H.* Advances in Doppler-based navigation of underwater robotic vehicles // Conference (International) on Robotics and Automation Proceedings. — IEEE, 1999. Vol. 1. P. 399–406. doi: 10.1109/robot.1999.770011.
12. *Hegrenaes O., Berglund E.* Doppler water-track aided inertial navigation for autonomous underwater vehicle // OCEANS Europe Proceedings. — IEEE, 2009. Art. 5278307. 10 p. doi: 10.1109/oceanse.2009.5278307.
13. *Tal A., Klein I., Katz R.* Inertial Navigation System/Doppler Velocity Log (INS/DVL) fusion with partial DVL measurements // Sensors — Basel, 2017. Vol. 17. Iss. 2. Art. 415. 20 p. doi: 10.3390/s17020415.
14. *Генике А. А., Побединский Г. Г.* Глобальные спутниковые системы определения местоположения и их применение в геодезии. — М.: Картгеоцентр, 2004. 352 с. EDN: QKGWEB.
15. *Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Wasle E.* GNSS — global navigation satellite systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more. — Vienna: Springer, 2008. 518 p. doi: 10.1007/978-3-211-73017-1.
16. *Hodges R.* Underwater acoustics: Analysis, design and performance of sonar. — New York, NY, USA: Wiley, 2011. 384 p.
17. *Kebkal K. G., Mashoshin A. I.* AUV acoustic positioning methods // Gyroscopy Navig., 2017. Vol. 8. P. 80–89. doi: 10.1134/S2075108717010059.
18. *Босов А. В.* Анализ использования доплеровских измерений для идентификации параметров движения по наблюдениям со случайными запаздываниями // Информатика и её применения, 2025. Т. 19. Вып. 1. С. 33–43. doi: 10.14357/19922264250105. EDN: MZKWCI.
19. *Босов А. В.* Фильтрация состояния нелинейной динамической системы по наблюдениям со случайными запаздываниями // Автоматика и телемеханика, 2023. № 6. С. 49–66. doi: 10.31857/S000523102306003X. EDN: CSDMWT

20. *Bosov A.* Tracking a maneuvering object by indirect observations with random delays // Drones, 2023. Vol. 7. No. 7. Art. 468. 17 p. doi: 10.3390/drones7070468.
21. *Босов А. В.* Оптимальная фильтрация состояния нелинейной динамической системы по наблюдениям со случайными запаздываниями // Информатика и её применения, 2023. Т. 17. Вып. 3. С. 8–17. doi: 10.14357/19922264230302. EDN: CFVYJM.
22. *Босов А. В.* Позиционирование и идентификация параметров движения подводного аппарата по наблюдениям со случайными запаздываниями // Автоматика и телемеханика, 2024. № 12. С. 23–48. doi: 10.31857/S0005231024120026. EDN: XUMKVA.
23. *Lingren A., Gong K.* Position and velocity estimation via bearing observations // IEEE T. Aero. Elec. Sys., 1978. No. 4. P. 564–577. doi: 10.1109/TAES.1978.308681.
24. *Lin X., Kirubarajan T., Bar-Shalom Y., Maskell S.* Comparison of EKF, pseudomeasurement, and particle filters for a bearing-only target tracking problem // Proc. SPIE, 2002. Vol. 4728. P. 240–250. doi: 10.1117/12.478508.
25. *Амелин К. С., Миллер А. Б.* Алгоритм уточнения местонахождения легкого БПЛА на основе калмановской фильтрации измерений пеленгационного типа // Информационные процессы, 2013. Т. 13. № 4. С. 338–352. EDN: RRXSZT.
26. *Босов А. В., Панков А. Р.* Условно-минимаксная фильтрация процесса в системе с переключающимися каналами наблюдения // Автоматика и телемеханика, 1995. № 6. С. 87–97.
27. *Босов А. В., Панков А. Р.* Алгоритмы управления в системах с переключающимися каналами наблюдения // Изв. РАН. Сер.: Теория и системы управления, 1996. № 2. С. 99–103.

Поступила в редакцию 10.03.2025

Принята к публикации 15.09.2025

TYPICAL MODELS OF OBSERVATION SYSTEM FOR TRACKING AND NAVIGATION OF UNMANNED MOVING OBJECTS

I. V. Uryupin

Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119333, Russian Federation

Abstract: The solution of navigation problems by the state of a stochastic dynamic system filtering on indirect observations is based on two models of equal importance. The first is motion model of the object whose position needs to be estimated. The second is the observation model, the specific features of which are dictated by the variety of measurement instruments used. The article discusses a typical noncooperative scenario in which an object is monitored by an independent complex of external measurements. The physical quantities measured in this scenario are directional angles (azimuth, or bearing, and elevation) and range. However, the impact on the measurement results of external uncontrolled factors formed by the environment in which the movement-observation takes

place can be quite diverse. The article proposes several typical options for describing such an impact. The first, the standard one, assumes simple additive errors of observations. In the second case, this model is complicated by the assumption that measurement errors are correlated with the current state of the moving object. The physical meaning of this option is provided by the range measurement. Both cases assume stable (without failures) operation of the monitoring complex. The third option is based on a well-known model of switching observation channels and allows for flexible modeling of both short- and long-term failures of some measuring devices. The final version takes into account the specific features of using sonars — acoustic sensors, i.e., motion in an aquatic environment. To illustrate the differences between the models considered, calculations are provided using position estimates based on direct measurements which are not affected by the motion model.

Keywords: navigation; target tracking; unmanned vehicles; stochastic dynamic observation system; additive disturbances; correlated noise; Markov chains; acoustic sonars

DOI: 10.14357/08696527250304

EDN: BZVNER

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. Popova, M. S., and V. V. Strijov. 2015. Vybór optimal'noy modeli klassifikatsii fizicheskoy aktivnosti po izmereniyam akselerometra [Selection of optimal physical activity classification model using measurements of accelerometer]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 9(1):76–86. doi: 10.14357/19922264150107. EDN: TVXFFL.
2. 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. doi: 10.14357/08696527240305. EDN: RTNRUZ.
3. Krivenko, M. P. 2024. Modelirovanie vkhodnogo potoka rabochikh nagruzok vychislitel'nogo klastera LANL Mustang [Modeling of the input flow of LANL Mustang computing cluster workloads]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 34(3):109–122. doi: 10.14357/08696527240308. EDN: FRSPMK.
4. Uryupin, I. V. 2024. Razrabotka programmnoy kompleksa modelirovaniya effektivnosti v aviatransportnoy sisteme Rossii [Development of a software package for modeling efficiency in the Russian air transport system]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 34(3):136–146. doi: 10.14357/08696527240310. EDN: VMQRRH.
5. Uryupin, I. V. 2025. Ob universal'nykh modelyakh sostoyaniya dlya zadach slezheniya i navigatsii bespilotnykh dvizhushchikhsya ob"ektov [On universal state models for tracking and navigation tasks of unmanned moving objects]. *Sistemy*

- i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 35(2):31–44. doi: 10.14357/08696527250203. EDN: WRGXLN.
6. Mohsan, S. A. H., M. A. Khan, F. Noor, I. Ullah, and M. H. Alsharif. 2022. Towards the unmanned aerial vehicles (UAVs): A comprehensive review. *Drones* 6(6):147. 27 p. doi: 10.3390/drones6060147.
 7. Ehlers, F., ed. 2020. *Autonomous underwater vehicles: Design and practice (radar, sonar & navigation)*. London, U.K.: SciTech Publishing. 592 p.
 8. Burns, L. D., and C. Shulgan. 2018. *Autonomy: The quest to build the driverless car — and how it will reshape our world*. New York, NY: HarperCollins. 368 p.
 9. Bowen, E. G. 1987. *Radar days*. Boca Raton, CA: CRC Press. 231 p. doi: 10.1201/9781003069584.
 10. Polyakov, V. T. 1988. *Posvyashchenie v radioelektroniku* [Initiation into radio electronics]. Moscow: Radio i svyaz'. 352 p. EDN: TXEJTF.
 11. Whitcomb, L., D. Yoerger, and H. Singh. 1999. Advances in Doppler-based navigation of underwater robotic vehicles. *Conference (International) on Robotics and Automation Proceedings*. IEEE. 1:399–406. doi: 10.1109/robot.1999.770011.
 12. Hegrehaes, O., and E. Berglund. 2009. Doppler water-track aided inertial navigation for autonomous underwater vehicle. *OCEANS Europe Proceedings*. IEEE. Art. 5278307. 10 p. doi: 10.1109/oceanse.2009.5278307.
 13. Tal, A., I. Klein, and R. Katz. 2017. Inertial Navigation System/Doppler Velocity Log (INS/DVL) fusion with partial DVL measurements. *Sensors — Basel* 17(2):415. 20 p. doi: 10.3390/s17020415.
 14. Genike, A. A., and G. G. Pobedinskiy. 2004. *Global'nye sputnikovye sistemy opredeleniya mestopolozheniya i ikh primeneniye v geodezii* [Global satellite positioning systems and their application in geodesy]. Moscow: Kartgeotsentr. 354 p. EDN: QKGWEB.
 15. Hofmann-Wellenhof, B., H. Lichtenegger, and E. Wasle. 2008. *GNSS — global navigation satellite systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more*. Vienna: Springer. 518 p. doi: 10.1007/978-3-211-73017-1.
 16. Hodges, R. 2011. *Underwater acoustics: Analysis, design and performance of sonar*. New York, NY: Wiley. 384 p.
 17. Kebkal, K. G., and A. I. Mashoshin. 2017. AUV acoustic positioning methods. *Gyroscopy Navigation* 8:80–89. doi: 10.1134/S2075108717010059.
 18. Bosov, A. V. 2025. Analiz ispol'zovaniya doplerovskikh izmereniy dlya identifikatsii parametrov dvizheniya po nablyudeniya so sluchaynymi zapazdyvaniyami [Doppler measurements application analysis to identify motion parameters from observations with random delays]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 19(1):33–43. doi: 10.14357/19922264250105. EDN: MZKWCI.
 19. Bosov, A. V. 2023. Observation-based filtering of state of a nonlinear dynamical system with random delays. *Automat. Rem. Contr.* 84(6):594–605. doi: 10.1134/S0005117923060036. EDN: GVWEAB.
 20. Bosov, A. 2023. Tracking a maneuvering object by indirect observations with random delays. *Drones* 7(7):468. 17 p. doi: 10.3390/drones7070468.
 21. Bosov, A. V. 2023. Optimal'naya fil'tratsiya sostoyaniya nelineynoy dinamicheskoy sistemy po nablyudeniya so sluchaynymi zapazdyvaniyami [Nonlinear dynamic system state optimal filtering by observations with random delays]. *Informatika i ee*

- Primeneniya — Inform. Appl.* 17(3):8–17. doi: 10.14357/19922264230302. EDN: CFVYJM.
22. Bosov, A. V. 2024. AUV positioning and motion parameter identification based on observations with random delays. *Automat. Rem. Contr.* 85(12):1024–1040. doi: 10.1134/S0005117924700413. EDN: PLPFMZ.
 23. Lingren, A., and K. Gong. 1978. Position and velocity estimation via bearing observations. *IEEE T. Aero. Elec. Sys.* AES-14(4):564–577. doi: 10.1109/TAES.1978.308681.
 24. Lin, X., T. Kirubarajan, Y. Bar-Shalom, and S. Maskell. 2002. Comparison of EKF, pseudomeasurement, and particle filters for a bearing-only target tracking problem. *Proc. SPIE* 4728:240–250. doi: 10.1117/12.478508.
 25. Amelin, K. S., and A. B. Miller. 2013. An algorithm for refinement of the position of a light UAV on the basis of Kalman filtering of bearing measurements. *J. Commun. Technol. El.* 59(6):622–631. doi: 10.1134/S1064226914060047. EDN: SJVPPV.
 26. Bosov, A. V., and A. R. Pankov. 1995. Conditionally-minimax filtration in a system with commuting observation channels. *Automat. Rem. Contr.* 56(6):835–843.
 27. Bosov, A. V., and A. R. Pankov. 1996. Control algorithms in systems with switching observation channels. *J. Comput. Sys. Sc. Int.* 35(2):262–267. EDN LDYOXT.

Received March 10, 2025

Accepted September 15, 2025

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

УНИМОДАЛЬНОСТЬ ВЗВЕШЕННОЙ СУММЫ ЧАСТНЫХ КРИТЕРИЕВ МОДЕЛИ $G/M/1$ С ОБНОВЛЕНИЕМ И ДВУХПОРОГОВЫМ RED-ПОДОБНЫМ АЛГОРИТМОМ

*Я. М. Агаларов*¹

Аннотация: В настоящее время в существующих информационных сетях в дополнение к механизмам сквозного контроля перегрузок активно внедряют в маршрутизаторы RED-подобные (RED — Random Early Detection) механизмы управления очередью. В работе рассмотрена модель системы массового обслуживания (СМО) $G/M/1$, в которой очередь управляется двухпороговым RED-подобным алгоритмом с вероятностным сбросом заявок. В рассматриваемой модели решение о сбросе принимается в момент завершения обслуживания заявки в зависимости от текущей длины очереди. Теоретически исследовано поведение взвешенной функции критериев (интенсивности принятого потока заявок, средней задержки обслуженных заявок, интенсивности отклоненных на входе заявок, интенсивности сброшенных из очереди заявок, среднего времени простоя прибора) при изменении значения нижнего порогового параметра алгоритма. Доказан ряд утверждений о свойствах частных критериев и утверждение о том, что взвешенная функция частных критериев унимодальна по нижнему пороговому параметру. Предложено простое правило коррекции значения нижнего порогового параметра, которое гарантированно находит максимальное значение взвешенной функции частных критериев.

Ключевые слова: система массового обслуживания; RED-подобный алгоритм; обновление очереди; унимодальность

DOI: 10.14357/08696527250305

EDN: KMBOVF

1 Введение

В настоящее время в дополнение к существующим алгоритмам контроля и предотвращения перегрузок в интернете рекомендуют и активно внедряют RED-подобные алгоритмы (схемы), которые относятся к классу пороговых алгоритмов активного управления очередями (AQM — Active Queue Management) [1, 2]). Схема RED была впервые описана и проанализирована в [3], подробная классификация и обзор RED-подобных алгоритмов приведены в работах [4–7].

Основными критериями, по которым определяют эффективность RED-алгоритмов, служат значения показателей качества работы сети, называемых QoS-параметрами (QoS — Quality of Service) [8]: задержка трафика в сети, потери трафика, пропускная способность используемых соединений, джиттер задержки (разброс времени задержки) и некоторые другие параметры. По предназначению

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

RED-алгоритмы должны минимизировать задержку, снизить потери и уменьшить разброс трафика, а точнее, совместно с другими механизмами регулирования перегрузки обеспечить выполнение требований к QoS-параметрам.

Обеспечить правильную настройку параметров RED-алгоритма маршрутизатора можно только при правильном прогнозе поведения частных критериев. Для этого необходимо решить многокритериальную задачу: при каких значениях параметров алгоритма обеспечивается выполнение требуемых ограничений на величины частных показателей (частных целевых функций). В основном для исследования этой задачи в масштабе сети используются имитационные модели, а существующие аналитические модели разработаны для маршрутизаторов с RED-алгоритмами в виде моделей различных типов СМО с управляемыми очередями (см., например, [9–11]), где в подавляющем большинстве работ ставится задача расчета значений характеристик таких СМО. Работы, в которых исследуется задача адаптации параметров RED-алгоритма к изменяющимся условиям в сети, рассматривают в основном вероятность сброса и весовой коэффициент в качестве управляющих параметров, остальные параметры считают фиксированными [12–17], хотя настройка верхнего и нижнего порогов RED-алгоритма, по мнению некоторых исследователей, может также существенно повысить эффективность алгоритма (см., например, [18]).

Сложность задачи правильной настройки параметров RED-алгоритма вызвана, в частности, тем, что некоторые частные критерии взаимно конфликтуют (например, настройка может вызвать в одно и то же время снижение средней задержки и увеличение потерь трафика). При аналитическом исследовании таких (многокритериальных) задач для поиска компромиссного решения, которое удовлетворяет всем критериям, наиболее часто используют взвешенную сумму частных критериев (метод взвешенной функции), где весовые коэффициенты указывают на относительную важность соответствующего критерия [19–22]. Полученное этим методом оптимальное решение, минимизирующее (максимизирующее) взвешенную функцию, оказывается оптимальным по Парето при положительных весовых коэффициентах частных критериев и слабо оптимальным по Парето при неотрицательных коэффициентах [19].

Ниже приведены доказательства нескольких утверждений о свойствах взвешенной функции частных критериев модели маршрутизатора типа $M/G/1$ с двухпороговым RED-подобным алгоритмом управления очередью. Целью данной работы ставится разработка процедуры коррекции пороговых значений RED-подобного алгоритма для рассматриваемой модели, гарантированно повышающей эффективность алгоритма в смысле максимизации взвешенной целевой функции.

2 Описание системы

Рассматривается СМО с накопителем неограниченной емкости и одним прибором обслуживания, на которую поступает рекуррентный поток заявок с функцией распределения вероятностей $F(t)$, $0 < \bar{v} = \int_0^\infty t dF(t) < \infty$. Время обслуживания заявки прибором не зависит от входного потока и распределено по

экспоненциальному закону с параметром $0 < \mu < \infty$. Прием и обслуживание заявок в системе происходит согласно механизму управления с «неполным» обновлением следующим образом [4]. Пусть h_0 , h_1 и h_2 — целые положительные числа, удовлетворяющие условиям $h_1 - h_0 \geq 0$, $h_2 - h_1 \geq 0$ и $h_0 \geq 1$. В дальнейшем h_0 будем называть нижним порогом, h_1 — верхним порогом. Поступившая заявка занимает одно свободное место в накопителе и, если в момент поступления застаёт прибор свободным, сразу занимает его и начинает обслуживаться; в противном случае, если длина очереди меньше чем h_2 , то становится в очередь к прибору в порядке поступления, а иначе отклоняется. По завершении обслуживания заявка сразу покидает систему, освободив одновременно прибор и место в накопителе, и сразу после освобождения прибор принимает очередную заявку из очереди (если таковая есть). Если после завершения обслуживания очередной заявки в системе остается больше чем $h_1 + 1$ заявок, то с вероятностью $(1 - \alpha)$ все заявки в очереди, кроме первых h_0 , будут сброшены, а с вероятностью α все заявки (кроме обслуженной) останутся в системе. В дальнейшем заявку, обслуженную прибором, будем называть «успешной».

Заметим, что процесс обслуживания заявок в данной системе описывается вложенной цепью Маркова (см., например, [23]), где переходы цепи определяются моментами поступления заявок, а состояние цепи — числом заявок, находящихся в системе в момент поступления. Заметим также, что состояния вложенной цепи входят в один возвратный положительный класс.

Введем обозначения:

$\{\pi_i(\bar{h}), 0 \leq i \leq \infty\}$ — стационарное распределение вероятностей цепи при наборе $\bar{h}$, $\bar{h} = (h_0, h_1, h_2)$ ($\pi_i(\bar{h})$ — стационарная вероятность того, что цепь (система) находится в состоянии i);

$\bar{V}_{\text{ож}}(\bar{h}) = \sum_{i=0}^{h_2} \pi_i(\bar{h}) \bar{V}_{\text{ож}}(i, \bar{h})$, где $\bar{V}_{\text{ож}}(i, \bar{h})$ — среднее значение суммарного времени нахождения в очереди «успешных» заявок за время пребывания системы в состоянии i при наборе $\bar{h}$;

$\bar{N}_{\text{сбр}}(\bar{h}) = \sum_{i=0}^{h_2} \pi_i(\bar{h}) \bar{N}_{\text{сбр}}(i, \bar{h})$, где $\bar{N}_{\text{сбр}}(i, \bar{h})$ — среднее число сброшенных из очереди заявок за время пребывания системы в состоянии i при наборе $\bar{h}$;

$\bar{V}_{\text{прост}}(\bar{h}) = \sum_{i=0}^{h_2} \pi_i(\bar{h}) \bar{V}_{\text{прост}}(i, \bar{h})$, где $\bar{V}_{\text{прост}}(i, \bar{h})$ — среднее время простоя прибора за время пребывания системы в состоянии i при наборе $\bar{h}$.

Рассмотрим взвешенную сумму частных показателей $(1 - \pi_{h_2}(\bar{h}), \bar{V}_{\text{ож}}(\bar{h}), \bar{N}_{\text{сбр}}(\bar{h}), \bar{V}_{\text{прост}}(\bar{h})$ и $\pi_{h_2}(\bar{h}))$ с весовыми коэффициентами $C_0 \geq 0$, $C_1 \geq 0$, $C_2 \geq 0$, $C_3 \geq 0$ и $C_4 \geq 0$ [24]:

$$Q(\bar{h}) = \frac{1}{v} [C_0 - C_1 \bar{V}_{\text{ож}}(\bar{h}) - C_2 \bar{N}_{\text{сбр}}(\bar{h}) - C_3 \bar{V}_{\text{прост}}(\bar{h}) - C_4 \pi_{h_2}(\bar{h})] = \\ = \frac{1}{v} \sum_{i=0}^{h_2} \pi_i(\bar{h}) d_i(\bar{h}), \quad (1)$$

где

$$d(\bar{h}) = \begin{cases} C_0 - C_1 \bar{V}_{\text{ож}}(i, \bar{h}) - C_2 \bar{N}_{\text{сбр}}(i, \bar{h}) - C_3 \bar{V}_{\text{прост}}(i, \bar{h}), & 0 \leq i < h_2; \\ d_{h_2-1}(\bar{h}) - C_0 - C_4, & i = h_2. \end{cases}$$

Ставится задача исследования поведения функции $Q(\bar{h})$ при изменении значения порогового параметра h_0 при условиях $h_2 - h_1 = a_2 = \text{const}$ и $h_1 - h_0 = a_1 = \text{const}$, где $a_1 \geq 0$, $a_2 \geq 0$. В дальнейшем для краткости изложения (без потерь общности результатов, так как $\bar{v}$ — постоянная величина) рассматриваем вместо $Q(\bar{h})$ функцию $D(\bar{h}) = Q(\bar{h})\bar{v} = \sum_{i=0}^{h_2} \pi_i(\bar{h})d_i(\bar{h})$.

3 Доказательство унимодальности функции $D(\bar{h})$

Пусть выполняются условия $h_2 - h_1 = a_2 = \text{const} \geq 0$ и $h_1 - h_0 = a_1 = \text{const} \geq 0$. Так как в рассматриваемом случае h_0 однозначно задает набор $\bar{h}$, то всюду для удобства изложения вместо переменной $\bar{h}$ будем писать h_0 .

Система уравнений равновесия вложенной цепи Маркова имеет вид:

$$\bar{\pi}^T(h_0)P(h_0) = \bar{\pi}^T(h_0), \quad \sum_{i=0}^{h_2} \pi_i(h_1) = 1, \quad \pi_i(h_1) > 0, \quad i = \overline{0, h_2}. \quad (2)$$

Здесь $\bar{\pi}^T(h_0) = (\pi_0(h_0), \dots, \pi_{h_2}(h_0))$ — вектор-строка стационарных состояний цепи; $P(h_0) = (p_{i,j}(h_0))_{i=0, j=0}^{h_2, h_2}$ — матрица переходных вероятностей цепи, где

$$p_{i,j}(h_0) = \begin{cases} r_{i+1-j}, & 0 \leq i \leq h_1 + 1, 1 \leq j \leq i + 1 \leq h_2; \\ \alpha^{i+1-j} r_{i+1-j}, & h_1 + 1 < i \leq h_2 - 1, h_0 < j \leq i + 1; \\ (1 - \alpha) \sum_{k=1}^{i-h_1-1} \alpha^{k-1} r_k + \alpha^{i-h_1-1} r_{i+1-j}, & h_1 + 1 < i \leq h_2 - 1, \\ & j = h_0; \\ (1 - \alpha) \sum_{k=1}^{i-h_1-1} \alpha^{k-1} r_{k+h_0-j} + \alpha^{i-h_1-1} r_{i+1-j}, & \\ & h_1 + 1 < i \leq h_2 - 1, 1 \leq j < h_0; \\ \sum_{k=i+1}^{\infty} r_k, & 0 \leq i \leq h_1 + 1, j = 0; \\ (1 - \alpha) \sum_{k=1}^{i-h_1-1} \alpha^{k-1} \sum_{l=k+h_0}^{\infty} r_l + \alpha^{i-h_1-1} \sum_{l=i+1}^{\infty} r_l, & h_1 < i \leq h_2 - 1, \\ & j = 0; \\ p_{h_2-1,j}(h_0), & i = h_2, 0 \leq j \leq h_2; \\ 0 & \text{в остальных случаях,} \end{cases}$$

$$r_l = \int_0^{\infty} \frac{(\mu v)^l}{l!} e^{-\mu v} dF(v), \quad l \geq 0.$$

Из уравнений (2), положив $\pi_i(h_0) = A_i(h_0)\pi_{h_2}(h_0)$, получим

$$\left. \begin{aligned} A_{h_2}(h_0) &= 1; \quad A_{h_2-1}(h_0) = \frac{1 - p_{h_2, h_2}(h_0)}{p_{h_2-1, h_2}(h_0)}; \\ A_{j-1}(h_0) &= \frac{\pi_j(h_0)[1 - p_{j, j}(h_0)] - \sum_{i=j+1}^{h_2} \pi_i(h_0)p_{i, j}(h_0)}{p_{j-1, j}(h_0)}, \\ &1 \leq j \leq h_2 - 1, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где

$$\pi_{h_2}(h_0) = \left(1 + \sum_{i=0}^{h_2-1} A_i(h_0)\right)^{-1}; \quad \pi_j(h_0) = \frac{A_j(h_0)}{1 + \sum_{i=0}^{h_2-1} A_i(h_0)}, \quad j = \overline{0, h_2 - 1}.$$

Отметим, что для стационарных вероятностей выполняется соотношение

$$\pi_{j+1}(h_0 + 1) = [1 - \pi_0(h_0 + 1)] \pi_j(h_0), \quad j = \overline{0, h_2 - 1}. \quad (4)$$

Фиксируем состояние i . Найдем аналитические выражения для величин $\bar{V}_{\text{ож}}(i, h_0)$, $\bar{N}_{\text{сбр}}(i, h_0)$ и $\bar{V}_{\text{прост}}(i, h_0)$, $i = \overline{0, h_2}$.

Пусть v — фиксированное значение времени пребывания системы в состоянии i . Пусть заявки, находящиеся в системе в момент перехода в состояние i , включая и поступившую, условно пронумерованы числами $1, 2, \dots$ в порядке поступления и заявку с номером l назовем l -заявкой. Обозначим через B_m случайное событие такое, что

$$B_m = \{\tau_1 + \dots + \tau_m \leq v < \tau_1 + \dots + \tau_{m+1}\},$$

где τ_i — случайная величина, распределенная по показательному закону с параметром μ ; V_l/m — время ожидания l -заявки при условии, что произошло событие B_m . Заметим, что B_m эквивалентно завершению обслуживания ровно m заявок за время v . Известно [23], что условное среднее значение случайной величины $V_{l+1} = (\tau_1 + \dots + \tau_l)$ при условии, что произошло B_m , равно

$$M[V_{l+1}/m] = \frac{l}{m+1} v, \quad l = \overline{1, m}.$$

Рассмотрим время ожидания l -заявки, $l = \overline{2, i+1}$, за время пребывания системы в состоянии i . Обозначим: $M[V_{\text{ож}}/m]_{i, h_0}$ — суммарное среднее время

ожидания «успешных» заявок, прошедших обслуживание или приступивших к обслуживанию в состоянии i при условии B_m ; $M[V_{\text{необ}}/m]_{i,h_0}$ — среднее суммарное время ожидания «успешных» заявок в очереди, не приступивших к обслуживанию в состоянии i при условии B_m ; $M[V_{\text{зан}}/m]_{i,h_0}$ — среднее время занятости прибора в состоянии i при условии B_m ; $\bar{V}_{\text{ож}}(i, h_0)$ — безусловное среднее время ожидания «успешных» заявок в состоянии i при пороге h_0 .

Отметим сразу, что $\bar{W}_{\text{ож}}(i, h_1/0) = iv$ и $\bar{W}_{\text{зан}}(i, h_1/0) = v$ для $0 \leq i \leq h_2$, $\bar{V}_{\text{ож}}(h_2, h_0) = \bar{V}_{\text{ож}}(h_2 - 1, h_0)$ и $\bar{V}_{\text{прост}}(h_2, h_0) = \bar{V}_{\text{прост}}(h_2 - 1, h_0)$. Разобьем множество состояний системы на четыре альтернативных подмножества и каждый случай рассмотрим в отдельности.

I. Случай $i \leq h_0$. Заметим, что в этом случае все заявки, находящиеся в очереди, будут успешно обслужены и справедливы следующие равенства:

$$M[V_{\text{ож}}/m]_{i,h_0} = \sum_{l=1}^m M[V_{l+1}/m] = \sum_{l=1}^m \frac{l}{m+1} v = \frac{mv}{2}, \quad m \leq i; \quad (5)$$

$$M[V_{\text{необ}}/m]_{i,h_0} = [(i+1) - (m+1)]v = (i-m)v, \quad m \leq i; \quad (6)$$

$$M[V_{\text{ож}}/m]_{i,h_0} = \sum_{l=1}^i M[V_{l+1}/m] = \sum_{l=1}^i \frac{l}{m+1} v = \frac{i(i+1)v}{2(m+1)}, \quad m > i; \quad (7)$$

$$M[V_{\text{зан}}/m]_{i,h_0} = \begin{cases} M[V_{i+2}/m] = \frac{i+1}{m+1} v & \text{при } m > i; \\ v & \text{при } m \leq i. \end{cases} \quad (8)$$

Из (5)–(8) для безусловного суммарного среднего времени ожидания заявок с помощью формулы полной вероятности получим:

$$\bar{V}_{\text{ож}}(i, h_0) = \frac{1}{2\mu} \left[\sum_{m=1}^{i+1} (2im - (m-1)m)r_m + i(i+1) \sum_{m=i+2}^{\infty} r_m \right], \quad i \leq h_0; \quad (9)$$

$$\bar{V}_{\text{зан}}(i, h_0) = \frac{1}{\mu} \sum_{m=1}^{i+1} mr_m + \frac{i+1}{\mu} \sum_{m=i+2}^{\infty} r_m, \quad 1 \leq i \leq h_0. \quad (10)$$

II. Случай $h_0 < i \leq h_1 + 1$. Обратим внимание на то, что в данном случае заявки, не приступившие в состоянии i к обслуживанию, могут быть сброшены в последующих состояниях системы. Пусть $a_n(i, h_0)$ — среднее число «успешных» заявок при пороге h_0 , не приступивших к обслуживанию в состоянии i ; $a_n^+(i, h_0)$ — среднее число «успешных» заявок при пороге h_0 , не приступивших к обслуживанию в состоянии i и перед которыми в очереди осталось больше $h_0 + 1$ заявок; n — общее число заявок, не приступивших

к обслуживанию в состоянии i . Докажем утверждение 1, которым воспользуемся ниже при выводе формул для $M[V_{\text{ож}}/m]_{i,h_0}$.

Утверждение 1. Верны следующие соотношения:

$$a_n(i, h_0) = \begin{cases} h_0 + a_n^+(i, h_0), & n > h_0; \\ n, & n \leq h_0, \end{cases} \quad (11)$$

где

$$a_n^+(i, h_0) = a_{n+1}^+(i+1, h_0+1).$$

Доказательство. Справедливость равенства (11) в случае $n \leq h_0$ следует из того, что в данной СМО l -заявка при $l \leq h_0 + 1$ и пороге h_0 не сбрасывается. Справедливость равенства (11) при $n > h_0$ следует из того, что вероятности сброса l -заявки при пороге h_0 и $(l+1)$ -заявки при пороге $h_0 + 1$ равны.

В случае $h_0 < i \leq h_1 + 1$ для $\bar{V}_{\text{зан}}(i, h_0)$ остается в силе соотношение (10), а для $\bar{V}_{\text{ож}}(i, h_0)$ (аналогично (9)) получим:

$$\begin{aligned} \bar{V}_{\text{ож}}(i, h_0) &= \sum_{m=0}^i \int_0^{\infty} \left[\sum_{l=1}^m M[V_{l+1}/m] + a_{i-m}(i, h_0)v \right] r_m(v) dF(v) + \\ &+ \sum_{m=i+1}^{\infty} \sum_{l=1}^i \int_0^{\infty} M[V_{l+1}/m] r_m(v) dF(v) = \\ &= \frac{1}{2\mu} \left[\sum_{m=1}^{i+1} [(m-1)m + a_{i-m}(i, h_0)] r_m + i(1+1) \sum_{m=i+2}^{\infty} r_m \right]. \quad (12) \end{aligned}$$

III. Случай $h_1 + 1 < i \leq h_1 + h_0 + 1$ (т. е. $i - h_1 - 1 \leq h_0$). Разобьем область значений m на несколько подобластей и, проведя простые преобразования, для каждой области получим следующие формулы для $M[V_{\text{ож}}/m]_{i,h_0}$:

– при $1 \leq m \leq i - h_1 - 1$

$$\begin{aligned} M[V_{\text{ож}}/m]_{i,h_0} &= \\ &= \sum_{l=2}^{m+1} M[V_l/m] + (1-\alpha) \sum_{k=1}^m \alpha^{k-1} (k + h_0 - m - 1)v + \alpha^m a_{i-m}(i, h_0)v = \\ &= -\frac{mv}{2} + \frac{\alpha - \alpha^{m+1}}{1-\alpha} v + (1-\alpha^m)h_0v + \alpha^m a_{i-m}(i, h_0)v; \quad (13) \end{aligned}$$

– при $i - h_1 \leq m \leq h_0 + 1$

$$\begin{aligned}
 M[V_{\text{ож}}/m]_{i,h_0} &= \\
 &= \sum_{l=2}^{m+1} M[V_l/m] + (1-\alpha) \sum_{k=1}^{i-h_1-1} \alpha^{k-1} (k+h_0-m-1)v + \alpha^{i-h_1-1} a_{i-m}(i, h_0)v = \\
 &= \frac{mv}{2} + \left[1 - (i-h_1)\alpha^{i-h_1-1} + \frac{\alpha - \alpha^{i-h_1}}{1-\alpha} \right] v + \\
 &\quad + (1 - \alpha^{i-h_1}) (h_0 - m - 1)v + \alpha^{i-h_1-1} a_{i-m}(i, h_0)v; \quad (14)
 \end{aligned}$$

– при $h_0 + 1 < m \leq i + h_0 - h_1 - 1$

$$\begin{aligned}
 M[V_{\text{ож}}/m]_{i,h_0} &= (1-\alpha) \sum_{k=1}^{m-h_0} \alpha^{k-1} \sum_{l=2}^{k+h_0} M[V_l/m] + \alpha^{m-h_0} \sum_{l=2}^{m+1} M[V_l/m] + \\
 &\quad + (1-\alpha) \alpha^{m-h_0} \sum_{k=1}^{i-h_1-m+h_0} \alpha^{k-1} (k-1)v + \alpha^{i-h_1} a_{i-m}(i, h_0)v = \\
 &= (1-\alpha) \sum_{k=1}^{m-h_0} \alpha^{k-1} \frac{(k+h_0-1)(k+h_0)}{2(m+1)} v + \alpha^{m-h_0} \frac{mv}{2} - \\
 &\quad - \alpha^{i-h_1} (i-h_1-m+h_0)v + \alpha^{i-h_1} a_{i-m}(i, h_0)v; \quad (15)
 \end{aligned}$$

– при $i + h_0 - h_1 \leq m \leq i$

$$\begin{aligned}
 M[V_{\text{ож}}/m]_{i,h_0} &= \alpha^{i-h_1-1} \sum_{l=2}^{m+1} M[V_l/m] + \\
 &\quad + (1-\alpha) \sum_{k=1}^{i-h_1-1} \alpha^{k-1} \sum_{l=2}^{k+h_0} M[V_l/m] + \alpha^{i-h_1-1} a_{i-m}(i, h_0)v = \\
 &= \alpha^{i-h_1-1} \frac{mv}{2} + (1-\alpha) \sum_{k=1}^{i-h_1-1} \alpha^{k-1} \frac{(k+h_0-1)(k+h_0)}{2(m+1)} v + \\
 &\quad + \alpha^{i-h_1-1} a_{i-m}(i, h_0)v; \quad (16)
 \end{aligned}$$

– при $m > i$

$$\begin{aligned}
 M[V_{\text{ож}}/m]_{i,h_0} &= (1-\alpha) \sum_{k=1}^{i-h_1-1} \alpha^{k-1} \sum_{l=2}^{k+h_0} M[V_l/m] + \alpha^{i-h_1-1} \sum_{l=2}^{i+1} M[V_l/m] = \\
 &= (1-\alpha) \sum_{k=1}^{i-h_1-1} \alpha^{k-1} \frac{(k+h_0-1)(k+h_0)}{2(m+1)} v + \alpha^{i-h_1-1} \frac{i(i+1)v}{2}. \quad (17)
 \end{aligned}$$

IV. Случай $i > h_1 + 1 + h_0$ (т. е. $i - h_1 - 1 > h_0$). Рассуждая так же, как и в предыдущем случае, получим, что при $m \leq h_0 + 1$ выполняются равенства (13), при $h_0 + 1 < m \leq i + h_0 - h_1 - 1$ верны равенства (15), при $i + h_0 - h_1 \leq m \leq i$ верны равенства (16), при $m > i$ справедливы равенства (17).

Так как прибор остается занятым, пока в системе находится хотя бы одна заявка, то время занятости прибора в период нахождения системы в состоянии i равно времени пребывания за этот период в системе последней поступившей заявки, а значит, верно равенство:

$$M[V_{\text{зан}}/m]_{i,h_0} = \begin{cases} v, & 0 \leq m \leq i \leq h_1 + 1; \\ \frac{i+1}{m+1} v, & i \leq h_1 + 1, m > i; \\ v, & m \leq h_0, h_1 + 1 < i; \\ (1-\alpha) \sum_{k=1}^{m-h_0} \alpha^{k-1} M[V_{k+h_0+1}/m] + \alpha^{m-h_0} v, & h_0 + 1 \leq m \leq i + h_0 - h_1 - 1, h_1 + 1 < i; \\ (1-\alpha) \sum_{k=1}^{i-h_1-1} \beta^{k-1} M[V_{k+h_0+1}/m] + \alpha^{i-h_1-1} v, & i + h_0 - h_1 \leq m \leq i; \\ (1-\alpha) \sum_{k=1}^{1-h_1-1} \alpha^{k-1} M[V_{k+h_0+1}/m] + \\ + \alpha^{i-h_1-1} M[V_{i+2}/m], & m \geq i + 1. \end{cases} \quad (18)$$

Для безусловного среднего времени ожидания заявок и среднего времени занятости системы в случае $i \geq h_2$ по формуле полной вероятности имеем:

$$\bar{V}_{\text{ож}}(i, h_0) = \sum_{m=0}^{\infty} \int_0^{\infty} M[V_{\text{ож}}/m]_{i,h_0} r_m(v) dA(v); \quad (19)$$

$$\bar{V}_{\text{зан}}(i, h_0) = \sum_{m=0}^{\infty} \int_0^{\infty} M[V_{\text{зан}}/m]_{i,h_0} r_m(v) dA(v).$$

Докажем несколько утверждений о свойствах частных показателей.

Утверждение 2. Справедливы равенства:

$$\bar{V}_{\text{ож}}(i+1, h_0+1) - \bar{V}_{\text{ож}}(i, h_0) = \bar{V}_{\text{зан}}(i, h_0), \quad i = \overline{0, h_2}; \quad (20)$$

$$\bar{N}_{\text{сбр}}(i+1, h_0+1) - \bar{N}_{\text{сбр}}(i, h_0) = 0, \quad i = \overline{0, h_2}. \quad (21)$$

Доказательство. Воспользовавшись равенствами (9), (10), (12)–(17) при условии, что время пребывания в состоянии i равно v , получим следующие соотношения:

– для $0 \leq i \leq h_1 + 1$ верно

$$M[V_{\text{ож}}/m]_{i+1, h_0+1} - M[V_{\text{ож}}/m]_{i, h_0} = \begin{cases} v & \text{при } m \leq i; \\ \frac{i+1}{m+1}v & \text{при } m > i; \end{cases} \quad (22)$$

– для $h_1 + 1 < i \leq h_1 + h_0 + 1$ верно

$$M[V_{\text{ож}}/m]_{i+1, h_0+1} - M[V_{\text{ож}}/m]_{i, h_0} = \begin{cases} v, & 0 \leq m \leq h_0 + 1; \\ (1 - \alpha) \sum_{k=1}^{m-h_0} \alpha^{k-1} \frac{k+h_0}{m+1} v + \alpha^{m-h_0} v, & h_0 + 1 < i + h_0 - h_1 - 1; \\ (1 - \alpha) \sum_{k=1}^{i-h_1-1} \alpha^{k-1} \frac{k+h_0}{m+1} v + \alpha^{i-h_1-1} v, & i + h_0 - h_1 \leq m \leq i; \\ (1 - \alpha) \sum_{k=1}^{i-h_1-1} \alpha^{k-1} \frac{k+h_0}{m+1} v + \alpha^{i-h_1-1} \frac{i+1}{m+1} v, & m > i. \end{cases} \quad (23)$$

Как следует из п. IV, для случая $h_1 + h_0 + 1 < i \leq h_2 - 1$ также выполняется равенство (23). Как видим, если объединить (22) и (23), то получим (18). Следовательно, применив формулу (19), получим (20).

Для среднего числа сброшенных в состоянии i заявок при условии, что произошло событие B_m , верны равенства:

– при $i \leq h_1 + 1$ (так как в состояниях $i \leq h_1 + 1$ заявки не сбрасываются)

$$M[N_{\text{сбр}}/m]_{i, h_0} = 0;$$

– при $h_1 + 1 < i \leq h_2$, $m \leq i - h_1 - 1$

$$\begin{aligned} M[N_{\text{сбп}}/m]_{i,h_0} &= (1 - \alpha) \sum_{k=1}^m \alpha^{k-1} (i + 1 - k - h_0) = \\ &= (i + 1 - h_0)(1 - \alpha^m) - m\alpha^m + \frac{1 - \alpha^m}{1 - \alpha}; \end{aligned}$$

– при $h_1 + 1 < i \leq h_2$, $m > i - h_1 - 1$

$$\begin{aligned} M[N_{\text{сбп}}/m]_{i,h_0} &= \sum_{k=1}^{i-h_1-1} (1 - \alpha) \alpha^{k-1} (i + 1 - k - h_0) = \\ &= (i + 1 - h_0) \left(1 - \alpha^{i-h_1-1}\right) - (i - h_1 - 1) \alpha^{i-h_1-1} + \frac{1 - \alpha^{i-h_1-1}}{1 - \alpha}. \end{aligned}$$

Тогда безусловное среднее число сброшенных в состоянии i заявок при пороге h_0 равно

$$\begin{aligned} \bar{N}_{\text{сбп}}(i, h_0) &= \sum_{m=1}^{i-h_1-1} \left[(i + 1 - h_0)(1 - \alpha^m) - m\alpha^m + \frac{1 - \alpha^m}{1 - \alpha} \right] r_m + \\ &+ \left[(i + 1 - h_0) \left(1 - \alpha^{i-h_1-1}\right) - (i - h_1 - 1) \alpha^{i-h_1-1} + \frac{1 - \alpha^{i-h_1-1}}{1 - \alpha} \right] \sum_{m=i-h_1}^{\infty} r_m. \end{aligned}$$

Из последнего равенства непосредственно следует доказательство равенства (21).

Утверждение 3. Справедливо равенство

$$\sum_{i=0}^{h_2} \pi_i(h_0) [\bar{V}_{\text{зан}}(i + 1, h_0 + 1) - \bar{V}_{\text{зан}}(i, h_0)] = \frac{r_0}{\mu} \frac{\pi_0(h_0 + 1)}{1 - \pi_0(h_0 + 1)}. \quad (24)$$

Доказательство. Из (18) и (19), подставив $M[V_l/m] = (l/(m + 1))v$ и проведя простые преобразования, получим:

$$\begin{aligned} &\bar{V}_{\text{зан}}(i + 1, h_0 + 1) - \bar{V}_{\text{зан}}(i, h_0) = \\ &= \begin{cases} \frac{1}{\mu} \sum_{m=i+2}^{\infty} r_m, & i \leq h_1; \\ \frac{1}{\mu} \left[\sum_{m=h_0+2}^{i-h_1+h_0} r_m (1 - \alpha^{m-h_0-1}) + (1 - \alpha^{i-h_1}) \sum_{m=i-h_1+h_0+1}^{i+1} r_m + \sum_{m=i+2}^{\infty} r_m \right], & h_1 + 1 \leq i. \end{cases} \end{aligned}$$

Легко показать, что для любого фиксированного i выражение в правой части этого равенства и выражение для $(1/\mu)p_{i+1,0}(h_0+1)$, получаемого из (2), равносильны. Следовательно, выполняется равенство

$$\overline{V}_{\text{зан}}(i+1, h_0+1) - \overline{V}_{\text{зан}}(i, h_0) = \frac{1}{\mu} p_{i+1,0}(h_0+1), \quad 0 \leq i \leq h_2.$$

Из уравнения для $\pi_0(h_0+1)$ в (2) и соотношений (3) получим

$$\begin{aligned} r_0 &= \frac{1}{\pi_0(h_0+1)} \sum_{i=1}^{h_2+1} \pi_i(h_0+1) p_{i,0}(h_0+1) = \\ &= \frac{1 - \pi_0(h_0+1)}{\pi_0(h_0+1)} \sum_{i=0}^{h_2} \pi_i(h_0) p_{i+1,0}(h_0+1). \end{aligned}$$

Из последнего равенства следует (24).

Утверждение 4. Целевая функция $D(h_0)$ — унимодальная функция по h_0 при $h_2 - h_1 = \text{const}$ и $h_1 - h_0 = \text{const}$.

Доказательство. Как следует из (2) и (4), верны равенства:

$$\begin{aligned} D(h_0) - D(h_0+1) &= \sum_{i=0}^{h_2} \pi_i(h_0) d_i(h_0) - \sum_{i=1}^{h_2+1} \pi_i(h_0+1) d_i(h_0+1) - \\ &- \pi_0(h_0+1) d_0(h_0+1) = \pi_0(h_0+1) \sum_{i=0}^{h_2} \pi_i(h_0) d_i(h_0) - \\ &- [1 - \pi_0(h_0+1)] \sum_{i=0}^{h_2} \pi_i(h_0) [d_{i+1}(h_0+1) - d_i(h_0)] - \pi_0(h_0+1) d_0(h_0+1). \end{aligned}$$

Отсюда, вынеся $\pi_0(h_0+1)$ за фигурные скобки в правой части последнего равенства, подставив вместо $d_i(h_0)$, $d_{i+1}(h_0+1)$ и $d_0(h_0+1)$ их выражения из (1) и используя (20) и (21), получим:

$$\begin{aligned} D(h_0) - D(h_0+1) &= \pi_0(h_0+1) \left\{ D(h_0) + C_1 \frac{1 - \pi_0(h_0+1)}{\pi_0(h_0+1)} \times \right. \\ &\quad \left. \times \left[\sum_{i=0}^{h_2} \pi_i(h_0) [\overline{V}_{\text{ож}}(i+1, h_0+1) - \overline{V}_{\text{ож}}(i, h_0)] \right] - \right. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & - C_2 \frac{1}{\pi_0(h_0 + 1)} \left[\sum_{i=0}^{h_2} \pi_{i+1}(h_0 + 1) [\overline{N}_{\text{сброс}}(i + 1, h_0 + 1) - \overline{N}_{\text{сброс}}(i, h_0)] \right] - \\
 & - C_3 \frac{1 - \pi_0(h_0 + 1)}{\pi_0(h_0 + 1)} \left[\sum_{i=0}^{h_2} \pi_i(h_0) [\overline{V}_{\text{прост}}(i + 1, h_0 + 1) - \overline{V}_{\text{прост}}(i, h_0)] \right] - \\
 & \quad - d_0(h_0 + 1) \Big\} = \\
 & = \pi_0(h_0 + 1) \left\{ D(h_0) + C_1 \frac{1 - \pi_0(h_0 + 1)}{\pi_0(h_0 + 1)} \sum_{i=0}^{h_2} \pi_i(h_0) \overline{V}_{\text{зан}}(i, h_0) - \right. \\
 & - C_3 \frac{1 - \pi_0(h_0 + 1)}{\pi_0(h_0 + 1)} \left[\sum_{i=0}^{h_2} \pi_i(h_0) [\overline{V}_{\text{зан}}(i, h_0) - \overline{V}_{\text{зан}}(i + 1, h_0 + 1)] \right] - \\
 & \quad \left. - C_0 + C_4 \left(\bar{v} - \frac{1 - r_0}{\mu} \right) \right\}.
 \end{aligned}$$

Заменив выражение в квадратных скобках в правой части последнего равенства на правую часть равенства (24), перепишем его в виде:

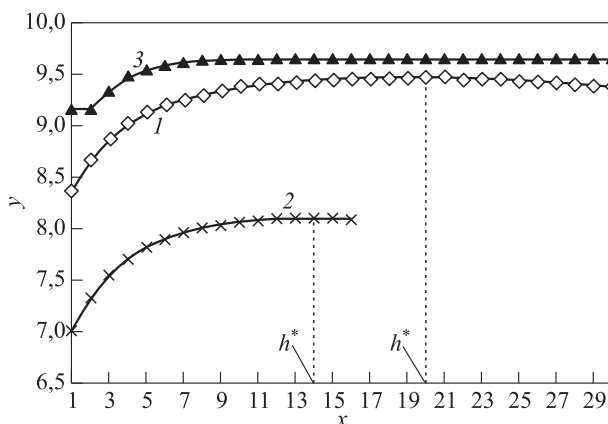
$$D(h_0) - D(h_0 + 1) = \pi_0(h_0 + 1)[D(h_0) - G(h_0)], \quad (25)$$

где

$$G(h_0) = C_0 - (C_3 + C_4) \frac{r_0}{\mu} + \frac{C_4}{\mu} - C_4 \bar{v} - C_1 \frac{1 - \pi_0(h_0 + 1)}{\pi_0(h_0 + 1)} \sum_{i=0}^{h_2} \pi_i(h_0) \overline{V}_{\text{зан}}(i, h_0).$$

Заметим, что функция $G(h_0)$ — невозрастающая функция по h_0 , так как $\sum_{i=0}^{h_2} \pi_i(h_0) \overline{V}_{\text{зан}}(i, h_0)$ — среднее время занятости прибора за время нахождения в произвольном состоянии и возрастает по h_0 , $\pi_0(h_0)$ — убывающая функция по h_0 . Тогда, поскольку имеет место соотношение (25), доказательство утверждения 3 непосредственно следует из теоремы 1, приведенной в [25].

На рисунке проиллюстрировано поведение взвешенной суммы частных показателей модели СМО с RED-подобным алгоритмом при следующих значениях параметров: $C_0 = 10$; $C_1 = 0,1$; $C_2 = 3$; $C_3 = 0,5$; $C_4 = 0,01$; $f(t) = \lambda \exp(-\lambda t)$; $\lambda = 4$; $\mu = 4$; $a_2 = 0$. На рисунке $D^*(a)$ — функция максимальных значений взвешенной суммы от переменной $a = a_1 = h_1 - h_0$, h^* — значение нижнего порога h_0 , при котором $D(h_0)$ достигает максимального значения.



Графики функций $D(h_0)$ при $a = 4$, $\alpha = 0,2$ (1) и при $a = 4$, $\alpha = 0,8$ (2) и функции $D^*(a)$ (3)

4 Заключение

Из свойства унимодальности следует, что $h_0 = h^*$ — точка максимума $Q(h_0)$, если выполняется условие $Q(h^* - 1) \leq Q(h^*)$ и $Q(h^*) \geq Q(h^* + 1)$. Также из свойства унимодальности $Q(h_0)$ следует простое правило оптимальной настройки нижнего порогового значения рассматриваемого RED-подобного алгоритма: параметр h_0 последовательно увеличивать или последовательно уменьшать до тех пор, пока возрастает $Q(h_0)$.

Отметим также, что если C_0 интерпретировать как «плату» поступившей заявки, C_1 , C_2 , C_3 и C_4 — «штрафы» в единицу времени соответственно за задержку заявки, за сброс из очереди, за простой прибора и отказ в обслуживании, а функцию $d_i(h_0)$ — как средний «доход», получаемый СМО в единицу времени за время нахождения в состоянии i , то $Q(h_0)$ интерпретируется как предельный «доход» СМО в единицу времени [20–22, 24].

Заметим, что унимодальность функции $Q(\bar{h})$ доказана по нижнему порогу при условии постоянных a_1 и a_2 . Как показывают вычислительные эксперименты, проведенные для анализа зависимости $Q(\bar{h})$ от h_1 и h_2 , оптимальное значение взвешенной функции по нижнему порогу при больших значениях a_1 (или a_2) меняется незначительно (см. на рисунке график функции $D^*(a)$).

Литература

1. Braden B., Clark D., Crowcroft J., et al. Recommendations on queue management and congestion avoidance in the internet. — The Internet Society, 1998. RFC 2309. 17 p. <https://www.rfc-editor.org/rfc/pdfrfc/rfc2309.txt.pdf>.

2. *De Schepper K., Briscoe B., White G.* Dual-queue coupled active queue management (AQM) for low latency, low loss, and scalable throughput (L4S) // Internet Engineering Task Force, 2023. RFC 9332. <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc9332.pdf>.
3. *Floyd S., Jacobson V.* Random early detection gateways for congestion avoidance // IEEE ACM T. Network., 1993. Vol. 1. No. 4. P. 397–413. doi: 10.1109/90.251892.
4. *Viana C. C. H., Zaryadov I. S., Milovanova T. A.* Queueing systems with different types of renovation mechanism and thresholds as the mathematical models of active queue management mechanism // Discrete Continuous Models Applied Computational Science, 2020. Vol. 28. No. 4. P. 305–318. doi: 10.22363/2658-4670-2020-28-4-305-318.
5. *Mahawish A. A., Hassan H. J.* Survey on: A variety of AQM algorithm schemas and intelligent techniques developed for congestion control // Indonesian J. Electrical Engineering Computer Science, 2021. Vol. 23. No. 3. P. 1419–1431. doi: 10.11591/ijeecs.v23.i3.pp1419-1431.
6. *Zaryadov I. S., Viana C. C. H., Korolkova A. V., Milovanova T. A.* Chronology of the development of active queue management algorithms of RED family. Part 3: From 2016 up to 2024 // Discrete Continuous Models Applied Computational Science, 2024. Vol. 32. No. 2. P. 154–171. doi: 10.22363/2658-4670-2024-32-2-154-171.
7. *Abdel-Jaber H.* Performance analysis of diverse active queue management algorithms // Int. J. Networked Distributed Computing, 2025. Vol. 13. Art. 15. 32 p. doi: 10.1007/s44227-025-00056-1.
8. *Campbell A., Coulson G., Hutchison D.* A quality of service architecture // ACM SIGCOMM Comp. Com., 1994. Vol. 24. No. 2. P. 6–27. doi: 10.1145/185595.18564.
9. *Bonald T., May M., Bolot J.-C.* Analytic evaluation of RED performance // IEEE INFOCOM Conference on Computer Communications, 19th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies Proceedings. — IEEE, 2000. Vol. 3. P. 1415–1424. doi: 10.1109/INFCOM.2000.832539.
10. *Зарядов И. С., Королькова А. В., Разумчик Р. В.* Математические модели расчета и анализа характеристик систем активного управления очередями с двумя входящими потоками и различными приоритетами // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт, 2012. № 7. С. 107–111. EDN: PWXFSB.
11. *Konovalov M., Razumchik R.* Finite capacity single-server queue with Poisson input, general service and delayed renovation // Eur. J. Oper. Res., 2023. Vol. 304. No. 3. P. 1075–1083. doi: 10.1016/j.ejor.2022.05.047.
12. *Hassan S. O., Rufai A. U., Ogunlere O., et al.* IRED: An improved active queue management algorithm // J. Computer Science, 2022. Vol. 18. No. 3. P. 130–137. doi: 10.3844/jcssp.2022.130.137.
13. *Surajo Y., Suleiman A. B., Yahaya U.* Exponential-self-adaptive random early detection scheme for queue management in next generation routers // FUDMA J. Sciences, 2023. Vol. 7. No. 3. P. 33–39. doi: 10.33003/fjs-2023-0703-1763.
14. *Alshahrani A., Abu-Shareha A. A., Shambour Q. Y., Al-Kasasbeh B.* A fully adaptive active queue management method for congestion prevention at the router buffer // CMC — Comput. Mater. Con., 2023. Vol. 77. No. 2. P. 1689–1698. doi: 10.32604/cmc.2023.043545.
15. *Hassan S. O., Ajaegbu C., Solanke O. O.* Double Function Random Early Detection (DFRED): A revised RED-oriented algorithm // Iraqi J. Science, 2023. Vol. 64. No. 10. P. 5241–5252. doi: 10.24996/ijs.2023.64.10.31.

16. *Luh H., Wang C., Xu H.* A study on parameter setting of the RED queueing model // 2nd Sino-International Symposium on Probability, Statistics, and Quantitative Proceedings. — Taipei, Taiwan: ROC, 2025. P. 77–91.
17. *Ali I., Hong S., Kim T. Y.* A multilevel network-assisted congestion feedback mechanism for network congestion control. — Cornell University, 2025. 18 p. arXiv: 2501.08535 [cs.NI].
18. *Baklizi M.* Weight queue dynamic active queue management algorithm // Symmetry — Basel, 2020. Vol. 12. No. 12. Art. 2077. 16 p. doi: 10.3390/sym12122077.
19. *Подиновский В. В., Ногин Л. Д.* Парето-оптимальные решения многокритериальных задач. — М.: Наука, 1982. 256 с. EDN: RYRTAR.
20. *Коновалов М. Г.* Об одной задаче оптимального управления нагрузкой на сервер // Информатика и её применения, 2013. Т. 7. Вып. 4. С. 34–43. doi: 10.14357/19922264130404. EDN: RRROXB.
21. *Гришунина Ю. Б.* Оптимальное управление очередью в системе $M/G/1/\infty$ с возможностью ограничения приема заявок // Автоматика и телемеханика, 2015. № 3. С. 79–93.
22. *Агаларов Я. М.* Об однопороговом управлении очередью в системе массового обслуживания с нетерпеливыми заявками // Информатика и её применения, 2024. Т. 18. Вып. 2. С. 40–46. doi: 10.14357/19922264240206. EDN: JZHAKU.
23. *Карлин С.* Основы теории случайных процессов / Пер. с англ. — М.: Мир, 1971. 536 с. (*Karlin S.* A first course in stochastic processes. — New York, London: Academic Press, 1968. 502 p.)
24. *Агаларов Я. М.* Оптимизация порогового параметра RED-подобного алгоритма управления очередью модели $G/M/1$ // Системы и средства информатики, 2024. Т. 34. № 4. С. 31–47. doi: 10.14357/08696527240403. EDN: VLYKTK.
25. *Агаларов Я. М.* Признак унимодальности целочисленной функции одной переменной // Обзорение прикладной и промышленной математики, 2019. Т. 26. Вып. 1. С. 65–66. EDN: EBHBDB.

Поступила в редакцию 21.04.2025

Принята к публикации 15.09.2025

UNIMODALITY OF THE WEIGHTED SUM OF PARTIAL CRITERIA OF THE $G/M/1$ MODEL WITH UPDATING AND A TWO-THRESHOLD RED-LIKE ALGORITHM

Ya. M. Agalarov

Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119333, Russian Federation

Abstract: Currently, in addition to end-to-end congestion control mechanisms, RED-like (RED — Random Early Detection) queue management mechanisms are being actively implemented in routers in existing information networks. The paper considers a model of the $G/M/1$ queue system in which the queue is controlled by

a two-threshold RED-like algorithm with probabilistic dumping of requests. In the model under consideration, the decision to reset is made at the time of completion of the client service depending on the current queue length. Theoretically, the behavior of a weighted function of criteria (the intensity of the accepted customer flow, the average delay of served customers, the intensity of rejected customers at the entrance, the intensity of customers dropped from the queue, and the average downtime of the device) is studied when changing the value of the lower threshold parameter of the algorithm. A number of statements about the properties of particular criteria and the statement that the weighted function of particular criteria is unimodal in terms of the lower threshold parameter are proved. A simple rule for correcting the value of the lower threshold parameter is proposed which is guaranteed to find the maximum value of a weighted function of particular criteria.

Keywords: queuing system; RED-like algorithm; queue updating; unimodality

DOI: 10.14357/08696527250305

EDN: KMBOVF

References

1. Braden, B., D. Clark, J. Crowcroft, *et al.* 1998. Recommendations on queue management and congestion avoidance in the internet. The Internet Society. RFC 2309. 17 p. Available at: <https://www.rfc-editor.org/rfc/pdf/rfc2309.txt.pdf> (accessed October 1, 2025).
2. De Schepper, K., B. Briscoe, and G. White. 2023. Dual-queue coupled active queue management (AQM) for low latency, low loss, and scalable throughput (L4S). Internet Engineering Task Force. RFC 9332. Available at: <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc9332.pdf> (accessed October 1, 2025).
3. Floyd, S., and V. Jacobson. 1993. Random early detection gateways for congestion avoidance. *IEEE ACM T. Network.* 1(4):397–413. doi: 10.1109/90.251892.
4. Viana, C. C. H., I. S. Zaryadov, and T. A. Milovanova. 2020. Queueing systems with different types of renovation mechanism and thresholds as the mathematical models of active queue management mechanism. *Discrete Continuous Models Applied Computational Science* 28(4):305–318. doi: 10.22363/2658-4670-2020-28-4-305-318.
5. Mahawish, A. A., and H. J. Hassan. 2021. Survey on: A variety of AQM algorithm schemas and intelligent techniques developed for congestion control. *Indonesian J. Electrical Engineering Computer Science* 23(3):1419–1431. doi: 10.11591/ijeecs.v23.i3.pp1419-1431.
6. Zaryadov, I. S., C. C. H. Viana, A. V. Korolkova, and T. A. Milovanova. 2024. Chronology of the development of active queue management algorithms of RED family. Part 3: From 2016 up to 2024. *Discrete Continuous Models Applied Computational Science* 32(2):154–171. doi: 10.22363/2658-4670-2024-32-2-154-171.
7. Abdel-Jaber, H. 2025. Performance analysis of diverse active queue management algorithms. *Int. J. Networked Distributed Computing* 13:15. 32 p. doi: 10.1007/s44227-025-00056-1.
8. Campbell, A., G. Coulson, and D. Hutchison. 1994. A quality of service architecture. *ACM SIGCOMM Comp. Com.* 24(2):6–27. doi: 10.1145/185595.18564.

9. Bonald, T., M. May, and J.-C. Bolot. 2000. Analytic evaluation of RED performance. *IEEE INFOCOM Conference on Computer Communications, 19th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies Proceedings*. 3:1415–1424. doi: 10.1109/INFCOM.2000.832539.
10. Zaryadov, I. S., A. V. Korolkova, and R. V. Razumchik. 2012. Matematicheskie modeli rascheta i analiza kharakteristik sistem aktivnogo upravleniya ocheredyami s dvumya vkhodyashchimi potokami i razlichnymi prioritetami [Mathematical models of active queue management systems analysis based on queueing system with two types of traffic and different priorities]. *T-Comm: Telekommunikatsii i transport* [T-COMM] 6(7):107–111. EDN: PWXFSB.
11. Kononov, M., and R. Razumchik. 2023. Finite capacity single-server queue with Poisson input, general service and delayed renovation. *Eur. J. Oper. Res.* 304(3):1075–1083. doi: 10.1016/j.ejor.2022.05.047.
12. Hassan, S. O., A. U. Rufai, O. Ogunlere, et al. 2022. IRED: An improved active queue management algorithm. *J. Computer Science* 18(3):130–137. doi: 10.3844/jcssp.2022.130.137.
13. Surajo, Y., A. B. Suleiman, and U. Yahaya. 2023. Exponential-self-adaptive random early detection scheme for queue management in next generation routers. *FUDMA J. Sciences* 7(3):33–39. doi: 10.33003/fjs-2023-0703-1763.
14. Alshahrani, A., A. A. Abu-Shareha, Q. Y. Shambour, and B. Al-Kasasbeh. 2023. A fully adaptive active queue management method for congestion prevention at the router buffer. *CMC — Comput. Mater. Con.* 77(2):1689–1698. doi: 10.32604/cmc.2023.043545.
15. Hassan, S. O., C. Ajaegbu, and O. O. Solanke. 2023. Double function random early detection (DFRED): A revised red-oriented algorithm. *Iraqi J. Science* 64(10):5241–5252. doi: 10.24996/ijis.2023.64.10.31.
16. Luh, H., C. Wang, and H. Xu. 2025. A study on parameter setting of the RED queueing model. *2nd Sino-International Symposium on Probability, Statistics, and Quantitative Proceedings*. Taipei, Taiwan: ROC. 77–91.
17. Ali, I., S. Hong, and T. Y. Kim. 2025. A multilevel network-assisted congestion feedback mechanism for network congestion control. Cornell University. 18 p. Available at: <https://arxiv.org/pdf/2501.08535> (accessed October 1, 2025).
18. Baklizi, M. 2020. Weight queue dynamic active queue management algorithm. *Symmetry — Basel* 12(12):2077. 16 p. doi: 10.3390/sym12122077.
19. Podinovskiy, V. V., and V. D. Nogin. 1982. *Pareto-optimal'nye resheniya mnogokriterial'nykh zadach* [Pareto optimal solutions in multicriteria problems]. Moscow: Nauka. 256 p. EDN: RYRTAR.
20. Kononov, M. G. 2013. Ob odnoy zadache optimal'nogo upravleniya nagruzkoy na server [About one task of overload control]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 7(4):34–43. doi: 10.14357/19922264130404. EDN: RRROXB.
21. Grishunina, Y. B. 2015. Optimal control of queue in the $M|G|1|\infty$ system with possibility of customer admission restriction. *Automat. Rem. Contr.* 76(3):433–445. doi: 10.1134/S0005117915030078. EDN: UFOQYF.
22. Agalarov, Ya. M. 2024. Ob odnoporogovom upravlenii ochered'yu v sisteme massovogo obsluzhivaniya s neterpelivymi zayavkami [On single-threshold queue management in a queueing system with impatient customers]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 18(2):40–46. doi: 10.14357/19922264240206. EDN: JZHAKU.

23. Karlin, S. 1968. *A first course in stochastic processes*. New York, London: Academic Press. 502 p.
24. Agalarov, Ya. M. 2024. Optimizatsiya porogovogo parametra RED-podobnogo algoritma upravleniya ochered'yu modeli $G/M/1$ [Optimization of the threshold parameter of a RED-like queue management algorithm for a $G/M/1$ queue]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 34(4):31–47. doi: 10.14357/08696527240403. EDN: VLYKTK.
25. Agalarov, Ya. M. 2019. Priznak unimodal'nosti tselochislennoy funktsii odnoy peremennoy [A sign of unimodality of an integer function of one variable]. *Obozrenie prikladnoy i promyshlennoy matematiki* [Surveys Applied and Industrial Mathematics] 26(1):65–66. EDN: EBHBDB.

Received April 21, 2025

Accepted September 15, 2025

Contributor

Agalarov Yaver M. (b. 1952) — Candidate of Science (PhD) in technology, associate professor, leading scientist, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119333, Russian Federation; agglar@yandex.ru

ARIMA-МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ВРЕМЕН ПРЕБЫВАНИЯ В СИСТЕМЕ МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ

М. П. Кривенко¹

Аннотация: Проведено построение модели последовательности времен пребывания $\{V_i\}$ на основе имеющихся предположений относительно характеристик системы массового обслуживания (СМО) и заданных наборов данных. Для статистического контроля стабильности СМО с помощью $\{V_i\}$ привлечена модель ARIMA (AutoRegressive Integrated Moving Average). Основные причины для этого: процесс $\{V_i\}$ может быть как стационарным, так и нестационарным с зависимостью отдельных состояний; опробование упрощенного варианта ARIMA-модели при обнаружении нестабильности показало ее действенность; существует соответствующая программная реализация — пакет forecasting платформы R. При этом статистический контроль стабильности — пионерское направление, и опыта построения соответствующих статистических моделей практически нет. В статье проясняются тонкости принимаемых к действию общих принципов построения модели в случае контроля стабильности функционирования СМО. Для иллюстрации возможностей ARIMA-моделирования рассматриваются последовательности $\{V_i\}$ для двухпроцессорной системы $M/M/2$ обработки заданий со случайным выбором числа требуемых процессоров. Проведенные эксперименты показали: ARIMA-модель учитывает особенности процесса $\{V_i\}$; принятый метод подгонки модели демонстрирует надежность; применение для контроля стабильности только параметров модели неэффективно. Появившаяся возможность прогнозирования не противоречит общим результатам о поведении стабильной или нестабильной систем, может вносить коррективы в принятие решения о стабильности, а также служить отправной точкой при анализе и оценке рисков использования СМО. Исследована адекватность предлагаемой модели.

Ключевые слова: СМО (система массового обслуживания); временные ряды; тесты стабильности; автоматическое прогнозирование; ARIMA-моделирование; статистика с R

DOI: 10.14357/08696527250306

EDN: KSPKSG

1 Введение

Построение модели временного ряда, связанного с функционированием СМО, представляет собой попытку на основе имеющихся предположений (это, в частности, структура СМО, категория изучаемого процесса, общие свойства

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

входного потока и т. д.) и заданного набора данных построить представление о наиболее подходящем стохастическом процессе, который мог бы породить наблюдаемые значения. Такая задача чрезвычайно сложна и остается таковой даже в том случае, когда объем доступных данных можно сделать сколь угодно большим. Увеличение числа выборочных значений целесообразно с точки зрения надежности статистического вывода и желательно как средство реализации бесконечности при установлении стабильности, но, скорее всего, усложнит модель хотя бы потому, что на длительном периоде времени приходится допускать изменчивость условий функционирования СМО. Не надо забывать также, что рост обрабатываемых данных усугубляет вычислительные проблемы.

Тем не менее можно добиться значительного прогресса, если рассматривать только линейные процессы и надеяться, что они хорошо аппроксимируют во всех нужных аспектах свойства истинного процесса. Кроме того, для рассматриваемого далее процесса пребывания заявок в СМО с чего-то надо начинать.

Особое внимание в этом смысле привлекает методология Бокса–Дженкинса, известная под именем ARIMA; ее наиболее современное изложение дано в разд. 4 [1]. Соответствующая модель данных представляет собой расширение модели авторегрессии и скользящего среднего ARMA(p, q), применяется к нестационарным временным рядам, которые можно сделать стационарными путем взятия разностей порядка d от исходного временного ряда, и обозначается как ARIMA(p, d, q). Несезонный вариант ARIMA-модели, согласно [2], имеет вид:

$$\varphi(B) (1 - B^d) y_t = c + \theta(B) \varepsilon_t, \quad (1)$$

где $\{\varepsilon_t\}$ — белый шум с нулевым средним и дисперсией σ^2 ; B — оператор обратного сдвига; $\varphi(z)$ и $\theta(z)$ — полиномы порядка p и q соответственно. Чтобы обеспечить обратимость модели и возможность построения прогноза, предполагается, что $\varphi(z)$ и $\theta(z)$ не имеют корней в области $|z| < 1$.

Причин обратиться к ARIMA-модели в контексте статистического контроля стабильности СМО несколько.

Во-первых, для нестабильных систем и входного потока определенной интенсивности число обслуживаемых заявок линейно растет при увеличивающемся t , поэтому время пребывания в системе в среднем также растет по крайней мере линейно [3], а для стабильных — становится постоянным. Таким образом, при контроле стабильности приходится при больших значениях времени сталкиваться как со стационарным, так и с нестационарным поведением процесса пребывания заявок в системе, для которого к тому же характерна зависимость отдельных состояний. Перечисленное как раз и отвечает содержанию ARIMA-модели.

Во-вторых, опробование фактически упрощенного варианта ARIMA-модели при обнаружении нестабильности показало ее действенность [3].

В-третьих, несмотря на сложность ARIMA-модели, существует ее программная реализация, кстати, тоже непростая. Сама по себе рассматриваемая модель достаточно сложна, так как представляет собой комбинацию трех дале-

ко не простых моделей, подразумевающих сочетание разнородных трудоемких методов оценивания их параметров. Вдобавок ее применение сопровождается вычислительными проблемами, связанными с необходимостью реализации процедур многомерной оптимизации и поддержки методов перепроверки, да еще для заведомо больших объемов обрабатываемых данных; все это не способствует активному самостоятельному продвижению предлагаемой модели. На помощь приходит возможность использования надежного инструментария для работы с ARIMA-моделью в виде пакета **forecasting** [2] программной среды вычислений **R** [4] (здесь и далее имена пакетов и функций, относящихся к **R**, выделены жирным).

В-четвертых, в области родственных исследований сетевого трафика [5] можно обнаружить множество позитивных примеров использования ARIMA-модели.

Анализ сетевого трафика (далее — просто трафика) — важный этап разработки успешных превентивных схем контроля перегрузок и выявления их возможных причин. При этом выделяются две категории прогнозов: долгосрочные и краткосрочные. Прогнозирование трафика на длительный период времени дает его развернутое описание для оценки будущих потребностей в пропускной способности и, следовательно, позволяет более детально планировать и принимать лучшие решения. Кратковременное прогнозирование связано с динамическим распределением ресурсов. Оно может быть использовано для улучшения механизмов качества обслуживания, для маршрутизации пакетов, а также для контроля перегрузки и оптимального управления ресурсами.

Для описания и прогнозирования трафика используются различные группы методов, одна из которых основана на линейных моделях временных рядов. Самые популярные среди них — модели авторегрессии и модели скользящего среднего, которые могут использоваться по отдельности или объединяться для получения более точного описания данных. Такая модель оказывается крайне эффективной для различных вариантов трафика, включая прогнозирование циклических и сезонных процессов. Дальнейшим развитием оказывается интегрированная ARIMA-модель, позволяющая достичь высоких показателей качества прогнозирования. В последнее время предложены модификации перечисленных моделей [5]: К-факторная ARMA, накопительная прогнозирования APM (Accumulative Predicting Model), SARIMA (Seasonal ARIMA) с кластерами по методу k -средних, SARIMA на основе вейвлет-приближений, скорректированная AARIMA (Adjusted ARIMA), приближение для прогнозирования трафика на основе средств прогнозирования временных рядов EPTS (Engineering Prediction Time Series). Эти модификации приводят к улучшению точности прогноза, позволяют увеличить скорость обработки данных и повысить эффективность за счет снижения шума трафика, создают предпосылки для последующего развития линейных моделей.

Опыт использования линейных моделей при прогнозировании позволяет также вычленить составляющие методологии исследования трафика:

- основные этапы анализа трафика (предварительная обработка, интеллектуальный анализ данных);
- используемые показатели эффективности;
- основные модели трафика и методы прогнозирования, а также их модификации;
- стандартные наборы данных (для обучения, верификации и тестирования).

И, наконец, в-пятых, не следует забывать, что статистический контроль стабильности — пионерское направление, и опыта построения статистических моделей протекающих в СМО процессов нет, а вот сомнения в результативности применения комбинированной модели линейных процессов есть.

2 Принципы построения модели данных

Далее выясняются тонкости (детали, подробности) принимаемых к действию общих принципов построения модели в случае контроля стабильности функционирования СМО. При этом необходимо учитывать два важных условия: для моделирования привлекается сложная структура (ARIMA-модель и ее многочисленные модификации, упомянутые в связи с анализом трафика) и отсутствие соответствующего опыта статистического описания сложных процессов (последовательности времен пребывания заявок в очереди или в системе).

Формируемые решения сочетают общие контуры ARIMA-подхода и возможности привлекаемого к обработке данных пакета **forecasting** среды **R**. Базовой для этого пакета служит работа [2], которая претерпела несколько редакций. Последний вариант переведен на русский язык [6].

Пакет **forecasting** среды **R** имеется в открытом доступе на <https://CRAN.R-project.org/package=forecasting> и содержит три основные процедуры: моделирование ARIMA-данных (функция **arima.sim(...)**); подгонка ARIMA-модели (функция **auto.arima(...)**); ARIMA-прогнозирование (функция **forecast(...)**).

Выбор объема анализируемых данных. Важным и весьма противоречивым фактором процесса построения модели оказывается длина ряда наблюдений. Чтобы обеспечить достаточную долю объективности принятых решений, необходимо иметь значительное число свидетельств, на которых может быть основан рациональный выбор модели. Кроме того, статистический вывод о нестабильности может вылиться в окончательное заключение о нестабильности СМО только после его распространения на промежуток $[0, \infty)$. В результате получается, что уверенность в правоте получаемых результатов растет с увеличением объемов обрабатываемых данных, но обработка потенциально безграничного объема исходных данных на практике не реализуема хотя бы из-за существенных вплоть до непреодолимых вычислительных ограничений. Важнее другое: применение статистических тестов при «неограниченной» длине N некоторого временного ряда может привести к ошибочным выводам относительно нестабильности СМО [7] —

принятие нулевой гипотезы с помощью критерия типа Дики–Фуллера при значительных, но конечных значениях N может говорить о возможной перегрузке и нестабильной работе СМО, но одновременно с этим при больших значениях N — о восстановлении работы системы, которое в итоге гипотетически способно привести к позиционированию СМО как стабильной. Таким образом, при выборе ориентировочных значений N приходится руководствоваться противоречивыми требованиями:

- ограничения, налагаемые предметной областью анализа стабильности;
- целевые показатели эффективности предлагаемых решений;
- вычислительные возможности как построения, так и применения процедур анализа данных.

Этапы построения модели. ARIMA-ориентированная процедура построения модели состоит из итерационного цикла идентификации, оценки и диагностической проверки. Этапом, вызывающим наибольшие трудности в практических попытках построения модели временных рядов, оказывается идентификация. Здесь из богатого набора моделей необходимо выбрать один процесс, который мог бы адекватно описать данный исследуемый ряд. Несмотря на то что для рационального выбора имеются некоторые объективные критерии, чаще всего не существует четко определенной процедуры, ведущей в каждой конкретной ситуации к уникальному решению, и приходится обращаться к здравому смыслу.

Поскольку идентификация модели содержит много сложностей, возникает желание полностью исключить этот этап, например путем использования модели, содержащей большие значения параметров d , p и q , т. е. включающей в себя варианты, которые могут возникнуть на практике. Даже если не обращать внимания на вычислительные сложности алгоритмов обработки данных, подобный подход оказывается неработоспособным, так как приводит к оценкам параметров модели с чрезвычайно высокими стандартными отклонениями из-за потенциальной множественности решений.

Еще одна возможность построения модели состоит в том, чтобы автоматизировать стадию идентификации в ходе цикла построения модели, применяя приемы подбора параметров порядка модели, использующие, в частности, информационные критерии. Опыт работы с подобными критериями свидетельствует о противоречивости получающихся результатов и склонности к чрезмерному усложнению моделей. Дополнительная трудность состоит в том, что полная оценка характеристик альтернативных моделей оказывается весьма затратной с вычислительной точки зрения.

Таким образом, лучшей стратегией становится построение сначала несложной модели, которую затем уже можно будет уточнять. Фактически это означает, что выбор модели основывается на убеждении, что на практике лежащий в основе процесс, скорее всего, будет достаточно простым, а применение модели рационально.

Функция **auto.arima(...)** формирует наилучшую модель согласно одному из информационных критериев (AIC (Akaike information criterion), AIC_c , BIC (Bayesian information criterion)) из совокупности простых моделей в диапазоне, заданном максимальными значениями параметров d , p и q . Авторы [6] отдают предпочтение AIC_c — скорректированному критерию Акаике, но при контроле функционирования СМО принимаемые значения N обычно велики и оба критерия Акаике равносильны.

Адаптация модели данных. Диапазон эффективного применения ARIMA-модели расширяется, если допустить возможность преобразования данных. Его вид может проистекать из предметной области, о чем говорить для задач контроля стабильности пока преждевременно, либо оно будет задаваться в общем параметрическом виде и оцениваться по данным. Наилучшим образом зарекомендовало себя преобразование Бокса–Кокса, которое нацелено на повышение надежности статистических выводов путем повышения степени адекватности данных предположениям. Оно особенно полезно в контексте регрессионного анализа и других методов формирования статистических моделей, где допущение о гомоскедастичности и нормальности имеет решающее значение, определено для положительных наблюдений y_i и имеет вид:

$$\tilde{y}_i = f(y_i) = \begin{cases} \frac{y_i^{\lambda_{BC}} - 1}{\lambda_{BC}}, & \lambda_{BC} \neq 0; \\ \ln(y_i), & \lambda_{BC} = 0. \end{cases}$$

Здесь параметр λ_{BC} определяет характер преобразования.

Преобразование Бокса–Кокса широко используется в различных областях, его применение особенно интересно для еще неизведанных ситуаций. Поэтому выбор подходящего значения λ_{BC} становится важным шагом ARIMA-анализа и реализуется либо методом стабилизации дисперсии [8], либо с помощью λ_{BC} -параметризованной подгонки нормального распределения методом максимального правдоподобия или на основе нахождения максимальной величины коэффициента корреляции между квантилями функции нормального распределения и отсортированной преобразованной последовательностью [9].

Одно из существенных ограничений заключается в том, что преобразование Бокса–Кокса можно применять только к положительным данным, но для статистического анализа процесса пребывания это неактуально. Важнее, что оно предполагает, что данные независимо и одинаково распределены, что явно не выполняется в рассматриваемом случае.

После применения преобразования Бокса–Кокса возникает проблема корректной интерпретации его результатов. Преобразованные данные могут дать разную информацию по сравнению с исходными данными, особенно с точки зрения взаимосвязей между переменными и значимости предикторов в регрессионной модели. При представлении результатов желательно обратно преобразовать результаты в исходную шкалу, чтобы становились понятнее его последствия. Хотя

надо признать, что на начальном этапе продвижения ARIMA-модели в области статистического контроля стабильности вопросы интерпретации модели не столь уж актуальны. Но, стабилизируя дисперсию и улучшая нормальность распределений данных, преобразование Бокса–Кокса повышает достоверность статистических моделей и надежность получаемых на основе данных выводов, а значение λ важно как индикатор согласия с базовыми предположениями применяемого регрессионного анализа.

ARIMA-прогнозирование. Прогнозирование исследуемых процессов актуально в большей степени в случае стабильных СМО, когда локальные изменения могут принимать вид опасных тенденций и требовать вмешательства в контроль функционирования. Нестабильное поведение обнаруживается, когда $d \geq 1$, причем согласно [3], скорее всего, для описания исследуемого процесса достаточно будет ограничиться только значением $d = 1$ и ожидать линейного роста среднего наблюдаемого процесса. В этом смысле указанное значение может подтверждать правильность подбора модели.

Алгоритм прогнозирования должен основываться на подходящей модели временного ряда, вычислять прогнозы и в обязательном порядке давать представление о качестве построенных прогнозов.

Для построения прогноза исследуемого процесса в точке $t = T + 1$ при известных предшествующих значениях для $t = \dots, T - 1, T$ и полученных оценках параметров модели в первую очередь находится такое разложение представления (1), что y_t оказывается в левой части, а все остальные члены y_i и ε_i с меньшими значениями индексов — в правой. Если теперь в нем провести замену t на $T + h$, то можно последовательно для $h = 1, 2, \dots$ нужное число раз пересчитать прогнозируемое значение y_{T+h} , заменив в правой части разложения ошибку прогноза будущего значения в точке $t = T + h$ на 0, а прошлые ошибки — соответствующими остатками для уже имеющихся или спрогнозированных значений y_t .

Вычисление интервалов возможных значений ARIMA-прогноза (интервалов прогноза) в общем случае выполняется сложнее как в смысле обоснования правомерности исходных предположений, так и с учетом конкретного вида модели. Примером простого результата служит обычный вид доверительного интервала для оценки прогноза в точке $T + 1$ при найденном выборочном стандартном отклонении остатков. Этот результат справедлив для всех моделей ARIMA, независимо от их параметров и порядков [6]. Многошаговые интервалы прогноза, правда для частных случаев ARIMA-моделей, приведены в [10].

Интервалы прогноза для моделей ARIMA строятся на основных допущениях регрессионного анализа об остатках. По этой причине их формирование необходимо предварять исследованиями зависимости и распределения остатков. Если остатки не коррелированы, но не распределены нормально, то можно обратиться к бутстреп-методу, что допускает функция **forecast**.

В общем случае интервалы прогноза в моделях ARIMA увеличиваются по мере расширения прогнозного горизонта. Для стационарных моделей, когда

$d = 0$, они будут сходиться и для длительных горизонтов будут, по существу, одинаковыми. Если же $d \geq 1$, то интервалы прогноза будут продолжать расти в будущем.

3 Эксперименты

Для исследования возможностей ARIMA-моделирования рассмотрим, как и раньше в [11], последовательности времен пребывания заявок в системе $\{V_i\}$ для двухпроцессорной системы обработки заданий со случайным выбором числа требуемых процессоров. Функционирование подобной системы $M/M/2$ определяется параметрами: λ — интенсивность поступления заданий на обработку; p_1 — вероятность того, что для выполнения задания требуется один процессор; μ — среднее время обработки задания процессором/процессорами. Следует заметить, что обозначения $\lambda_{ВС}$ и λ разной природы и по возможности сохраняют сложившиеся традиции публикаций.

Условие стабильности этой системы при простейшем пуассоновском входном потоке функционирования известно и принимает вид $\lambda/\mu < 2/(2-p_1^2)$, с помощью которого будет осуществляться выбор моделируемых систем: параметры p_1 и μ принимаются базовыми со значениями $p_1 = 0,5$ и $\mu = 1$, а λ выбирается как $C_\lambda(2\mu)/(2-p_1^2)$, где C_λ — индикатор стабильности работы системы (при $C_\lambda < 1$ система стабильна). Рассматривались случаи $C_\lambda = 0,5, 0,9, 1,1$ и $1,5$ и следующие схемы статистических испытаний для каждого из них: генерирование временного ряда пребывания в системе при обработке 100 000 заявок; расщепление ряда на идущие один за другим фрагменты размером 1000 каждый; подгонка ARIMA-модели для каждого фрагмента (всего 400 вариантов).

Работоспособность модели. В первую очередь эксперименты показали, что ARIMA-модель учитывает особенности процесса пребывания заявок в СМО:

- при умеренных значениях в диапазоне $C_\lambda < 1$ четко проявляется начальная фаза функционирования СМО, когда стабилизируются ее показатели и значения d меняются с 1 (рост средних показателей для первых фрагментов данных) на 0 (стабилизация для последующих фрагментов);
- ожидаемое поведение процесса пребывания на бесконечности может фрагментарно нарушаться, и статистический анализ для принятой модели тут же будет свидетельствовать об этом; так ожидаемые значения $d = 0$ (свидетельство стабильности системы) и 1 (нестабильная система) изредка (3% вариантов) заменяются на $d = 2$, что может быть вызвано допредельным нелинейным поведением процесса или сменой характера его изменений.

Надежность результатов. Подгонка модели для принятой реализации ARIMA-моделирования осуществляется путем выбора наилучшей комбинации значений параметров p и q из $\{1, 2, \dots, 5\} \times \{1, 2, \dots, 5\}$. Среди проанализированных вариантов встретилось лишь 1,5% с решением на границе; так получилось, что все подобные решения одинаковы и имеют вид ARIMA(5, 2, 0).

Тот факт, что число остальных решений доминирует, укрепляет доверие к принятому методу подгонки модели, а также свидетельствует о достаточности принятых предельных значений p и q .

Эффективность преобразования исходных данных. Для подключения преобразования данных Бокса–Кокса в рамках пакета **forecasting** необходимо указать **lambda=“auto”**. Полученные оценки параметра λ_{BC} могут дать предварительную информацию относительно общих статистических свойств анализируемых процессов. Так, в частности, при $C_\lambda \approx 1$, средние значения λ_{BC} близки к 1, т. е. необходимость в преобразовании отпадает.

Следует обратить внимание на то, что в ходе экспериментов проявилась неустойчивость работы процедуры оценивания λ_{BC} , когда ее результат либо просто не формируется без каких-либо дополнительных сообщений (5% вариантов), либо при различных данных равен одному и тому же значению (15% вариантов $\lambda_{BC} = -0,8999268$ и 21% вариантов $\lambda_{BC} = 1,999927$, что, скорее всего, отвечает граничным возможным значениям λ_{BC}). Подобные ситуации возникают в нестабильном случае, и их частота растет с увеличением значения индикатора нестабильности, а причина кроется в принятой схеме прогнозирования с помощью ARIMA-модели: преобразование Бокса–Кокса находится в начале цепочки процедур подбора модели [6, рис. 8.11] и его применение совершенно адекватно реагирует на нестационарность анализируемых процессов в случае нестабильности. Кроме того, предполагается, что данные независимо и одинаково распределены, что совершенно точно не выполняется для процесса $\{V_i\}$. Неустойчивость функционирования СМО изменяет до неузнаваемости, возможно, даже похожее на нормальное распределение V_i для стабильного случая.

Перечисленные факторы (нереальность условий применения и сложность интерпретации результатов преобразования, неустойчивость процедур обработки) дают основания для отказа от применения преобразования Бокса–Кокса, тем более что в этом случае экспериментальные результаты ARIMA-моделирования, касающиеся структурных параметров (p, d, q) , практически не отличаются от варианта с предварительным преобразованием данных.

Статистический контроль стабильности. При обнаружении стационарности наблюдаемого или преобразованного процессов используется тест на единичный корень, результаты которого отражаются на значении параметра d построенной на основе данных ARIMA-модели. Как следствие, получаем правило решения: если $d = 0$, то речь идет о стабильной системе, а если $d \geq 1$, то о нестабильной. Полученные экспериментальные результаты для соответствующей ошибки классификации (14% для $C_\lambda = 0,5$, 93% для $C_\lambda = 0,9$, 0% для $C_\lambda = 1,1$ и 0% для $C_\lambda = 1,5$) согласуются с [3], что вполне естественно, так как речь идет об одном и том же критерии значимости Дики–Фуллера. Поэтому остается в силе и основной вывод [7] о целесообразности использования для контроля стабильности комбинированных критериев.

Адекватность ARIMA-модели. В стандартной линейной регрессии предполагается, что ошибки независимы и распределены одинаково. Последнее

требование может усиливаться условием нормальности. На практике проверка сформулированных предположений для выборочных остатков сводилась к исследованию отличия от нуля значений автокорреляционной функции (АКФ) и к применению стандартных критериев нормальности. При этом уровень значимости при тестировании принимался равным 10%.

Учитывая разведочный характер изучения возможности ARIMA-моделирования для описания процесса пребывания заявок в СМО, следовало активно использовать графические методы. Так, анализ поведения графиков АКФ, включающих доверительную область для нулевых значений, показал наличие только отдельных выходов за ее границы. Гистограммная оценка плотности распределения остатков имела колоколообразный вид, симметричный относительно среднего значения, т. е. соответствовала нормальной плотности. Полученные визуальным путем предварительные предположения о независимости и нормальности подверглись дополнительному формальному анализу.

Классической процедурой тестирования, предложенной для оценки автокорреляции в регрессионных отношениях, считается критерий Дурбина–Уотсона (Durbin–Watson), реализованный в виде функции **dwtest(...)** из пакета **lmtest**. Другими тестами на автокорреляцию, предложенными именно для диагностической проверки ARIMA-моделей [12, гл. 6], служат тест Бокса–Пирса (Box–Pierce) и модифицированный вариант теста Лjung–Бокса (Ljung–Box). Оба реализованы в виде функции **Box.test(...)** из пакета **stats**. В отличие от диагностических тестов пакета **lmtest** указанная функция обрабатывает в качестве основного аргумента ряд остатков, а не спецификацию линейной модели, что позволяет не вводить дополнительные предположения и тем самым существенным образом упрощает ее применение. Для всех вариантов данных и обоих тестов **Box.test(...)** результаты со 100%-ной безошибочностью указывают на правдоподобность предположения о независимости остатков.

В **R** реализованы практически все имеющиеся тесты на нормальность — либо в виде стандартных функций, либо входящими в состав отдельных пакетов. Примером базовой функции служит **shapiro.test(...)**, при помощи которой можно реализовать тест Шапиро–Уилка (Shapiro–Wilk). В специализированный пакет **nortest** входят другие распространенные проверки на нормальность: **ad.test(...)** — тест Андерсона–Дарлинга (Anderson–Darling); **cvm.test(...)** — тест Крамера–фон Мизеса (Cramer–von Mises); **lillie.test(...)** — тест Колмогорова–Смирнова в модификации Лиллиефорса (Lilliefors–Kolmogorov–Smirnov); **pearson.test(...)** — критерий хи-квадрат Пирсона (Pearson); **sf.test(...)** — тест Шапиро–Франция (Shapiro–Francia). Из них использовались функции **ad.test(...)**, **cvm.test(...)**, **lillie.test(...)** и **pearson.test(...)**, не имеющие ограничений по размеру выборки и тем самым не требующие дополнительных временных затрат на рандомизацию. Для всех вариантов данных и отобранных тестов со 100%-ной безошибочностью гипотеза о нормальном распределении остатков отвергалась. Для усиления надежности принимаемых решений анализ последовательности остатков дополнялся исследованием случайной перестанов-

ки ее элементов; результаты оставались без изменений и говорили о том, что предположение о нормальности остатков если и может быть принятым, то только как грубое приближение. Это получило свое подтверждение после уменьшения размера фрагмента до 100 (напомним, что общее число фрагментов при этом становилось равным 1000) с последующим исследованием зависимости и нормальности: независимость устанавливалась так же строго, а число принятий гипотезы о нормальном распределении возрастало и могло становиться более 50%.

Примеры прогнозов. Открывающиеся возможности использования прогноза $\{V_i\}$ на основе ARIMA-модели проиллюстрируем на двух примерах: когда исследуемая система стабильна, $C_\lambda = 0,9$, и нестабильна, $C_\lambda = 1,1$. Значения степени стабильности C_λ выбраны вблизи единичного порогового значения и могут приводить к ошибкам принятия соответствующих решений. Из всей совокупности фрагментов для каждого примера были выбраны по одному так, чтобы структура соответствующих моделей была бы одинаковой и нетривиальной, таковой оказалась ARIMA(3, 1, 2); оценки параметров модели оказались, естественно, различными. Значения V_i , наблюдаемые для определенного фрагмента ($i = \overline{1, 1000}$) и спрогнозированные ($i = \overline{1001, 1200}$) при $C_\lambda = 0,9$ и $C_\lambda = 1,1$ приведены на рис. 1 и 2 соответственно. Области, образованные 90%-ными доверительными интервалами, выделены серым цветом.

Для $C_\lambda = 0,9$ значение $d = 1$ предупреждает о возможной нестабильности системы, что ошибочно. Но поведение прогноза на рис. 1 не только указывает на стабильность, но и дает оценку среднего поведения ряда $\{V_i\}$. Доверительные интервалы для прогнозируемых значений времени пребывания достаточно протяженные, что соответствует немалому разбросу самого наблюдаемого процесса.

Для $C_\lambda = 1,1$ оценка $d = 1$ и поведение прогнозируемых значений (см. рис. 2) говорят о нестабильном поведении системы, а их изменения быстро принимают ожидаемый линейный вид. Размеры доверительной области полностью согласуются с поведением $\{V_i\}$ на периоде наблюдения.

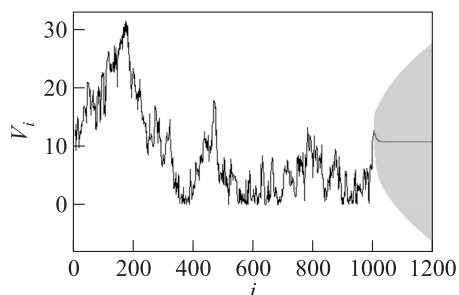


Рис. 1 Поведение $\{V_i\}$ на основе данных 26-го фрагмента и модели ARIMA(3, 1, 2) при $C_\lambda = 0,9$

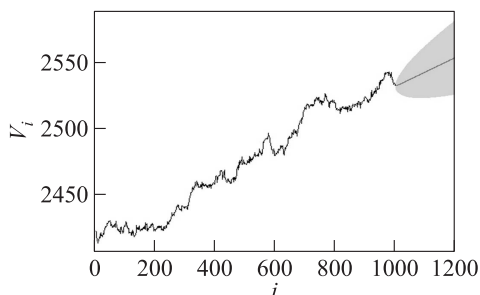


Рис. 2 Поведение $\{V_i\}$ на основе данных 35-го фрагмента и модели ARIMA(3, 1, 2) с дрейфом при $C_\lambda = 1,1$

Таким образом, оценка перспективы не противоречит общим результатам о поведении стабильной или нестабильной системы, может вносить коррективы в принятие решения о стабильности, а также служить отправной точкой при анализе и оценке рисков использования СМО.

4 Заключение

Стремление применить ARIMA-моделирование процессов времен пребывания заявок в СМО в первую очередь опиралось на свойства этих процессов, обоснованные ранее. Кроме того, привлечение модели было обеспечено программными средствами, а также имелись позитивные примеры ее использования в других близких областях. В дополнение к этому проведенные исследования возможностей ARIMA-модели позволили предпринятую попытку ее внедрения при решении задач контроля стабильности СМО завершить успешно.

В стандартной линейной регрессии, ставшей базовым методом в рассматриваемой ситуации, предполагается, что ошибки независимы и распределены одинаково, последнее может усиливаться до требования нормальности. В проведенных экспериментах при рассмотрении остатков для аппроксимированной регрессии и их выборочных автокорреляций эти предположения в основном выполняются. Однако при расширении спектра априорных допущений относительно СМО приходится допускать, что предположения регрессионного анализа могут нарушаться. Поэтому более уместно предположить, что ошибки представляют собой наблюдения стационарного процесса второго порядка с нулевым средним значением [10, разд. 6.6]. Поскольку многие АКФ хорошо аппроксимируются АКФ правильно выбранного процесса $ARMA(p, q)$, такое расширенное представление об ошибках модели может представлять интерес в перспективе.

Другим способом нейтрализации отклонений от классических предположений регрессии при прогнозировании может стать применение методов управления выборкой. Просто воспользоваться бутстрепом для оценивания интервалов прогноза (параметр **bootstrap** функции **forecast(...)**) некорректно, потому что тиражироваться должна нормально распределенная ошибка, чего, как оказывается, нет. Поэтому можно имитировать случайным образом пропуск элементов $\{V_i\}$ (в духе метода складного ножа) и получать для сглаживания множество интервалов. Данная возможность у функции **forecast(...)** отсутствует.

Литература

1. Box G. E. P., Jenkins G. M., Reinsel G., Ljung G. M. Time series analysis: Forecasting and control. — 5th ed. — Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2015. 712 p.
2. Hyndman R. J., Khandakar Y. Automatic time series forecasting: The forecast package for R // J. Stat. Softw., 2008. Vol. 27. Iss. 3. P. 1–22. doi: 10.18637/jss.v027.i03.
3. Кривенко М. П. Статистический критерий стабильности системы массового обслуживания, основанный на последовательности времен пребывания // Систе-

- мы и средства информатики, 2024. Т. 34. № 2. С. 55–65. doi: 10.14357/08696527240204. EDN: RVWWXQ.
4. Jones E., Harden S., Crawley M. J. The R book. — 3rd ed. — Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2023. 880 p.
 5. Manish J. M., Hadi T. H. A review of network traffic analysis and prediction techniques. — Cornell University, 2015. 22 p. arXiv:1507.05722 [cs.NI].
 6. Хайндман Р., Атанасопулос Д. Прогнозирование: принципы и практика / Пер. с англ. А. В. Логунова. — М.: ДМК Пресс, 2023. 458 с. (Hyndman R. J., Athanasopoulos G. Forecasting: Principles and practice. — 3rd ed. — Melbourne, Australia: OTexts, 2021. 442 p.)
 7. Кривенко М. П. Сравнительный анализ тестов стабильности системы массового обслуживания // Информатика и её применения, 2025. Т. 19. Вып. 1. С. 61–66. doi: 10.14357/19922264250108. EDN: XDTUNK.
 8. Guerrero V. M. Time-series analysis supported by power transformations // J. Forecasting, 1993. Vol. 12. Iss. 1. P. 37–48. doi: 10.1002/for.3980120104.
 9. Box G. E. P., Cox D. R. An analysis of transformations // J. Roy. Stat. Soc. B Met., 1964. Vol. 26. No. 2. P. 211–252.
 10. Brockwell P. J., Davis R. A. Introduction to time series and forecasting. — 3rd ed. — Cham, Switzerland: Springer, 2016. 428 p. doi: 10.1007/978-3-319-29854-2.
 11. Кривенко М. П. Статистический критерий стабильности системы массового обслуживания, основанный на входном и выходном потоках // Информатика и её применения, 2024. Т. 18. Вып. 1. С. 54–60. doi: 10.14357/19922264240108. EDN: JNJJMU.
 12. Kleiber C., Zeileis A. Applied econometrics with R. — New York, NY, USA: Springer Science + Business Media, LLC, 2008. 229 p. doi: 10.1007/978-0-387-77318-6.

Поступила в редакцию 02.06.2025

Принята к публикации 15.09.2025

ARIMA-MODELING OF THE SEQUENCE OF SOJOURN TIMES IN QUEUEING SYSTEMS

M. P. Krivenko

Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119333, Russian Federation

Abstract: The article constructs a model of the sequence of sojourn times $\{V_i\}$ based on the available assumptions regarding the characteristics of the queueing system and the specified data sets. For statistical control of the stability of the queueing system, the ARIMA-model (AutoRegressive Integrated Moving Average) has been used. The main reasons for this are as follows: the process $\{V_i\}$ can be both stationary and nonstationary with the dependence of individual states; testing a simplified version of the ARIMA-model when instability is detected has shown its effectiveness; and there is a corresponding software

implementation — the forecasting package of the R platform. At the same time, statistical stability control is a pioneer direction and there is practically no experience in building appropriate statistical models. The article clarifies the subtleties of the general principles of model construction taken into action in the case of monitoring the stability of the queueing system. To illustrate the capabilities of ARIMA-modeling, sequences for a dual-processor $M/M/2$ job processing system with a random selection of the number N are considered. The ARIMA-model takes into account the features of the process $\{V_i\}$; the adopted method of fitting the model demonstrates reliability; and using only model parameters for stability control is not effective. The emerged predictive capability does not contradict the overall results on the behavior of stable or unstable systems, can make adjustments to the decision on stability, and can also serve as a starting point for analyzing and assessing the risks of using queueing system. The adequacy of the proposed model is investigated.

Keywords: queueing system; time series; tests of stability; automatic forecasting; ARIMA- modeling; statistics with R

DOI: 10.14357/08696527250306

EDN: KSPKSG

References

1. Box, G. E. P., G. M. Jenkins, G. C. Reinsel, and G. M. Ljung. 2015. *Time series analysis: Forecasting and control*. 5th ed. Hoboken, NJ: Wiley. 712 p.
2. Hyndman, R., and Y. Khandakar. 2008. Automatic time series forecasting: The forecast package for R. *J. Stat. Softw.* 27(3):1–22. doi: 10.18637/jss.v027.i03.
3. Krivenko, M. P. 2024. Statisticheskiiy kriteriy stabil'nosti sistemy massovogo obsluzhivaniya, osnovannyy na posledovatel'nosti vremen prebyvaniya [Statistical criterion for queueing system stability based on sojourn times]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 34(2):55–65. doi 10.14357/08696527240204. EDN: RVWWXQ.
4. Jones, E., S. Harden., and M. J. Crawley. 2023. *The R book*. 3rd ed. Hoboken, NJ: Wiley. 880 p.
5. Manish, J. M., and T. H. Hadi. 2015. A review of network traffic analysis and prediction techniques. Cornell University. 22 p. Available at: <https://arxiv.org/pdf/1507.05722v2> (accessed October 3, 2025).
6. Hyndman, R. J., and G. Athanasopoulos. 2021. *Forecasting: Principles and practice*. 3rd ed. Melbourne: OTexts. 442 p.
7. Krivenko, M. P. 2025. Sravnitel'nyy analiz testov stabil'nosti sistemy massovogo obsluzhivaniya [Comparative analysis of queueing system stability tests]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 19(1):61–66. doi: 10.14357/19922264250108. EDN: XDTUNK.
8. Guerrero, V. M. 1993. Time-series analysis supported by power transformations. *J. Forecasting* 12(1):37–48. doi: 10.1002/for.3980120104.
9. Box, G. E. P., and D. R. Cox. 1964. An analysis of transformations. *J. Roy. Stat. Soc. B Met.* 26(2):211–252.
10. Brockwell, P. J., and R. A. Davis. 2016. *Introduction to time series and forecasting*. 3rd ed. Cham, Switzerland: Springer. 428 p. doi: 10.1007/978-3-319-29854-2.

11. Krivenko, M.P. 2024. Statisticheskiy kriteriy stabil'nosti sistemy massovogo ob-sluzhivaniya, osnovanny na vkhodnom i vykhodnom potokakh [Statistical criterion for queuing system stability based on input and output flows]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 18(1):54–60. doi: 10.14357/19922264240108. EDN: JNJJMU.
12. Kleiber, C., and A. Zeileis. 2008. *Applied econometrics with R*. New York, NY: Springer Science + Business Media, LLC. 229 p. doi: 10.1007/978-0-387-77318-6.

Received June 2, 2025

Accepted September 15, 2025

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

МОДЕЛЬ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ИМИТАЦИИ АТАК НА ОСНОВЕ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ*

*М. М. Греков*¹

Аннотация: Рассматривается применение методов машинного обучения для построения интеллектуальной системы имитации атак, ориентированной на автоматизацию тестирования на проникновение в рамках обеспечения сетевой безопасности. Традиционные методы проведения таких тестов характеризуются высокой трудоемкостью и существенными затратами времени и ресурсов. Разработанная модель использует алгоритмы генеративного состязательного имитационного обучения и обучения с подкреплением. Это позволяет воспроизводить поведение атакующих и формировать реалистичные сценарии, приближенные к действиям профессиональных специалистов по безопасности. Особенность модели заключается во введении семантических вознаграждений — они позволяют учитывать не только сам факт достижения цели, но и такие параметры, как новизна атакующего действия и его скрытность. Для повышения устойчивости к изменениям в сетевой среде модель может быть расширена двумя дискриминаторами. Также предусмотрена возможность многоагентного взаимодействия, что позволяет моделировать скоординированные атаки, имитирующие действия нескольких злоумышленников.

Ключевые слова: информационная безопасность; генеративное состязательное имитационное обучение; имитация атак; машинное обучение

DOI: 10.14357/08696527250307

EDN: LYXIDN

1 Введение

В условиях быстро развивающегося ландшафта угроз информационной безопасности действия злоумышленников представляют серьезную проблему для организаций во всех отраслях. Важным фактором стала оценка эффективности внедренной системы защиты информации.

Имитация взломов и атак (Breach and Attack Simulation, BAS) — быстро развивающаяся область в области информационной безопасности. BAS-системы становятся все более важным инструментом для оценки и улучшения применяемых мер информационной безопасности [1]. Такие системы предполагают использование передовых технологий для моделирования и тестирования потенциально слабых мест компьютерных сетей и систем. Основной целью BAS ставится выявление потенциальных уязвимостей, прежде чем они могут быть

*Статья рекомендована к публикации программным комитетом 15-й Международной конференции «Интеллектуализация обработки информации».

¹Тульский государственный университет, grekov.web@yandex.ru

использованы злоумышленниками. Традиционно BAS-системы полагались на predetermined сценарии, основанные на правилах, для имитации атак.

В последние годы использованию методов машинного обучения и моделей нейросетей в области сетевой безопасности уделяется значительное внимание в связи с возрастающей сложностью и изощренностью сетевых атак [2]. Методы обучения с подкреплением (Reinforcement Learning, RL) и глубокого обучения с подкреплением (Deep Reinforcement Learning, DRL) широко используются научным сообществом для моделирования и автоматизации тестирования на проникновение [3]. Однако их применение в контексте крупных сетей, состоящих из множества хостов и узлов, сталкивается с рядом существенных ограничений. Эти методы, как правило, демонстрируют высокую эффективность при тестировании на уровне одного хоста, их адаптивность и масштабируемость значительно снижаются при работе в более сложных и многосоставных средах, таких как крупные сети.

В традиционных методах RL/DRL агент вынужден исследовать множество возможных состояний системы, что требует значительных вычислительных ресурсов и времени. Награды, получаемые за успешное тестирование уязвимостей, недостаточно частые или даже отсутствуют на протяжении большого числа взаимодействий. Кроме того, сложность настройки наград для работы в сети с множеством хостов значительно увеличивается. Каждый хост и его окружение могут требовать индивидуальной настройки параметров награды, что приводит к дополнительной сложности в процессе обучения.

Одним из перспективных подходов в области тестирования на проникновение оказалось генеративное состязательное имитационное обучение (Generative Adversarial Imitation Learning, GAIL) [4]. GAIL использует концепцию имитационного обучения, где агент обучается на основе поведения эксперта, а не напрямую на наградах, получаемых в процессе тестирования. Это позволяет агенту быстрее адаптироваться к сложным сценариям, минимизируя необходимость в тонкой настройке наград.

Таким образом, агент может имитировать успешные стратегии атаки, даже если такие события происходят редко. Кроме того, GAIL значительно упрощает настройку наград, так как агент обучается подражать действиям опытных тестеров на проникновение, а не полагаться на сложные схемы наград, разработанные для каждой конкретной уязвимости или компонента системы. Это позволяет эффективно моделировать атаки в больших и сложных сетях без необходимости ручной настройки наград для каждого отдельного хоста.

В данной статье предлагается модель на основе генеративного состязательного имитационного обучения для автоматизации процесса тестирования на проникновение и улучшения оценки эффективности систем защиты информации. Разрабатываемая модель на основе генеративного состязательного имитационного обучения дополнена механизмом семантических вознаграждений, что позволяет оценивать атаки не только по факту достижения цели, но и с учетом их новизны и степени скрытности. Такая формализация функции вознаграждения способ-

ствуется обучению агента более сложным, приближенным к реальным условиям сценариям, а также обеспечивает воспроизведение поведения, характерного для квалифицированных специалистов в области тестирования на проникновение. Кроме того, архитектура модели поддерживает многоагентный режим, при котором несколько агентов могут взаимодействовать между собой и с окружением в рамках единого процесса атаки. В реальных условиях злоумышленники часто используют несколько агентов для выполнения атак, таких как распределенные DoS-атаки или сложные многозадачные атаки с целью обхода защитных механизмов. Многоагентный подход в контексте GAIL позволяет моделировать такие координированные атаки более эффективно, чем это возможно при использовании традиционных методов RL/DRL, которые чаще всего фокусируются на одном агенте и одном объекте тестирования.

2 Генеративное состязательное имитационное обучение

Применение обучения с подкреплением может быть непростой задачей, когда оптимальная политика неизвестна или ее трудно освоить с нуля [5]. Высокая размерность дискретного пространства действий агента приводит к проблеме сходимости. Имитационное обучение решает указанную проблему, позволяя агенту имитировать политику эксперта.

GAIL — это метод имитационного обучения, который использует генератор и дискриминатор для создания реалистичных сценариев атаки. В основе GAIL лежат генеративные состязательные нейронные сети (Generative Adversarial Network, GAN), которые стали мощным инструментом для моделирования сложных распределений данных [6]. GAN представляет собой две нейронные сети, одна из которых служит генератором, а вторая — дискриминатором. В ходе состязательного обучения может быть получена модель, способная создавать новые образцы данных, подобные реальным [7].

Генератор G обучается на основе стратегии и создает траектории атак, максимально похожие на поведение эксперта. Пусть π_G — это политика генератора, которая на основе текущего состояния s_t выбирает действия a_t для атаки. Вознаграждение r_t , получаемое на каждом шаге, определяется как разница между действиями генератора и действиями эксперта.

Обучение генератора в GAIL сводится к максимизации правдоподобия действий эксперта:

$$J_G(\pi_G) = \mathbb{E}_{a_t \sim \pi_G} [\log D(s_t, a_t)],$$

где $D(s_t, a_t)$ — вероятность того, что дискриминатор примет действия a_t как действия, выполненные реальным экспертом; $\mathbb{E}$ — математическое ожидание по выборке действий a_t из политики π_G .

Дискриминатор D обучается для того, чтобы отличить действия генератора от действий, выполненных экспертами. Дискриминатор получает пару (s_t, a_t) .

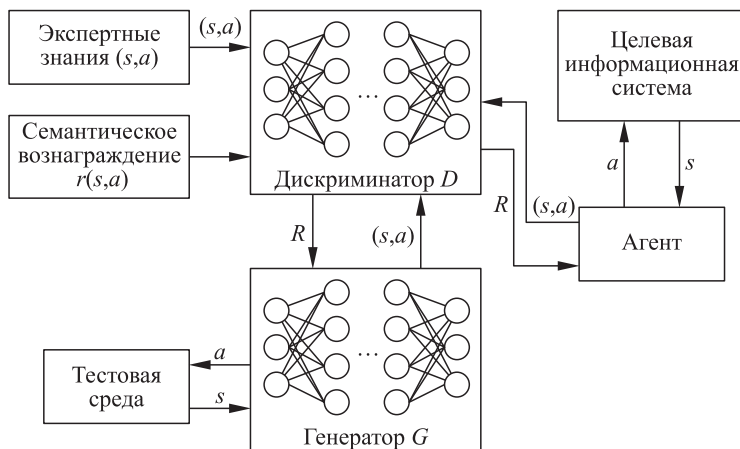


Рис. 1 Модель системы на основе GAIL и DRL

Вознаграждение для дискриминатора можно записать как

$$L_D(D) = \mathbb{E}_{a_t \sim \pi_{\text{expert}}} [\log D(s_t, a_t)] + \mathbb{E}_{a_t \sim \pi_G} [\log (1 - D(s_t, a_t))],$$

где π_{expert} — политика эксперта, которая представляет реальные действия атакующих.

Для создания модели интеллектуальной BAS-системы, представленной на рис. 1, предлагается применить архитектуру, которая основана на моделях GAIL и DRL/RL. Одно из ключевых свойств предлагаемой модели заключается в ее способности формировать сценарии атак, достоверно воспроизводящие поведение эксперта при проведении тестирования на проникновение. Принцип работы основан на создании соответствия между действиями эксперта и реакциями целевой системы. Как только сопоставление изучено, генератор может использовать его для имитации атак, аналогичных тем, которые выполняются экспертом. Затем сгенерированные сценарии атак используются для обучения агента RL/DRL выполнять проникновение в сетевую инфраструктуру. Агент обучен максимизировать свое вознаграждение, находя уязвимости и используя их, а также избегая обнаружения механизмами безопасности сети. Такая модель позволит уменьшить трудоемкость и сделать процесс тестирования на проникновение более масштабируемым.

Первоначальными входными данными служат знания экспертов. Создание такого набора данных возможно в автоматическом режиме с помощью DeepExploit [7]. Полученный набор данных — это множество состояний и действий, что представляет собой траектории атак. Генератор обучается в тестовой среде с одним устройством, агент выполняет действия в информационной системе (реальная среда). Обе модели не имеют доступа к входным данным. Обучение осуществляется за счет дискриминатора, который должен отличать множество из

базы знаний от множеств, получаемых от генератора и RL/DRL-агента. Таким образом, модели итеративно обучаются выполнять действия, которые приводят к успешному проникновению.

3 Сбор данных для обучения и структура набора данных

В отличие от традиционных методов обучения с подкреплением, где точная формализация признаков состояния определяет функцию вознаграждения [3], генеративное состязательное имитационное обучение опирается на траектории экспертов — последовательности состояний и действий [4, 5]. Это снижает зависимость от ручной настройки признаков, однако качество модели в решающей степени зависит от репрезентативности траекторий, полноты и согласованности данных, которые должны отражать поведение реальных атакующих [1].

Данные собираются автоматически в тестовой среде Metasploitable2 с помощью DeerpExploit [7], что позволяет воспроизвести уязвимости реальных систем, такие как устаревшие версии программного обеспечения и открытые сервисы [8]. Процесс начинается со сканирования цели для выявления доступных портов, сервисов и их конфигураций, что формирует основу для траекторий «состояние–действие». Наивысшее значение вознаграждения присваивается сценарию, при котором агент не только эксплуатировал целевой узел, но и получил расширенные привилегии [9, 10]. В момент достижения максимального вознаграждения фиксируются соответствующие пары состояние — действие, которые затем сохраняются в набор данных для обучения.

Вектор состояния состоит из пяти компонентов: *тип операционной системы* (например, Linux), определяемый на основе информации о цели; *название сервиса* или продукта (например, SSH), выявляемое по данным порта; *версия сервиса* (например, 5.9 для OpenSSH), извлекаемая из конфигурации сервиса; *тип эксплойт-модуля* — модуль Metasploit для эксплуатации уязвимости; *целевая платформа*, указывающая конкретную версию или архитектуру, выбираемую из списка целей.

Тип эксплойт-модуля определяется на основе поиска модулей Metasploit для конкретного сервиса, с фильтрацией по совместимости с операционной системой и качеством эксплойта [7]. Целевая платформа выбирается из списка, связанного с каждым эксплойтом, где каждая цель сопровождается описанием и набором совместимых полезных нагрузок (payload). Выбор этих параметров ограничен совместимостью с характеристиками сервиса, что обеспечивает их применимость в реальных атаках [7]. Значимость компонентов подтверждается анализом базы CVE, где уязвимости, такие как CVE-2021-44228 (Log4j) или CVE-2017-5638 (Apache Struts), зависят от сервисов, версий и типов эксплуатации [8]. Сбор данных происходит в двух режимах: начальное состояние формируется с использованием случайного выбора из доступных параметров, а последующие состояния основаны на текущих конфигурациях, выявленных в процессе тестирования [5].

После сбора данные обрабатываются для подготовки к обучению GAIL. На первом этапе исключаются дубликаты и состояния с неизвестными сервисами [7].

Качество данных оценивается по двум метрикам:

- (1) полнота (доля записей с полным набором компонентов состояния) достигает 96% благодаря исключению неполных данных [1];
- (2) согласованность (отсутствие дубликатов и противоречий в траекториях) составляет 98%, что подтверждено анализом уникальности пар состояние–действие.

Валидация данных осуществляется путем сопоставления с уязвимостями Metasploitable2. Качество модели GAIL зависит от репрезентативности траекторий и точности обработки данных, что обеспечивает генерацию реалистичных сценариев атак [4].

Тип операционной системы, название сервиса, тип эксплойт-модуля кодируются как целое число (индекс списка), которое нормализуется в диапазоне $[-1, 1]$ через максимальное число типов в списке по формуле:

$$\hat{s}_i = \frac{s_i - S_{\text{mean}}}{S_{\text{mean}}},$$

где s_i — индекс признака из списка до нормализации; S_{mean} — значение, равное максимальному числу в списке признака, поделенному пополам.

Версия сервиса извлекается из результатов сканирования в виде вещественного числа. Тип целевой платформы обозначается целым числом и представляет собой номер цели, полученный из списка в сопоставленном эксплойте.

Для каждого эксплойта и цели формируется список совместимых полезных нагрузок (payload), которые представляют собой конкретные варианты эксплуатации. Действие агента определяется как выбор номера payload'a из этого списка [5]. Для сетевых сценариев добавляются параметры узлов, такие как открытые порты и статус компрометации, которые также нормализуются для учета взаимодействия в многоагентных атаках [5].

Таким образом, для одного узла итоговый вектор отражает обработанные и приведенные к единой шкале данные: $-0,375$, $-0,35135135135135137$, $3,3$, $-0,13196894848270996$, 2 — с соответствующим действием 56 (индекс payload Metasploit).

Обработанные данные формируют обучающий набор для GAIL, где состояния и действия становятся экспертными, эталонными траекториями. Для тестируемой системы действия предсказываются нейронной сетью агента из списка совместимых полезных нагрузок на основе текущего состояния среды [4]. Нормализованные состояния подаются в сеть для оценки и обновляются после каждого шага агента. Такой подход минимизирует необходимость ручной настройки признаков, но требует обработки данных для повышения их качества, что достигается описанными методами.

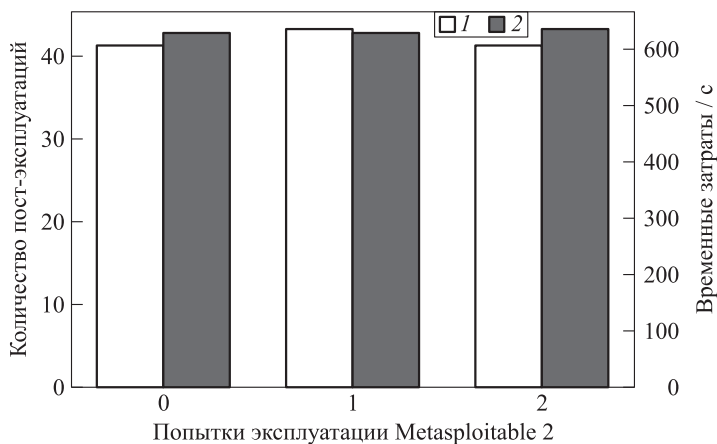


Рис. 2 Результаты эксплуатации уязвимой виртуальной машины: 1 — пост-эксплуатации; 2 — временные затраты

В процессе обучения на основе текущего состояния генератор-агент, используя свою политику $\pi(a|s)$, выбирает действие a . Дискриминатор, в свою очередь, учится отличать действия эксперта от сгенерированных действий агента. На основе обратной связи от дискриминатора агент корректирует свою политику $\pi(a|s)$, стремясь максимизировать сходство со стратегией эксперта. На рис. 2 продемонстрированы результаты трех экспериментов по эксплуатации одного уязвимого узла Metasploitable 2.

4 Семантические вознаграждения

Семантические признаки представляют высокоуровневую информацию о состоянии среды или действиях агента. К таким признакам могут относиться контекстные зависимости, причинно-следственные связи, а также логические отношения между элементами системы. Их использование позволяет более точно учитывать специфику исследуемой задачи при построении функции вознаграждения.

Введение семантических вознаграждений направлено на повышение качества обучения агента за счет включения в модель дополнительных сведений о характере целевой среды и предпочтительном поведении. Такие вознаграждения могут быть заданы как вручную, на основе экспертных знаний, так и извлечены автоматически с помощью алгоритмов машинного обучения.

В системах, реализующих генеративное состязательное имитационное обучение, семантические вознаграждения выполняют важную функцию — они дополняют базовые метрики успеха атаки и позволяют агенту вырабатывать бо-

лее реалистичные и гибкие стратегии. В отличие от традиционных подходов, в которых критерием успеха служит, как правило, только факт эксплуатации уязвимости, семантические метрики вводят оценку качества действий с точки зрения их новизны и скрытности.

Новизна характеризует степень отклонения текущего действия агента от ранее наблюдавшихся стратегий, а скрытность — вероятность обхода защитных механизмов, включая системы обнаружения вторжений и мониторинговые средства. Таким образом, агент получает дополнительные сигналы к поиску нестандартных и малозаметных путей достижения цели, что более точно отражает поведение реальных атакующих в современных условиях.

Формально итоговая функция вознаграждения может быть представлена как сумма базового компонента и семантической составляющей, отражающей высокоуровневые требования к атаке:

$$R(s, a) = R_{\text{base}}(s, a) + R_{\text{sem}}(s, a).$$

Для повышения точности оценки поведения агента возможно расширение архитектуры GAIL с использованием двух дискриминаторов [11]. Первый дискриминатор по-прежнему отвечает за распознавание подлинности действий относительно экспертных траекторий, в то время как второй анализирует степень скрытности действий, выявляя те из них, которые наименее подвержены детектированию. Такая конфигурация позволяет одновременно учитывать и результативность атаки, и ее незаметность, что особенно важно в условиях противодействия со стороны защищенной системы.

В рамках этой модификации вводится дополнительный семантический дискриминатор $D_{\text{sem}}(s, a)$, который сопоставляет действия агента с заранее заданными критериями значимости и приемлемости. В частности, он оценивает, насколько выбранное действие соответствует целевым требованиям по скрытности, оригинальности и контекстной уместности в данной ситуации:

$$D_{\text{sem}}(s_t, a_t) = \frac{1}{1 + \exp(-f_{\text{sem}}(s_t, a_t) + \alpha R_{\text{sem}}(s_t, a_t))},$$

где $f_{\text{sem}}(s, a)$ — функция, оценивающая семантическую значимость действия a в состоянии s .

Подобное расширение позволяет обучать агентов более гибким и реалистичным стратегиям, ориентированным не только на достижение цели атаки, но и на адаптацию к механизмам защиты, что значительно приближает имитационные сценарии к условиям реального функционирования сложных информационных систем.

5 Многоагентный подход к координированным атакам

Для создания более реалистичных сценариев атак в разрабатываемой системе предусмотрена возможность применения многоагентного подхода. В рамках

такой архитектуры несколько агентов действуют параллельно, координируя свои действия с целью достижения общей задачи. Это позволяет воспроизводить сложные модели атак, характерные для распределенных или скоординированных действий злоумышленников.

Каждый агент может выполнять свою специфическую роль, что отражает типичную структуру многоэтапных атак, при которых различные участники применяют различные тактики, средства и стратегии. Многоагентный подход особенно актуален при моделировании атак, проводимых организованными группами, где взаимодействие между участниками критически важно для обхода средств защиты.

С точки зрения обучения модели дискриминатор в такой системе должен учитывать не только индивидуальные действия агентов, но и их совокупное воздействие на общую стратегию атаки. Оценка действий проводится с учетом их новизны, скрытности, а также степени согласованности между агентами.

Формально значение дискриминатора $D_\theta(s_t, \{a_t^i\}_{i=1}^N)$ для набора из N агентов может быть определено следующим образом:

$$D_\theta \left(s_t, \{a_t^i\}_{i=1}^N \right) = \frac{1}{1 + \exp \left(- \sum_{i=1}^N f_\theta(s_t, a_t^i) + \alpha \sum_{i=1}^N R_{\text{sem}}(s_t, a_t^i) \right)},$$

где $f_\theta(s_t, a_t^i)$ — параметрическая функция, отображающая пару состояние–действие агента i в логит-значение; $R_{\text{sem}}(s_t, a_t^i)$ — семантическое вознаграждение для действия агента i , учитывающее новизну и скрытность атаки; α — коэффициент, регулирующий влияние семантической составляющей на дискриминатор.

Таким образом, модель получает возможность оценивать как отдельные действия, так и коллективную динамику поведения агентов, что особенно важно при воспроизведении многовекторных атак.

Политика каждого агента $\pi_i(a_t^i|s_t)$ в процессе обучения корректируется на основе сигнала обратной связи от дискриминатора и соответствующих семантических вознаграждений. Целевая функция для агента i определяется следующим выражением:

$$J_{\pi_i} = \mathbb{E}_{\pi_i} \left[D_\theta \left(s_t, \{a_t^i\}_{i=1}^N \right) + \gamma R_{\text{sem}}(s_t, a_t^i) \right],$$

где J_{π_i} — цель обучения для каждого агента i , включающая как классическое вознаграждение от дискриминатора, так и семантическое вознаграждение; γ — коэффициент для учета важности семантического вознаграждения в процессе обучения.

Интеграция многоагентного взаимодействия позволяет формировать более точные, динамичные и разнообразные сценарии атак, что расширяет возможности имитационного тестирования в условиях реалистичной и изменяющейся среды.

6 Заключение

Уже не вызывает никаких сомнений то обстоятельство, что моделирование взломов и атак стало важным компонентом современной кибербезопасности. Используя BAS-системы на основе представленной модели, организации могут выявлять потенциальные уязвимости и угрозы безопасности. Перспективным направлением дальнейших работ здесь видится интенсивное экспериментирование с целью оценки эффективности модели в сравнении с существующими подходами к тестированию на проникновение в реальных сетевых инфраструктурах. Эти результаты будут способствовать совершенствованию моделей имитации атак на основе машинного обучения.

Литература

1. *Jaber A., Fritsch L.* Towards AI-powered cybersecurity attack modeling with simulation tools: Review of attack simulators // *Advances in P2P, parallel, grid, cloud and internet computing* / Ed. L. Barolli. — Lecture notes in networks and systems ser. — Cham: Springer, 2022. Vol. 571. P. 249–257. doi: 10.1007/978-3-031-19945-5.25.
2. *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.
3. *Reinforcement learning: State-of-the-art* / Eds. M. A. Wiering, M. van Otterlo. — Adaptation, learning, and optimization ser. — Heidelberg, New York, Dordrecht, London: Springer, 2012. Vol. 12. 672 p. doi: 10.1007/978-3-642-27645-3.
4. *Ho J., Ermon S.* Generative adversarial imitation learning // *Adv. Neur. In.*, 2016. Vol. 29. P. 4572–4580.
5. *Elderman R., Pater L. J. J., Thie A. S., et al.* Adversarial reinforcement learning in a cyber security simulation // 9th Conference (International) on Agents and Artificial Intelligence Proceedings. — SciTePress, 2017. Vol. 1. P. 559–566. doi: 10.5220/0006197105590566.
6. *Goodfellow I. J., Pouget-Abadie J., Mirza M., et al.* Generative adversarial networks // *Adv. Neur. Inf.*, 2014. Vol. 27. P. 2672–2680.
7. *Maeda R., Mimura M.* Automating post-exploitation with deep reinforcement learning // *Comput. Secur.*, 2021. Vol. 100. No. C. Art. 102108. 13 p. doi: 10.1016/j.cose.2020.102108.
8. *Мищенко А. И.* Механизмы поиска уязвимостей в операционных системах, построенных на базе ядра Linux // *Системы и средства информатики*, 2013. Т. 23. № 1. С. 27–32. EDN: QCLUSR.
9. *Hu Z., Beuran R., Tan Y.* Automated penetration testing using deep reinforcement learning // *European Symposium on Security and Privacy Workshops Proceedings*. — IEEE, 2020. P. 2–10. doi: 10.1109/EuroSPW51379.2020.00010.
10. *Chaudhary S., O'Brien A., Xu S.* Automated post-breach penetration testing through reinforcement learning // *Conference on Communications and Network Security Proceedings*. — IEEE, 2020. Art. 9162301. 2 p. doi: 10.1109/CNS48642.2020.9162301.

11. *Nguyen T. D., Le T., Vu H., Phung D.* Dual discriminator generative adversarial nets // *Adv. Neur. In.*, 2017. Vol. 30. P. 2671–2681.

Поступила в редакцию 30.01.2025

Принята к публикации 15.09.2025

MODEL OF AUTOMATED ATTACK SIMULATION SYSTEM BASED ON MACHINE LEARNING*

M. M. Grekov

Tula State University, 92 Lenina Ave., Tula 300012, Russian Federation

Abstract: The paper explores the application of machine learning techniques to the development of an intelligent attack simulation system designed to automate penetration testing as a part of network security assurance. Traditional penetration testing methods are often labor-intensive and require significant time and resource investment. The proposed model integrates Generative Adversarial Imitation Learning and reinforcement learning algorithms, enabling the simulation of attacker behavior and the generation of realistic scenarios that closely mimic the actions of professional security experts. A key feature of the model is the incorporation of semantic rewards which account not only for the achievement of attack objectives but also for factors such as the novelty and stealthiness of the actions. To improve adaptability in dynamic network environments, the model can be extended with dual discriminators. Additionally, support for multi-agent interaction makes it possible to simulate coordinated attacks involving multiple adversaries.

Keywords: information security; generative adversarial imitation learning; attack simulation; machine learning

DOI: 10.14357/08696527250307

EDN: LYXIDN

References

1. Jaber, A., and L. Fritsch. 2022. Towards AI-powered cybersecurity attack modeling with simulation tools: Review of attack simulators. *Advances in P2P, parallel, grid, cloud and internet computing*. Ed. L. Barolli. Lecture notes in networks and systems ser. Cham: Springer. 571:249–257. doi: 10.1007/978-3-031-19945-5.25.
2. 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.

*The paper is published on the proposal of the Program Committee of the 15th Conference (International) on Intelligent Data Processing: Theory and Applications.

3. Wiering, M. A., and M. Van Otterlo, eds. 2012. *Reinforcement learning: State-of-the-art*. Adaptation, learning, and optimization ser. Heidelberg, New York, Dordrecht, London: Springer. Vol. 12. 672 p. doi:10.1007/978-3-642-27645-3.
4. Ho, J., and S. Ermon. 2016. Generative adversarial imitation learning. *Adv. Neur. In.* 29:4572–4580.
5. Elderman, R., L. J. J. Pater, A. S. Thie, *et al.* 2017. Adversarial reinforcement learning in a cyber security simulation. *9th Conference (International) on Agents and Artificial Intelligence Proceedings*. SciTePress. 1:559–566. doi: 10.5220/0006197105590566.
6. Goodfellow, I. J., J. Pouget-Abadie, M. Mirza, *et al.* 2014. Generative adversarial nets. *Adv. Neur. In.* 27:2672–2680.
7. Maeda, R., and M. Mimura. 2021. Automating post-exploitation with deep reinforcement learning. *Comput. Secur.* 100(C):102108. 13 p. doi: 10.1016/j.cose.2020.102108.
8. Mishchenko, A. I. 2013. Mekhanizmy poiska uyazvimostey v operatsionnykh sistemakh, postroennykh na baze yadra Linux [Linux-based operating systems vulnerabilities searching methods]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 23(1):27–32. EDN: QCLUSR.
9. Hu, Z., R. Beuran, and Y. Tan. 2020. Automated penetration testing using deep reinforcement learning. *European Symposium on Security and Privacy Workshops Proceedings*. IEEE. 2–10. doi: 10.1109/EuroSPW51379.2020.00010.
10. Chaudhary, S., A. O'Brien, and S. Xu. 2020. Automated post-breach penetration testing through reinforcement learning. *Conference on Communications and Network Security Proceedings*. IEEE. Art. 9162301. 2 p. doi: 10.1109/CNS48642.2020.9162301.
11. Nguyen, T. D., T. Le, H. Vu, and D. Phung. 2017. Dual discriminator generative adversarial nets. *Adv. Neur. In.* 30:2671–2681.

Received January 30, 2025

Accepted September 15, 2025

Contributor

Grekov Mikhail M. (b. 1998) — PhD student, assistant, Department of Information Security, Tula State University, 92 Lenina Ave., Tula 300012, Russian Federation; grekov.web@yandex.ru

ОБЕЗЛИЧИВАНИЕ ПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКИХ ДАННЫХ С ПРИВЛЕЧЕНИЕМ ДОВЕРЕННОГО ЦЕНТРА ДЕПЕРСОНАЛИЗАЦИИ

*А. В. Ладиков*¹

Аннотация: Рассматриваются вопросы защиты данных в системах бизнес-аналитики и использования в аналитических целях обезличенных данных, что позволяет повысить их защиту в случае несанкционированного доступа к системам хранения аналитической информации или организации в целом. Показано, что обезличивание данных в периметре организации, хотя и снижает риск утечки данных, но не исключает его в случае несанкционированного доступа ко многим системам организации, включая систему обезличивания. Рассмотрен вопрос делегирования процедуры обезличивания персональных идентификаторов третьей, доверенной, стороне, называемой доверенным центром обезличивания. Приведен алгоритм получения обезличенных данных от клиентов информационных систем в уже обезличенном виде с использованием доверенного центра обезличивания персональных идентификаторов. Даны рекомендации по повышению защищенности данных при использовании доверенного центра обезличивания, а также рекомендации по обезличиванию, которые позволяют минимизировать изменения в системах бизнес-аналитики при переходе от обработки персональных пользовательских данных к обработке обезличенных пользовательских идентификаторов.

Ключевые слова: обезличивание данных; доверенный центр деперсонализации; персональные идентификаторы; защита данных; утечка данных

DOI: 10.14357/08696527250308

EDN: MUCGX1

1 Введение

Активная цифровизация общества существенно упрощает взаимодействие пользователей между собой и с различными организациями. Большинство операций, таких как, например, покупка и доставка товаров, оплата услуг, банковские операции, заявки и поручения, могут быть осуществлены в электронном виде, что повышает удобство взаимодействия пользователей с организациями и приводит к взаимному сокращению времени, подобных взаимодействий.

Учитывая, что для успешного развития цифровых решений организациям требуется глубоко понимать пользователей этих решений и способы их взаимодействия с цифровыми сервисами, организации стремятся к получению от своих клиентов большего количества статистической информации, которая не

¹ АО «Лаборатория Касперского», AndreyNot@mail.ru

всегда связана с основной функциональностью предлагаемого продукта или сервиса, а служит исключительно для повышения качества предлагаемого продукта, его конкурентоспособности или же созданию для организаций дополнительной ценности, заключающейся в монетизации получаемой от клиентов информации. В этом случае информация, полученная от пользователей, поступает напрямую в системы бизнес-аналитики.

Поскольку речь идет о добросовестных организациях, стремящихся быть прозрачными для своих пользователей и работающих в правовом поле [1], пользователя просят предоставить согласие на предоставление и обработку статистической информации. При этом собираемая статистическая информация не всегда может быть получена в обезличенном виде, т. е. в системы бизнес-аналитики могут попадать данные, позволяющие идентифицировать конкретного пользователя, что несет риски в связи с участившимися случаями утечки персональных данных пользователей из накапливающих их информационных систем [2, 3].

В связи с тем что системы бизнес-аналитики отличаются по способу доступа к информации от систем оперативной обработки данных [4], это повышает риск утечки пользовательских данных из подобных систем, что порождает потребности в дополнительных способах защиты информации, обрабатываемой в системах бизнес-аналитики. При этом защитные меры должны быть направлены как на недопущение несанкционированного доступа в систему, так и на минимизацию последствий ущерба в случае проникновения в систему злоумышленников.

Одним из способов защиты данных в системах бизнес-аналитики, позволяющим снизить последствия ущерба, стало обезличивание данных, обрабатываемых в системах бизнес-аналитики.

Вопросы обезличивания и защиты персональных данных на протяжении последних трех десятилетий остаются предметом научных исследований. Одной из первых прикладных реализаций, используемых для обезличивания медицинских данных, стала работа Л. Свини [5]. В ней впервые описан метод замены чувствительных данных на идентификаторы, который получил название «псевдоанонимизация». В дальнейших исследованиях Л. Свини [6] был формализован метод k -анонимности, обеспечивающий невозможность идентификации отдельного субъекта в выборке путем гарантии того, что каждый квазиидентификатор повторяется не менее чем у k записей. Несмотря на широкое применение, метод оказался уязвим к атакам, использующим внешние знания [7].

Для повышения устойчивости к таким атакам были предложены методы l -диверсификации [7], обеспечивающие разнообразие значений чувствительных атрибутов внутри каждой эквивалентной группы, и t -когерентности [8], ограничивающей влияние доминирующих значений. Методы автоматического выявления квазиидентификаторов в наборах данных рассмотрены в статье [9], а в работе [10] предложен способ автоматического поиска квазиидентификаторов с использованием деревьев.

Однако наибольший вклад в формальное обоснование конфиденциальности данных внесла дифференциальная приватность, введенная Синтией Дворк [11],

обеспечивающая строго определенные вероятностные гарантии того, что результат обработки выборки статистически не зависит от наличия или отсутствия конкретной записи.

Последние исследования рассматривают вопрос необходимости соблюдения баланса между приватностью и полезностью данных, а также сильную зависимость понятий «анонимные данные» и «персональные данные» от применимого законодательства различных стран [12]. В работе [13] рассматриваются вопросы анонимизации персональных данных с точки зрения европейского законодательства, подчеркивается юридическая неопределенность вопросов обезличенных данных и случаев, при которых обезличенные данные попадают под действие GDPR (General Data Protection Regulation) [13].

В российской литературе основной работой, описывающей методы обезличивания персональных данных, считаются рекомендации Роскомнадзора [14]. Категоризация персональных данных в соответствии с российским законодательством и вопросы общедоступных категорий персональных данных рассмотрены в публикации Е. В. Полуяновой [15]. Способы комбинирования рекомендуемых Роскомнадзором методов для обезличивания данных в аналитических системах описаны в работе [16].

Параллельно с развитием статистических методов анонимизации и обезличивания данных получила распространение архитектурная парадигма использования доверенных посредников (Trusted Third Parties, ТТР). В таких системах передача и обезличивание персональных данных осуществляются с привлечением изолированной сущности, отвечающей за безопасную обработку, трансформацию или фильтрацию данных перед их поступлением в системы обработки и хранения информации. Доверенный посредник может выполнять функции деперсонализации, агрегации или шифрования пропускаемых через него данных.

В публикации [17] описывается система обмена данными через промежуточное доверенное звено поверх недоверенной инфраструктуры. Архитектура описывает роль доверенного посредника, обеспечивающего шифрование данных и управление доступом. В работе [18] описывается архитектура, в которой промежуточный компонент играет роль доверенного посредника между владельцами данных и облачными провайдерами, данный компонент выполняет шифрование и деперсонализацию данных, контроль доступа и выполнение политик безопасности. Данная работа наиболее формально описывает концепцию доверенных посредников.

Архитектура с доверенным посредником позволяет достичь высокой степени изоляции персональных данных от последующих этапов их использования, что особенно важно в условиях распределенных вычислений или при передаче данных между организациями.

Предлагаемый в настоящей работе подход с использованием доверенного центра деперсонализации (ДЦД) представляет собой реализацию парадигмы доверенного посредника (ТТР), сохраняющей совместимость с уже развернутыми корпоративными системами хранения данных. В отличие от дифференциаль-

ной приватности метод ориентирован на инфраструктурное разделение хранения и обработки идентификаторов и телеметрии, что снижает риск компрометации полного набора данных. В предлагаемой схеме ни один из участников процесса обработки данных, за исключением пользователя, владеющего персональными данными и отправляющего их в информационную систему, не имеет доступа к оригинальным пользовательским идентификаторам и телеметрии, что обеспечивается разделением данных на этапе их отправки в информационную систему.

Метод обеспечивает согласованность форматов и уникальности идентификаторов при полном устранении прямых персональных связей, что делает его эффективным инструментом при интеграции с аналитическими системами, и соблюдение требований законодательства о персональных данных.

2 Обезличивание с привлечением третьей, доверенной стороны

В современном мире большая часть пользовательских данных в организации появляется путем сбора информации при взаимодействии пользователей с информационными системами. Отправляемая в рамках одной посылки клиентская информация может быть разделена на две группы: пользовательские идентификаторы, позволяющие идентифицировать клиента информационной системы, и телеметрия [19], несущая аналитические знания в контексте пользователя.

К первой группе относятся такие данные, как номер и серия документа, удостоверяющего личность, номер телефона, адрес электронной почты и любые другие идентификаторы, однозначно идентифицирующие клиента. Ко второй группе относятся все данные, не позволяющие однозначно идентифицировать клиента, но при этом необходимые для взаимодействия клиента с информационной системой или представляющие аналитический интерес, например: сведения об операционной системе; сведения о взаимодействии с приложениями; время, проведенное в приложении; сумма платежа; используемые и неиспользуемые возможности сервиса и любая другая информация, не позволяющая однозначно идентифицировать пользователя.

Поскольку для аналитических целей важны не сами значения пользовательских идентификаторов, идентифицирующих конкретного пользователя, а их уникальность и способность отличить одного пользователя и его атрибуты от другого, а также соответствие формата идентификатора формату, ожидаемому аналитической системой [16], то логичным представляется подход, при котором пользовательские идентификаторы будут поставляться в аналитическую систему уже в обезличенном виде. Данное изменение существенно снижает ценность данных для злоумышленника — для него наибольшую ценность представляет именно связь телеметрии с настоящими пользовательскими идентификаторами, так как доступ к подобной информации позволяет использовать ее для совершения злонамеренных действий по отношению к владельцам данных и другим участникам процесса обработки информации.

С учетом того, что отправляемые данные можно разделить на две группы, становится возможным отправить их двумя независимыми послылками:

- в первой послылке собираются все идентификаторы, идентифицирующие пользователя;
- во второй послылке собирается связанная с пользователем аналитическая информация.

Первая послылка отправляется третьей, независимой, стороне, далее будем называть эту сторону ДЦД [19], вторая послылка отправляется в систему бизнес-аналитики организации.

Задача ДЦД состоит в обезличивании полученных идентификаторов одним из рекомендованных методов обезличивания и передаче уже обезличенных данных в систему бизнес-аналитики организации. На стороне организации, собирающей данные, две полученные послылки объединяются, в результате чего получается послылка, состоящая из обезличенных идентификаторов и дополнительных аналитических данных [19].

Подробная схема обезличивания данных с привлечением ДЦД продемонстрирована на рисунке, где

- Data source — первоисточник пользовательских данных, содержащий персональные данные или другие данные пользователя;
- Trusted depersonalization center — доверенный центр деперсонализации данных;
- Data processor — организация, получающая и обрабатывающая пользовательские данные;

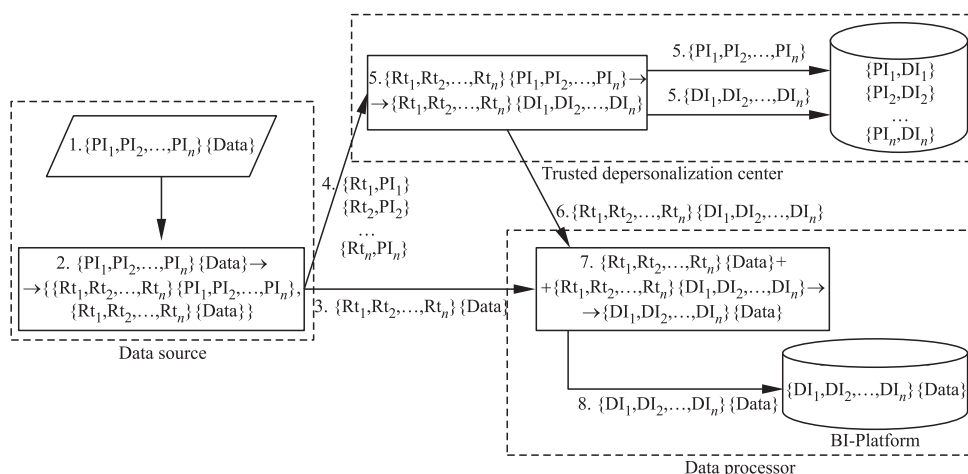


Схема обезличивания пользовательских данных с привлечением доверенного центра деперсонализации

- BI-Platform — аналитическая платформа, производящая хранение и обработку полученных пользовательских данных в аналитических целях;
- PI_i — персональный идентификатор пользователя;
- DI_i — обезличенный идентификатор, поставленный в соответствие персональному идентификатору PI_i ;
- Rt_i — случайный билет (Random ticket), формирующийся для каждого персонального идентификатора при каждой его отправке;
- Data — неперсональные данные пользователя, ассоциированные с персональными идентификаторами.

Алгоритм обезличивания с привлечением ДЦД заключается в следующем:

- (1) источник данных (Data Source), клиентское устройство или любая другая информационная система, которой требуется передать данные в платформу бизнес-аналитики (BI-Platform), формирует набор данных, состоящий из персональных идентификаторов ($PI_1, PI_2, \dots, PI_n$) и аналитической информации (Data);
- (2) в процессе отправки набора данных источником данных для каждого персонального идентификатора PI_i , присутствующего в посылке, генерируется случайный билет Rt_i , посылка разделяется на две независимых: первая представляет собой набор случайных билетов, объединенный с телеметрией ($\{Rt_1, Rt_2, \dots, Rt_n\}\{Data\}$), а вторая состоит из персональных идентификаторов и поставленных им в соответствие случайных билетов ($\{Rt_1, Rt_2, \dots, Rt_n\}\{PI_1, PI_2, \dots, PI_n\}$);
- (3) первая посылка ($\{Rt_1, Rt_2, \dots, Rt_n\}\{Data\}$) отправляется организации, обрабатывающей данные клиентов (Data processor);
- (4) вторая посылка ($\{Rt_1, Rt_2, \dots, Rt_n\}\{PI_1, PI_2, \dots, PI_n\}$) передается в ДЦД. Для повышения безопасности передачи данных и отсутствия связей между передаваемыми персональными идентификаторами персональные идентификаторы и сопоставленные им случайные билеты могут передаваться в ДЦД несколькими посылками [20, 21];
- (5) ДЦД, получив набор персональных идентификаторов и сопоставленных им случайных билетов, производит обезличивание каждого из полученных персональных идентификаторов, ставя в соответствие каждому персональному идентификатору PI_i обезличенный идентификатор DI_i , используя рекомендованные методы обезличивания персональных данных. После чего формируется новая посылка, состоящая из обезличенных идентификаторов и сопоставленных с ними случайных билетов ($\{Rt_1, Rt_2, \dots, Rt_n\}\{DI_1, DI_2, \dots, DI_n\}$);
- (6) полученная посылка передается в организацию, обрабатывающую пользовательские данные (Data processor);

- (7) после получения первой $(\{Rt_1, Rt_2, \dots, Rt_n\}\{Data\})$ и второй $(\{Rt_1, Rt_2, \dots, Rt_n\}\{DI_1, DI_2, \dots, DI_n\})$ посылка на стороне организации происходит склеивание посылок, при котором каждому случайному билету Rt_i ставится в соответствие обезличенный персональный идентификатор DI_i ;
- (8) получившаяся в результате посылка $(\{DI_1, DI_2, \dots, DI_n\}\{Data\})$, состоящая из переданной от клиента телеметрии $(\{Data\})$ и набора уже обезличенных пользовательских идентификаторов $(\{DI_1, DI_2, \dots, DI_n\})$, сохраняется в систему бизнес-аналитики (BI-Platform).

Важно отметить, что для обеспечения безопасности данных, обрабатываемых ДЦД, и сохранения возможности обработки персонализированных данных в системах бизнес-аналитики без существенного изменения аналитических систем требуется выполнение двух условий.

1. Система деперсонализации должна обеспечивать обезличивание полученных идентификаторов отдельно друг от друга и раздельное их сохранение [20, 21]. Например, при обезличивании набора идентификаторов вида {Имя, Фамилия, Номер телефона} должен быть получен набор идентификаторов $\{f(\text{Имя}), f(\text{Фамилия}), f(\text{Номер телефона})\}$, где $f(PI) \rightarrow DI$ — метод обезличивания.
2. Метод обезличивания идентификаторов должен сохранять их тип для обеспечения совместимости с уже существующей и развернутой в организации системой бизнес-аналитики [16]. Например, при обезличивании адреса электронной почты должен быть получен идентификатор, совпадающий по своему формату с допустимым значением адреса электронной почты, а при обезличивании номера телефона должен быть получен идентификатор, совпадающий с допустимым значением для телефонного номера.

Реализация описанной выше схемы обезличивания данных позволяет организации, являющейся конечным получателем данных от своих клиентов, оперировать ими как персональными, сохраняя уникальность пользовательских идентификаторов и их совместимость с существующими системами бизнес-аналитики. При этом система обезличивания персональных идентификаторов, реализованная в виде ДЦД, хранит персональные идентификаторы не связанными между собой и не хранит никакой дополнительной информации о пользователях, что не позволяет злоумышленнику в случае получения доступа к доверенному центру обезличивания получить какие-либо полезные данные из хранимой в системе информации, кроме набора персональных идентификаторов, логически не связанных между собой.

3 Анализ преимуществ предлагаемой схемы обезличивания

Рассмотрим далее основные различия в обеспечении безопасности предлагаемой схемы обезличивания персональных идентификаторов и схемы,

при которой система обезличивания находится в периметре организации [16].

Первое отличие предлагаемой схемы — физическое разделение мест хранения телеметрии и персональных идентификаторов. В случае использования системы обезличивания в периметре организации компрометация периметра организации с помощью удачно проведенной атаки приводит к получению злоумышленником доступа к персональным данным и телеметрии, с ней связанной, т. е. раскрывает данные о пользователях.

В случае же использования ДЦД для раскрытия данных о пользователях требуется компрометация двух независимых систем: центра деперсонализации и информационной системы с телеметрией. При этом компрометация центра деперсонализации не приводит к раскрытию персональных данных пользователей, так как идентификаторы одного пользователя хранятся в не связанном между собой виде и установить между ними связь, используя только лишь данные из ДЦД, невозможно [20, 21].

Второе отличие заключается в разделении данных на персональные идентификаторы и телеметрию на этапе их отправки в информационную систему. В описанных ранее схемах с использованием доверенных посредников [17, 18] доверенный посредник пропускает через себя информацию, т. е. имеет полный доступ к персональным идентификаторам и телеметрии. В предложенной схеме за счет разделения данных на этапе отправки доверенный посредник обрабатывает только персональные идентификаторы без телеметрии (значимого контекста), что также повышает надежность схемы за счет того, что компрометация доверенного посредника не приводит к раскрытию данных пользователя в связке с его идентификаторами.

Из первого и второго отличий следует интересное свойство — целевая система, собирающая в своих интересах или интересах пользователей информацию о них и обрабатывающая ее, может полностью отказаться от обработки персональных данных, переложив ответственность за их обработку на ДЦД. В действительности, если данные в привязке к персональным идентификаторам собираются в аналитических целях, то вследствие разделения обработки персональных идентификаторов и телеметрии целевая система (система бизнес-аналитики) не обрабатывает персональные идентификаторы пользователей, так как они поступают в систему уже в обезличенном виде. Это, в свою очередь, позволяет организациям переложить ответственность за обработку персональных данных, безопасное их хранение, учет фактов согласия пользователей с обработкой персональных данных и отзыв этих соглашений на ДЦД, а также позволяет смягчить требования к защите собственной инфраструктуры, так как риск ее компрометации не позволит злоумышленникам без дополнительных усилий раскрыть персональные данные пользователей в связке с хранимым контекстом.

Ключевой же недостаток предлагаемой схемы кроется в необходимости изменения программного обеспечения, поставляемого пользователям информационной системы, с целью разделения данных на персональные идентификаторы

и телеметрию на этапе отправки. При этом данное программное обеспечение может предоставляться ДЦД в виде программных модулей, встраиваемых в программное обеспечение и обеспечивающих корректное разделение данных на стороне пользовательского программного обеспечения.

4 Заключение

В статье рассмотрен вопрос снижения рисков утечки пользовательских данных в организациях, обрабатывающих данные в аналитических целях, за счет обезличивания пользовательских данных, поступающих и агрегирующихся организациями в системах бизнес-аналитики. Предложен способ получения пользовательских данных в уже обезличенном виде, что позволяет снизить риски разглашения информации о клиентах организации в случае компрометации ее информационных систем и получения несанкционированного доступа злоумышленников к ним, что возможно в случае размещения средства деперсонализации в периметре организации.

Предложенное понятие ДЦД по своей роли наиболее близко к доверенному удостоверяющему центру, производящему выпуск цифровых сертификатов для организаций и гарантирующему, что безопасность сертификата обеспечивается безопасностью приватного ключа, хранимого удостоверяющим центром согласно стандартам. По той же аналогии ДЦД хранит защищенным образом пары обезличенных персональных идентификаторов и оригинальных пользовательских идентификаторов, сопоставленных им.

Важно отметить, что применение предложенной схемы не ограничивается системами бизнес-аналитики. Возможно применение данного подхода в клиент-серверной архитектуре при взаимодействии информационной системы и ее пользователей через ДЦД, а также отправки адресной коммуникации от информационной системы пользователям посредством деобезличивания идентификаторов на стороне центра деперсонализации. Данные подходы будут рассмотрены в отдельной статье.

Литература

1. О персональных данных: Федеральный закон РФ от 27.07.2006 г. № 152-ФЗ (ред. от 06.02.2023). https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_61801/.
2. Значимые утечки данных в 2022 году: Аналитический отчет Лаборатории Касперского. <https://go.kaspersky.com/ru-data-leakage-report-2022>.
3. Значимые утечки данных в 2023 году: Аналитический отчет Лаборатории Касперского. <https://dfi.kaspersky.ru/data-leakage-2023>.
4. DAMA-DMBOK: Свод знаний по управлению данными / Пер. с англ. Г. Арафонова. — 2-е изд. — М.: Олимп-Бизнес, 2020. 828 с. (DAMA-DMBOK: Data management body of knowledge / Eds. D. Henderson, S. Earley. — 2nd ed. — Basking Ridge, NJ, USA: Technics Publications, 2017. 624 p.)

5. *Sweeney L.* Replacing personally-identifying information in medical records, the Scrub system // *Proceedings: A Conference of the American Medical Information Association* / Ed. J. J. Cimino. — Washington, D.C., USA: Hanley & Belfus, 1996. P. 333–337.
6. *Sweeney L.* k -Anonymity: A model for protecting privacy // *Int. J. Uncertain. Fuzz.*, 2022. Vol. 10. Iss. 5. P. 557–570. doi: 10.1142/S0218488502001648.
7. *Machanavajjhala A., Kifer D., Gehrke J., Venkatasubramanian M.* l -Diversity: Privacy beyond k -anonymity // *ACM T. Knowl. Discov. D.*, 2007. Vol. 1. No. 1. Art. 3. 52 p. doi: 10.1145/1217299.1217302.
8. *Li N., Li T., Venkatasubramanian S.* t -Closeness: Privacy beyond k -anonymity and l -diversity // *23rd Conference (International) on Data Engineering Proceedings*. — IEEE, 2007. P. 106–115. doi: 10.1109/ICDE.2007.367856.
9. *Huang L., Song J., Lu Q., Liu X.* Hypergraph-based solution for selecting quasi-identifier // *Int. J. Digital Content Technology Applications*, 2012. Vol. 6. Iss. 20. P. 597–606. doi: 10.4156/jdcta.vol6.issue20.65.
10. *Sathiya Devi S., Indhumathi R.* Enhancing privacy for automatically detected quasi identifier using data anonymization // *Web Intelligence*, 2023. Vol. 21. Iss. 1. P. 71–91. doi: 10.3233/WEB-221823.
11. *Dwork C.* Differential privacy // *Automata, languages and programming* / Eds. M. Bugliesi, B. Preneel, V. Sassone, I. Wegener. — Lecture notes in computer science ser. — Berlin, Heidelberg: Springer, 2006. Vol. 4052. P. 1–12. doi: 10.1007/11787006_1.
12. *Gadotti A., Rocher L., Houssiau F., Crețu A.-M., de Montjoye Y.-A.* Anonymization: The imperfect science of using data while preserving privacy // *Science Advances*, 2024. Vol. 10. Iss. 29. Art. eadn7053. 22 p. doi: 10.1126/sciadv.adn7053.
13. *Rupp V., von Grafenstein M.* Clarifying “personal data” and the role of anonymisation in data protection law: Including and excluding data from the scope of the GDPR (more clearly) through refining the concept of data protection // *Comput. Law Secur. Rev.*, 2024. Vol. 52. Art. 105932. 25 p. doi:10.1016/j.clsr.2023.105932.
14. Об утверждении требований и методов по обезличиванию персональных данных: Приказ Роскомнадзора от 05.09.2013 № 996. 7 с. http://rkn.gov.ru/docs/doc_981.tiff.
15. *Полуянова Е. В.* К вопросу о категориях персональных данных, регулируемых положениями действующего законодательства // *Аграрное и земельное право*, 2024. № 9(237). С. 165–167. doi: 10.47643/1815-1329_2024_9_165. EDN: EYBKVO.
16. *Ладиков А. В.* Обезличивание пользовательских данных в системах бизнес-аналитики // *Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Сер.: Естественные и технические науки*, 2024. № 1. С. 76–81. EDN: LNTICX.
17. *Zhao G., Rong C., Li J., Zhang F., Tang Y.* Trusted data sharing over untrusted cloud storage providers // *2nd Conference (International) on Cloud Computing Technology and Science Proceedings*. — IEEE, 2010. P. 97–103. doi: 10.1109/CloudCom.2010.36.
18. *Chadwick D. W., Fan W., Costantino G., de Lemos R., Di Cerbo F., Herwono I., Manea M., Mori P., Sajjad A., Wang X.-S.* A cloud-edge based data security architecture for sharing and analysing cyber threat information // *Future Gener. Comp. Sy.*, 2020. Vol. 102. P. 710–722. doi: 10.1016/j.future.2019.06.026.

19. *Ефремов А. А., Шмойлов Д. В.* Способ анонимного обмена данными в клиент-серверной архитектуре. Патент RU2696240C1 с приор. от 30.03.2018. Опубл. 31.07.2019. EDN: TLUKGB.
20. *Лапушкин А. С., Шмойлов Д. В., Ладиков А. В., Ефремов А. А.* Способ передачи конфиденциальных данных. Патент RU2728503C1 с приор. от 29.03.2019. Опубл. 29.07.2020. EDN: FYVTWO.
21. *Лапушкин А. С., Шмойлов Д. В., Ладиков А. В., Ефремов А. А.* Способ и система передачи данных на сервер с привлечением удостоверяющего центра. Патент RU2773624C2 с приор. от 19.06.2020. Опубл. 06.06.2022. EDN: FAPLFW.

Поступила в редакцию 02.10.2024

Принята к публикации 15.09.2025

DEPERSINALIZATION OF USER DATA WITH THE INVOLVEMENT OF A TRUSTED DEPERSONALIZATION CENTER

A. V. Ladikov

Kaspersky Lab., 2 bld. 39A Leningradskoe Shosse, Moscow 125212, Russian Federation

Abstract: The article is devoted to the issues of data protection in business intelligence systems and the use of depersonalized data for analytical purposes, which allows to increase their protection in case of unauthorized access to analytical information storage systems or the organization as a whole. It is shown that depersonalization of data in the perimeter of the organization, although it reduces the risk of data leakage, but does not exclude it in case of unauthorized access to many systems of the organization including the depersonalization system. The issue of delegating the procedure of personal identifiers depersonalization to the third, trusted, party called a trusted depersonalization center is considered. The algorithm of receiving depersonalized data from clients of information systems in already depersonalized form using the trusted center of personal identifiers depersonalization is given. The recommendations are given on how to improve data security when using a trusted depersonalization center as well as recommendations on depersonalization, which allow minimizing changes in business intelligence systems when switching from processing personal user data to processing depersonalization user identifiers.

Keywords: data depersonalization; trusted depersonalization center; personal identifiers; data protection; data leakage

DOI: 10.14357/08696527250308

EDN: MUCGXI

References

1. О personal'nykh dannykh: Federal'nyy zakon 152-FZ [About personal data: Federal law 152-FZ]. July 27, 2006 (as amended on 06.02.2023). Available at:

- https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_61801/ (accessed October 7, 2025).
2. Znachimye utechki dannykh v 2022 godu [Significant data leaks in 2022]. 2022. Kaspersky Lab Analytical Report. Available at: <https://go.kaspersky.com/ru-data-leakage-report-2022> (accessed October 7, 2025).
 3. Znachimye utechki dannykh v 2023 godu [Significant data leaks in 2023]. 2023. Kaspersky Lab analytical report. Available at: <https://dfi.kaspersky.ru/data-leakage-2023> (accessed October 7, 2025).
 4. Henderson, D., and S. Earley, eds. 2017. *DAMA-DMBOK: Data management body of knowledge*. 2nd ed. Basking Ridge, NJ: Technics Publications. 624 p.
 5. Sweeney, L. 1996. Replacing personally-identifying information in medical records, the SCRUB system. *Proceedings: A Conference of the American Medical Information Association*. Ed. J. J. Cimino. Washington, D.C.: Hanley & Belfus. 333–337.
 6. Sweeney, L. 2002. k -Anonymity: A model for protecting privacy. *Int. J. Uncertain. Fuzz.* 10(5):557–570. doi:10.1142/S0218488502001648.
 7. Machanavajjhala, A., D. Kifer, J. Gehrke, and M. Venkatasubramanian. 2007. l -Diversity: Privacy beyond k -anonymity. *ACM T. Knowl. Discov. D.* 1(1):3. 52 p. doi: 10.1145/1217299.1217302.
 8. Li, N., T. Li, and S. Venkatasubramanian. 2007. t -Closeness: Privacy beyond k -anonymity and l -diversity. *23rd Conference (International) on Data Engineering Proceedings*. IEEE. 106–115. doi: 10.1109/ICDE.2007.367856.
 9. Huang, L., J. Song, Q. Lu, and X. Liu. 2012. Hypergraph-based solution for selecting quasi-identifier. *Int. J. Digital Content Technology Applications* 6(20):597–606. doi: 10.4156/jdcta.vol6.issue20.65.
 10. Sathiya Devi, S., and R. Indhumathi. 2023. Enhancing privacy for automatically detected quasi identifier using data anonymization. *Web Intelligence* 21(1):71–91. doi: 10.3233/WEB-221823.
 11. Dwork, C. 2006. Differential privacy. *Automata, languages and programming*. Eds. M. Bugliesi, B. Preneel, V. Sassone, and I. Wegener. Lecture notes in computer science ser. Berlin, Heidelberg: Springer. 4052:1–12. doi: 10.1007/11787006_1.
 12. Gadotti, A., L. Rocher, F. Houssiau, A.-M. Crețu, and Y.-A. de Montjoye. 2024. Anonymization: The imperfect science of using data while preserving privacy. *Science Advances* 10(29):eadn7053. 22 p. doi: 10.1126/sciadv.adn7053.
 13. Rupp, V., and M. von Grafenstein. 2024. Clarifying “personal data” and the role of anonymisation in data protection law: Including and excluding data from the scope of the GDPR (more clearly) through refining the concept of data protection. *Comput. Law Secur. Rev.* 52:105932. 25 p. doi:10.1016/j.clsr.2023.105932.
 14. Roskomnadzor. September 5, 2013. Ob utverzhdenii trebovaniy i metodov po obezlichivaniyu personal'nykh dannykh: Prikaz No. 996 [On approval of requirements and methods for the depersonalization of personal data: Order No. 996]. 7 p. Available at: http://rkn.gov.ru/docs/doc_981.tiff (accessed October 7, 2025).
 15. Poluyanova, E. V. 2024. K voprosu o kategoriakh personal'nykh dannykh, reguliruemyykh polozheniyami deystvuyushchego zakonodatel'stva [On the issue of categories of personal data regulated by the provisions of current legislation]. *Agrarnoe i zemel'noe pravo* [Agrarian and Land Law] 9(237):165–167. doi: 10.47643/1815-1329_2024_9_165. EDN: EYBKVO.

16. Ladikov, A. V. 2024. Obezlichivanie pol'zovatel'skikh dannykh v sistemakh biznes-analitiki [Depersonalization of user data in business intelligence systems]. *Sovremennaya nauka: aktual'nye problemy teorii i praktiki. Ser. Estestvennye i tekhnicheskie nauki* [Modern Science: Actual Problems of Theory and Practice. Natural and technical sciences ser.] 1:76–81. doi: 10.37882/2223-2966.2024.01.24. EDN: LNTICX.
17. Zhao, G., C. Rong, J. Li, F. Zhang, and Y. Tang. 2010. Trusted data sharing over untrusted cloud storage providers. *2nd Conference (International) on Cloud Computing Technology and Science Proceedings*. IEEE. 97–103. doi: 10.1109/CloudCom.2010.36.
18. Chadwick, D. W., W. Fan, G. Costantino, R. de Lemos, F. Di Cerbo, I. Herwono, M. Manea, P. Mori, A. Sajjad, and X.-S. Wang. 2020. A cloud-edge based data security architecture for sharing and analysing cyber threat information. *Future Gener. Comp. Sy.* 102:710–722. doi: 10.1016/j.future.2019.06.026.
19. Efremov, A. A., and D. V. Shmoylov. 2019. Sposob anonimnogo obmena dannymi v klient-servernoy arkhitekture [Method for anonymous communication in client-server architecture]. Patent RF No. 2696240C1. EDN: TLUKGB.
20. Lapushkin, A. S., D. V. Shmoylov, A. V. Ladikov, and A. A. Efremov. 2020. Sposob peredachi konfidentsial'nykh dannykh [Confidential data transmission method]. Patent RF No. RU2728503C1. EDN: FYVTWO.
21. Lapushkin, A. S., D. V. Shmoylov, A. V. Ladikov, and A. A. Efremov. 2022. Sposob i sistema peredachi dannykh na server s privilecheniem udostoverayushchego tsentra [Method and system for data transmission to server using certifying center]. Patent RF No. RU2773624C2. EDN: FAPLFW.

Received October 2, 2024

Accepted September 15, 2025

Contributor

Ladikov Andrey V. (b. 1985) — head of Business Intelligence Platform Development, deputy director, Cloud Infrastructure Development, Kaspersky Lab, 2 bld. 39A Leningradskoe Shosse, Moscow 125212, Russian Federation; AndreyNot@mail.ru

ЭВОЛЮЦИЯ КОНЦЕПТУАЛЬНЫХ ПОДХОДОВ К ИНТЕГРАЦИИ ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫХ И УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ КАК ОСНОВЫ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ОРГАНИЗАЦИОННЫХ СИСТЕМ

А. А. Зацаринный¹, С. В. Козлов²

Аннотация: В обзорной статье приводится анализ опыта создания, современного состояния и перспективы развития интегрированных систем управления (ИСУ). Показаны этапы эволюционного развития систем: от структурной интеграции аппаратно-программных средств инфокоммуникационных и управляющих систем в 1980-е гг. к функциональной интеграции разнородных функциональных систем на рубеже начала XXI в. и в перспективе к интеграции целевых и обеспечивающих процессов по иерархии органов управления (ОУ) и по горизонтали взаимодействия разнородных функциональных систем. Приведены основные элементы онтологии предметной области интегрированных систем в виде взаимосвязи стандартов предприятий (BPM, ERP, CRM и др.) и системы соответствующих нотаций (IDEF). Выделены проблемы их применения, обусловленные расширением разнообразия элементов и масштабов интегрированных систем. Показана необходимость выбора новой основы интеграции инфокоммуникационных и управляющих систем в виде системы процессов, включая целевые функциональные процессы, обеспечивающие процессы системной инженерии и противодействующие созданию и функционированию интегрированных систем.

Ключевые слова: интегрированная система; структурная, функциональная и процессная интеграция; стандарты организаций; система нотаций для интегрированных систем; система полных групп целевых, обеспечивающих и противодействующих процессов

DOI: 10.14357/08696527250309

EDN: IMTLJY

1 Введение

В развитии организационных систем (ОрС) за последние 15–20 лет отмечаются крупные изменения на уровне смены их парадигмы [1, 2]. Тектоцентрическая парадигма ОрС как строго фиксированное по структуре и топологии формирование уступает место новой, холистической парадигме (рис. 1). Ее суть определяется не только внешним и внутренним строением, а еще и тем, как и чем она себя проявляет в системе, в которую она включена как элемент [3]. Новая парадигма

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

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

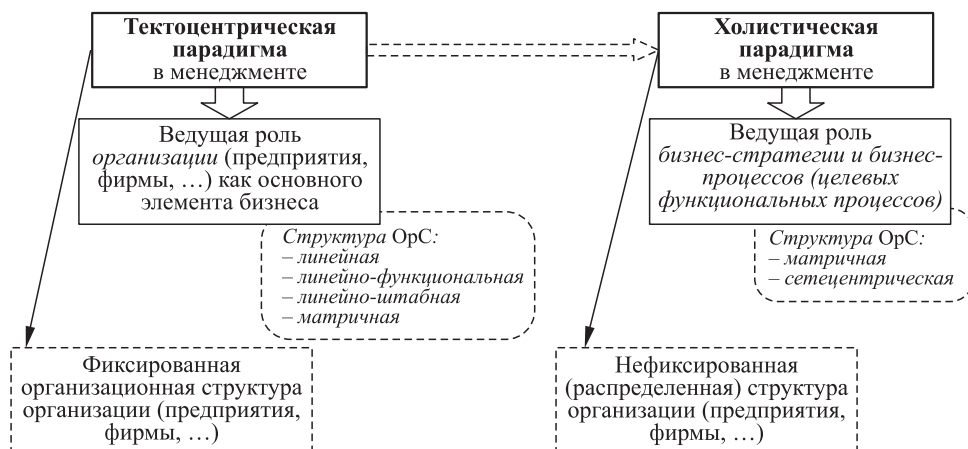


Рис. 1 Эволюция парадигмы развития менеджмента

их развития обуславливает расширение возможностей за счет совершенствования системы управления (СУ) в их составе на основе интеграции разнородных функциональных (инфокоммуникационных, управляющих и др.) систем.

В статье рассмотрены новые аспекты развития СУ, связанные с переходом от функциональной к процессной интеграции с учетом нового подхода к представлению системы целевых процессов в ОРС (см. рис. 1).

2 Основные этапы развития интегрированных систем управления

Анализ работ по созданию ИСУ различного назначения на протяжении XX в. свидетельствует о том, что практически до 1970–1980-х гг. интеграция осуществлялась на структурном уровне [4–8]. Она была направлена в первую очередь на совершенствование телекоммуникационной основы для обеспечения качественного информационного взаимодействия органов и субъектов управления в системах корпоративного управления за счет комплексного применения разнородных средств автоматизации управления. Одновременно с этим осуществлялось расширение перечня услуг, предоставляемых ОУ. В этот период предметная область и масштабы интеграции функциональных элементов в составе ИСУ соответствовали системам типа C^2 (command, control) и C^3 (command, control, and communications), что послужило исходной базой для дальнейшего развития ИСУ в направлении функциональной интеграции новых элементов. Структурная интеграция предполагает объединение различных компонентов системы на уровне их архитектуры и инфраструктуры. Целью ставится обеспечение совместимости и взаимодействия между различными системами, модулями и базами данных.

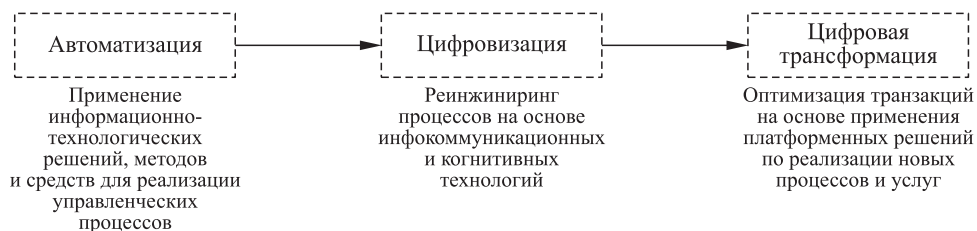


Рис. 2 Этапы технологического развития ИСУ

Постоянно растущие потребности ОУ в обеспечении ситуационной осведомленности их должностных лиц обусловили необходимость поэтапного подключения в состав СУ новых функциональных элементов, обеспечивающих реализацию таких функций, как сбор информации об обстановке, навигацию, ориентирование, распознавание и т. д. В зарубежной практике в начале XXI в. были обновлены концепции развития интегрированных систем [9–11] до уровня C^4IEFTW , C^5IEFTW и др.

В развитии ИСУ с точки зрения цифровизации как доминирующей технологии можно выделить три этапа, как показано на рис. 2.

Развитие СУ осуществляется в створе преодоления новых угроз в инфокоммуникационной сфере. Общее направление их развития: от специализированных, монофункциональных СУ к многофункциональным, многодоменным системам с поэтапной интеграцией в их составе функциональных элементов, реализуемых на основе новых технологий в условиях цифровой трансформации. В развитии управленческой деятельности обычно выделяют автоматизацию функций по выполнению задач управления и автоматизацию процессов управления, реализуемых на основе функционального и процессного подходов соответственно. Анализ и обобщение направлений развития ИСУ типа C^nI свидетельствует о том, что по мере расширения их функциональности возрастает сложность комплексной автоматизации функций по выполнению задач управления, непропорционально быстро растет сложность обеспечения межадачного взаимодействия, что еще более усугубляется в рамках многодоменной системы. Функциональная автоматизация не позволяет достичь должного эффекта от интеграции разнородных систем, возрастает роль автоматизации процессов. На 1-й и 2-й стадиях интеграции СУ как объект исследования представляется в виде взаимоувязанной совокупности органов, центров и средств управления (ОЦСУ), а предмет исследования составляют бизнес-процессы и системотехника для их реализации. Основными методами исследований служат методы функционального подхода и системной инженерии. На рис. 3 показана характеристика этапов эволюции ИСУ, а на рис. 4 — изменение уровня автоматизации функций и процессов, реализуемых в рамках управленческой деятельности. В настоящее время объектом исследования становится ИСУ как многофункциональная система на уровне элементов СУ, рассматриваемых на 2-й и 3-й стадиях. Предмет исследования

1 Узкоспециализированные СУ	Стадии интеграции элементов СУ	Основные признаки стадии интеграции	Предмет исследования	Методы исследования
2 Комплексные СУ (C ² , C ³ , C ³ I, ...)	Типовой объект исследования (на 1-й и 2-й стадии интеграции элементов)	Система управления как взаимосвязанная совокупность ОЦСУ	Бизнес-процессы в жизненном цикле Системотехника	Функциональный подход к созданию ИСУ Системная инженерия
3 Интеграция подсистем на основе технологии COTS (Commercial Off-The-Shelf — «готовые к использованию»)	Объект исследования (на 3-й стадии интеграции элементов)	Интегрированная СУ как многофункциональная система на уровне ОЦСУ	Полная группа целевых процессов в жизненном цикле	Процессный и проектный подходы Системная инженерия
4 Интеграция подсистем на процессной основе (общие бизнес-процессы)	Объект исследования (на 4-й и 5-й стадии интеграции элементов)	Интегрированная СУ как многопроцессорная система на уровне ОЦСУ	Система полных групп целевых, обеспечивающих и противодействующих процессов в жизненном цикле	Процессный и проектный подходы
5 Интеграция подсистем на процессной основе (полная группа процессов)				

Рис. 3 Характеристика этапов эволюции ИСУ



Рис. 4 Изменение уровня автоматизации функций и процессов управления

должен рассматриваться практически полностью на уровне процессов в жизненном цикле СУ, а методы исследования — на основе процессного и проектного подходов и системной инженерии. Еще четверть века назад такая интеграция ограничивалась 3–4 видами функциональных систем (1-я стадия), а обеспечение их совместного функционирования достигалось за счет применения системы протоколов и различного рода шлюзов. Дальнейшее расширение функциональности ИСУ приводило к возрастанию сложности обеспечения совместимости ее компонентов.

Инфокоммуникационная сфера в настоящее время становится весьма уязвимой в отношении современных угроз при реализации системных решений, определяющих обеспечение интероперабельности разнородных элементов при создании ИСУ.

По мере развития технологий наблюдается интенсивное расширение горизонтов угроз. Складывается такое положение, когда в условиях нарастания внешних угроз лавинообразно растет сложность организации и качественного обеспечения деятельности ОУ, что становится причиной появления вторичных угроз внутрисистемного характера. Ограничения системного подхода [12, 13], связанные с недостаточной определенностью предметной сферы СУ, противоречивостью исходных данных и целостностью объекта исследований, проявляются в том, что создаваемые СУ не в полной мере будут соответствовать условиям их применения, а с учетом высокой сложности ИСУ такое положение становится сдерживающим фактором.

3 Развитие стандартов управления организационными системами

Применительно к стадиям начиная с третьей (см. рис. 3) в теории и практике интеграции СУ создан и широко используется набор разнородных стандартов предприятий [14], обобщение и классификация которых представлены в табл. 1. Учитывая одновременное применение различных стандартов управления организациями [13, 15–17], как показано на рис. 5, следует отметить, что расширение перечня объединяемых в составе ИСУ разнородных элементов усложняет применение существующих стандартов организаций из-за увеличения их перечня и расширения разветвленности необходимой конфигурации их взаимодействия. На рис. 6 показано соответствие нотаций для описания стандартов организаций и выделены наиболее широко применяемые из них. Так, системы по стандарту ERP2 объединяют в себе реализацию большинства описанных ранее стандартов и обеспечивают максимальную автоматизацию объединенных бизнес-процессов производственных и других организаций:

$$\text{ERP2} = \text{CSRP} + \text{SRM} + \text{PLM} + \text{SCM} + \text{e-COM} + \dots$$

При всех достоинствах указанной системы стандартов организации и соответствующих им нотаций не обеспечивается адекватный учет негативного влияния угроз в виде противодействующих процессов, а бизнес-процессы при этом

Таблица 1 Направления взаимодействия стандартов в едином цикле управления организацией (предприятием)

Обозначение	Наименование	Взаимодействие в едином цикле
Этап планирования		
PLM	Product Lifecycle Management: Управление жизненным циклом продукта от разработки до вывода из эксплуатации	Управляет жизненным циклом продукта начиная с этапа проектирования. Данные о продукте передаются в ERP и APS для планирования производства
CAD/CAM	Computer-Aided Design/Computer-Aided Manufacturing: Компьютерное проектирование/компьютерное производство	Используются для проектирования и производства продукта, данные передаются в PLM и ERP
ERP	Enterprise Resource Planning: Управление ресурсами предприятия (финансы, персонал, закупки, производство)	На основе данных от PLM планирует ресурсы (материалы, финансы, персонал) для производства
MRP/MRP II	Material Requirements Planning / Manufacturing Resource Planning: Планирование потребностей в материалах/планирование производственных ресурсов	Планирует потребности в материалах и производственных ресурсах на основе данных от ERP
APS	Advanced Planning and Scheduling: Планирование и оптимизация производственных процессов	Оптимизирует производственное расписание, учитывая данные от ERP и PLM
Этап производства		
MES	Manufacturing Execution System: Управление производственными процессами в реальном времени	Управляет производственными процессами в реальном времени, получая данные от APS и ERP
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition: Мониторинг и управление промышленным оборудованием	Мониторит и контролирует оборудование, передавая данные в MES для анализа и управления
BPM	Business Process Management: Управление бизнес-процессами, их моделирование, автоматизация и оптимизация	Автоматизирует и оптимизирует бизнес-процессы, связанные с производством, используя данные от MES и ERP
TQM	Total Quality Management: Всеобщее управление качеством	Обеспечивает контроль качества на всех этапах производства

Продолжение табл. 1 на с. 136

Таблица 1 (продолжение) Направления взаимодействия стандартов в едином цикле управления организацией (предприятием)

Обозначение	Наименование	Взаимодействие в едином цикле
Этап управления взаимоотношениями с клиентами		
CRM	Customer Relationship Management: Управление взаимоотношениями с клиентами, включая продажи, маркетинг и обслуживание	Управляет взаимодействием с клиентами, включая заказы, продажи и обслуживание. Данные о заказах передаются в ERP для планирования производства
ERP	Enterprise Resource Planning: Управление ресурсами предприятия (финансы, персонал, закупки, производство)	Интегрирует данные от CRM для управления заказами, финансами и ресурсами
EDI	Electronic Data Interchange: Электронный обмен данными	Обеспечивает электронный обмен данными с клиентами и поставщиками
Этап управления цепочками поставок		
SCM/SCP/SCE	Supply Chain Management/Supply Chain Planning/Supply Chain Execution: Управление цепочками поставок/планирование цепочек поставок/исполнение цепочек поставок	Управляет цепочками поставок, планированием и исполнением, используя данные от ERP и CRM
WMCIAS	Warehouse Management and Control Integrated Automation Systems: Управление складом и интегрированные системы автоматизации	Управляет складскими операциями и интегрированными системами автоматизации
Этап анализа и отчетности		
BI	Business Intelligence: Анализ данных для поддержки принятия решений	Анализирует данные от всех систем (ERP, MES, CRM, PLM) для поддержки принятия решений
DM	Data Mining: Извлечение знаний из данных	Извлекает знания из данных для улучшения процессов
GAAP/IFRS	Generally Accepted Accounting Principles/International Financial Reporting Standards: Общепринятые принципы бухгалтерского учета/международные стандарты финансовой отчетности	Обеспечивает соответствие финансовой отчетности общепринятым принципам и международным стандартам

Окончание табл. 1 на с. 137

Таблица 1 (окончание) Направления взаимодействия стандартов в едином цикле управления организацией (предприятием)

Обозначение	Наименование	Взаимодействие в едином цикле
IAB/APICS	International Association of Bookkeepers/American Production and Inventory Control Society: Международная ассоциация бухгалтеров/Американское общество управления производством и запасами	Поддерживает стандарты бухгалтерского учета и управления производством
BPM	Business Process Management: Управление бизнес-процессами, их моделирование, автоматизация и оптимизация	Использует аналитику от BI для оптимизации бизнес-процессов
Этап управления персоналом		
HRM	Human Resource Management: Управление человеческими ресурсами	Управляет человеческими ресурсами, интегрируя данные с ERP и CRM

представляются безотносительно к их привязке к ОЦСУ. Обобщая сведения, представленные на рис. 5 и 6 и в табл. 1, надо отметить, что по мере расширения размерности ИСУ становится актуальным другой подход к систематизации в их предметной области на основе представления полных групп целевых функциональных процессов, процессов системной инженерии, обеспечивающих их реализацию, и противодействующих процессов. Его методическую основу должно составлять представление системы процессов в жизненном цикле ИСУ с ее декомпозицией с учетом отражения процессов взаимодействия ОЦСУ.

Важно отметить, что процессная основа OpC, отраженная в стандартах предприятий (см. табл. 1) и в основных нотациях (см. рис. 6), не в полной

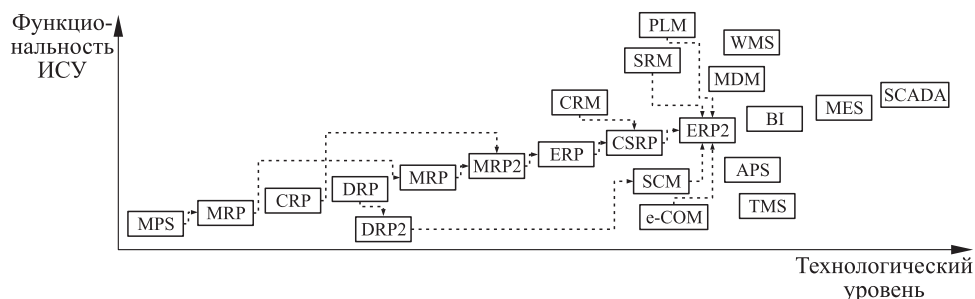


Рис. 5 Развитие стандартов управления организацией (предприятием)

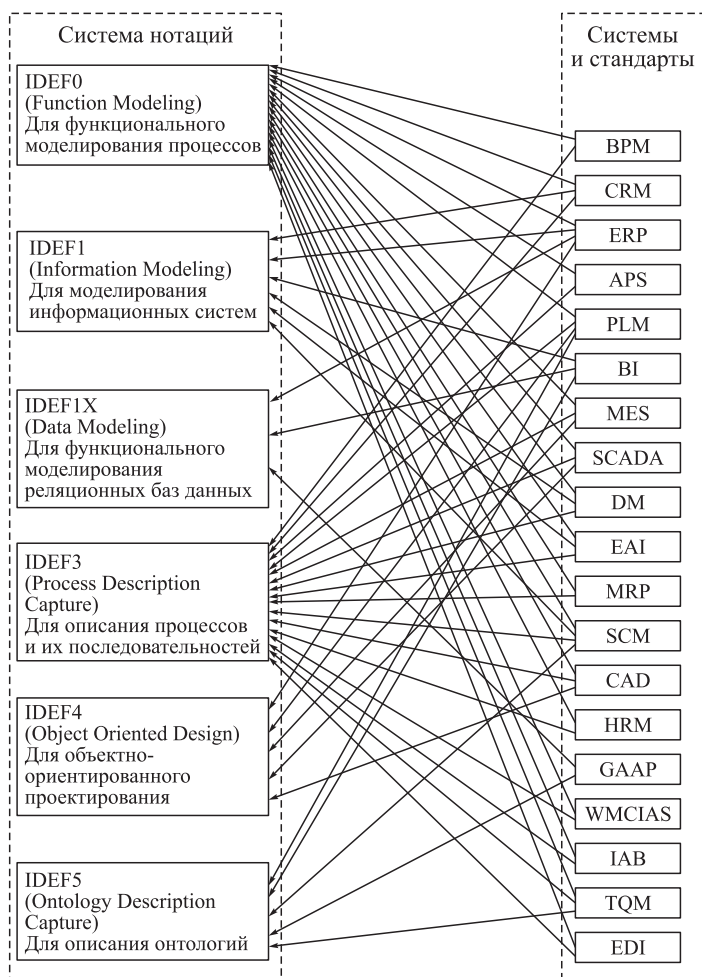


Рис. 6 Взаимодействие системы нотаций с основными стандартами управления организацией

мере адаптирована к реалиям перспективных ИСУ, поскольку не учитывает необходимость нового подхода к декомпозиции системы процессов в жизненном цикле ИСУ как предмета поэтапной интеграции на уровне организационных, организационно-ресурсных и технико-технологических процессов, отражающих взаимодействие ОЦСУ (табл. 2).

Представление системы процессов, отражающих взаимодействие элементов СУ, позволяет на качественно новом уровне подходить к созданию ИСУ. В табл. 2 с учетом [18] представлена их классификация.

Таблица 2 Классификация процессов в жизненном цикле ИСУ

Элементы СУ	Виды процессов	Признак классификации процессов
Органы управления	Организационные (административные или бизнес-процессы)	Взаимодействие ОУ, подразделений, должностных лиц, специалистов между собой без учета применения средств управления
Центры управления	Организационно-технические процессы	Взаимодействие ОУ, подразделений, должностных лиц, специалистов между собой с учетом применения технических средств управления
	Организационно-информационные процессы	Взаимодействие ОУ, подразделений, должностных лиц, специалистов между собой с учетом применения средств управления информационными ресурсами
	Организационно-когнитивные процессы	Взаимодействие ОУ, подразделений, должностных лиц, специалистов между собой с учетом применения средств управления ресурсами знаний
Средства управления	Технико-технологические процессы	Взаимодействие средств управления между собой без участия человека-оператора

4 Заключение

В обзорной статье, посвященной эволюции концептуальных подходов на фоне смены парадигмы современного менеджмента, показана перспектива перехода к процессной интеграции инфокоммуникационных и управляющих систем как основы перспективных СУ. Развитие ИСУ как ERP-системы в виде интегрированной совокупности методов, процессов, технологий и средств в направлении расширения ее функциональных возможностей целесообразно проводить поэтапно на основе комплексного применения методов функционального и процессного подходов, что обеспечивает возможность одновременного проектирования организационной структуры (функциональных областей ИСУ) и порядка взаимодействия элементов системы в рамках этой структуры, представляемых в виде полной группы процессов (алгоритмов функционирования), отражающей взаимодействие организационных СУ.

В системе нотаций предметной области ИСУ ключевыми становятся IDEF0 и IDEF3, которые при использовании процессной интеграции должны быть адаптированы с учетом систематизации целевых функциональных и обеспечивающих процессов системной инженерии в жизненном цикле ИСУ.

Новый подход к систематизации полных групп целевых функциональных процессов, отличающийся от традиционного их представления на уровне биз-

нес-процессов, не учитывающего процессы взаимодействия элементов СУ, позволяет по-новому подходить к созданию ИСУ и на унифицированной основе классификации целевых и противодействующих процессов (см. табл. 2) проводить анализ уязвимостей на стыках однородных и разнородных процессов, используя лучшие практики стандартов организаций и соответствующих им нотаций.

Литература

1. Эволюция организационного развития: принятие целостных парадигм. — HumanDesign.ai, 2021. <https://humandesign.ai/ru/the-evolution-of-organizational-development-embracing-holistic-paradigms>.
2. Козлов С. В. О комплексном и комплектном подходе к созданию интегрированных систем управления на основе информационных технологий // Экономика и бизнес: теория и практика, 2025. № 5(123). С. 173–178. doi: 10.24412/2411-0450-2025-5-173-178. EDN: BULGSL.
3. Зацаринный А. А., Киселев Э. В., Козлов С. В., Колин К. К. Информационное пространство цифровой экономики России. Концептуальные основы и проблемы формирования. — М.: НИПКЦ Восход-А, 2018. 236 с. EDN: ZLUODZ.
4. Прангишвили И. В. Системный подход и общесистемные закономерности. — М.: Синтез, 2000. 528 с.
5. Зацаринный А. А. Основные принципы системного подхода при проектировании, внедрении и развитии современных корпоративных сетей // Системы и средства информатики, 2002. Вып. 12. С. 58–66. EDN: UTYDGJ.
6. Зацаринный А. А., Ионенков Ю. С., Козлов С. В. Некоторые вопросы проектирования информационно-телекоммуникационных систем / Под ред. А. А. Зацаринного. — М.: ИПИ РАН, 2010. 218 с. EDN: QMVUFZ.
7. Зацаринный А. А., Колин К. К. Методологические основы системного подхода к созданию информационных систем в условиях глобализации общества // Стратегические приоритеты, 2018. № 1(17). С. 38–61. EDN: TICYTR.
8. Зарубин Д. А. История автоматизированных систем управления предприятием. Обоснование создания интегрированной системы автоматизации управления предприятием // Международный студенческий научный вестник, 2019. № 6. Ст. 14. 12 с. EDN: PNKQSH.
9. Trott K. Command, control, communications, computer, intelligence, surveillance and reconnaissance (C4ISR) modeling and simulation using joint semi-automated forces (JSAF). Air Force Research Laboratory. Final Technical Report AFRL-IF-RS-TR-2003-144. 13 p. https://www.researchgate.net/publication/277730202_Command_Control_Communications_Computer_Intelligence_Surveillance_and_Reconnaissance_C4ISR_Modeling_and_Simulation_Using_Joint_Semi-Automated_Forces_JSAF.
10. Козлов С. В., Кубанков А. Н. Процессные основы интеграции и комплексного развития информационных, управляющих, роботизированных, телекоммуникационных систем // Научные технологии в космических исследованиях Земли, 2020. Т. 12. № 1. С. 23–31. doi: 10.36724/2409-5419-2020-12-1-23-31. EDN: TXEKHI.

11. C4ISR/C5ISR/C6ISR — в чем разница? // Военный перевод, 2021. <https://voenper2020.site/materials/leksika/c4isr-c5isr-c6isr-v-chem-raznitsa?ysclid=me5beyhknk31361040>.
12. Пригожин А. И. Методы развития организаций. — М.: МЦФЭР, 2003. 823 с.
13. Классы автоматизации: от MPS до ERP2. — Хабр, 2024. <https://habr.com/ru/articles/819255>.
14. Челидзе Д. Типы основных ИТ-систем. — Челидзе и партнеры, 2021. <https://www.chelidze-d.com/post/it-systems?ysclid=m7lvu8w74d216254820>.
15. Гвишиани Д. М. Системный подход к исследованию глобальных проблем // Наука и человечество / Под ред. А. А. Логунова, А. П. Александрова, Н. Г. Басова и др. — М.: Знание, 1983. С. 237–249.
16. Буренок В. М., Ивлев А. А., Корчак В. Ю. Развитие военных технологий XXI века: проблемы, планирование, реализация. — Тверь: Купол, 2009. 624 с.
17. Цифровое производство начинается с MES. — Дзен, 2018. <https://dzen.ru/a/W-rn7mhP4ACzidu9?ysclid=m7lwbgj99r481847917>.
18. Козлов С. В., Кубанков А. Н. О направлениях интеграции информационных, управляющих и телекоммуникационных систем на процессной основе // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт, 2018. Т. 12. № 9. С. 34–40. doi: 10.24411/2072-8735-2018-10142. EDN: ZXWWBP.

Поступила в редакцию 17.07.2025

Принята к публикации 15.09.2025

EVOLUTION OF CONCEPTUAL APPROACHES TO THE INTEGRATION OF INFORMATION, CONTROL, AND TELECOMMUNICATION SYSTEMS AS THE BASIS OF PROMISING ORGANIZATIONAL SYSTEMS

A. A. Zatsarinny and S. V. Kozlov

Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119333, Russian Federation

Abstract: The review article provides an analysis of the experience of creating, the current state, and prospects for the development of integrated control systems. The stages of the evolutionary development of systems are shown: from the structural integration of hardware and software means of infocommunication and control systems in the 1980s to the functional integration of heterogeneous functional systems at the turn of the early 21st century and in the future to the integration of target and supporting processes in the hierarchy of control bodies and in the horizontal interaction of heterogeneous functional systems. The main elements of the ontology of the integrated systems domain are presented in the form of a relationship between enterprise standards (BPM, ERP, CRM, etc.) and a system of corresponding notations (IDEF). The problems of their application caused by the expansion of the variety of elements and scales of integrated systems are highlighted. The article demonstrates the need to choose a new basis for

integrating information and communication systems and control systems in the form of a system of processes, including target functional processes, supporting system engineering processes, and processes that prevent the creation and operation of integrated systems.

Keywords: integrated system; structural, functional, and process integration; organization standards; notation system for integrated systems; system of complete groups of target, supporting, and countering processes

DOI: 10.14357/08696527250309

EDN: IMTLJY

References

1. The evolution of organizational development embracing holistic paradigms. 2021. HumanDesign.ai. Available at: <https://humandesign.ai/the-evolution-of-organizational-development-embracing-holistic-paradigms> (accessed October 8, 2025).
2. Kozlov, S. V. 2025. O kompleksnom i komplektnom podkhode k sozdaniyu integrirovannykh sistem upravleniya na osnove informatsionnykh tekhnologiy [On a comprehensive and integrated approach to creating integrated management systems based on information technologies]. *Ekonomika i biznes: teoriya i praktika* [Economy and Business: Theory and Practice] 5(123):173–178. doi: 10.24412/2411-0450-2025-5-173-178. EDN: BULGSL.
3. Zatsarinny, A. A., E. V. Kiselev, S. V. Kozlov, and K. K. Kolin. 2018. *Informatsionnoe prostranstvo tsifrovoy ekonomiki Rossii. Kontseptual'nye osnovy i problemy formirovaniya* [Information space of the digital economy of Russia. Conceptual foundations and problems of formation]. Moscow: Voskhod-A. 236 p. EDN: ZLUODZ.
4. Prangishvili, I. V. 2000. *Sistemnyy podkhod i obshchesistemnye zakonomernosti* [Systems approach and general systemic patterns]. Moscow: Sinteg. 528 p.
5. Zatsarinny, A. A. 2002. Osnovnye printsipy sistemnogo podkhoda pri proektirovanii, vnedrenii i razvitii sovremennykh korporativnykh setey [Basic principles of systems approach to the design, implementation, and development of modern corporate networks]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 12:58–66. EDN: UTYDGJ.
6. Zatsarinny, A. A., Yu. S. Ionenkov, and S. V. Kozlov. 2010. *Nekotorye voprosy proektirovaniya informatsionno-telekommunikatsionnykh sistem* [Some issues of designing information and telecommunication systems]. Ed. A. A. Zatsarinny. Moscow: IPI RAN. 218 p. EDN: QMVUFZ.
7. Zatsarinny, A. A., and K. K. Kolin. 2018. Metodologicheskie osnovy sistemnogo podkhoda k sozdaniyu informatsionnykh sistem v usloviyakh globalizatsii obshchestva [Methodological foundations of a systematic approach to the creation of information systems in a globalizing society]. *Strategicheskie priority* [Strategic Priorities] 1(17):38–61. EDN: TICYTR.
8. Zarubin, D. A. 2019. Istoriya avtomatizirovannykh sistem upravleniya predpriyatiem. Obosnovanie sozdaniya integrirovannoy sistemy avtomatizatsii upravleniya predpriyatiem [History of automated enterprise management systems. Justification of creation of the integrated system of automation of management of the enterprise]. *Mezhdunarodnyy studentcheskiy nauchnyy vestnik* [International Student Scientific Bulletin] 6:14. 12 p. EDN: PNKQSH.

9. Trott, K. 2003. Command, control, communications, computer, intelligence, surveillance and reconnaissance (C4ISR) modeling and simulation using joint semi-automated forces (JSAF). Air Force Research Laboratory. Final Technical Report AFRL-IF-RS-TR-2003-144. 13 p. Available at: https://www.researchgate.net/publication/277730202_Command_Control_Communications_Computer_Intelligence_Surveillance_and_Reconnaissance_C4ISR_Modeling_and_Simulation_Using_Joint_Semi-Automated_Forces_JSAF (accessed October 8, 2025).
10. Kozlov, S. V., and A. N. Kubankov. 2020. Protsessnye osnovy integratsii i kompleksno-go razvitiya informatsionnykh, upravlyayushchikh, robotizirovannykh, telekommunikatsionnykh sistem [Process bases of integration and complex development of information, control, robotic, and telecommunication systems]. *Naukoemkie tekhnologii v kosmicheskikh issledovaniyakh Zemli* [High Technologies in Earth Space Research] 12(1):23–31. doi: 10.36724/2409-5419-2020-12-1-23-31. EDN: TXEKHI.
11. C4ISR/C5ISR/C6ISR — v chem raznitsa [C4ISR/C5ISR/C6ISR — what's the difference?]. 2021. *Voennyi perevod* [Military Translation]. Available at: <https://voenper2020.site/materials/leksika/c4isr-c5isr-c6isr-v-chem-raznitsa?ysclid=me5beyhknk31361040> (accessed October 8, 2025).
12. Prigozhin, A. I. 2003. *Metody razvitiya organizatsiy* [Methods of organization development]. Moscow: MTsFER. 823 p.
13. Klassy avtomatizatsii: ot MPS do ERP2 [Automation classes: From MPS to ERP2]. 2024. *Habr*. Available at: <https://habr.com/ru/articles/819255> (accessed October 8, 2025).
14. Chelidze, D. 2024. Tipy osnovnykh IT-sistem [Types of basic IT systems]. *Chelidze i partnery* [Chelidze and partners]. Available at: <https://www.chelidze-d.com/post/it-systems> (accessed October 8, 2025).
15. Gvishiani, D. M. 1983. Sistemnyi podkhod k issledovaniyu global'nykh problem [A systems approach to the study of global problems]. *Nauka i chelovechestvo* [Science and humanity]. Eds. A. A. Logunov, A. P. Aleksandrov, N. G. Basov, et al. Moscow: Znanie. 237–249.
16. Burenok, V. M., A. A. Ivlev, and V. Yu. Korchak. 2009. *Razvitie voennykh tekhnologiy XXI veka: problemy, planirovanie, realizatsiya* [Development of military technologies in the 21st century: Problems, planning, implementation]. Tver: Kupol. 624 p.
17. Tsifrovoe proizvodstvo nachinaetsya s MES [Digital manufacturing starts with MES]. 2018. Available at: <https://dzen.ru/a/W-rn7mhP4ACzidu9?ysclid=m7lwbj99r481847917> (accessed October 8, 2025).
18. Kozlov, S. V., and A. N. Kubankov. 2018. O napravleniyakh integratsii informatsionnykh, upravlyayushchikh i telekommunikatsionnykh sistem na protsessnoy osnove [Ways of integrating information, controlling and telecommunication systems on a process basis]. *T-Comm: Telekommunikatsii i transport* [T-Comm] 12(9):34–40. doi: 10.24411/2072-8735-2018-10142. EDN: ZXWWBP.

Received July 17, 2025

Accepted September 15, 2025

Contributors

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 119333, Russian Federation; AZatsarinny@frccsc.ru

Kozlov Sergey V. (b. 1955) — 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 119333, Russian Federation; skozlov@frccsc.ru

К 85-ЛЕТИЮ ЗАСЛУЖЕННОГО ДЕЯТЕЛЯ НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ И. Н. СИНИЦЫНА

Игорь Николаевич Синицын, профессор, доктор технических наук, заслуженный деятель науки РФ, почетный наставник — выдающийся ученый в области прикладной механики и управления, прикладной математики и информатики, основатель научной школы в области стохастических информационных технологий, автор свыше 650 научных трудов, 62 книг и 30 изобретений. Имеет большой опыт работы в промышленности, высших технических учебных заведениях и Российской академии наук.

1 Этапы научной деятельности

Игорь Николаевич Синицын родился 14 августа 1940 г. в Москве в семье педагогов. Получил блестящее образование, окончив английскую спецшколу № 1 в Сокольниках с серебряной медалью, МВТУ им. Н. Э. Баумана и МГУ им. М. В. Ломоносова, где в 1965 г. защитил кандидатскую диссертацию. Одновременно с учебой в МГУ по приглашению академика А. Ю. Ишлинского начал работать в известном ракетно-космическом Научно-исследовательском институте прикладной механики им. академика В. И. Кузнецова (НИИ ПМ). В период 1960–1983 гг. участвовал в разработке и испытаниях гироскопических командных приборов и информационно-измерительных систем, вел инженерную и научно-исследовательскую деятельность, по результатам которой в 1983 г. защитил докторскую диссертацию.

Практическая работа в НИИ ПМ органично совмещалась с педагогической де-



И. Н. Синицын — сотрудник НИИ ПМ, 1963 г.



И. Н. Синицын на кафедре ВВИА им. Н. Е. Жуковского, 1974 г.

тельностью: сначала в МВТУ им. Н. Э. Баумана, затем в Военно-воздушной инженерной академии им. профессора Н. Е. Жуковского (ВВИА). В период 1974–1983 гг. И. Н. Синицын работал на факультете авиационного вооружения ВВИА, где занимался подготовкой авиационных инженеров и космонавтов, принимал участие в разработке и испытаниях специальной техники.

В 1984 г. И. Н. Синицын был направлен во вновь организованный Институт проблем информатики АН СССР (ИПИ АН, впоследствии — ИПИ РАН, ныне — ФИЦ ИУ РАН) для работ в области специальных системных применений ЭВМ новых поколений. В настоящее время И. Н. Синицын является руководителем научного направления «Теоретико-вероятностные и статистические методы моделирования» в ФИЦ ИУ РАН, заместителем председателя секции Ученого совета ФИЦ ИУ РАН, членом трех диссертационных сове-

тов. В разные годы И. Н. Синицын был заместителем генерального конструктора, заместителем главного конструктора и главным конструктором ряда автоматизированных и информационных систем специального назначения, награжден ведомственными наградами.

Игорь Николаевич Синицын много сил отдает подготовке научно-педагогических кадров. С 1987 г. И. Н. Синицын является профессором Московского авиационного института и читает спецкурсы в области стохастической динамики, надежности и безопасности информационных систем, работает заместителем главного редактора журнала «Системы высокой доступности», а также членом редколлегии ряда ведущих рецензируемых научных журналов: «Информатика и её применения», «Системы и средства информатики», «Pattern Recognition and Image Analysis», «Наукоемкие технологии» и др.

В 2001 г. И. Н. Синицыну было присвоено почетное звание «Заслуженный деятель науки Российской Федерации», а в 2024 г. он был награжден юбилейной медалью «300 лет Российской академии наук».

2 Основные направления работ

Основные научные труды И. Н. Синицына относятся к следующим областям:

- статистическая теория информационных технологий и автоматизированных систем;

- прецизионные информационно-измерительные технологии и системы для научных исследований и специального назначения;
- информационно-аналитические технологии и системы поддержки принятия решений для информатизации высших органов государственной власти РФ и федеральных ведомств;
- теория систем интегрированной логистической поддержки и организационно-техничко-экономических систем (ОТЭС);
- теория стохастических канонических представлений (КП) и стохастических систем (СтС).

В области статистической теории информационных технологий и автоматизированных систем ему принадлежат фундаментальные результаты по теории канонических и обобщенных КП случайных функций (СФ) в СтС, в том числе с распределенными параметрами и случайной структурой (1964–1983). Методы теории СтС им распространены на СтС, описываемые дифференциальными уравнениями с СФ состояния, уравнениями в гильбертовых и банаховых пространствах. Им разработаны эффективные вычислительные методы нахождения распределений, основанные на параметризации, позволяющие радикально сократить число уравнений для параметров распределений, а также новые вычислительные методы статистического анализа и синтеза, допускающие эффективное оценивание точности и ориентированные на параллельные статистические вычисления. Игорь Николаевич Сеницын разработал методы нахождения точных распределений с инвариантной мерой, обнаружил ряд новых классов точных распределений (1979–1993). Важные результаты получены им по теоретико-групповым методам анализа автоматизированных систем (1983–2000), разработана статистическая теория катастрофоустойчивости автоматизированных систем высокой точности и доступности. В 2005–2007 гг. И. Н. Сеницын разработал теорию сингулярных СтС. В разные годы он возвращался к вопросам анализа и синтеза эредитарных СтС. В большой серии статей И. Н. Сеницын разработал методы и алгоритмы статистической линеаризации сложных нелинейностей, описываемых дробно-рациональными, иррациональными и специальными функциями. Им получены важные результаты в области СтС на многообразиях, в том числе круговых, сферических, цилиндрических и др.

В период 2016–2020 гг. под руководством И. Н. Сеницына получены важные результаты в области суб- и условно-оптимального оценивания процессов в СтС на многообразиях, эредитарных СтС, а также теории условно-оптимального управления по различным критериям.

Игорь Николаевич Сеницын — основоположник стохастических информационных технологий оперативной обработки информации, калибровки, контроля и мониторинга автоматизированных систем. Под его руководством и при непосредственном участии созданы инструментальные средства для статистического анализа, моделирования и синтеза систем: проблемно-ориентированные диалоговые системы и библиотеки «СтС-Анализ» (1989–1990, 2004–2007), «СтС-



С создателем теории фильтрации Р. Э. Калманом, 2008 г.

Фильтр» (1991, 2004–2007), «СтС-Модель» (1993, 2007), Nalib (1991–1993), TransStatLib (1991–1993), ASAP-ALPHA-97, «Безопасность и надежность» (1991–1995), «Здоровье РФ» (1992–1996, 1999, 2003) и др. Им разработаны эффективные символьные методы анализа и синтеза СтС. В 2005–2007 гг. создано и внедрено специализированное программное обеспечение «СтС-СМА», а в 2007–2010 гг. — «СтС-ИТКР».

Его книги в области теории СтС — «Стохастические дифференциальные системы. Анализ и фильтрация» (1985, 1987, 1990), «Лекции по функциональному анализу и его приложениям» (1999, 2018), «Теория стохастических систем» (2000, 2001, 2004, совместно с В. С. Пугачёвым), а также «Фильтры Калмана и Пугачёва» (2006, 2007), «Канонические представления случайных функций и их применение в задачах компьютерной поддержки научных исследований» (2009) и «Лекции по нормальной и эллипсоидальной аппроксимации распределений в стохастических системах» (2013, совместно с В. И. Синицыным) широко известны в России и за рубежом.

Начиная с 2017 г. И. Н. Синицын ведет исследования в области вероятностного и статистического моделирования и анализа, фильтрации и экстраполяции, распознавания и обучения особых СтС, не разрешенных относительно производных, а также неявных, в том числе эрмитарных, систем. Большое внимание

И. Н. Сеницын уделяет теории и применению канонических разложений (КР) и интегральных КР на основе вейвлет, нейросетевых и бионических подходов.

В области прецизионных информационно-измерительных технологий и автоматизированных систем для научных исследований и специального назначения И. Н. Сеницыным впервые разработана теория ряда информационно-измерительных систем в условиях случайных динамических возмущений, открыт ряд новых статистических динамических эффектов (выбросы разных типов, флуктуационные уходы, накопление возмущений и др.). Ему принадлежат первые работы по статистической динамике командно-измерительных гироскопических приборов, акселерометров, градиентометров и метрологических систем высочайшей точности, информационной теории и методам измерений, калибровок, ускоренных испытаний в экстремальных условиях, а также статистического и полунатурного моделирования. Под его руководством и при непосредственном участии разработаны и внедрены несколько поколений серийных систем (в том числе со встроенными устройствами для снижения возмущений), обладающих уникальными характеристиками (1959–1983). Работая в НИИ ПМ, И. Н. Сеницын принимал непосредственное участие в определении технической политики в области новой специальной техники (1979–1983). В 2013 г. был награжден медалью «100 лет со дня рождения академика В. И. Кузнецова».

С именем И. Н. Сеницына связано создание концепций автоматизации научных исследований в СССР, в первую очередь основанных на средствах массовой вычислительной техники (1984–1988). Под руководством и при участии И. Н. Сеницына сформулированы принципы создания микровидеосистем и создан ряд базовых систем в интересах МВД и Минздрава СССР (1984–1988). Полученные результаты получили развитие в автоматизированных системах метрологического обеспечения, видеоконтроля и биометрических системах. Под руководством И. Н. Сеницына разработаны принципы построения и архитектуры вычислительных систем командных пунктов, а также новые быстрые методы и алгоритмы обработки изображений, обладающих сильной пространственно-временной деформацией. Для автоматизации астрометрических научных исследований был создан комплекс моделей, алгоритмов и специального программного обеспечения и информационные ресурсы для нестандартной интегрированной обработки параметров вращения Земли по фундаментальной проблеме «Статистическая динамика вращения Земли». В 2005–2010 гг. совместно с Ю. Г. Марковым и Л. В. Рыхловой впервые обнаружен ряд новых эффектов (автоколебания полюса Земли на чандлеровской частоте, параметрическая стабилизация чандлеровских колебаний, нелинейные флуктуационные дрейфы неустойчивости вращения Земли и др.).

В области информационно-аналитических технологий и автоматизированных систем поддержки принятия решений для информатизации высших органов государственной власти, федеральных ведомств и др. разработан и внедрен ряд базовых информационных технологий (обработка информации от независимых источников, формирование и хранение больших баз электронных образов, управ-



Синицын Игорь Николаевич, 2024 г.

2020 гг. была создана научная школа. В 2020–2022 гг. вышел полный цикл фундаментальных статей в области оптимального оценивания и управления в стохастических синергетических ОТЭС различного назначения¹.

ление информационными активами и др.). Сформулированы принципы и разработаны базовые системно-технические решения для ряда крупномасштабных автоматизированных информационных и информационно-управляющих систем высокой точности и доступности. Работы в этом направлении были отмечены ведомственными наградами Главного управления специальных программ Президента РФ. В период 1999–2010 гг. в рамках работ, возглавляемых академиками С. В. Емельяновым и С. К. Коровиным, И. Н. Синицын разработал теорию систем высокой доступности с новыми видами стохастической обратной связи.

В области теории интегрированной логистической поддержки и ОТЭС И. Н. Синицыным совместно с А. С. Шаламовым в период 2009–

3 Канонические представления (канонические разложения и интегральные канонические представления)

Особое место в научном творчестве И. Н. Синицына занимает теория стохастических КП. Как известно, КП удобны для выполнения различных операций анализа над случайными функциями, особенно линейных. Объясняется это тем, что в КП СФ ее зависимость от аргумента (скалярного или векторного) выражается при помощи вполне определенных неслучайных координатных функций, что дает возможность свести выполнение различных линейных операций к соответствующим операциям над неслучайными координатными функциями. Важное значение КП СФ имеют для задач статистической обработки информации (сигналов, изображений, сцен и других образов), стохастического системного анализа, идентификации и синтеза, аналитического и статистического моделирования,

¹См. обзор Соколов И. А., Захаров В. Н., Шоргин С. Я, Корепанов Э. Р., Синицын В. И. Стохастические системы и развитие организационно-техничко-экономических систем // Системы и средства информатики, 2020. Т. 30. № 3.

комплексного решения задач, связанных с построением компьютерных моделей поддержки научных исследований. Здесь методы КП СФ оказываются достаточно универсальными средствами. Создание теории КП СФ связано с именами М. Лозва, А. Н. Колмогорова, К. Карунена и В. С. Пугачёва и относится к 1940–1950 гг. Современные проблемы автоматизации научных исследований, тесно связанные с информационными технологиями и компьютерной поддержкой научных исследований, ставят новые задачи разработки прикладной теории, а также методического, алгоритмического и программного обеспечения в области стохастического системного анализа, идентификации и стохастических информационных технологий научных исследований на базе КП СФ. Первое систематическое изложение теории КП СФ было дано В. С. Пугачёвым в известной книге «Теория случайных функций и её применение в задачах автоматического управления» (1957, 1960, 1962). К 2009 г. И. Н. Сеницыным была написана монография «Канонические представления случайных функций и их применение в задачах компьютерной поддержки научных исследований», в которой были всесторонне изложены вероятностные и статистические основы анализа и синтеза систем методами КП СФ и их применения. Современные вопросы развития КП СФ и КП случайных элементов в функциональных пространствах нашли отражение уже в переработанном и дополненном издании «Канонические представления случайных функций. Теория и применения», вышедшем в 2023 г.

Отдельное внимание здесь уделено развитию КР на основе вейвлет-технологий. Для анализа нестационарных стохастических процессов (СтП), заданных на конечном промежутке времени, И. Н. Сеницын выбирает вейвлеты с компактными носителями (например, вейвлеты Добеши или вейвлеты Хаара). Вейвлет-базис задается с помощью итерационного алгоритма с изменением масштаба и сдвигом единственной функции — масштабирующей. Это приводит к процедуре кратномасштабного анализа, который служит инструментом построения базисов вейвлетов. С помощью вейвлет-базисных функций можно покрыть всю область изменения исследуемого СтП. Вейвлеты с компактными носителями не могут быть записаны в аналитической форме, кроме простейших из них — вейвлетов Хаара, а характеризуются набором численных коэффициентов в некоторых функциональных уравнениях, содержащих изменение масштаба и сдвиг аргументов. Поэтому часто для проведения вычислительных экспериментов используются вейвлеты Хаара. И. Н. Сеницыным разработана корреляционная теория анализа и синтеза скалярных и векторных СФ и ковариационных функций (матриц) на основе ортонормированного вейвлет-базиса, порожденного вейвлетами с конечным носителем (и создано инструментальное программное обеспечение), предложен метод синтеза КР на основе вейвлет-нейронных сетей (КР ВНС).

В последнее время получено развитие методов оптимизации посредством КР ВНС информационных систем, описываемых обобщенными линейными, параметрическими и нелинейными уравнениями В. С. Пугачёва, по среднеквадратичному, энергетическому, сложно-статистическому и байесовым критериям.

Для СтС большой размерности алгоритмы не требуют предварительных аналитических выкладок, когда случайные параметры системы заданы первыми двумя вероятностными моментами. Начаты работы по применению КР с независимыми компонентами в случае негауссовых распределений.

Ряд важных теоретических и практических результатов был получен И. Н. Сеницыным в области метрологии, биометрии, бионических СтС, в том числе на основе муравьиных, роевых и прочих эвристик.

Научная школа И. Н. Сеницына в области стохастических технологий и систем сформировалась на основе ученых и специалистов АН СССР (ИПИ АН СССР, ИПИ РАН, ФИЦ ИУ РАН), МАИ, а также специализированных ведомств.

К числу основных результатов научной школы И. Н. Сеницына можно отнести следующие:

- (1) теория КР, вейвлет-канонических разложений (КРВЛ) и КР ВНС, в том числе на многообразиях;
- (2) методы анализа и условно-оптимального синтеза по байесовским критериям сложных (не разрешенных относительно производных, неявных, эрмитарных) СтС, в том числе на основе КР, КРВЛ и КР ВНС;
- (3) автоматизированные рабочие места и комплексы универсальных средств экспресс-анализа для средств вычислительной техники с традиционной и специальной архитектурой;
- (4) теоретические основы и комплекс математических моделей статистической динамики флуктуаций движения полюса и вращения Земли;
- (5) методическое обеспечение и комплекс специализированных инструментальных программных средств вероятностного и статистического моделирования и анализа срочных финансовых операций;
- (6) методическое и программное обеспечение контроля и идентификации для биометрических технологий на базе персональных видеосистем различного назначения;
- (7) методическое и программно-техническое обеспечение для CALS-технологий в условиях случайных возмущений и стохастических факторов для систем высокой доступности. Создан и внедрен ряд ОТЭС.

Ученики и коллеги И. Н. Сеницына поздравляют Игоря Николаевича с юбилеем и желают крепкого здоровья и дальнейших успехов в многогранной деятельности.

*И. А. Соколов, В. Н. Захаров, С. Я. Шоргин,
Э. Р. Корепанов, В. И. Сеницын*

ХРОНОЛОГИЧЕСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ НАУЧНЫХ ТРУДОВ

И. Н. СИНИЦЫНА (2020–2024)

2020

1. Кибзун А. И., Синицын И. Н. Современные проблемы теории оптимизации стохастических систем // Автоматика и телемеханика, 2020. № 11. С. 3–10. doi: 10.1134/S000523101911001X.
2. Синицын И. Н., Шаламов А. С. Обучение персонала заказчика вопросам информационного обеспечения интегрированной логистической поддержки экспортируемой продукции на станции эксплуатации // Системы высокой доступности, 2020. Т. 16. Вып. 1. С. 14–23. doi: 10.18127/j20729472-202001-02.
3. Синицын И. Н., Жуков Д. В., Корепанов Э. Р., Конашенкова Т. Д. Метод линейной оптимальной обработки информации посредством вейвлет разложений // Системы компьютерной математики и их приложения, 2020. Вып. 21. С. 213–220.
4. Sinitsyn I. N., Sinitsyn V. I., Korepanov E. R., Konashenkova T. D. Optimization of linear stochastic systems based on canonical wavelet expansions // Automat. Rem. Contr., 2020. Vol. 81. No. 11. P. 2046–2061. doi: 10.1134/S0005117920110077.
5. Sinitsyn I. N., Sinitsyn V. I., Korepanov E. R. Extending the theory of Liptser–Shiryaev filters // Automat. Rem. Contr., 2020. Vol. 81. No. 4. P. 602–613. doi: 10.1134/S0005117920040037.
6. Синицын И. Н., Синицын В. И. Фильтрация и экстраполяция процессов в миграционно-популяционных стохастических системах // Системы и средства информатики, 2020. Т. 30. № 1. С. 4–19. doi: 10.14357/08696527200101.
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. 138–156. doi: 10.1134/S0005231019110082.
8. Синицын И. Н., Синицын В. И., Корепанов Э. Р. Развитие теории фильтров Липцера–Ширяева // Автоматика и телемеханика, 2020. № 4. С. 37–51. doi: 10.1134/S0005231019040030.
9. Синицын И. Н., Синицын В. И., Корепанов Э. Р., Конашенкова Т. Д. Инструментальное программное обеспечение анализа и синтеза стохастических систем высокой доступности (IX) // Системы высокой доступности, 2020. Т. 16. № 4. С. 5–23. doi: 10.18127/j20729472-202004-01.
10. Синицын И. Н., Синицын В. И., Корепанов Э. Р., Конашенкова Т. Д. Инструментальное программное обеспечение анализа и синтеза стохастических систем высокой доступности (X) // Системы высокой доступности, 2020. Т. 16. № 4. С. 24–39. doi: 10.18127/j20729472-202004-02.

2021

11. 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.

12. *Синицын И. Н.* Аналитическое моделирование и фильтрации процессов в интегро-дифференциальных стохастических системах, не разрешенных относительно производных // Системы и средства информатики, 2021. Т. 31. № 1. С. 37–56. doi: 10.14357/08696527210104.
13. *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. P. 1–7. doi: 10.36266/JMSR/139.
14. *Синицын И. Н., Шаламов А. С.* Оптимальное оценивание и управление процессами в стохастических синергетических организационно-техничко-экономических системах. Оптимальное стохастическое управление процессами в связанных подсистемах продукции и персонала на фоне помех (II) // Системы высокой доступности, 2021. Т. 17. № 1. С. 51–72. doi: 10.18127/j20729472-202101-05.
15. *Синицын И. Н., Карпенко А. П., Сахаров М. К.* Инструментальное программное обеспечение анализа и синтеза стохастических систем высокой доступности (XIV) // Системы высокой доступности, 2021. Т. 17. № 3. С. 59–83. doi: 10.18127/j20729472-202103-05.
16. *Синицын И. Н., Титов Ю. П.* Инструментальное программное обеспечение анализа и синтеза стохастических систем высокой доступности (XV) // Системы высокой доступности, 2021. Т. 17. № 4. С. 24–33. doi: 10.18127/j20729472-202104-02.
17. *Sinitsyn I. N.* Analytical modeling of linear and circular control stochastic systems // Advances in robotics and automatic control: Reviews / Ed. S. Y. Yurish. — Barcelona, Spain: IFSA Publishing S. L., 2021. Vol. 2. P. 59–117.
18. *Sinitsyn I. N., Shalamov A. S.* Problems of estimation and control in synergetic organization-technical-economic systems // Actual Problems of System and Software Engineering: 7th Conference (International). — Moscow, 2021.
19. *Sinitsyn I., Sinitsyn V., Korepanov E., Konashenkova T.* Wavelet modeling of control stochastic systems at complex shock disturbances // Mathematics, 2021. Vol. 9. Iss. 20. Art. 2544. 15 p. doi: 10.3390/math9202544.
20. *Sinitsyn I. N., Sinitsyn V. I., Korepanov E. R., Konashenkova T. D.* Wavelet filtering in shock stochastic systems with high availability // Int. J. Systems Engineering, 2021. Vol. 5. Iss. 1. P. 1–12. doi: 10.11648/j.ijse.20210501.11.
21. *Синицын И. Н., Синицын В. И., 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.
22. *Синицын И. Н., Синицын В. И., 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.
23. *Синицын И. Н., Синицын В. И., 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.

24. *Синицын И. Н., Синицын В. И., Корепанов Э. Р., Конашенкова Т. Д.* Инструментальное программное обеспечение вейвлет оптимального синтеза нестационарных систем по сложно-статистическому критерию // Системы компьютерной математики и их приложения, 2021. Вып. 22. С. 166–175.

2022

25. *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.
26. *Синицын И. Н.* Совместная фильтрация и распознавание нормальных процессов в стохастических системах, не разрешенных относительно производных // Информатика и её применения, 2022. Т. 16. Вып. 2. С. 85–93. doi: 10.14357/19922264220211.
27. *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.
28. *Карпенко А. П., Синицын И. Н.* Бионика и системы высокой доступности // Системы высокой доступности, 2022. Т. 18. Вып. 2. С. 25–41. doi: 10.18127/j20729472-202202-02.
29. *Синицын И. Н., Титов Ю. П.* Оптимизация порядка следования гиперпараметров вычислительного кластера методом муравьиных колоний // Системы высокой доступности, 2022. Т. 18. Вып. 3. С. 23–37. doi: 10.18127/j20729472-202203-02.
30. *Синицын И. Н., Титов Ю. П.* Развитие стохастических алгоритмов муравьиной организации // Бионика — 60 лет. Итоги и перспективы: Сб. статей Первой Междунар. научн.-практич. конф. — М.: Ассоциация технических университетов, 2022. С. 210–220. doi: 10.53677/9785919160496_210_220.
31. *Синицын И. Н., Карпенко А. П.* Роевой интеллект и его применение в системах высокой доступности // Системы высокой доступности, 2022. Т. 18. Вып. 4. С. 44–55. doi: 10.18127/j20729472-202204-04.
32. *Sinit syn I. N., Shalamov A. S.* Methods of conditionally optimal forecasting for stochastic synergetic CALS technologies // Time series analysis — new insights / Eds. R. Abdalla, M. El-Diasty, A. Kostogryzov, N. Makhutov. — IntechOpen, 2023. Ch. 3. 33 p. doi: 10.5772/intechopen.103657.
33. *Sinit syn I., Sinit syn V., Korepanov E., Konashenkova T.* Bayes synthesis of linear nonstationary stochastic systems by wavelet canonical expansions // Mathematics, 2022. Vol. 10. Iss. 9. Art. 1517. P. 1–14. doi: 10.3390/math10091517.
34. *Синицын И. Н., Синицын В. И., Корепанов Э. Р., Конашенкова Т. Д.* Инструментальное программное обеспечение синтеза оптимальной системы по байесовому критерию методом вейвлет канонических разложений // Системы компьютерной математики и их приложения, 2022. Вып. 23. С. 161–178.

35. *Синицын И. Н., Синицын В. И., Корепанов Э. Р., Конашенкова Т. Д.* Инструментальное программное обеспечение анализа и синтеза стохастических систем высокой доступности (XV) // Системы высокой доступности, 2022. Т. 18. Вып. 1. С. 47–61. doi: 10.18127/j20729472-202201-05.
36. *Синицын И. Н., Синицын В. И., Корепанов Э. Р., Конашенкова Т. Д.* Инструментальное программное обеспечение анализа и синтеза стохастических систем высокой доступности (XVI) // Системы высокой доступности, 2022. Т. 18. Вып. 2. С. 58–77. doi: 10.18127/j20729472-202202-04.
37. *Синицын И. Н., Синицын В. И., Корепанов Э. Р., Конашенкова Т. Д.* Синтез качества наблюдаемых мультисервисных сетевых стохастических систем методом вейвлет канонических разложений // Современные сетевые технологии: Труды 4-й Междунар. конф. — М.: МГУ им. М. В. Ломоносова, 2022. С. 110–118.

2023

38. *Синицын И. Н.* Канонические представления случайных функций. Теория и применение. — М.: ТОРУС ПРЕСС, 2023. 816 с. doi: 10.30826/94588-308-6.
39. *Sinitsyn I. N., Sinitsyn V. I., Korepanov E. R., Konashenkova T. D.* Synthesis of nonlinear nonstationary stochastic systems by wavelet canonical expansions // Mathematics, 2023. Vol. 11. Iss. 9. Art. 2059. P. 1–18. doi: 10.3390/math11092059.
40. *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.
41. *Sinitsyn I. N.* Developing the theory of stochastic canonic expansions and its applications // Pattern Recognition Image Analysis, 2023. Vol. 33. Iss. 4. P. 862–887. doi: 10.1134/S1054661823040429.
42. *Иванов А. И., Синицын И. Н.* Нейросетевой статистический многокритериальный анализ качества информационных систем высокой доступности при малых выборках // Системы высокой доступности, 2023. Т. 19. Вып. 2. С. 38–45. doi: 10.18127/j20729472-202302-03.
43. *Синицын И. Н., Титов Ю. П.* Исследование алгоритмов циклического поиска дополнительных решений при оптимизации порядка следования гиперпараметров методом муравьиных колоний // Системы высокой доступности, 2023. Т. 19. Вып. 1. С. 59–73. doi: 10.18127/j20729472-202301-05.
44. *Синицын И. Н., Титов Ю. П.* Исследование возможности получения всех решений методом муравьиных колоний для задачи оптимизации порядка следования гиперпараметров // Системы высокой доступности, 2023. Т. 19. Вып. 2. С. 55–69. doi: 10.18127/j20729472-202302-05.
45. *Sinitsyn I. N., Titov Y. P.* Control of set of system parameter values by the ant colony method // Automat. Rem. Contr., 2023. Vol. 84. Iss. 8. P. 893–903. doi: 10.1134/S0005117923080106.

46. *Синицын И. Н., Синицын В. И., Корепанов Э. Р., Конашенкова Т. Д.* Инструментальное программное обеспечение анализа и синтеза стохастических систем высокой доступности (XVII) // Системы высокой доступности, 2023. Т. 19. Вып. 2. С. 5–24. doi: 10.18127/j20729472-202302-01.
47. *Синицын И. Н., Синицын В. И., Корепанов Э. Р., Конашенкова Т. Д.* Инструментальное программное обеспечение анализа и синтеза стохастических систем высокой доступности (XVIII) // Системы высокой доступности, 2023. Т. 19. Вып. 3. С. 18–34. doi: 10.18127/j20729472-202303-02.
48. *Синицын И. Н., Синицын В. И., Корепанов Э. Р., Конашенкова Т. Д.* Синтез оптимальных по функциональным байесовым критериям стохастических систем методом вейвлет-канонических разложений // Системы высокой доступности, 2023. Вып. 4. С. 37–50. doi: 10.18127/j20729472-202304-03.
49. *Синицын И. Н., Синицын В. И., Корепанов Э. Р., Конашенкова Т. Д.* Синтез оптимальной нестационарной линейной защищенной стохастической системы по критерию максимального правдоподобия // Системы и средства защиты информации: XIV Межведомственная научн.-практич. конф. — Пенза: НТП «Криптософт», 2023. С. 41–55.
50. *Синицын И. Н., Шаламов А. С., Корепанов Э. Р., Белоусов В. В., Макаренкова И. В.* Методы машинного обучения для моделирования, оценивания и управления в защищенных синергетических организационно-технич.-экономических системах // Системы и средства защиты информации: XIV Межведомственная научн.-практич. конф. — Пенза: НТП «Криптософт», 2023. С. 56–65.

2024

51. *Синицын И. Н., Титов Ю. П.* Применение асинхронного метода муравьиных колоний при взаимодействии с вычислителем // Бионика: III Междунар. научн.-практич. конф.: Мат-лы конференции. — М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2024. С. 86–90.
52. *Синицын И. Н., Синицын В. И., Корепанов Э. Р., Конашенкова Т. Д.* Байесов синтез многомерной стохастической системы высокой доступности методом вейвлет канонических разложений // Системы высокой доступности, 2024. Т. 20. Вып. 1. С. 55–66. doi: 10.18127/j20729472-202401-06.
53. *Синицын И. Н., Синицын В. И., 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.
54. *Синицын И. Н., Синицын В. И., Корепанов Э. Р., Конашенкова Т. Д.* Нейросетевой синтез оптимальной линейной стохастической системы по критерию минимума среднеквадратичной ошибки // Системы и средства информатики, 2024. Т. 34. № 3. С. 87–108. doi: 10.14357/08696527240307.
55. *Синицын И. Н., Синицын В. И., Корепанов Э. Р., Конашенкова Т. Д.* Нейросетевой алгоритм синтеза оптимальной линейной стохастической системы высокой доступности по энергетическому критерию // Системы высокой доступности, 2024. Т. 20. Вып. 4. С. 5–14. doi: 10.18127/j20729472-202404-01.

56. *Синицын И. Н., Синицын В. И., Корепанов Э. Р., Конашенкова Т. Д.* Метод функциональной байесовой оптимизации, основанный на вейвлет канонических представлениях гауссовских стохастических процессов // XIV Всероссийское совещание по проблемам управления: Сб. научн. трудов. — М.: ИПУ РАН, 2024. С. 528–532.
57. *Мунерман В. И., Мунерман Д. В., Синицын И. Н.* Условно-трехмерные матрицы и их применения // Системы компьютерной математики и их приложения, 2024. Вып. 25. С. 124–130.
58. *Синицын И. Н.* Дискретное условно-оптимальное оценивание в неявных наблюдаемых стохастических системах // Системы и средства информатики, 2024. Т. 34. № 4. С. 16–30. doi: 10.14357/08696527240402. EDN: TLHYUA.
59. *Синицын И. Н.* Условно-оптимальная фильтрация и управление стохастическими системами, не разрешенными относительно производных, со случайными параметрами // Системы и средства информатики, 2024. Т. 34. № 2. С. 3–20. doi: 10.14357/08696527240201. EDN: XLRCQE.
60. *Синицын И. Н.* Методы моделирования неявных эрмитарных стохастических систем // Системы и средства информатики, 2024. Т. 34. № 3. С. 67–86. doi: 10.14357/08696527240306. EDN: RVKAFM.
61. *Синицын И. Н.* Методы вероятностного и статистического моделирования неявных стохастических систем // Системы и средства информатики, 2024. Т. 34. № 3. С. 48–66. doi: 10.14357/08696527240305. EDN: RTNRUZ.
62. *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.
63. *Синицын И. Н., Иванов А. И., Безяев А. В., Филипов И. А.* Алгоритм настройки параметров выходных кусочно-линейных функций искусственных нейронов Гирри, ориентированный на свертывание кодовой избыточности // Системы высокой доступности, 2024. Т. 20. Вып. 3. С. 19–27. doi: 10.18127/j20729472-202403-02.
64. *Синицын И. Н., Титов Ю. П.* Исследование применения метода муравьиных колоний в многокритериальных параметрических задачах // Системы высокой доступности, 2024. Т. 20. Вып. 4. С. 52–63. doi: 10.18127/j20729472-202404-06.
65. *Гончаров Е. И., Мунерман В. И., Синицын И. Н.* Современные технологические средства создания многомерно-матричных машин баз данных // Системы высокой доступности, 2024. Т. 20. Вып. 1. С. 5–17. doi: 10.18127/j20729472-202401-01.
66. *Синицын И. Н., Титов Ю. П.* Оптимизация параметрических задач с отрицательным значением целевой функции методом муравьиных колоний // Системы высокой доступности, 2024. Т. 20. Вып. 1. С. 30–37. doi: 10.18127/j20729472-202401-03.
67. *Синицын И. Н.* Условно-оптимальная фильтрация в стохастических системах со случайными параметрами и не разрешенных относительно производных // Информатика и её применения, 2024. Т. 18. Вып. 3. С. 21–29. doi: 10.14357/19922264240303. EDN: XCXLGD.

68. *Синицын И. Н.* Методы условно-оптимальной фильтрации и экстраполяции в наблюдаемых неявных стохастических системах // Информатика и её применения, 2024. Т. 18. Вып. 4. С. 2–9. doi: 10.14357/19922264240401. EDN: TFRJYK.
69. *Синицын И. Н.* Условно-оптимальная фильтрация и экстраполяция в неявных дифференциальных гауссовских стохастических системах при автокоррелированной помехе в наблюдениях // Информатика и её применения, 2024. Т. 18. Вып. 4. С. 19–25. doi: 10.14357/19922264240403. EDN: VUETK.
70. *Синицын И. Н.* Субоптимальная фильтрация в стохастических системах, не разрешенных относительно производных, со случайными параметрами // Информатика и её применения, 2024. Т. 18. Вып. 1. С. 2–10. doi: 10.14357/19922264240101. EDN: KUWMKJ.
71. *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.

Агаларов Явер Мирзабекович (р. 1952) — кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Архипов Павел Олегович (р. 1979) — кандидат технических наук, директор Орловского филиала Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Греков Михаил Михайлович (р. 1998) — аспирант, ассистент кафедры информационной безопасности Тульского государственного университета

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

Зацаринный Александр Алексеевич (р. 1951) — доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Козлов Сергей Витальевич (р. 1955) — кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник 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

Ладиков Андрей Владимирович (р. 1985) — руководитель отдела разработки платформы бизнес-аналитики, заместитель директора по разработке облачной инфраструктуры АО «Лаборатория Касперского»

Морозов Николай Викторович (р. 1956) — старший научный сотрудник Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Орлов Георгий Александрович (р. 1994) — младший научный сотрудник Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Плеханов Леонид Петрович (р. 1943) — кандидат технических наук, 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

Степченков Дмитрий Юрьевич (р. 1973) — старший 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

Филиппских Сергей Леонидович (р. 1987) — младший научный сотрудник Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Цуканов Максим Владимирович (р. 1995) — 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).

Если при подготовке статьи авторы использовали инструменты на основе искусственного интеллекта, они обязаны включить эту информацию в текст статьи.

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 informatzionnogo 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.

If authors used artificial intelligence (AI)-based tools in preparing their manuscript, they must include this information in the text of the article.

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 Publs. 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 Publs. 10 p.

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.

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