

ISSN 1684-8853 (print); ISSN 2541-8610 (online)

# ИНФОРМАЦИОННО- УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

2(123)/2023

2(123)/2023

PEER REVIEWED JOURNAL

# INFORMATSIONNO- UPRAVLIAIUSHCHIE SISTEMY (INFORMATION AND CONTROL SYSTEMS)

**Founder**

A. Vostrikov

**Publisher**Saint Petersburg State University  
of Aerospace Instrumentation**Editor-in-Chief**

E. Krouk

Dr. Sc., Professor, Moscow, Russia

**Executive secretary**

O. Muravtsova

**Editorial Board**

S. Andreev

Dr. Sc., Tampere, Finland

V. Anisimov

Dr. Sc., Professor, Saint Petersburg, Russia

B. Bezruchko

Dr. Sc., Professor, Saratov, Russia

N. Blaunstein

Dr. Sc., Professor, Beer-Sheva, Israel

M. Buzdalov,

PhD, Researcher, Saint Petersburg, Russia

C. Christodoulou

PhD, Professor, Albuquerque, New Mexico, USA

A. Dudin

Dr. Sc., Professor, Minsk, Belarus

I. Dumer

PhD, Professor, Riverside, USA

M. Favorskaya

Dr. Sc., Professor, Krasnoyarsk, Russia

L. Fortuna

PhD, Professor, Catania, Italy

A. Fradkov

Dr. Sc., Professor, Saint Petersburg, Russia

A. Hramov

Dr. Sc., Professor, Innopolis, Russia

L. Jain

PhD, Professor, Canberra, Australia

G. Matvienko

Dr. Sc., Professor, Tomsk, Russia

A. Myllari

PhD, Professor, Grenada, West Indies

K. Samouylov

Dr. Sc., Professor, Moscow, Russia

J. Seberry

PhD, Professor, Wollongong, Australia

M. Sergeev

Dr. Sc., Professor, Saint Petersburg, Russia

A. Shalyto

Dr. Sc., Professor, Saint Petersburg, Russia

A. Shepeta

Dr. Sc., Professor, Saint Petersburg, Russia

Yu. Shokin

RAS Academician, Dr. Sc., Novosibirsk, Russia

A. Smirnov

Dr. Sc., Professor, Saint Petersburg, Russia

T. Sutikno

PhD, Associate Professor, Yogyakarta, Indonesia

Z. Yuldashev

Dr. Sc., Professor, Saint Petersburg, Russia

R. Yusupov

RAS Corr. Member, Dr. Sc., Professor, Saint Petersburg, Russia

A. Zeifman

Dr. Sc., Professor, Vologda, Russia

**Editor:** A. Larionova**Proofreader:** T. Zvertanovskaia**Design:** M. Chernenko, Yu. Umnitsyna**Layout and composition:** Yu. Umnitsyna**Contact information**

The Editorial and Publishing Center, SUAI

67A, Bol'shaya Morskaya, 190000, Saint Petersburg, Russia

Website: <http://i-us.ru/en>, e-mail: [i-us.spb@gmail.com](mailto:i-us.spb@gmail.com)

Tel.: +7 - 812 494 70 02

**INFORMATION AND CONTROL SYSTEMS***Geidarov P. Sh. Investigating stability of a multilayer perceptron with calculated synaptic weights to smaller training sample sizes* 2*Krotov K. V. A branch and bound algorithm for the optimization of batch scheduling in pipeline systems* 15**INFORMATION SECURITY***Solodukha R. A. Steganalysis of Bit Plane Complexity Segmentation algorithm* 27**INFORMATION CHANNELS AND MEDIUM***Burkov A. A. Comparison of the ways to reduce energy costs in stable massive machine-type communication systems* 39**SYSTEM ANALYSIS***Kolesnikova S. I., Fomenkova A. A. Dynamic strategies for monitoring quality control at a complex bioengineering facility* 51*Zhilnikova N. A., Baranova A. A. Information technologies and automation of environmental and technological management of the territorial natural-production complex* 61**INFORMATION ABOUT THE AUTHORS** 69

2(123)/2023

ИНФОРМАЦИОННО-  
УПРАВЛЯЮЩИЕ  
СИСТЕМЫ

РЕЦЕНЗИРУЕМОЕ ИЗДАНИЕ

**Учредитель**

А. А. Востриков

**Издатель**Санкт-Петербургский государственный университет  
аэрокосмического приборостроения**Главный редактор**Е. А. Крук,  
д-р техн. наук, проф., Москва, РФ**Ответственный секретарь**

О. В. Муравцова

**Редакционная коллегия:**

С. Д. Андреев,  
д-р техн. наук, Тампере, Финляндия  
В. Г. Анисимов,  
д-р техн. наук, проф., Санкт-Петербург, РФ  
Б. П. Безручко,  
д-р физ.-мат. наук, проф., Саратов, РФ  
Н. Блаунштейн,  
д-р физ.-мат. наук, проф., Беэр-Шева, Израиль  
М. В. Буэдалов,  
канд. техн. наук, научный сотрудник, Санкт-Петербург, РФ  
Л. С. Джайн,  
д-р наук, проф., Канберра, Австралия  
А. Н. Дудин,  
д-р физ.-мат. наук, проф., Минск, Беларусь  
И. И. Думер,  
д-р наук, проф., Риверсайд, США  
А. И. Зейфман,  
д-р физ.-мат. наук, проф., Вологда, РФ  
К. Кристодолу,  
д-р наук, проф., Альбукерке, Нью-Мексико, США  
Г. Г. Матвиенко,  
д-р физ.-мат. наук, проф., Томск, РФ  
А. А. Мюллери,  
д-р наук, профессор, Гренада, Вест-Индия  
К. Е. Самуйлов,  
д-р техн. наук, проф., Москва, РФ  
Д. Себерри,  
д-р наук, проф., Волонгонг, Австралия  
М. Б. Сергеев,  
д-р техн. наук, проф., Санкт-Петербург, РФ  
А. В. Смирнов,  
д-р техн. наук, проф., Санкт-Петербург, РФ  
Т. Сутикну,  
д-р наук, доцент, Джокьякарта, Индонезия  
М. Н. Фаворская,  
д-р техн. наук, проф., Красноярск, РФ  
Л. Фортуна,  
д-р наук, проф., Катания, Италия  
А. Л. Фрадков,  
д-р техн. наук, проф., Санкт-Петербург, РФ  
А. Е. Храмов,  
д-р физ.-мат. наук, Иннополис, РФ  
А. А. Шалыто,  
д-р техн. наук, проф., Санкт-Петербург, РФ  
А. П. Шепета,  
д-р техн. наук, проф., Санкт-Петербург, РФ  
Ю. И. Шокин,  
акад. РАН, д-р физ.-мат. наук, проф., Новосибирск, РФ  
З. М. Юлдашев,  
д-р техн. наук, проф., Санкт-Петербург, РФ  
Р. М. Юсупов,  
чл.-корр. РАН, д-р техн. наук, проф., Санкт-Петербург, РФ

**Редактор:** А. Г. Ларионова**Корректор:** Т. В. Звертановская**Дизайн:** М. Л. Черненко, Ю. В. Умницына**Компьютерная верстка:** Ю. В. Умницына**Адрес редакции:** 190000, г. Санкт-Петербург,  
ул. Большая Морская, д. 67, лит. А, ГУАП, РИЦ  
Тел.: (812) 494-70-02, эл. адрес: ius.spb@gmail.com,  
сайт: <http://i-us.ru>**ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ***Гейдаров П. Ш. Исследование устойчивости многослойного персептрона с вычисляемыми весами синапсов к меньшим объемам обучающей выборки* 2*Кротов К. В. Алгоритм метода ветвей и границ оптимизации расписаний выполнения пакетов заданий в конвейерных системах* 15**ЗАЩИТА ИНФОРМАЦИИ***Солодуха Р. А. Стеганоанализ изображений, модифицированных алгоритмом Bit Plane Complexity Segmentation* 27**ИНФОРМАЦИОННЫЕ КАНАЛЫ И СРЕДЫ***Burkov A. A. Comparison of the ways to reduce energy costs in stable massive machine-type communication systems* 39**СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ***Kolesnikova S. I., Fomenkova A. A. Dynamic strategies for monitoring quality control at a complex bioengineering facility* 51*Жильникова Н. А., Баранова А. А. Информационные технологии и автоматизация эколого-технологического управления территориальным природно-производственным комплексом* 61**СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ** 69

Журнал входит в БД Scopus и в 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.

Сдано в набор 07.03.23. Подписано в печать 10.05.23. Дата выхода в свет: 12.05.2023.

Формат 60×841/8. Гарнитура CentSchbkCyrill BT. Печать цифровая.

Усл. печ. л. 8,3. Уч.-изд. л. 11,4. Тираж 1000 экз (1-й завод 50 экз.). Заказ № 208.

Оригинал-макет изготовлен в редакционно-издательском центре ГУАП.

190000, г. Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А.

Отпечатано в редакционно-издательском центре ГУАП.

190000, г. Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А.

Распространяется бесплатно.

Журнал зарегистрирован в Министерстве РФ по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций. Свидетельство о регистрации ПИ № 77-12412 от 19 апреля 2002 г. Перерегистрирован в Роскомнадзоре. Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-82226 от 23 ноября 2021 г.

© А. А. Востриков, 2023



## Исследование устойчивости многослойного персептрона с вычисляемыми весами синапсов к меньшим объемам обучающей выборки

П. Ш. Гейдаров<sup>а</sup>, доктор техн. наук, доцент, [orcid.org/0000-0002-3881-0629](https://orcid.org/0000-0002-3881-0629), [plbaku2010@gmail.com](mailto:plbaku2010@gmail.com)

<sup>а</sup>Институт систем управления НАН Азербайджана, Бахтияра Вагабадзе ул., 68, AZ 1141, Баку, Азербайджан

**Введение:** процесс создания искусственных нейронных сетей требует от разработчиков наличия большого объема обучающей базы данных, что усложняет процесс создания и обучения искусственной нейронной сети. При этом в биологических нейронных сетях живых организмов процесс обучения успешно выполняется с сравнительно малыми объемами обучающих баз данных. Поэтому задача создания новых архитектур искусственных нейронных сетей, позволяющих эффективно уменьшать необходимый объем обучающей базы данных, является весьма актуальной задачей. **Цель:** проверить устойчивость результативности нейронной сети, реализованной на основе метрических методов распознавания, к меньшим объемам обучающих баз данных. **Результаты:** для решения поставленной задачи выполнены сравнительные эксперименты обучения нейронной сети с разными объемами базы MNIST для нейронной сети как с предварительно вычисленными весовыми значениями, так и со случайной генерацией весов. Сравнительный анализ итогов экспериментов показал, что результативность нейронной сети с вычисленными весовыми значениями более устойчива к уменьшению объема обучающей выборки. Также предложена общая схема и основные положения алгоритма реализации представленной технологии для создания вычисляемых сверточных нейронных сетей. **Практическая значимость:** нейронные сети с вычисленными весовыми значениями требуют меньшего объема обучающей базы данных, что позволяет ускорить и упростить процедуру создания, обучения и дообучения нейронной сети.

**Ключевые слова** – многослойный персептрон, метрические методы распознавания, обучение нейронных сетей, сверточные нейронные сети.

**Для цитирования:** Гейдаров П. Ш. Исследование устойчивости многослойного персептрона с вычисляемыми весами синапсов к меньшим объемам обучающей выборки. *Информационно-управляющие системы*, 2023, № 2, с. 2–14. doi:10.31799/1684-8853-2023-2-2-14, EDN: WOHNNE

**For citation:** Geidarov P. Sh. Investigating stability of a multilayer perceptron with calculated synaptic weights to smaller training sample sizes. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2023, no. 2, pp. 2–14 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2023-2-2-14, EDN: WOHNNE

### Введение

В настоящее время искусственные нейронные сети (НС) широко применяются в различных сферах техники и науки [1–14]. Это объясняется тем, что из всех алгоритмов машинного обучения современные возможности искусственных НС позволяют получить наилучшие результаты в задачах распознавания образов. Тем не менее нужно отметить, что на сегодня возможности искусственных НС по многим критериям уступают возможностям биологических НС живых организмов. В частности, реализация искусственных НС требует наличия очень большой обучающей базы данных, исчисляемой десятками и сотнями тысяч (а иногда и более) элементов, что усложняет процедуру реализации НС для их разработчиков. При этом в биологических НС процесс обучения не требует таких огромных обучающих баз данных. Например, наблюдения за детьми показывают, что те обучаются сравнительно небольшими наборами данных [15]. Следовательно, разработка новых архитектур искусственных НС, которые могли бы позволить НС обучаться

с меньшими объемами обучающей выборки по аналогии с тем, как это делают биологические НС, остается весьма актуальным вопросом.

Для улучшения возможностей искусственных НС прямого распространения были предложены архитектуры НС многослойного персептрона на основе метрических методов распознавания (НСММП) [16, 17], которые реализуют алгоритмы метрических методов распознавания [18], таких как метод ближайшего соседа, метод ближайших  $n$  соседей, метод потенциалов и др., и при этом имеют архитектуру многослойного персептрона, что делает возможным эти сети дополнительно дообучать, как обычный многослойный персептрон. И как было также показано в работах [16, 17, 19], значения весов для этих НС можно вычислять аналитически по формулам с применением небольшого набора эталонов, что позволяет без использования алгоритмов обучения и обучающих баз данных сразу получить работоспособную НС. Процесс предварительного аналитического вычисления значений весов НС по формулам без обучения НС выполняется очень быстро — за доли секунд и минут [20, 21].

В работе [21] за полсекунды были вычислены весовые значения НС и таким образом сразу получена работоспособная НС с результативностью 64 % правильно идентифицированных символов контрольной базы MNIST. Такая способность очень похожа на способность биологического мозга — запоминать и узнавать объекты сразу с использованием малого набора данных.

Полученные преимущества реализуются благодаря внедрению алгоритмов метрических методов распознавания в классические НС, что позволяет объединить возможности метрических методов распознавания с НС в единой архитектуре НС многослойного перцептрона. В частности, в отличие от классических НС алгоритмы метрических методов распознавания позволяют распознавать образы с небольшим количеством эталонов. В метрических методах распознавания для распознавания входного объекта на основе метрических выражений близости вычисляются коэффициенты близости распознаваемого объекта к каждому выбранному эталону. По наименьшему или наибольшему значению (в зависимости от метрического выражения) выбирается ближайший к распознаваемому объекту эталон и соответственно выбирается и образ, которому принадлежит данный эталон. Именно эти возможности позволяют аналитически вычислять значения весов НС, реализованной на основе метрического метода распознавания, и ускорять весь процесс создания и обучения НС.

Отметим также, что результативность НС с вычисленными весами повторяет результативность используемого метрического метода, на основе которого НС и была реализована. Соответственно, согласно метрическим методам распознавания, чем больше количество используемых эталонов и чем результативнее используемый метрический метод, тем выше будет результативность предварительно аналитически вычисленной НС.

В настоящее время существуют разработанные методы и подходы начальной инициализации весов [22–24], отличные от классических методов. Но по этим методам не вычисляют точные значения весов, а они являются разновидностями более «умной» случайной инициализации весов. Методами [22–24] вычисляются не сами значения весов НС, а значения пределов диапазонов для случайной инициализации весов. Предназначение использования методов инициализации весов является также иным. Оно направлено на то, чтобы решить проблему обучения глубоких сетей с очень большим количеством слоев (более десяти), поскольку в процессе обучения таких глубоких НС выходы нейронов в слоях образуют слишком большие или, наоборот, слишком малые значения, что сильно замедляет обу-

чение глубокой НС и приводит ее в паралич или в локальный минимум. Методы начальной инициализации весов [22–24] позволяют предотвратить этот процесс и ускорить алгоритм обучения глубокой НС. Но нужно отметить разницу этих методов с предлагаемым в данной работе подходом аналитического вычисления весов. Методы начальной инициализации весов [22–24] не способны создавать работоспособную НС без использования алгоритма обучения, тогда как рассматриваемый метод позволяет сразу получить НС, способную распознавать образы без обучения. При этом сам процесс обучения полученной НС заменяется на процесс дообучения. В работах [20, 21] показано, что полученная НС может дополнительно дообучаться алгоритмом обратного распространения ошибки “backpropagation”. Также на основе проведенных экспериментов показано [21], что процесс дообучения НС выполняется значительно быстрее, чем полное обучение НС классическим образом — путем начальной случайной генерации значений весов.

В данной работе ставилась цель показать устойчивость результативности ( $Rv$ ) НС прямого распространения с вычисленными весами к уменьшению объема обучающей выборки ( $V_{BD}$ ) по сравнению с НС того же класса со случайной инициализацией весов. Здесь под понятием «результативность» имеется в виду количество (или процент) правильно идентифицированных изображений контрольной (тестируемой) базы MNIST.

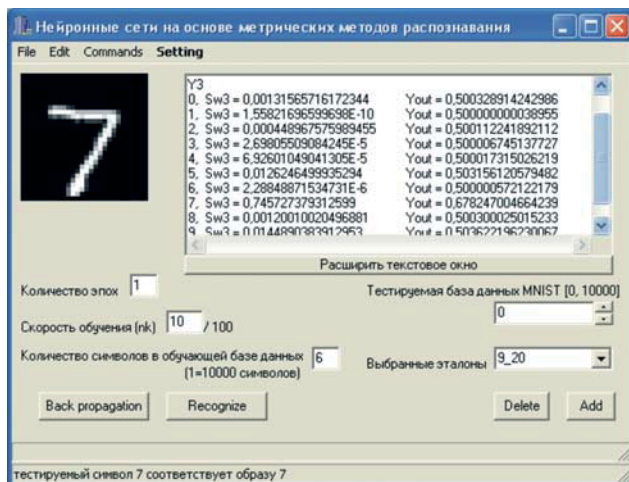
Для реализации этой цели проведены эксперименты обучения НС на базе MNIST с вычисленными весовыми значениями и случайно сгенерированными весовыми значениями для разных объемов обучающей выборки. По результатам этих экспериментов выполнен сравнительный анализ. Если функция зависимости результативности обученной НС с вычисленными весовыми значениями  $Rvi(V_{BD})$  больше результативности НС со случайной инициализацией весов  $Rsi(V_{BD})$  для всех проведенных экспериментов  $i$  и при всех прочих равных условиях ( $Rvi(V_{BD}) > Rsi(V_{BD})$ ), то в этом случае можно говорить, что результативность НС с вычисленными весовыми значениями весов более устойчива (стабильна) к уменьшению объема обучающей выборки по сравнению с результативностью НС с классической случайной инициализацией весов.

### Начальные параметры и условия эксперимента

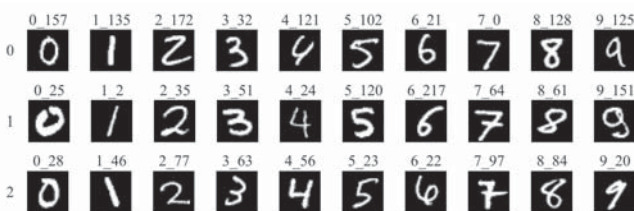
В работе [21] проведены два эксперимента, на основе которых был выполнен сравнительный анализ результатов обучения трехслойной

НС с вычисленными весами и со случайной генерацией весов. Была создана НС на основе метрического метода распознавания – метода ближайшего соседа по схеме, приведенной на рис. 3 в работе [19]. Для реализации НС был разработан программный модуль (рис. 1), позволяющий создавать и тестировать НС на основе метрических методов распознавания по выбранному набору эталонов. В качестве эталонов использовался набор из 30 образцов цифр (рис. 2) – по три от каждого образа, случайным образом выбранных из контрольной базы MNIST.

Для входных изображений использовалась бинарная входная матрица с размерностью 28 столбцов и 56 строк, где первая часть таблицы (28:28) определяет активные пиксели входного изображения, для которых значение пикселя >150, и неактивные пиксели, для которых значение пикселя <150. Во второй части бинарной таблицы наоборот: активными считаются пиксели со значениями <150, неактивными – со значениями >150. Размерность таблиц весов нейрона первого слоя определяется также размерностью бинарной входной таблицы (28:56). Пример вычисленной таблицы весов первого слоя приведен



■ **Рис. 1.** Программный модуль на базе Builder C++  
 ■ **Fig. 1.** A program module based on Builder C++



■ **Рис. 2.** 30 выбранных эталонов из контрольной базы MNIST  
 ■ **Fig. 2.** 30 selected samples from the MNIST control database

для эталонов  $7_0$  и  $3_{32}$  (рис. 3).  $Wh$  – смещение (bias) нейрона слоя. В качестве выражения меры близости используется формула, по которой вычисляются значения всех весов первого слоя:

$$w_{c,r}^{(1)} = d_1^2 - d_2^2 = \left( (c_1 - c_p)^2 + (r_1 - r_p)^2 \right) - \left( (c_2 - c_p)^2 + (r_2 - r_p)^2 \right), \quad (1)$$

где  $d_1, d_2$  – кратчайшие расстояния от ячейки таблицы весов с координатами  $(c_p, r_p)$  до ближайших ячеек таблицы весов с координатами  $(c_1, r_1)$  и  $(c_2, r_2)$ , в которых изображения эталонов 1 и 2 активны.

Алгоритм определения ближайшей активной ячейки эталонного изображения приведен в работе [19]. Для всех нейронов НС использовалась сигмоидная функция активации

$$f(Sw) = \frac{1}{1 + e^{-Sw}}, \quad (2)$$

где  $Sw$  – функция состояния нейрона. Для нейрона первого слоя, выполняющего сравнение  $i$ -го и  $j$ -го эталонов, функция состояния нейрона  $Sw_{i,j}^{(1)}$  определяется по выражению

$$Sw_{i,j}^{(1)} = \sum_{r=0}^R \sum_{c=0}^C (x_{c,r} w_{i,j,c,r}^{(1)}), \quad (3)$$

где  $C, R$  – количество столбцов и строк в таблице весов;  $c, r$  – координаты пикселя или ячейки изображения  $i$ , соответственно, координаты таблицы весов;  $i$  и  $j$  – порядковые номера двух сравниваемых эталонов.

Для нейронов второго и третьего слоя полносвязной НС [19, рис. 3] все значения весов принимаются равными  $w_{ij}^{(2)} = w_{ij}^{(3)} = 1$ . Поскольку в данной задаче используется полносвязный персептрон, то весовые значения всех добавленных связей в НС принимаются равными 0. В работе [17] показано, что такой подход не меняет логику работы НС. На рис. 4 представлен фрагмент значений весов для второго слоя, а на рис. 5 приведены все значения весов третьего слоя.

Функции состояния нейрона второго слоя  $Sw_k^{(2)}$  и третьего слоя  $Sw_k^{(3)}$  определяются по выражениям

$$Sw_k^{(2)} = \sum_{j=1, j \neq k}^N f(Sw_{k,j}^{(1)}); \quad (4)$$

$$Sw_k^{(3)} = \sum_{i \in k}^{K_k} f(Sw_i^{(2)}). \quad (5)$$

Для всех нейронов первого слоя значения весов смещения  $w_0^{(1)} = Wh1 = 0$ . Для всех нейронов







инициализированными весовыми значениями к уменьшению объема обучающей выборки MNIST были проведены сравнительные эксперименты с той же НС и с теми же начальными параметрами алгоритма обучения, что описаны в предыдущем разделе.

Результаты двух процедур обучений НС как с вычисленными весовыми значениями, так и со случайно сгенерированными начальными значениями весов приведены в табл. 2. На всех трех эпохах обучения НС количество правильно идентифицированных изображений больше для НС с вычисленными весовыми значениями, а общее время обучения НС с вычисленными

весовыми значениями на 38 % меньше ( $p_{\text{ускор}} = (471 - 293) \times 100/471 \approx 38 \%$ ). В табл. 3, где приводятся результаты тестирования обученной НС на контрольной базе MNIST, видно, что результативность после каждой эпохи обучения выше для НС с вычисленными весовыми значениями.

Были также проведены обучение НС на базе 20 000 изображений и тестирование по 10 000 изображений. По результатам (табл. 4, 5) видно, что на всех трех эпохах обучения количество узнаваемых изображений больше для НС с вычисленными весовыми значениями, общее время обучения НС с вычисленными весовыми значениями выполняется на 34 % быстрее ( $p_{\text{ускор}} =$

■ **Таблица 2.** Результаты обучения НС на 40 000 изображений базы MNIST с вычисленными весами и со случайной генерацией весов

■ **Table 2.** Results of training a neural network using 40,000 images of the MNIST database with calculated weights and with random generation of weights

| № эпохи                     | Скорость обучения | Обучение с предварительно вычисленными весами |                                |           |               | Обучение со случайной инициализацией весов в диапазоне [-0,5; 0,5] |                                |           |            |              |
|-----------------------------|-------------------|---|--------------------------------|-----------|---------------|--|--------------------------------|-----------|------------|--------------|
|                             |                   | Количество узнаваемых изображений             | Процент узнаваемых изображений | $S_{err}$ | Время, мин    | Количество узнаваемых изображений                                  | Процент узнаваемых изображений | $S_{err}$ | Время, мин |              |
| 1                           | 0,1               | 32 815  | 82,00                          | 765,7     | 137,6         | 27 346   | 68,30                          | 1314,5    | 228,6      |              |
| 2                           | 0,1               | 35 705  | 89,20                          | 411       | 88,47         | 32 578   | 81,44                          | 729,25    | 140,4      |              |
| 3                           | 0,02              | 36 899  | 92,20                          | 295,4     | 67,5          | 34 851   | 87,10                          | 498,7     | 102,8      |              |
| <b>Общее время обучения</b> |                   |   |                                |           | <b>293,57</b> | <b>Общее время обучения</b>  |                                |           |            | <b>471,8</b> |

■ **Таблица 3.** Сравнение результатов обучения НС на 40 000 изображений с проверкой на контрольной выборке MNIST (10 000 изображений) для каждой эпохи обучения

■ **Table 3.** Comparison of training results of a neural network on 40,000 images with a tested MNIST control set (10,000 images) for each training epoch

| № эпохи | Скорость обучения | Количество узнаваемых изображений (в скобках – процент) |  |
|---------|-------------------|---|--|
|         |                   | с предварительно вычисленными весами                    | с начальной случайной инициализацией весов |
| 1       | 0,1               | 8731 (87,31)  | 6661 (66,61)                               |
| 2       | 0,1               | 8910 (89,10)  | 6869 (68,69)                               |
| 3       | 0,02              | 9194 (91,94)  | 8533 (85,33)                               |

■ **Таблица 4.** Результаты обучения НС на 20 000 изображений базы MNIST с вычисленными весами и случайной генерацией весов

■ **Table 4.** Neural network training results using 20,000 MNIST images with computed weights and random weight generation

| № эпохи                     | Скорость обучения | Обучение с предварительно вычисленными весами |                                |           |              | Обучение со случайной инициализацией весов в диапазоне [-0,5; 0,5] |                                |           |            |               |
|-----------------------------|-------------------|---|--------------------------------|-----------|--------------|--|--------------------------------|-----------|------------|---------------|
|                             |                   | Количество узнаваемых изображений             | Процент узнаваемых изображений | $S_{err}$ | Время, мин   | Количество узнаваемых изображений                                  | Процент узнаваемых изображений | $S_{err}$ | Время, мин |               |
| 1                           | 0,1               | 15564   | 77,82                          | 498,87    | 90,27        | 12 497   | 62,48                          | 798,8     | 142,23     |               |
| 2                           | 0,1               | 17412   | 87,06                          | 254,61    | 58,8         | 15 552   | 77,76                          | 437,9     | 90,39      |               |
| 3                           | 0,02              | 18098   | 90,49                          | 183,77    | 47,13        | 17 015   | 85,07                          | 290,07    | 65,51      |               |
| <b>Общее время обучения</b> |                   |   |                                |           | <b>196,2</b> | <b>Общее время обучения</b>  |                                |           |            | <b>298,13</b> |

■ **Таблица 5.** Сравнение результатов обучения НС на 20 000 изображений с проверкой на контрольной выборке MNIST (10 000 изображений) для каждой эпохи обучения

■ **Table 5.** Comparison of training results of a neural network on 20,000 images with a tested MNIST control set (10,000 images) for each training epoch

| № эпохи | Скорость обучения | Количество узанных изображений (в скобках – процент) |  |
|---------|-------------------|--|--|
|         |                   | с предварительно вычисленными весами                 | с начальной случайной инициализацией весов |
| 1       | 0,1               | 8644 (86,44)   | 7051 (70,51)                               |
| 2       | 0,1               | 8774 (87,74)   | 7716 (77,16)                               |
| 3       | 0,02              | 9078 (90,78)   | 8025 (80,25)                               |

=  $(298 - 196) \times 100/298 \approx 34 \%$  и количество правильно узанных символов по контрольной базе MNIST с вычисленными весовыми значениями после каждой эпохи обучения также выше.

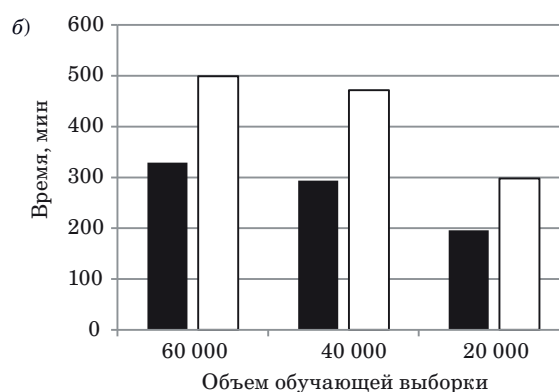
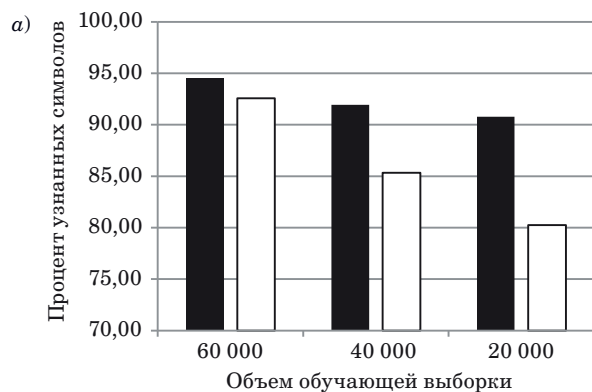
Диаграмма (рис. 6, а) показывает зависимость количества правильно идентифицированных символов контрольной базы MNIST от используемого объема обучающей выборки для обученной НС как с предварительно вычисленными весами, так и со случайной инициализацией весов. На диаграмме также видно, что НС с вычисленными весовыми значениями ведет себя более стабильно (устойчиво) к уменьшению объема обучающей выборки, количество правильно распознанных символов по контрольной базе MNIST сохраняет значения более чем 90 %, тогда как для НС со случайной инициализацией весов количество правильно распознанных символов падает до 80 %. На второй диаграмме (рис. 6, б) процедура обучения НС при разных объемах обучающей базы данных MNIST выполняется

быстрее для НС с предварительно вычисленными весовыми значениями.

Приведенные выше результаты показывают, что после трех эпох обучения количество правильно идентифицированных символов многослойного персептрона с вычисленными весовыми значениями и объемом обучающей выборки 20 000 изображений приблизительно равно количеству правильно узанных изображений НС со случайной начальной генерацией весов и с объемом обучающей выборки 60 000 изображений ( $9078 \approx 9256$ ). При этом по табл. 1 из работы [21] и табл. 4 можно также наблюдать, что время, потраченное на обучение НС с предварительно вычисленными значениями весов и с использованием 20 000 изображений обучающего набора, составляет 196 мин, тогда как время, потраченное на обучение НС с начальной случайной генерацией весов и с использованием 60 000 изображений обучающего набора базы MNIST, составляет 499 мин. Таким образом, процедура обучения многослойного персептрона с вычисленными весовыми значениями еще более ускоряется до значения  $p_{ускор} = (499 - 196) \times 100/499 \approx 60,72 \%$ .

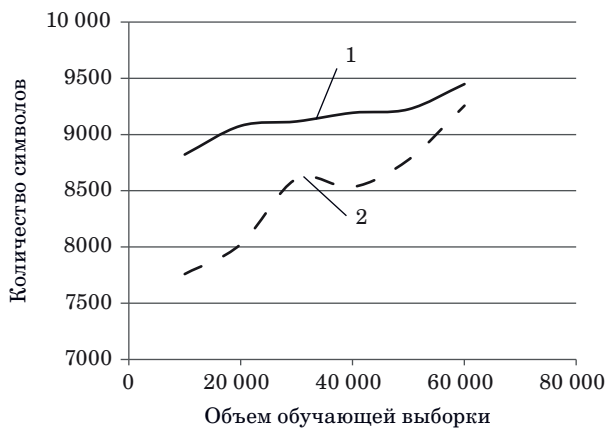
Аналогичным образом были также проведены сравнительные эксперименты на наборах обучающих выборок с 10 000, 30 000 и 50 000 символов базы MNIST с теми же начальными условиями (табл. 6).

Две кривые (рис. 7) отражают зависимость значений, приведенных в табл. 6. Из табл. 6 и рис. 7 делаем вывод, что для всех объемов обучающей базы данных значения правильно идентифицированных символов больше для НС с предварительно вычисленными значениями, и чем меньше количество обучающей выборки, тем больше эта разница проявляет себя. Для обученной НС с предварительно вычисленными весовыми значениями кривая коли-



■ **Рис. 6.** Зависимость количества узанных символов по контрольной базе MNIST (а) и времени обучения НС (б) с вычисленными весовыми значениями (черный цвет) и случайной генерацией весов (белый цвет) от объема обучающей выборки

■ **Fig. 6.** Percentage of recognized characters in the MNIST control base (а) and training time (б) with calculated weights (black color) and random generation of weights (white color) in relation to the volume of the training set



■ **Рис. 7.** Зависимость количества правильно идентифицированных символов контрольной базы MNIST от объема обучающего набора базы MNIST для НС с предварительно вычисленными весами 1 и со случайной генерацией весов 2

■ **Fig. 7.** Functions of the number of correctly identified symbols of the MNIST base to the volume of the training set of the MNIST base for a neural network with computed weights 1 and with random generation of weights 2

■ **Таблица 6.** Итоговые значения количества правильно идентифицированных изображений контрольной базы MNIST (10 000 изображений) для НС, обученных на трех эпохах с разными наборами обучающих баз данных, со случайной инициализацией весов и с вычисленными весами

■ **Table 6.** The final values of the number of correctly identified images of the MNIST control database (10,000 images) for the neural network with random initialization of weights and with calculated weights trained on three epochs with different sets of training databases

| Нейронная сеть                  | Количество изображений при объеме символов обучающей базы данных |        |        |        |        |        |
|---------------------------------|--|--------|--------|--------|--------|--------|
|                                 | 10 000   | 20 000 | 30 000 | 40 000 | 50 000 | 60 000 |
| Со случайными значениями весов  | 7760   | 8025   | 8607   | 8533   | 8776   | 9256   |
| С вычисленными значениями весов | 8823   | 9078   | 9117   | 9194   | 9225   | 9449   |

чества правильно идентифицированных символов более стабильна, тогда как кривая обученной НС с начальной случайной генерацией весов ведет себя не стабильно, и, кроме того, значения количества правильно идентифицированных символов для этой кривой сильно уменьшаются с уменьшением объема обучающей выборки.

График первой функции (см. рис. 7, кривая 1) определяется полиномом третьей степени

$$Y_1 = 2 \times 10^{-11}x^3 - 2 \times 10^{-6}x^2 + 0,0654x + 8333,3, \quad (7)$$

а график второй функции (см. рис. 7, кривая 2) определяется полиномом пятой степени

$$Y_2 = -2 \times 10^{-19}x^5 + 5 \times 10^{-14}x^4 - 3 \times 10^{-09}x^3 + 10^{-04}x^2 - 1,2896x + 13730, \quad (8)$$

что также говорит об устойчивости НС с вычисленными весами к уменьшению объемов обучающей базы данных.

### Схемы применения предлагаемых архитектур нейронных сетей для сверточных нейронных сетей

Алгоритм аналитического вычисления значений весов можно применить не только для трех-четырёхслойных НС, но и для глубоких НС [25, 26]. Если на схеме [19, рис. 3] изображения эталонов сразу использовались для вычисления значений весов полносвязной НС, то для сверточных НС предварительно для каждого изображения эталона будут создаваться слои с каналами и ядрами, каждый — на основе выделенного признака эталона.

Фрагмент эталонного изображения 0\_157 (см. рис. 2) показан на рис. 8. Для простоты рассматривается однотонное черно-белое изображение, для которого пиксель принимается равным 255, если значение пикселя >127, и равным 0, если значение пикселя <127. Выделенный участок одного признака изображения — это матрица зна-

|   |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |   |
|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|---|
| 0 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0 |
| 0 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0 |
| 0 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 255 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0 |
| 0 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 255 | 255 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0 |
| 0 | 0   | 0   | 0   | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0 |
| 0 | 0   | 0   | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 | 0   | 0   | 0   | 0 |
| 0 | 0   | 255 | 255 | 255 | 255 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 255 | 255 | 0   | 0 |
| 0 | 0   | 255 | 255 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 255 | 255 | 0 |
| 0 | 255 | 255 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 255 | 255 | 0 |
| 0 | 255 | 255 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 255 | 255 | 0 |
| 0 | 255 | 255 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 255 | 255 | 0 |
| 0 | 255 | 255 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 255 | 255 | 0 |
| 0 | 255 | 255 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 255 | 255 | 0 |
| 0 | 255 | 255 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 255 | 255 | 0 |
| 0 | 255 | 255 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 255 | 255 | 0 |
| 0 | 0   | 0   | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 | 0   | 0   | 0   | 0 |
| 0 | 0   | 0   | 0   | 0   | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 | 0   | 0   | 0   | 0 |

■ **Рис. 8.** Фрагмент эталонного изображения 0\_157 с выделенным участком одного признака

■ **Fig. 8.** Fragment of the sample image 0\_157 with a selected area of one feature

чений пикселей размерностью 5:5, на основе которой и будет вычисляться ядро первого канала.

Каждое значение веса матрицы ядра  $w_{i,j}^{(\text{ядро})}$  может вычисляться на основе соответствующего ему значения таблицы свертки  $C_{i,j}$  (для первого сверточного слоя это будет значение пикселя изображения), масштабированного соотношением разницы максимального ( $w_{\max}^{(\text{ядро})} = 1$ ) и минимального ( $w_{\min}^{(\text{ядро})} = -1$ ) значения весов к разнице максимального и минимального значения таблицы свертки (для первого сверточного слоя значения  $C_{\max} = 255, C_{\min} = 0$  определяются максимальным и минимальным значением пикселя изображения). Например, значение веса  $w_{ij}^{(\text{ядро})}$  для данного признака на рис. 8 может определяться из выражения

$$w_{i,j}^{(\text{ядро})} = \frac{w_{\max}^{(\text{ядро})} - w_{\min}^{(\text{ядро})}}{C_{\max} - C_{\min}} \cdot C_{i,j} - 1 = (2C_{i,j} / 255) - 1. \quad (9)$$

Таким образом вычисляются все значения весов в матрице ядра (рис. 9).

Значение смещения для данного канала первого слоя

$$w_0 = K\% \left( \sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^5 (C_{i,j} \cdot w_{i,j}^{(\text{ядро})}) \right), \quad (10)$$

где  $K$  – выбранное значение процента от произведения матрицы вычисленного ядра (см. рис. 9) и матрицы признака изображения (см. рис. 8), на основе которого ядро было создано.

Далее на основе полученного ядра и смещения определяются все схожие признаки с участками изображений, близкие к изображению отмеченного признака (см. рис. 8):

$$C_{n,m}^{(1)} = \sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^5 (C_{n+i,m+j} \cdot w_{i,j}^{(\text{ядро})}) - w_0, \quad (11)$$

где  $C_{n,m}^{(1)}$  – значение первого канала первого слоя свертки с координатами значений канала  $n$  и  $m$ .

|    |    |    |    |    |
|----|----|----|----|----|
| -1 | -1 | -1 | -1 | -1 |
| -1 | -1 | -1 | 1  | -1 |
| -1 | -1 | -1 | 1  | 1  |
| -1 | 1  | 1  | 1  | 1  |
| 1  | 1  | 1  | 1  | 1  |

■ **Рис. 9.** Аналитически вычисленное ядро для признака, выделенного на рис. 8

■ **Fig. 9.** Analytically calculated kernel for the selected feature in fig. 8

Для данного примера  $n$  и  $m$  меняются последовательно в диапазоне [0, 24]. Согласно функции активации *ReLU*, наиболее часто используемой в слоях свертки сверточных сетей, значение канала будет определяться следующим образом:

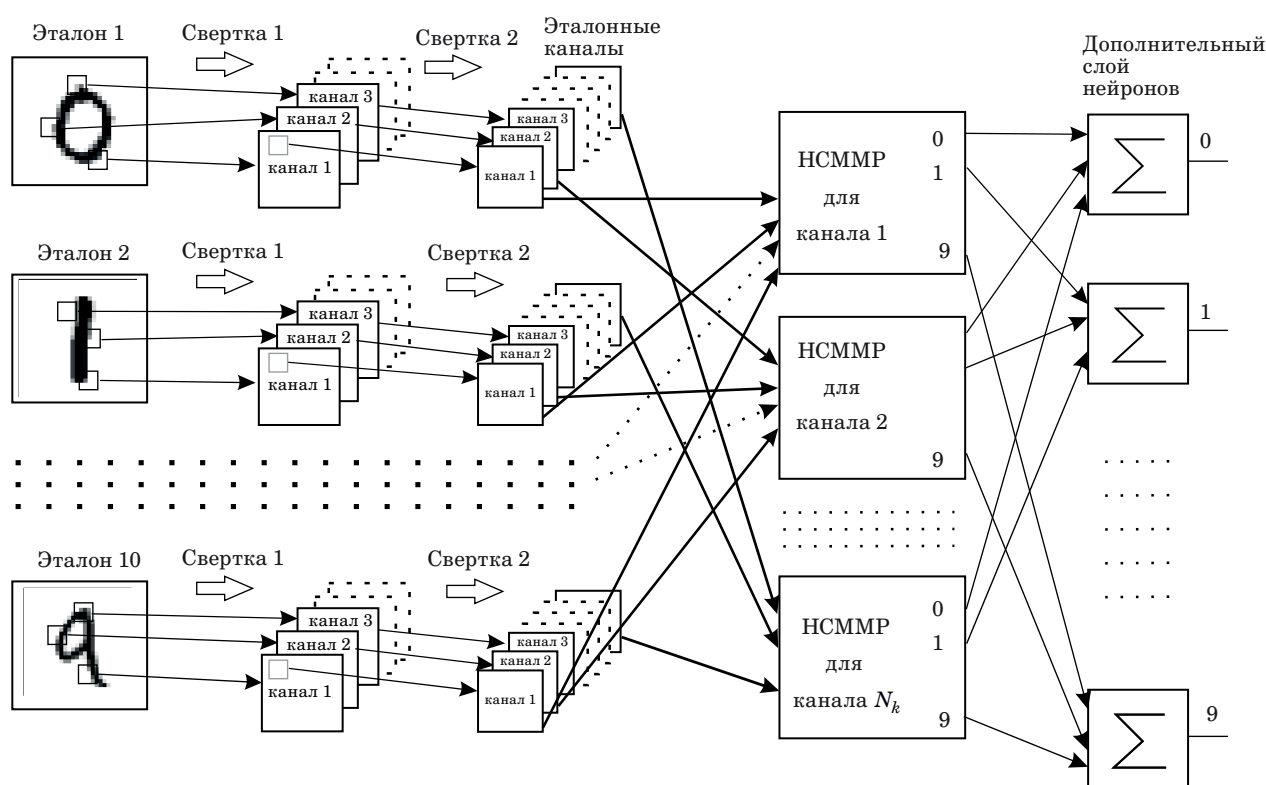
$$\begin{aligned} \text{если } C_{n,m}^{(1)} > 0, f(C_{n,m}^{(1)}) &= C_{n,m}^{(1)}; \\ \text{если } C_{n,m}^{(1)} \leq 0, f(C_{n,m}^{(1)}) &= 0. \end{aligned} \quad (12)$$

Так выполняется свертка слоя и вычисление первого канала для эталона 0\_157. Таким же образом на основе ядра на рис. 9 и смещения  $w_0$  вычисляются первые каналы для всех эталонов на рис. 2.

Далее алгоритм выбирает следующий признак (с учетом исключения повторений признаков) на изображении эталона (см. рис. 8), по описанному выше образцу вычисляет ядро и смещение для второго канала и на основе полученного ядра и смещения вычисляет следующие каналы для всех эталонов. Чем больше выбирается значение  $K$ , тем больше будут значения смещений  $w_0$  и тем точнее выделяются признаки, схожие с признаком, на основе которого вычислялось ядро [см. формулу (10)], но при этом будет увеличиваться и количество каналов, поскольку в таком случае увеличивается и количество признаков эталонных изображений.

Процесс повторяется до полного завершения признаков на всех эталонных изображениях. Для вычисления следующих сверточных слоев процесс повторяется аналогичным образом с той только разницей, что признаки будут выбираться уже не на основе изображения эталона, а на основе вычисленного канала в предыдущем слое, а само ядро для этих слоев будет не двумерным, как в первом слое (см. рис. 9), а трехмерным. Третье измерение ядра будет равно количеству каналов предыдущего слоя, что связано с тем, что признак  $C_{i,j}$  для всех слоев  $> 1$  будет также трехмерным. Значения каждого  $k$ -го слоя трехмерного ядра будут вычисляться аналогично по выражению (9).

В итоге на выходе последнего канала свертки вычисляемой сверточной НС мы получаем точно определенное количество вычисленных каналов ( $N_{\text{канал}}$ ), которое одинаково для каждого эталона. Для каналов разных эталонов, но с одинаковыми порядковыми номерами, строится полносвязная трехслойная НС по схеме на основе НСММР, где количество эталонов также будет равным 30. Аналогичным образом создаются полносвязные НС для каждого канала выходного сверточного слоя. На рис. 10 приведена схема создания вычисляемой сверточной НС с использованием 10 эталонов (по одному эталону от каждого образа на рис. 2). Значения всех одинаковых по номеру выходов полносвязных НС НСММР подаются на соответствующие сум-



■ **Рис. 10.** Схема создания сверточной НС с вычисляемыми весами на основе НСММР

■ **Fig. 10.** Scheme for creating a deep convolutional neural network with calculated weights based on neural networks of metric methods for recognizing

мирующие линейные нейроны. Окончательный выход НС определяется по правилу наибольшего значения.

## Заключение

Проведенные выше эксперименты и полученные результаты позволяют сделать следующие выводы.

Значения весов многослойного персептрона могут сразу вычисляться аналитически с использованием небольшого набора выбранных эталонов, что дает возможность сразу создать работоспособную НС без обучения, которая может дополнительно дообучаться классическими алгоритмами обучения.

Процедура дообучения многослойного персептрона с вычисленными весовыми значениями выполняется существенно быстрее, чем обучение НС с начальной случайной генерацией весов. Следовательно, приведенный в работе [21] результат сравнительного эксперимента был не случайным, а закономерным. Более того, за счет уменьшения объема обучающей выборки время обучения НС еще более сокращается.

Результативность НС с аналитически вычисленными весовыми значениями более устойчива к уменьшению объема обучающей базы данных.

Рассматривается возможность применить предлагаемые архитектуры НСММР для реализации аналитически вычисляемых сверточных НС (см. рис. 10).

## Литература

1. Кузнецов О. П., Базенков Н. И., Болдышев Б. А., Жилиякова Л. Ю., Куливец С. Г., Чистопольский И. А. Асинхронная дискретная модель химических взаимодействий в простых нейронных системах. *Искусственный интеллект и приня-*

*тие решений*, 2018, № 2, с. 3–20. doi:10.14357/20718594180201

2. Осипов В. Ю., Никифоров В. В. Возможности рекуррентных нейронных сетей с управляемыми элементами по восстановлению потоков кадров. *Информационно-управляющие системы*, 2019, № 5, с. 10–17. doi:10.31799/1684-8853-2019-5-10-17

3. **Baymurzina D., Golikov E., Burtsev M.** A review of neural architecture search. *Neurocomputing*, 2021, no. 474, pp. 82–93. doi:10.1016/j.neucom.2021.12.014
4. **Peng P., Pan J., Xu H., Feng X.** Rectified-physics informed neural networks for solving stationary partial differential equations. *Computers & Fluids*, 2022, vol. 245, iss. 1. doi:10.1016/j.compfluid.2022.105583
5. **Yi Lin, Po-Jang Hsieh.** Neural decoding of speech with semantic-based classification. *Cortex*, 2022, no. 154, pp. 231–240. doi:10.1016/j.cortex.2022.05.018
6. **Gaba S., Budhiraja I., Kumar V., Garg S., Kad-doum G., Hassan M. M.** A federated calibration scheme for convolutional neural networks: Models, applications and challenges. *Computer Communications*, 2022, vol. 192, pp. 144–162. doi:10.1016/j.comcom.2022.05.035
7. **Guangyuan Liao, Limin Zhang.** Solving flows of dynamical systems by deep neural networks and a novel deep learning algorithm. *Mathematics and Computers in Simulation*, 2022, vol. 202, no. 1, pp. 331–342. doi:10.1016/j.matcom.2022.06.004
8. **Pawlicki M., Kozik R., Choraś M.** A survey on neural networks for (cyber-) security and (cyber-) security of neural networks. *Neurocomputing*, 2022, vol. 500(1), pp. 1075–1087. doi:10.1016/j.neucom.2022.06.002
9. **Yunfei Yang, Zhen Li, Yang Wang.** Approximation in shift-invariant spaces with deep ReLU neural networks. *Neural Networks*, 2022, vol. 153, pp. 269–281. doi: 10.1016/j.neunet.2022.06.013
10. **Hola A., Czarnecki S.** Brick wall moisture evaluation in historic buildings using neural networks. *Automation in Construction*, 2022, vol. 141. doi:10.1016/j.autcon.2022.104429
11. **Jaberi M., Ravanmehr R.** Human activity recognition via wearable devices using enhanced ternary weight convolutional neural network. *Pervasive and Mobile Computing*, 2022, vol. 83. doi:10.1016/j.pmcj.2022.101620
12. **Yetian Fan, Wenyu Yang.** A backpropagation learning algorithm with graph regularization for feedforward neural networks. *Information Sciences*, 2022, vol. 607, pp. 263–277. doi:10.1016/j.ins.2022.05.121
13. **Aki Koivu, Joonas-Pekko Kakko, Mikko Sairanen.** Quality of randomness and node dropout regularization for fitting neural networks. *Expert Systems with Applications*, 2022, vol. 207, iss. 3. doi:10.1016/j.eswa.2022.117938
14. **Tao Zhang, Hui Xu, Xinlong Feng.** A non-intrusive neural network model order reduction algorithm for parameterized parabolic PDEs. *Computers & Mathematics with Applications*, 2022, vol. 119, iss. 1, pp. 59–67. doi:10.1016/j.camwa.2022.05.035
15. **Cummaudo A.** What's the minimum amount of data needed to teach a neural network? *Applied Artificial Intelligence Institute's Blog*. <https://a2i2.deakin.edu.au/2018/02/21/whats-the-minimum-amount-of-data-needed-to-teach-a-neural-network/> (дата обращения: 05.12.2022).
16. **Geidarov P. Sh.** Neural networks on the basis of the sample method. *Automatic Control and Computer Sciences*, 2009, vol. 43, no. 4, pp. 203–210. doi:10.3103/S0146411609040063
17. **Гейдаров П. Ш.** Алгоритм реализации метода ближайшего соседа в многослойном персептроне. *Тр. СПИИРАН*, 2017, т. 2, № 51, с. 123–151. doi:10.15622/sp.51.6
18. **Биргер И. А.** *Техническая диагностика*. М.: Машиностроение, 1978. 240 с.
19. **Гейдаров П. Ш.** Алгоритм вычисления значений весов синапсов первого слоя нейронной сети на основе метрических методов распознавания. Ч. 1. *Информационно-управляющие системы*, 2020, № 2, с. 20–30. doi:10.31799/1684-8853-2020-2-20-30
20. **Гейдаров П. Ш.** Алгоритм вычисления значений весов синапсов первого слоя нейронной сети на основе метрических методов распознавания. Ч. 2. *Информационно-управляющие системы*, 2020, № 3, с. 25–38. doi:10.31799/1684-8853-2020-3-25-38
21. **Geidarov P. Sh.** Comparative analysis of the results of training the neural network with calculated weights and with random generation of the weights. *Automation and Remote Control*, 2020, vol. 81, no. 7, pp. 1211–1229. <https://doi.org/10.3103/S0146411609040063>
22. **Glorot X. and Bengio Y.** Understanding the difficulty of training deep feedforward neural networks. *Intern. Conf. on Artificial Intelligence and Statistics*, 2010, pp. 249–256.
23. **Glorot X., Bordes A., Bengio Y.** Deep sparse rectifier networks. *Proc. of the 14th Intern. Conf. on Artificial Intelligence and Statistics*, 2011, pp. 315–323.
24. **Kaiming He, Xiangyu Zhang, Shaoqing Ren, Jian Sun.** Delving deep into rectifiers: surpassing human-level performance on ImageNet classification. *arXiv:1502.01852*.
25. **LeCun Y., Bengio Y., Hinton G.** Deep learning. *Nature*, 2015, vol. 521, no. 7553, pp. 436–444. doi:10.1038/nature14539
26. **Schmidhuber J.** Deep learning in neural networks: An overview. *Neural Networks*, 2015, vol. 61, pp. 85–117. doi:10.1016/j.neunet.2014.09.003

UDC 004.85

doi:10.31799/1684-8853-2023-2-2-14

EDN: WOHNNE

**Investigating stability of a multilayer perceptron with calculated synaptic weights to smaller training sample sizes**P. Sh. Geidarov<sup>a</sup>, Dr. Sc., Tech., Associate Professor, orcid.org/0000-0002-3881-0629, plbaku2010@gmail.com<sup>a</sup>Institute of Control Systems of the National Academy of Sciences of Azerbaijan, Bakhtiyar Vahabzade St., 68, AZ 1141, Baku, Azerbaijan

**Introduction:** The process of creating artificial neural networks demands that developers have big samples of data sets, which complicates the process of creating and training an artificial neural network. At the same time, in biological neural networks of living organisms, the learning process is successfully performed with a relatively small samples of training data. Therefore, the task of creating new architectures of artificial neural networks that can effectively reduce the required samples of data in the training database is a very urgent task. **Purpose:** To test the stability of the performance of a neural network implemented on the basis of metric recognition methods with smaller training sample sizes. **Results:** We carry out comparative experiments to train a neural network using different samples of the MNIST database, the experiments being conducted with both precalculated weights and weighted random numbers. A comparative analysis of the results of the experiments shows that the performance of a neural network with precalculated weight values is more resilient to the size reduction of a training sample. We also propose a general scheme and the main provisions of the algorithm for implementing the presented technology for creating computed convolutional neural networks. **Practical relevance:** Neural networks with calculated weights require a smaller training data set, which allows one to speed up and simplify the procedure of creating, training and retraining a neural network.

**Keywords** – multilayer perceptron, metric recognition methods, neural network training, convolutional deep neural networks.

**For citation:** Geidarov P. Sh. Investigating stability of a multilayer perceptron with calculated synaptic weights to smaller training sample sizes. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2023, no. 2, pp. 2–14 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2023-2-2-14, EDN: WOHNNE

**References**

- Kuznetsov O. P., Bazenkov N. I., Boldyshev B. A., Zhilyakova L. Yu., Kulivets S. G., Chistopolsky I. A. Asynchronous discrete model of chemical interactions in simple neuronal systems. *Scientific and Technical Information Processing*, 2018, no. 2, pp. 3–20 (In Russian). doi:10.14357/20718594180201
- Osipov V. Yu., Nikiforov V. V. Recurrent neural networks with controlled elements in restoring frame flows. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2019, no. 5, pp. 10–17 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2019-5-10-17
- Baymurzina D., Golikov E., Burtsev M. A review of neural architecture search. *Neurocomputing*, 2021, no. 474, pp. 82–93. doi:10.1016/j.neucom.2021.12.014
- Peng P., Pan J., Xu H., Feng X. Rectified-physics informed neural networks for solving stationary partial differential equations. *Computers & Fluids*, 2022, vol. 245, iss. 1. doi:10.1016/j.compfluid.2022.105583
- Yi Lin, Po-Jang Hsieh. Neural decoding of speech with semantic-based classification. *Cortex*, 2022, no. 154, pp. 231–240. doi:10.1016/j.cortex.2022.05.018
- Gaba S., Budhiraja I., Kumar V., Garg S., Kaddoum G., Hassan M. M. A federated calibration scheme for convolutional neural networks: Models, applications and challenges. *Computer Communications*, 2022, vol. 192, pp. 144–162. doi:10.1016/j.comcom.2022.05.035
- Guangyuan Liao, Limin Zhang. Solving flows of dynamical systems by deep neural networks and a novel deep learning algorithm. *Mathematics and Computers in Simulation*, 2022, vol. 202, no. 1, pp. 331–342. doi:10.1016/j.matcom.2022.06.004
- Pawlicki M., Kozik R., Choraś M. A survey on neural networks for (cyber-) security and (cyber-) security of neural networks. *Neurocomputing*, 2022, vol. 500(1), pp. 1075–1087. doi:10.1016/j.neucom.2022.06.002
- Yunfei Yang, Zhen Li, Yang Wang. Approximation in shift-invariant spaces with deep ReLU neural networks. *Neural Networks*, 2022, vol. 153, pp. 269–281. doi: 10.1016/j.neunet.2022.06.013
- Hoła A., Czarnecki S. Brick wall moisture evaluation in historic buildings using neural networks. *Automation in Construction*, 2022, vol. 141. doi:10.1016/j.autcon.2022.104429
- Jaberi M., Ravanmehr R. Human activity recognition via wearable devices using enhanced ternary weight convolutional neural network. *Pervasive and Mobile Computing*, 2022, vol. 83. doi:10.1016/j.pmcj.2022.101620
- Yetian Fan, Wenyu Yang. A backpropagation learning algorithm with graph regularization for feedforward neural networks. *Information Sciences*, 2022, vol. 607, pp. 263–277. doi:10.1016/j.ins.2022.05.121
- Aki Koivu, Joonas-Pekko Kakko, Mikko Sairanen. Quality of randomness and node dropout regularization for fitting neural networks. *Expert Systems with Applications*, 2022, vol. 207, iss. 3. doi:10.1016/j.eswa.2022.117938
- Tao Zhang, Hui Xu, Xinlong Feng. A non-intrusive neural network model order reduction algorithm for parameterized parabolic PDEs. *Computers & Mathematics with Applications*, 2022, vol. 119, iss. 1, pp. 59–67. doi:10.1016/j.camwa.2022.05.035
- Cummaudo A. What's the minimum amount of data needed to teach a neural network? *Applied Artificial Intelligence Institute's blog*. Available at: <https://a2i2.deakin.edu.au/2018/02/21/whats-the-minimum-amount-of-data-needed-to-teach-a-neural-network/> (accessed 5 December 2022).
- Geidarov P. Sh. Neural networks on the basis of the sample method. *Automatic Control and Computer Sciences*, 2009, vol. 43, no. 4, pp. 203–210. doi:10.3103/S0146411609040063
- Geidarov P. Sh. Algorithm for implementing the nearest neighbor method in a multilayer perceptron. *Proc. of SPIRAS*, 2017, vol. 51, p. 123–151 (In Russian)
- Birger I. A. *Tekhnicheskaya diagnostika* [Technical diagnostics]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1978. 240 p. (In Russian).
- Geidarov P. Sh. Algorithm for calculating synapse weights of the first layer of a neural network on the base of metric recognition methods. Part 1. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2020, no. 2, pp. 20–30 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2020-2-20-30
- Geidarov P. Sh. Algorithm for calculating synapse weights of the first layer of a neural network on the base of metric recognition methods. Part 2. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2020, no. 3, pp. 25–38 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2020-3-25-38
- Geidarov P. Sh. Comparative analysis of the results of training the neural network with calculated weights and with random generation of the weights. *Automation and Remote Control*, 2020, vol. 81, no. 7, pp. 1211–1229. <https://doi.org/10.3103/S0146411609040063>

22. Glorot X. and Bengio Y. Understanding the difficulty of training deep feedforward neural networks. *Intern. Conf. on Artificial Intelligence and Statistics*, 2010, pp. 249–256.
23. Glorot X., Bordes A., Bengio Y. Deep sparse rectifier networks. *Proc. of the 14th Intern. Conf. on Artificial Intelligence and Statistics*, 2011, pp. 315–323.
24. Kaiming He, Xiangyu Zhang, Shaoqing Ren, Jian Sun. Delving deep into rectifiers: surpassing human-level performance on ImageNet classification. *arXiv:1502.01852*.
25. LeCun Y., Bengio Y., Hinton G. Deep learning. *Nature*, 2015, vol. 521, no. 7553, pp. 436–444. doi:10.1038/nature14539
26. Schmidhuber J. Deep learning in neural networks: An overview. *Neural Networks*, 2015, vol. 61, pp. 85–117. doi:10.1016/j.neunet.2014.09.003

### Уважаемые авторы!

#### При подготовке рукописей статей необходимо руководствоваться следующими рекомендациями.

Статьи должны содержать изложение новых научных результатов. Название статьи должно быть кратким, но информативным. В названии недопустимо использование сокращений, кроме самых общепринятых (РАН, РФ, САПР и т. п.).

Текст рукописи должен быть оригинальным, а цитирование и самоцитирование корректно оформлено.

Объем статьи (текст, таблицы, иллюстрации и библиография) не должен превышать эквивалента в 20 страниц, напечатанных на бумаге формата А4 на одной стороне через 1,5 интервала Word шрифтом Times New Roman размером 13, поля не менее двух сантиметров.

Обязательными элементами оформления статьи являются: индекс УДК, заглавие, инициалы и фамилия автора (авторов), ученая степень, звание (при отсутствии — должность), полное название организации, аннотация и ключевые слова на русском и английском языках, ORCID и электронный адрес одного из авторов. При написании аннотации не используйте аббревиатур и не делайте ссылок на источники в списке литературы. Предоставляйте подрисовочные подписи и названия таблиц на русском и английском языках.

Статьи авторов, не имеющих ученой степени, рекомендуется публиковать в соавторстве с научным руководителем, наличие подписи научного руководителя на рукописи обязательно; в случае самостоятельной публикации обязательно предоставляйте заверенную по месту работы рекомендацию научного руководителя с указанием его фамилии, имени, отчества, места работы, должности, ученого звания, ученой степени.

Простые **формулы** набирайте в Word, сложные с помощью редактора MathType или Equation. Для набора одной формулы не используйте два редактора; при наборе формул в формульном редакторе знаки препинания, ограничивающие формулу, набирайте вместе с формулой; для установки размера шрифта в MathType никогда не пользуйтесь вкладкой Other, Smaller, Larger, используйте заводские установки редактора, не подгоняйте размер символов в формулах под размер шрифта в тексте статьи, не растягивайте и не сжимайте мышью формулы, вставленные в текст; пробелы в формуле ставьте только после запятой при перечислении с помощью Ctrl+Shift+Space (пробел); не отделяйте пробелами знаки: + = - ×, а также пространство внутри скобок; для выделения греческих символов в MathType полужирным начертанием используйте Style → Other → bold.

Для набора формул в Word никогда не используйте вкладки: «Уравнение», «Конструктор», «Формула» (на верхней панели: «Вставка» — «Уравнение»), так как этот ресурс предназначен только для внутреннего использования в Word и не поддерживается программами, предназначенными для изготовления оригинал-макета журнала.

При наборе символов в тексте помните, что символы, обозначаемые латинскими буквами, набираются светлым курсивом, русскими и греческими — светлым прямым, векторы и матрицы — прямым полужирным шрифтом.

Подробнее см. pdf-файл «Правила подготовки рукописей» (стр. 11) на сайте <https://guar.ru/ric>

#### Иллюстрации:

— рисунки, графики, диаграммы, блок-схемы предоставляйте в виде отдельных исходных файлов, поддающихся редактированию, используя векторные программы: Visio (\*.vsd, \*.vsdx); Adobe Illustrator (\*.ai); Coreldraw (\*.cdr, версия не выше 15); Excel (\*.xls); Word (\*.docx); AutoCad, Matlab (экспорт в PDF, EPS, SVG, WMF, EMF); Компас (экспорт в PDF), веб-портал DRAW.IO (экспорт в PDF);  
— фото и растровые — в формате \*.tif, \*.png с максимальным разрешением (не менее 300 pixels/inch).

Наличие подрисовочных подписей и названий таблиц на русском и английском языках обязательно (желательно не повторяющих дословно комментарии к рисункам в тексте статьи).

#### В редакцию предоставляются:

— сведения об авторе (фамилия, имя, отчество, место работы, должность, ученое звание, учебное заведение и год его окончания, ученая степень и год защиты диссертации, область научных интересов, количество научных публикаций, домашний и служебный адреса и телефоны, e-mail), фото авторов: анфас, в темной одежде на белом фоне, должны быть видны плечи и грудь, высокая степень четкости изображения без теней и отблесков на лице, фото можно представить в электронном виде в формате \*.tif, \*.png, \*.jpg с максимальным разрешением — не менее 300 pixels/inch при минимальном размере фото 40×55 мм;

— экспертное заключение.

**Список литературы** составляется по порядку ссылок в тексте и оформляется следующим образом:

— для книг и сборников — фамилия и инициалы авторов, полное название книги (сборника), город, издательство, год, общее количество страниц, doi;

— для журнальных статей — фамилия и инициалы авторов, полное название статьи, название журнала, год издания, номер журнала, номера страниц, doi;

— ссылки на иностранную литературу следует давать на языке оригинала без сокращений;

— при использовании web-материалов указывайте адрес сайта и дату обращения.

Список литературы оформляйте двумя отдельными блоками по образцам lit.dot на сайте журнала (<http://i-us.ru/paperrules>): Литература и References.

Более подробно правила подготовки текста с образцами изложены на нашем сайте в разделе «Руководство для авторов».

### Контакты

Куда: 190000, г. Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А, ГУАП, РИЦ

Кому: Редакция журнала «Информационно-управляющие системы»

Тел.: (812) 494-70-02

Эл. почта: [ius.spb@gmail.com](mailto:ius.spb@gmail.com)

Сайт: [www.i-us.ru](http://www.i-us.ru)



УДК 004.453

doi:10.31799/1684-8853-2023-2-15-26

EDN: WWXRRW

Научные статьи  
Articles

## Алгоритм метода ветвей и границ оптимизации расписаний выполнения пакетов заданий в конвейерных системах

К. В. Кротов<sup>а</sup>, канд. техн. наук, доцент, [orcid.org/0000-0002-9670-6141](https://orcid.org/0000-0002-9670-6141), [krotov\\_k1@mail.ru](mailto:krotov_k1@mail.ru)

<sup>а</sup>Севастопольский государственный университет, Университетская ул., 33, Севастополь, 299053, РФ

**Введение:** оптимизация расписаний выполнения пакетов заданий обеспечивает эффективную реализацию производственных и вычислительных процессов. Современные методы оптимизации расписаний характеризуются ограничениями на размерность задач либо невозможностью получить решения, приближающиеся к глобально оптимальному. **Цель:** разработать алгоритм метода ветвей и границ оптимизации расписаний выполнения пакетов заданий в конвейерных системах. **Результаты:** получена математическая модель многостадийных процессов, позволяющая идентифицировать моменты времени начала выполнения пакетов заданий в соответствующих позициях в последовательностях реализации действий с ними на приборах конвейерных систем. Представлен критерий оптимизации решений, соответствующий моменту времени окончания выполнения заданий, включенных в пакеты. Сформулирован способ разбиения множеств решений на их подмножества (ветвления вершин дерева), который предусматривает добавление по одному пакету разных типов в последовательности реализации действий с ними из множеств не включенных в них пакетов. Разработан способ построения решений по порядкам выполнения на приборах пакетов, входящих в сформированные подмножества, для которых вычисляются значения критерия, используемые при обновлении верхних оценок. Синтезирован способ определения значений нижних оценок критерия для множеств решений, соответствующих вершинам дерева, полученным в результате ветвления, а также алгоритм метода ветвей и границ. **Практическая значимость:** исследования, проведенные с использованием программной реализации алгоритма, показали, что он позволяет до 35 % сократить время на выполнение пакетов по сравнению с решениями без оптимизации. При малом количестве типов заданий алгоритм позволяет получить решение, соответствующее глобально оптимальному. При увеличении количества типов заданий точность приближения решений к глобально оптимальному составляет 0,9–0,95.

**Ключевые слова** – конвейерные системы, пакеты заданий, метод ветвей и границ, расписания выполнения пакетов заданий.

**Для цитирования:** Кротов К. В. Алгоритм метода ветвей и границ оптимизации расписаний выполнения пакетов заданий в конвейерных системах. *Информационно-управляющие системы*, 2023, № 2, с. 15–26. doi:10.31799/1684-8853-2023-2-15-26, EDN: WWXRRW

**For citation:** Krotov K. V. A branch and bound algorithm for the optimization of batch scheduling in pipeline systems. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2023, no. 2, pp. 15–26 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2023-2-15-26, EDN: WWXRRW

### Введение

Выполнение в конвейерных системах (КС) заданий разных типов, входящих в наборы, предусматривает формирование пакетов для реализации операций с ними на приборах систем. Решение задачи оптимизации расписаний выполнения пакетов заданий (ПЗ) в КС предполагает решение подзадач: 1) оптимизации составов пакетов; 2) оптимизации расписаний выполнения пакетов в КС. Автором предложены следующие способы решения указанных задач: 1) метод многоуровневой оптимизации расписаний выполнения ПЗ в КС [1]; 2) метод ветвей и границ (МВГ) для оптимизации решений по составам ПЗ при построении расписаний их выполнения в КС на основе эвристического правила [2]. В практических приложениях актуальным является решение задачи оптимизации расписаний выполнения ПЗ на приборах КС.

Современные методы оптимизации расписаний выполнения ПЗ могут быть объединены

в соответствии с типом обрабатываемых систем: 1) системы с одной машиной обработки заданий в составе пакетов (Batch Processing Machine – BPM); 2) системы потокового типа (Flow Shop), в состав которых входят машины последовательной обработки (Job Processing Machine – JPM) и BPM; 3) системы с последовательной обработкой единичных заданий на первой стадии выполнения операций с ними (системы Flow Shop либо Job Shop) и с BPM на второй стадии. В работах [3, 4] рассматриваются способы оптимизации составов пакетов для их выполнения на одной BPM. Синтезированы модели смешанного целочисленного линейного программирования (mixed-integer linear programming – MILP). Особенностью предложенной в [3] модели является учет зависимости времени настройки приборов от размеров партий. При распределении заданий по пакетам в [5] используется алгоритм муравьиной колонии, позволяющий группировать задания, имеющие приближенно одинако-

вую длительность выполнения, и реализовать обмен заданиями между пакетами для снижения простоев приборов в ВРМ. В [6, 7] для определения составов ПЗ и расписаний их выполнения на приборах одной ВРМ применены эвристические правила, не гарантирующие приближения к оптимальному решению. В [8] рассматривается решение задачи построения расписаний выполнения ПЗ в системах второго типа. Для построения расписаний выполнения ПЗ использован метод обратного планирования, предусматривающий: 1) выбор пакета с наибольшим количеством заданий, определение момента времени начала действий с ним таким образом, чтобы момент времени окончания его выполнения совпадал с директивным сроком окончания для всех заданий; 2) при упорядочивании пакетов по невозрастанию количества заданий в них применение указанного подхода для каждого пакета. В [9] рассматривается система, содержащая несколько ВРМ. Способ определения составов пакетов основывается на условии, что включаемые в них задания имеют различные моменты времени поступления в систему. В соответствии с этими значениями реализуется упорядочивание заданий, на основе сформированной последовательности определяются составы пакетов с учетом пропускной способности ВРМ. Работа [10] посвящена синтезу модели МПР для оптимизации расписаний в системах с машинами в следующей последовательности: первая и третья — JPM, вторая — ВРМ. В соответствии с порядком выполнения единичных заданий на JPM определяются составы ПЗ и порядки их выполнения на ВРМ. Значительное количество переменных и ограничений обуславливают невозможность оптимизации решений за ограниченное время при значительной размерности задач. Особенностью системы в [11] является наличие ВРМ, приборы которых могут быть включены в многостадийные процессы обработки ПЗ по одному, обеспечивая тем самым их гибкость. Сформулирован алгоритм табу-поиска, в котором выделены уровни для: 1) перераспределения заданий между пакетами; 2) упорядочивания пакетов на машинах; 3) упорядочивания заданий в пакетах. Синтезированы операторы: 1) вставки, реализующий добавление заданий в пакеты для одной либо разных ВРМ; 2) замены, реализующий замену заданий в пакетах либо пакетов на разных машинах. Обработываемая система, рассматриваемая в [12], содержит JPM на первой и третьей стадиях обработки партий деталей и ВРМ на второй стадии. На третьей стадии JPM выполняет функции контроля деталей, получаемых на первой и второй стадиях, включаемых в контрольные партии для идентификации бракованных среди них. Авторами [12] получены

формулы для вычисления: 1) количества и составов производственных и контрольных партий; 2) рангов партий, в соответствии с которыми реализуется их упорядочивание на приборах. В [13] конвейер обработки ПЗ представлен в виде последовательности вершин графа потока управления, в котором каждой вершине соответствует определенное приложение. Разработанная авторами [13] программа реализует моделирование перемещения пакетов в конвейере с целью определять оптимальные параметры функционирования системы (количество пакетов, поступающих на вход приложений в единицу времени, размеры пакетов) и оптимальное распределение ресурсов между приложениями. Система, рассматриваемая в [14], содержит на первом этапе Job Shop, а на заключительной стадии обработки — ВРМ. По окончании обработки в Job Shop детали размещаются в буфере перед ВРМ. Задача распределения заданий по пакетам решается при различных моментах времени поступления их в буфер.

Современное состояние применения МВГ для оптимизации расписаний характеризуется работами [15–20], в которых решаются следующие задачи:

- оптимизация составов ПЗ и расписаний их выполнения на одном приборе с целью минимизировать затраты на производство изделий в составе партий, незавершенное производство [15];
- построение расписаний выполнения единичных заданий в системах Flow Shop [16];
- оптимизация расписаний выполнения единичных заданий на параллельных приборах [17];
- построение расписаний выполнения проектов при ограничениях на возобновляемые ресурсы и директивные сроки окончания [18];
- проектное планирование при разработке программ [19];
- построение расписаний выполнения заданий при условии нечетких длительностей реализации действий с ними на приборах [20].

Таким образом, применение МВГ для задач оптимизации расписаний выполнения ПЗ заданных составов в КС не реализовано, требуется развить МВГ для решения задачи оптимизации расписаний выполнения ПЗ в КС.

### Математическая модель многостадийных процессов выполнения пакетов заданий в конвейерных системах

Синтез модели процессов выполнения ПЗ в КС обеспечивается введением обозначений для входных данных, параметров и решений, соответствующих порядкам реализации действий с ПЗ. Введены обозначения:  $N$  — количество типов заданий, выполняемых в КС;  $i$  — иден-

тификатор типа заданий, пакеты которых выполняются в КС ( $i = \overline{1, N}$ );  $l$  – идентификаторы приборов КС ( $l = \overline{1, L}$ );  $\pi^l$  – последовательности выполнения ПЗ на  $l$ -х приборах КС, соответствующие порядкам реализации действий с ними;  $\mathbf{M} = (m_1, m_2, \dots, m_N)^T$  – вектор количества ПЗ  $i$ -х типов;  $\mathbf{A} = \|a_{ih}\|_{N \times m_{\max}}$  – матрица составов ПЗ ( $m_{\max} = \max_i(m_i)$ );  $N_p$  – количество ПЗ, размещаемых в последовательностях  $\pi^l$ , порядок выполнения которых в КС оптимизируется;  $\mathbf{T} = \|t_{li}\|_{L \times N}$  – матрица длительностей выполнения заданий на приборах КС;  $\mathbf{T}^l = \|t_{ii'}^l\|_{N \times N}$  ( $l = \overline{1, L}$ ) – матрицы длительностей переналадок  $l$ -х приборов с выполнения заданий  $i$ -х на выполнение заданий  $i'$ -х типов ( $t_{ii}^l = 0$ );  $j$  – номера позиций, которые занимают ПЗ в последовательностях  $\pi^l$  ( $l = \overline{1, L}$ );  $\mathbf{R} = \|r_{ij}\|_{N \times N_p}$  – матрица количества заданий  $i$ -х типов в пакетах, занимающих в  $\pi^l$   $j$ -е позиции;  $\mathbf{T}^{pl} = \|t_{ij}^{pl}\|_{N \times N_p}$  – матрицы моментов времени начала выполнения ПЗ  $i$ -х типов, занимающих  $j$ -е позиции в последовательностях  $\pi^l$ .

Постановка задачи оптимизации расписаний выполнения ПЗ в КС формулируется следующим образом. Параметры процесса выполнения ПЗ в КС: 1) количество типов заданий  $N$  и приборов  $L$ ; 2) матрицы:  $\mathbf{T}$  длительностей выполнения заданий и  $\mathbf{T}^l$  ( $l = \overline{1, L}$ ) длительностей переналадок приборов. Входными данными являются: вектор  $\mathbf{M}$  количества ПЗ и матрица  $\mathbf{A}$  составов ПЗ. Результатом являются: 1) матрица  $\mathbf{R}$  порядка выполнения ПЗ в КС; 2) матрицы  $\mathbf{T}^{pl}$  моментов времени начала выполнения ПЗ  $i$ -х типов, занимающих в  $\pi^l$   $j$ -е позиции.

Математическая модель процессов выполнения ПЗ в КС обеспечивает определение значений элементов  $t_{ij}^{pl}$  матриц  $\mathbf{T}^{pl}$  на основе матриц  $\mathbf{T}$ ,  $\mathbf{T}^l$  ( $l = \overline{1, L}$ ) и матрицы  $\mathbf{R}$  порядка их выполнения. Определение значений  $t_{ij}^{pl}$  реализуется с использованием значений простоев  $l$ -х приборов в ожидании начала выполнения ПЗ  $i$ -х типов в  $j$ -х позициях в  $\pi^l$  ( $l = \overline{1, L}$ ), обозначенных как  $Pr_{ij}^l$ . Выражения для вычисления значений  $Pr_{ij}^l$  получены в следующем виде:

$$-l = 1 : Pr_{ij}^1 = 0 \quad (i = \overline{1, N}; j = \overline{1, N_p}); \quad (1)$$

$$-l > 1 : Pr_{ij}^l = \max[0, (t_{ij}^{\pi^{(l-1)}} + r_{ij} \cdot t_{(l-1),i}) - (t_{i',j-1}^{pl} + r_{i',j-1} \cdot t_{i'}^l + t_{i',i}^l)], \quad (2)$$

где  $j = \overline{2, N_p}$ ;  $i'$  – тип заданий в пакете, занимающем в последовательностях  $\pi^l$   $(j-1)$ -ю позицию, предшествующую  $j$ -й позиции пакета  $i$ -го типа.

Выражения для вычисления  $t_{ij}^{pl}$  ( $l = \overline{1, L}$ ) получены в виде

$$-l = 1 : t_{i1}^{\pi^1} = 0 \quad (j = 1);$$

$$t_{ij}^{\pi^1} = t_{i',j-1}^{\pi^1} + r_{i',j-1} \cdot t_{i'}^1 + t_{i',i}^1 \quad (j = \overline{2, N_p}); \quad (3)$$

$$-l > 1 : t_{i1}^{pl} = \sum_{g=1}^{l-1} \sum_{s=1}^N t_{gs} \cdot r_{s1} \quad (j = 1);$$

$$t_{ij}^{pl} = t_{i',j-1}^{pl} + r_{i',j-1} \cdot t_{i'}^l + t_{i',i}^l + Pr_{ij}^l \quad (j = \overline{2, N_p}), \quad (4)$$

где  $i'$  интерпретируется по аналогии. В результате математическая модель процессов выполнения ПЗ в КС представлена выражениями (1)–(4).

Критерий оптимальности расписаний представляет собой момент времени окончания выполнения ПЗ на  $L$ -м приборе и определяется выражением вида  $\max_{j=1, N_p} (t_{i,j}^{pl} + r_{i,j} \cdot t_{L,i})$ . Задача оптимизации расписаний имеет вид

$$\min f(\mathbf{R}), \quad (5)$$

где  $f(\mathbf{R}) = \max_{j=1, N_p} (t_{i,j}^{pl} + r_{i,j} \cdot t_{L,i})$ .

Ограничения множества допустимых расписаний имеют вид:

1) ограничение на количество заданий  $i$ -го типа в пакетах в последовательностях  $\pi^l$  их выполнения на приборах КС:  $\sum_{j=1}^{N_p} r_{ij} = \sum_{h=1}^{m_i} a_{ih}$ ;

2) ограничение на общее количество заданий  $N$  типов в пакетах в последовательностях  $\pi^l$  их выполнения на приборах КС:  $\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{N_p} r_{ij} = \sum_{i=1}^N \sum_{h=1}^{m_i} a_{ih}$ .

### Алгоритм метода ветвей и границ оптимизации расписаний выполнения ПЗ в КС

Метод ветвей и границ использован для оптимизации порядка выполнения ПЗ на приборах КС (последовательностей  $\pi^l$  ( $l = \overline{1, L}$ ) реализации действий с ПЗ в КС). Для разработки алгоритма оптимизации расписаний выполнения ПЗ в КС, использующего МВГ, в рассмотрение введены обозначения:  $l_k$  – идентификатор вершины в дереве МВГ, формируемой на  $k$ -й итерации алгоритма (соответствующей размещению ПЗ  $i$ -го типа в  $j$ -й позиции в последовательностях  $\pi^l$  их выполнения в КС);  $G^{l_k}$  – множество решений, предусматривающих размещение одного  $h_i$ -го пакета  $i$ -го типа в  $j$ -й позиции в последовательностях  $\pi^l$  ( $l = \overline{1, L}$ ), соответствующее  $l_k$ -й вершине;  $O^{l_k}$  – нижняя оценка значений критерия  $f$ , вы-

числяемая для  $l_k$ -й вершины, соответствующей  $G^{l_k}$ ;  $O^b$  — верхняя оценка значений критерия  $f$ , соответствующая решению-рекорду;  $H_{i1}^{l_k}$  — множества номеров  $h_i$  ПЗ  $i$ -х типов ( $i = 1, N$ ), которые сопоставлены  $l_k$ -й вершине дерева МВГ в целях реализации процедуры ветвления (ПЗ размещаются в  $(j + 1)$ -й позиции в последовательностях  $\pi^l$  ( $l = 1, L$ ) их выполнения в КС ( $h_i \in H_{i1}^{l_k}$ ));  $H_{i2}^{l_k}$  — копии множеств  $H_{i1}^{l_k}$  номеров  $h_i$  ПЗ  $i$ -х типов ( $i = 1, N$ ), используемые при вычислении значения  $O^{l_k}$  и значения критерия  $f$  для решения, входящего в  $G^{l_k}$ ;  $\mathbf{R}^{l_k} = \left\| r_{ij}^{l_k} \right\|_{N \times N_p}$  — матрица количества заданий  $i$ -х типов в пакетах, занимающих  $j$ -е позиции в  $\pi^l$ , соответствующая  $l_k$ -й вершине дерева МВГ;  $\mathbf{R}_1^{l_k} = \left\| (r_{ij}^{l_k})_1 \right\|_{N \times N_p}$  — копия матрицы  $\mathbf{R}^{l_k}$ , модифицируемая при вычислении  $O^{l_k}$  и значения критерия  $f$  для решения, входящего в  $G^{l_k}$ ;  $\mathbf{T}_{l_k}^{\pi^l} = \left\| (t_{ij}^{l_k})_{\pi^l} \right\|_{N \times N_p}$  — матрицы моментов времени начала выполнения ПЗ  $i$ -х типов, занимающих  $j$ -е позиции в  $\pi^l$  ( $l = 1, L$ ), соответствующие  $l_k$ -й вершине дерева для вычисления  $O^{l_k}$  и значения критерия  $f$ ;  $\mathbf{I}, \mathbf{I}'$  — векторы типов заданий, в которых они упорядочены по убыванию средней длительности переналадок;  $N_{\mathbf{I}}$  и  $N_{\mathbf{I}'}$  — количество элементов в  $\mathbf{I}$  и  $\mathbf{I}'$ ;  $j'$  — номер позиции, в которой в  $\pi^l$  размещаются оставшиеся не добавленными задания разных типов при вычислении  $O^{l_k}$  и значения критерия  $f$ ;  $Q_k$  — множество номеров  $l_k$ -х вершин  $k$ -го уровня дерева.

Разработка алгоритма МВГ включает синтез процедур: 1) разбиение множеств решений  $G^{l_k}$  на подмножества  $G^{l_{k+1}}$  (ветвление  $l_k$ -х вершин дерева); 2) формирование решений по порядку выполнения ПЗ в  $\pi^l$ , входящих в множества  $G^{l_k}$ , для которых реализуется вычисление значений критерия  $f$ , используемых при определении значения оценки  $O^b$  и вычислении нижних оценок  $O^{l_k}$  для множеств  $G^{l_k}$ . Также требуется явно определить условия: 1) исключения бесперспективных множеств решений  $G^{l_k}$ , соответствующих  $l_k$ -м вершинам, из дальнейшего рассмотрения; 2) остановки алгоритма МВГ при получении оптимального решения.

Каждой вершине дерева соответствуют кортеж параметров  $\langle k, l_k, i, h_i, j \rangle$ , группа множеств  $H_{i1}^{l_k}$  ( $i = 1, N$ ), содержащих номера  $h_i$  пакетов  $i$ -х типов, которые будут включены в последовательности  $\pi^l$  на следующей итерации алгоритма (сопоставлены вершинам  $(k + 1)$ -го уровня дерева МВГ). Реализации ветвления предшествует формирование множеств  $H_{i1}^{l_k}$  ( $i = 1, N$ ) номеров ПЗ  $i$ -х типов, которые размещаются в  $\pi^l$  (множества  $H_{i1}^0$ , соответствующие корневой вершине  $G^0$ , имеют вид  $H_{i1}^0 = \{1, 2, \dots, m_i\}$ ). Процедура ветвле-

ния вершин дерева предполагает, что множество  $G^0$  корневой вершины разбивается на подмножества решений  $G^{l_1}$   $\left( l_1 = \overline{1, L_1}, L_1 = \sum_{i=1}^N m_i \right)$ , каждое

из которых предполагает размещение в  $(j = 1)$ -й позиции в последовательностях  $\pi^l$  одного  $h_i$ -го пакета  $i$ -го типа ( $i = 1, N$ ). Формируемым вершинам ставятся в соответствие кортежи  $\langle 1, l_1, i, h_i, 1 \rangle$

$\left( l_1 = \overline{1, L_1}, L_1 = \sum_{i=1}^N m_i, h_i = \overline{1, m_i}, i = 1, N \right)$ . После

формирования  $(k = 1)$ -го уровня дерева МВГ и сопоставления каждой его вершине определенного  $h_i$ -го ПЗ  $i$ -го типа ( $h_i = \overline{1, m_i}, i = 1, N$ ) реализуется модификация множеств  $H_{i1}^{l_1}$  ( $i = 1, N$ ).

Из множества  $H_{i1}^{l_1}$  для заданий  $i$ -го типа, пакет которых сопоставлен с  $l_1$ -й вершиной  $(k = 1)$ -го уровня дерева МВГ, исключается идентификатор пакета  $h_i$  ( $H_{i1}^{l_1} = H_{i1}^{l_1} \setminus \{h_i\}$ ). При реализации процедуры ветвления  $l_1$ -й вершины формируются  $l_2$ -е вершины на  $(k = 2)$ -м уровне, каждой из которых соответствует множество  $G^{l_2}$  решений, предусматривающих размещение в  $(j = 2)$ -й позиции в последовательностях  $\pi^l$   $h_i$ -х пакетов  $i'$ -х типов ( $i' \neq i$ ), идентификаторы которых принадлежат множествам  $H_{i1}^{l_1}$  ( $i = 1, N$ ), соответствующих  $l_1$ -й вершине, подвергающейся ветвлению. Для  $l_2$ -й вершины, полученной при ветвлении  $l_1$ -й вершины, множества  $H_{i1}^{l_2}$  ( $i = 1, N$ ) имеют вид: 1) если  $i = i'$ , то  $H_{i1}^{l_2} = H_{i1}^{l_1} \setminus \{h_i\}$ ; 2) если  $i \neq i'$ , то  $H_{i1}^{l_2} = H_{i1}^{l_1}$ . При ветвлении  $l_k$ -й вершины формируются  $(l_{k+1})$ -е вершины, каждой из которых соответствует кортеж  $\langle k + 1, l_{k+1}, i', h_i, j + 1 \rangle$  и множества  $H_{i1}^{l_{k+1}}$ . Каждой  $l_{k+1}$ -й вершине, получаемой в результате ветвления, сопоставлено множество решений  $G^{l_{k+1}}$ , предусматривающих размещение одного  $h_i$ -го пакета такого, что  $h_i \in H_{i1}^{l_k}$  в текущей  $(j + 1)$ -й позиции в последовательностях  $\pi^l$  их выполнения на приборах КС ( $H_{i1}^{l_k}$  — множества идентификаторов ПЗ, не размещенных в последовательностях  $\pi^l$ , соответствующих  $l_k$ -й вершине).

Способ вычисления оценки  $O^{l_k}$  и значения критерия  $f$  для решения, входящего в множество  $G^{l_k}$  (используемого при возможном обновлении значения верхней оценки  $O^b$ ), предусматривает формирование матрицы  $\mathbf{R}^{l_k}$  порядка выполнения  $h_i$ -х пакетов, добавленных в  $\pi^l$  к текущей  $k$ -й итерации алгоритма. Идентификаторы  $i$ -х типов заданий,  $h_i$ -х пакетов, номера позиций  $j$  пакетов в последовательностях  $\pi^l$ , входящих в кортежи  $\langle k, l_k, i, h_i, j \rangle$  для вершин, используются при инициализации значений элементов  $r_{ij}^{l_k}$  матрицы  $\mathbf{R}^{l_k}$  следующим образом:  $r_{ij}^{l_k} = a_{ih}$  ( $h = h_i, a_{ih}$  — элементы матрицы  $\mathbf{A}$ , соответствующие

количеству заданий в пакетах, занимающих  $j$ -е позиции в последовательностях  $\pi^l$ ). В итоге формируется матрица  $\mathbf{R}^{l_k}$ , соответствующая порядку выполнения ПЗ в  $\pi^l$  для рассматриваемой  $l_k$ -й вершины. Матрица  $\mathbf{R}^{l_k}$  передается при ветвлении  $l_k$ -й вершины дочерней ( $l_{k+1}$ -й) вершине в целях ее дополнения значением количества заданий в пакете, размещаемом в следующей ( $j + 1$ )-й позиции в  $\pi^l$ .

На основе матрицы  $\mathbf{R}^{l_k}$  формируется матрица  $\mathbf{R}_1^{l_k}$ , используемая при расчете  $O^{l_k}$  и значения критерия  $f$  для решения, входящего в  $G^{l_k}$ , используемого при обновлении оценки  $O^B$ . Алгоритм модификации матрицы  $\mathbf{R}_1^{l_k}$  для вычисления  $O^{l_k}$  и значения критерия  $f$  (для обновления  $O^B$ ) содержит шаги:

1. Присвоить счетчику  $N_{\Gamma}$  значение  $N: N_{\Gamma} = N$ . Присвоить  $j'$  значение позиции  $j$  из кортежа, соответствующего рассматриваемой  $l_k$ -й вершине:  $j' = j$ .

2. Если  $N_{\Gamma} = 0$ , то перейти на п. 4. Если  $N_{\Gamma} \neq 0$ , то определить номер  $s'$  элемента в векторе  $\mathbf{I}'$ , соответствующего типу заданий  $i'_s: s' = \min s$ . В соответствии с  $s'$  определить в  $\mathbf{I}'$  тип оставшихся заданий, которые размещаются в позиции  $j'$  в  $\pi^l: i = i'_s$ . Удалить  $i'_s$  из вектора  $\mathbf{I}'$ , модифицировать  $N_{\Gamma}: N_{\Gamma} = N_{\Gamma} - 1$ .

3. Модифицировать номер  $j'$  позиции в последовательностях  $\pi^l$ , в которой размещаются оставшиеся задания  $i$ -го типа:  $j' = j' + 1$ . Инициализировать элемент  $(r_{ij'})_1^{l_k}$  матрицы  $\mathbf{R}_1^{l_k}: (r_{ij'})_1^{l_k} = n^i - \sum_{s=1}^{j'} (r_{is})_1^{l_k}$ . Перейти на п. 2.

4. Останов алгоритма.

В матрице  $\mathbf{R}_1^{l_k}$  элементы столбцов с 1-го по  $j$ -й соответствуют ПЗ, добавленным в эти последовательности  $\pi^l$  при реализации процедуры ветвления  $l_k$ -х вершин. Элементы столбцов с индексами, большими  $j$ , формируются с учетом размещения в  $\pi^l$  оставшихся заданий  $i$ -х типов ( $i = 1, N$ ), не размещенных в них до этого. Процедура вычисления оценки  $O^{l_k}$  предполагает реализацию этапов:

1. Расчет значений элементов матриц  $\mathbf{T}_{l_k}^{pl}$  ( $l = \overline{1, L}$ ) для ПЗ, размещенных в  $\pi^l$  в позициях с 1-ю по  $j$ -ю, где  $j$  – элемент кортежа  $\langle k, l_k, i, h_i, j \rangle$  для  $l_k$ -й вершины, для которой вычисляется оценка  $O^{l_k}$ . Для этого предусматривается использование матрицы  $\mathbf{R}_1^{l_k}$  и выражений (1)–(4).

2. Расчет значений элементов матрицы  $\mathbf{T}_{l_k}^{pl}$  (для  $L$ -го прибора) для «остатков» заданий, размещенных в  $\pi^l$  в позициях, больших  $j$ -й. Для этого предусматривается использование матрицы  $\mathbf{R}_1^{l_k}$ , а также формулы вида

$$(t_{ij+1})^{pl} = (t_{i,j})^{pl} + r_{i,j} \cdot t_{L,i'} + t_{i,j}^L. \quad (6)$$

На основе значений элементов матрицы  $\mathbf{T}_{l_k}^{pl}$  нижняя оценка  $O^{l_k}$  для множества  $G^{l_k}$  определяется как момент времени окончания выполнения ПЗ на  $L$ -м приборе КС, а также оставшихся не размещенными в  $\pi^l$  заданий разных типов:

$$O^{l_k} = (t_{i,N_p})^{pl} + r_{i,N_p} \cdot t_{L,i}, \quad (7)$$

где  $N_p$  – позиция последнего ПЗ  $i$ -го типа в  $\pi^l$  на  $L$ -м приборе.

Способ формирования матрицы  $\mathbf{R}_1^{l_k}$ , способ расчета значений элементов матриц  $\mathbf{T}_{l_k}^{pl}$  и  $\mathbf{T}_{l_k}^{pl}$  соответствуют размещению в последовательностях  $\pi^l$  всех ПЗ для вершин, лежащих на пути из нулевой в рассматриваемую  $l_k$ -ю вершину, и размещению всех оставшихся заданий в последовательности  $\pi^l$  на  $L$ -м приборе.

Обновление значения верхней оценки  $O^B$  обеспечивается расчетом значения критерия  $f$  для сформированного порядка выполнения ПЗ в  $\pi^l$  ( $l = \overline{1, L}$ ), которому соответствует матрица  $\mathbf{R}_1^{l_k}$ , синтезированная с использованием приведенного выше способа (для каждой  $l_k$ -й вершины). Вычисление значения  $f$  для решения, представленного матрицей  $\mathbf{R}_1^{l_k}$ , обеспечивается определением значений элементов  $(t_{ij})_{l_k}^{pl}$  матриц  $\mathbf{T}_{l_k}^{pl}$  ( $l = \overline{1, L}$ ) в соответствии с выражениями (1)–(4). Значение критерия  $f$  для расписания выполнения ПЗ в КС, характеризуемого матрицей  $\mathbf{R}_1^{l_k}$ , определяется выражением

$$f(\mathbf{R}_1^{l_k}) = (t_{i,N_p})^{pl} + r_{i,N_p} \cdot t_{L,i}, \quad (8)$$

где  $i$  – тип заданий, пакет которых занимает последнюю  $N_p$ -ю позицию в последовательностях  $\pi^l$  ( $l = \overline{1, L}$ ). При формировании  $l_k$ -х вершин на некотором  $k$ -м уровне дерева МВГ пересчет верхней оценки и обновление рекорда реализуется при условии  $\min f(\mathbf{R}_1^{l_k}) < O^B$  (где  $\min f(\mathbf{R}_1^{l_k})$  определяется среди значений критерия  $f$ , соответствующих решениям из множеств  $G^{l_k}$  для  $l_k$ -х вершин  $k$ -го уровня дерева).

Условие исключения дальнейшего ветвления  $l_k$ -х вершин дерева МВГ в целях сокращения мощности множества расписаний выполнения ПЗ в КС (отбрасывания бесперспективных направлений) имеет вид  $O^{l_k} \geq O^B$ , где  $O^{l_k}$  – нижняя оценка для множества решений  $G^{l_k}$ , соответствующего  $l_k$ -й вершине.

Условие останова алгоритма предполагает, что если для решения по порядкам выполнения ПЗ в КС, характеризуемого матрицей  $\mathbf{R}_1^{l_k}$ , получено значение критерия  $f(\mathbf{R}_1^{l_k})$ , для которого выполняется условие  $f(\mathbf{R}_1^{l_k}) = O^{l_k} \leq O^B$  ( $l_k$  – индексы других вершин рассматриваемого  $k$ -го уровня

дерева МВГ,  $l'_k \neq l_k$ ), то это решение является оптимальным, и дальнейший поиск прекращается.

Вычисление верхней оценки  $O^B$  и определение решения-рекорда для множества  $G^0$  предусматривает, что сформированы: 1) множества номеров пакетов заданий  $i$ -х типов  $H_{i1}^0$  ( $H_{i1}^0 = \{1, 2, \dots, m_i\}$  ( $i = 1, N$ )); 2) векторы  $\mathbf{I}$  и  $\mathbf{I}'$ , элементами которых являются типы заданий, упорядоченные по неубыванию средней длительности переналадок приборов. Для сформированной матрицы  $\mathbf{R}_1^0$  с использованием выражений (1)–(4) определяются значения элементов матриц  $\mathbf{T}_0^{pl}$  ( $l = \overline{1, L}$ ). На основе значений элементов матрицы  $\mathbf{T}_0^{pl}$  идентифицируется значение критерия  $f$  для множества  $G^0$ , которое выступает в качестве верхней оценки  $O^B$ , соответствующее ему решение является рекордом.

Алгоритм МВГ, позволяющий реализовать оптимизацию расписаний выполнения ПЗ на приборах КС, имеет следующий порядок шагов:

1. Для корневой вершины дерева МВГ (множества  $G^0$ ) сформировать множества  $H_{i1}^0$  ( $i = \overline{1, N}$ ) в виде  $H_{i1}^0 = \{1, 2, \dots, m_i\}$ . Сформировать вектор типов заданий  $\mathbf{I}$ . Инициализировать вектор  $\mathbf{I}'$ :  $\mathbf{I}' = \mathbf{I}$ . Инициализировать элементы  $r_{ij}^0$  матрицы  $\mathbf{R}^0$  значениями 0. Инициализировать матрицу  $\mathbf{R}_1^0$ :  $\mathbf{R}_1^0 = \mathbf{R}^0$ . Выполнить процедуру модификации матрицы  $\mathbf{R}_1^0$ . На основе матрицы  $\mathbf{R}_1^0$  с использованием выражений (1)–(4) определить значения элементов  $(t_{ij})_0^{pl}$  матриц  $\mathbf{T}_0^{pl}$ . На основе матрицы  $\mathbf{T}_0^{pl}$  вычислить значение критерия  $f$  по формуле (8), соответствующее множеству  $G^0$ . Инициализировать матрицу  $\mathbf{R}^B$ , соответствующую решению-рекорду:  $\mathbf{R}^B = \mathbf{R}_1^0$ , оценку  $O^B$  инициализировать значением критерия  $f$ .

2. Задать значение номера  $k$  итерации алгоритма равным 1 ( $k = 1$ ). Инициализировать множество  $Q_1$ :  $Q_1 \neq \emptyset$ . Выполнить формирование дочерних  $l_1$ -х вершин дерева МВГ, используя для этого множества  $H_{i1}^0$  ( $i = \overline{1, N}$ ). Каждой сформированной вершине дерева МВГ поставить в соответствие кортеж вида  $\langle 1, l_1, i, h_i, 1 \rangle$ . Добавить идентификаторы сформированных  $l_1$ -х вершин, полученных в результате ветвления, в множество  $Q_1$ :  $Q_1 = Q_1 \cup \{l_1\}$   $\left( l_1 = \overline{1, L}, L_1 = \sum_{i=1}^N m_i, |Q_1| = L_1 \right)$ .

Для каждой дочерней  $l_1$ -й вершины выполнить инициализацию множеств  $H_{i1}^l$ , используя множества  $H_{i1}^0$  корневой вершины. Для каждой  $l_1$ -й вершины выполнить модификацию множества  $H_{i1}^l$ , соответствующего типу заданий  $i$  из кортежа  $\langle 1, l_1, i, h_i, 1 \rangle$ :  $H_{i1}^l = H_{i1}^l \setminus \{h_i\}$ , где  $h_i$  – номер пакета, размещенного в  $(j = 1)$ -й позиции в  $\pi^l$  ( $l = \overline{1, L}$ ). Инициализировать векторы  $\mathbf{I}$  и  $\mathbf{I}'$ . Для каждой  $l_1$ -й вершины на основе матрицы  $\mathbf{R}^0$

сформировать матрицы  $\mathbf{R}^l$ , а затем их модифицировать путем инициализации элементов  $r_{i1}^l$  значением элемента  $a_{i,h_i}$  матрицы  $\mathbf{A}$ , индексы которого соответствуют значениям элементов кортежа для этой вершины. На основе матрицы  $\mathbf{R}^l$  сформировать матрицу  $\mathbf{R}_1^l$ . Для каждой  $l_1$ -й вершины с использованием множеств  $H_{i1}^l$  ( $i = \overline{1, N}$ ) путем реализации соответствующей процедуры модифицировать матрицу  $\mathbf{R}_1^l$ . Для каждой  $l_1$ -й вершины на основе матрицы  $\mathbf{R}_1^l$  определить значение нижней оценки  $O^l$  для множества  $G^l$  с использованием рассмотренной процедуры. Для каждой  $l_1$ -й вершины на основе сформированной матрицы  $\mathbf{R}_1^l$  с использованием выражений (1)–(4) определить значения элементов  $(t_{ij})_l^{pl}$  матриц  $\mathbf{T}_1^{pl}$  ( $l = \overline{1, L}$ ), а также значение  $f(\mathbf{R}_1^l)$  для решения, входящего в множество  $G^l$ . Если для  $l_1$ -х вершин выполняется условие  $\min f(\mathbf{R}_1^l) < O^B$ , то верхняя оценка  $O^B$  модифицируется ( $O^B = \min f(\mathbf{R}_1^l)$ ).

3. Если для одной из  $l_k$ -х вершин  $k$ -го уровня дерева выполняется условие  $f(\mathbf{R}_1^k) = O^k \leq O^B$  ( $O^k$  – нижние оценки  $l'_k$ -х вершин, принадлежащих  $k$ -му уровню дерева), то инициализировать матрицу  $\mathbf{R}^B$ :  $\mathbf{R}^B = \mathbf{R}_1^k$ . Перейти на п. 19. Если условие  $f(\mathbf{R}_1^k) = O^k \leq O^B$  не выполняется ни для одной  $l_k$ -й вершины на  $k$ -м уровне дерева МВГ, то идентифицировать  $l_k$ -е вершины ( $l_k \in Q_k$ ) такие, что  $O^k \geq O^B$ . Идентификаторы  $l_k$ -х вершин  $k$ -го уровня дерева МВГ, для которых  $O^k \geq O^B$ , исключить из множества  $Q_k$ :  $Q_k = Q_k \setminus \{l_k\}$ . Сформировать множество  $Q_k^B$  вершин – кандидатов на ветвление:  $Q_k^B = Q_k$ .

4. Если  $Q_k^B = \emptyset$ , то перейти на п. 18. Если  $Q_k^B \neq \emptyset$ , то среди  $l_k$ -х вершин ( $l_k \in Q_k^B$ ) выбрать  $l_k^B$ -ю вершину, для которой  $O^{l_k^B} = \min(O^{l_k} | l_k \in Q_k^B)$ .

5. Модифицировать множество  $Q_k^B$ :  $Q_k^B = Q_k^B \setminus \{l_k^B\}$ . Если для  $l_k^B$ -й вершины  $\bigcup_{i=1}^N H_{i1}^{l_k^B} = \emptyset$ , то перейти на п. 4. Если  $\bigcup_{i=1}^N H_{i1}^{l_k^B} \neq \emptyset$ , то перейти на п. 6.

6. С использованием множеств  $H_{i1}^{l_k^B}$  для  $l_k^B$ -й вершины сформировать дочерние вершины (количество сформированных дочерних вершин определяется как  $\sum_{i=1}^N |H_{i1}^{l_k^B}|$ ). Модифицировать множество  $H_{i1}^{l_k^B}$ , соответствующее типу  $i$  заданий и номеру  $h_i$  пакета заданий в кортеже  $\langle k, l_k^B, i, h_i, j \rangle$  для  $l_k^B$ -й вершины следующим образом:  $H_{i1}^{l_k^B} = H_{i1}^{l_k^B} \setminus \{h_i\}$ .

7. Инициализировать идентификатор (номер)  $l_{k+1}$ -й вершины на  $(k + 1)$ -м уровне дерева МВГ

значением 1:  $l_{k+1} = 1$ . Инициализировать  $Q_{k+1}$ :  $Q_{k+1} = \emptyset$ .

8. Извлечь идентификатор  $l'_k$ -й вершины из множества  $Q_k$  в соответствии с условием  $l'_k = \min(l_k | l_k \in Q_k)$ . Исключить идентификатор  $l'_k$ -й вершины из множества  $Q_k$ :  $Q_k = Q_k \setminus \{l'_k\}$ . Если  $l'_k = l_k^B$ , то перейти на п. 10. Если  $l'_k \neq l_k^B$ , то присвоить рассматриваемой вершине идентификатор  $l_{k+1}$  вершины на  $(k + 1)$ -м уровне и поставить ей в соответствие кортеж параметров вида  $\langle k + 1, l_{k+1}, i, h_i, j \rangle$ , в котором значения параметров  $i, h_i, j$  соответствуют значениям параметров из кортежа  $l'_k$ -й вершины. Поставить в соответствие  $l_{k+1}$ -й вершине множества  $H_{i1}^{l_{k+1}}$  ( $i = 1, N$ ) следующим образом:  $H_{i1}^{l_{k+1}} = H_{i1}^{l_k}$  ( $i = 1, N$ ). Инициализировать матрицу  $R^{l_{k+1}}$  для  $l_{k+1}$ -й вершины:  $R^{l_{k+1}} = R^{l_k}$ . Дополнить множество  $Q_{k+1}$  номером  $l_{k+1}$ -й вершины:  $Q_{k+1} = Q_{k+1} \cup \{l_{k+1}\}$ . Модифицировать идентификатор  $l_{k+1}$  вершины на  $(k + 1)$ -м уровне дерева МВГ:  $l_{k+1} = l_{k+1} + 1$ .

9. Если  $l'_k < l_k^B$ , то перейти на п. 8.

10. Исключить идентификатор  $l_k^B$ -й вершины из  $Q_k$ :  $Q_k = Q_k \setminus \{l_k^B\}$ . Инициализировать множества  $H_{i2}^{l_k^B}$  ( $i = 1, N$ ) для  $l_k^B$ -й вершины:  $H_{i2}^{l_k^B} = H_{i1}^{l_k^B}$  ( $i = 1, N$ ). Задать тип заданий  $i'$ , пакеты которых будут сопоставляться с вершинами, полученными в результате ветвления, равным 1. Модифицировать номер позиции  $j$  ПЗ из кортежа  $\langle k, l_k^B, i, h_i, j \rangle$ , соответствующего  $l_k^B$ -й вершине:  $j = j + 1$ .

11. Если для  $i'$ -го типа заданий выполняется условие  $i' = i$  (где  $i$  – тип заданий в кортеже, соответствующем  $l_k^B$ -й вершине), то перейти на п. 14.

12. Если для множества  $H_{i2}^{l_k^B}$ , соответствующего рассматриваемому  $i'$ -му типу заданий, выполняется условие  $H_{i2}^{l_k^B} = \emptyset$ , то перейти на п. 14. Если  $H_{i2}^{l_k^B} \neq \emptyset$ , то извлечь из  $H_{i2}^{l_k^B}$  номер пакета, размещаемого в  $j$ -й позиции в последовательностях  $\pi^l$  их выполнения на приборах КС, модифицировать множество  $H_{i2}^{l_k^B}$ :  $h_{i'} = \min\{h_i | h_i \in H_{i2}^{l_k^B}\}$ ,  $H_{i2}^{l_k^B} = H_{i2}^{l_k^B} \setminus \{h_{i'}\}$ . С использованием значений: номера  $l_{k+1}$ -й вершины дерева МВГ, идентификатора типа заданий  $i'$ , идентификатора пакета заданий  $h_{i'}$ , номера  $j$  позиции пакета в последовательностях  $\pi^l$  – инициализировать параметры кортежа вершины, являющейся дочерней  $l_k^B$ -й вершине:  $\langle k + 1, l_{k+1}, i', h_{i'}, j \rangle$ . Инициализировать матрицу  $R^{l_{k+1}}$ , соответствующую добавленной вершине:  $R^{l_{k+1}} = R^{l_k}$ . Модифицировать матрицу  $R^{l_{k+1}}$  путем инициализации элемента  $r_{i'j}^{l_{k+1}} : r_{i'j}^{l_{k+1}} = a_{i'h_{i'}}$  ( $a_{i'h_{i'}}$  – соответствующий элемент матрицы  $A$ ). Дополнить множество  $Q_{k+1}$ :

$Q_{k+1} = Q_{k+1} \cup \{l_{k+1}\}$ . Инициализировать множества  $H_{i1}^{l_{k+1}}$  для  $l_{k+1}$ -й вершины:  $H_{i1}^{l_{k+1}} = H_{i1}^{l_k}$ .

13. Модифицировать номер вершины:  $l_{k+1} = l_{k+1} + 1$ . Перейти на п. 12.

14. Модифицировать идентификатор  $i'$  типа заданий, пакеты которых добавляются в последовательности  $\pi^l$  в рассматриваемую  $j$ -ю позицию:  $i' = i' + 1$ . Если  $i' \leq N$ , то модифицировать значение идентификатора  $l_{k+1}$  вершины на  $(k + 1)$ -м уровне дерева МВГ:  $l_{k+1} = l_{k+1} + 1$ , перейти на п. 12. Если  $i' > N$ , то модифицировать идентификатор  $l_{k+1}$ -й вершины:  $l_{k+1} = l_{k+1} + 1$ . Перейти на п. 15.

15. Извлечь идентификатор  $l'_k$ -й вершины из множества  $Q_k$  в соответствии с условием  $l'_k = \min(l_k | l_k \in Q_k)$ . Исключить идентификатор  $l'_k$ -й вершины из множества  $Q_k$ :  $Q_k = Q_k \setminus \{l'_k\}$ . Присвоить вершине идентификатор  $l_{k+1}$  и поставить ей в соответствие кортеж параметров  $\langle k + 1, l_{k+1}, i, h_i, j \rangle$ , в котором значения параметров  $i, h_i, j$  соответствуют значениям кортежа параметров  $l'_k$ -й вершины. Поставить в соответствие рассматриваемой  $l_{k+1}$ -й вершине множества  $H_{i1}^{l_{k+1}}$  ( $i = 1, N$ ):  $H_{i1}^{l_{k+1}} = H_{i1}^{l_k}$ . Инициализировать матрицу  $R^{l_{k+1}}$ :  $R^{l_{k+1}} = R^{l_k}$ . Дополнить множество  $Q_{k+1}$  номером  $l_{k+1}$ -й вершины:  $Q_{k+1} = Q_{k+1} \cup \{l_{k+1}\}$ .

16. Если  $Q_{k+1} \neq \emptyset$ , то модифицировать значение идентификатора  $l_{k+1}$  вершины:  $l_{k+1} = l_{k+1} + 1$ , перейти на п. 15. Если  $Q_{k+1} = \emptyset$ , то перейти на п. 17.

17. Модифицировать значение идентификатора  $k$  текущего рассматриваемого уровня дерева МВГ:  $k = k + 1$ . Инициализировать векторы  $I$  и  $I'$ . Для каждой  $l_k$ -й вершины инициализировать матрицы  $R_1^{l_k}$  на основе матриц  $R^k : R_1^{l_k} = R^k$ . Для каждой  $l_k$ -й вершины с использованием множеств  $H_{i1}^{l_k}$  ( $i = 1, N$ ) модифицировать матрицу  $R_1^{l_k}$  и определить значение нижней оценки  $O^{l_k}$  для множества  $G^{l_k}$ . Для каждой  $l_k$ -й вершины на основе сформированной матрицы  $R_1^{l_k}$  с использованием выражений (1)–(4) вычислить значения элементов матриц  $T_{l_k}^{pl}$  ( $l = 1, L$ ), а также значение  $f(R_1^{l_k})$  для решения, входящего в множество  $G^{l_k}$ . Если для  $l_k$ -х вершин выполняется условие  $\min f(R_1^{l_k}) < O^B$ , то модифицировать значение  $O^B$ :  $O^B = \min f(R_1^{l_k})$ . Перейти на п. 3.

18. Для каждой  $l_k$ -й вершины  $k$ -го уровня ( $l_k \in Q_k$ ) на основе сформированной матрицы  $R^{l_k}$  с использованием выражений (1)–(4) вычислить значения элементов  $(t_{ij})_{l_k}^{pl}$  матриц  $T_{l_k}^{pl}$  ( $l = 1, L$ ), а также значение  $f(R^{l_k})$  для решения, которому соответствует эта матрица. Среди решений по порядкам выполнения ПЗ на приборах КС, сопоставленных  $l_k$ -м вершинам ( $l_k \in Q_k$ ), идентифицировать решение, для которого

$R^{l_k^*} = \arg \min f(R^{l_k})$ , и соответствующую ему  $l_k^*$ -ю вершину. С использованием  $R^{l_k^*}$  инициализировать решение-рекорд  $R^B$ :  $R^B = R^{l_k^*}$ .

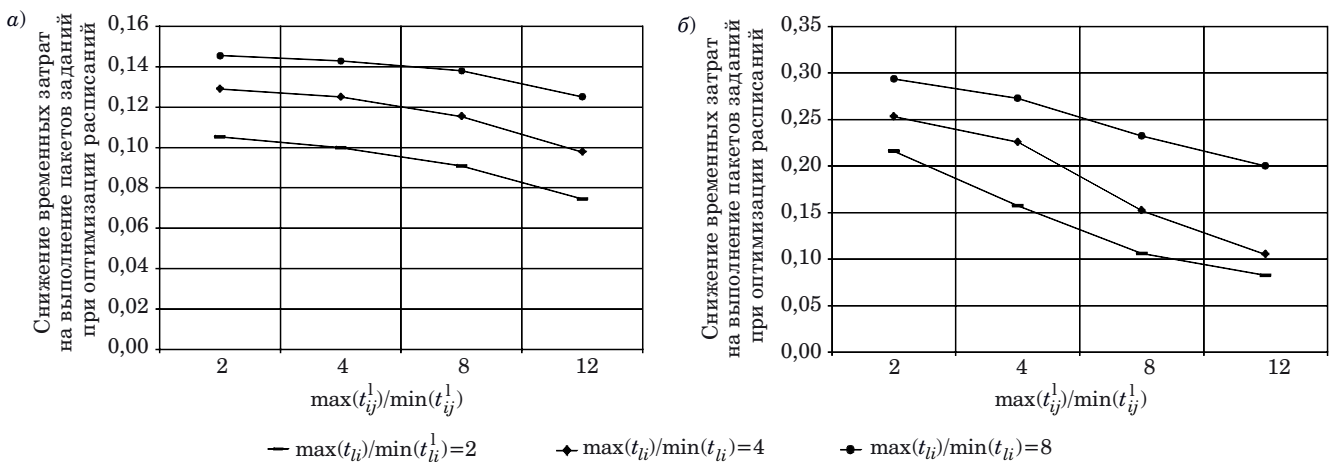
19. Останов алгоритма.

**Исследование эффективности применения алгоритма МВГ при оптимизации расписаний выполнения ПЗ в КС**

Для исследования эффективности применения МВГ при оптимизации расписаний выполнения ПЗ в КС использованы параметры: неоднородность длительностей выполнения заданий —  $\max(t_{ij})/\min(t_{ij})$ ; неоднородность длительностей переналадок —  $\max(t_{ij}^l)/\min(t_{ij}^l)$ . Значения  $\max(t_{ij}^l)/\min(t_{ij}^l) \in \{1, 2, 4, 8, 12\}$ ; значения  $\max(t_{ij})/\min(t_{ij}) \in \{1, 2, 4, 8\}$ . Значения  $n \in \{2, 3, 5\}$ , значения  $m_i \in \{2, 4, 6\}$ ,  $n^i = 6$  при  $m_i = 2$ ,  $n^i = 12$  при  $m_i = 4$ ,  $n^i = 24$  при  $m_i = 6$ . Значение  $L = 3$ . В качестве результатов фиксируются зависимости значений отношения  $f_{с.в.в.п} = (f_{фикс} - f_{о.р.п})/f_{фикс}$  от входных параметров ( $f_{с.в.в.п}$  — снижение времени выполнения пакетов при оптимизации расписаний по сравнению с фиксированными ПЗ,  $f_{фикс}$  — значение критерия для фиксированных ПЗ,  $f_{о.р.п}$  — значение критерия при оптимизации расписаний пакетов с использованием МВГ). Графики, отображающие зависимость значений  $f_{с.в.в.п}$  от значений входных параметров задачи, представлены рис. 1–3. Вычислительная сложность алгоритма оценена как  $O(n \cdot m_i^2)$ , где  $n$  — количество типов заданий,  $m_i$  — количество пакетов каждого типа ( $i = \overline{1, N}$ ). Оценка требуемой памяти для реализации алгоритма —  $O(nm_i)$ .

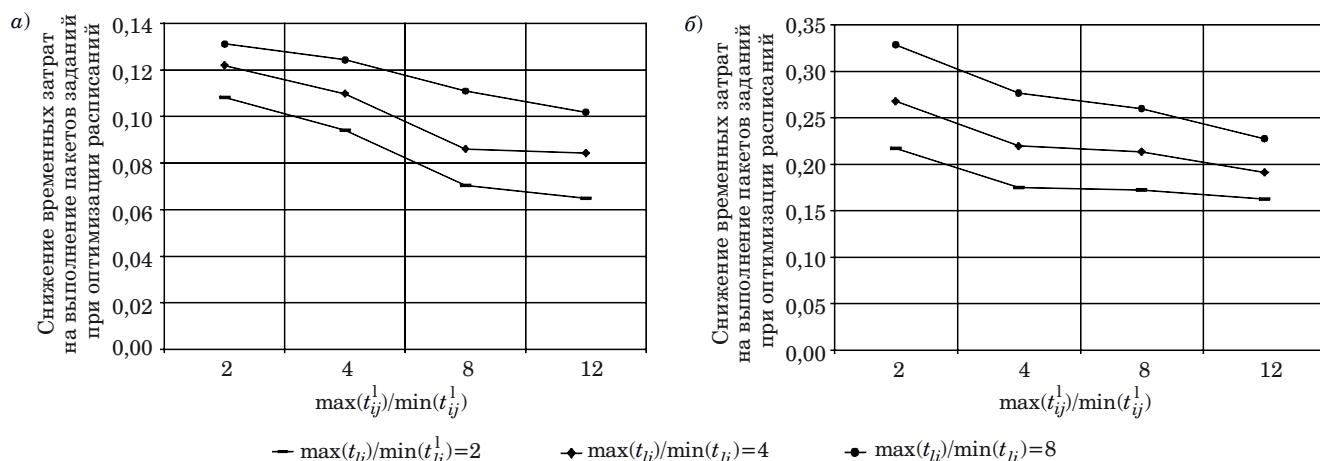
Интервалы времени получения результатов не превышают: при  $n \in \{2, 3\}$  и  $m_i = 2$  — 1 мин; при  $n \in \{2, 3\}$  и  $m_i = 4$  — 3 мин; при  $n = 2$  и  $m_i = 6$ ,  $n = 5$  и  $m_i = 2$  — 10 мин. Программа реализована с использованием языка С# в среде разработки Visual Studio. Анализ результатов показал, что использование МВГ позволяет снизить время выполнения ПЗ при оптимизации расписаний на 30–35 % по сравнению с не оптимизируемыми решениями. При  $n = 2$  МВГ формирует оптимальное решение, соответствующее решению, полученному при полном переборе. При  $n = 3$  точность приближения решения к глобально оптимальному составила 0,9–0,95.

Применение разработанного алгоритма метода МВГ оптимизации расписаний выполнения ПЗ в КС достаточно обширно. В частности, целесообразно его применение в системах оптимизации расписаний (планирования) многостадийных процессов обработки партий деталей в многономенклатурных механообрабатывающих производствах (планирование процессов реализуется с учетом динамически поступающих заказов на выпуск продукции), а также при оптимизации расписаний (планировании вычислительных процессов) обработки пакетов данных дистанционного зондирования Земли в составе web-ориентированных сервисов мониторинга ее поверхности в целях идентификации наличия на ней негативных природных явлений и техногенных воздействий на окружающую среду, их характеристик и условий распространения [21] (массивы значений отражательной способности земной поверхности, включаемые в пакеты, получены строго в одних и тех же каналах от одного и того же искусственного спутника Земли и соответствуют областям на ее поверхности



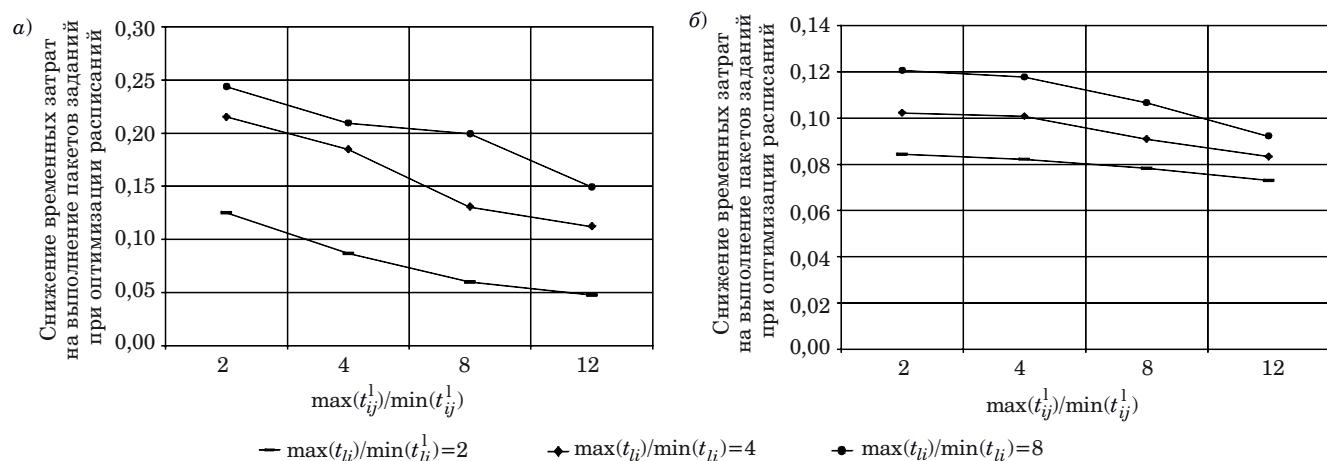
■ **Рис. 1.** Уменьшение времени выполнения пакетов заданий при оптимизации расписаний для: а —  $n = 2$ ,  $m_i = 2$  ( $i = \overline{1, 2}$ ); б —  $n = 2$ ,  $m_i = 4$  ( $i = \overline{1, 2}$ )  
 ■ **Fig. 1.** Decrease of the time of execution of the batches of tasks when optimizing schedules for: а —  $n = 2$ ,  $m_i = 2$  ( $i = \overline{1, 2}$ ); б —  $n = 2$ ,  $m_i = 4$  ( $i = \overline{1, 2}$ )





■ **Рис. 2.** Уменьшение времени выполнения пакетов заданий при оптимизации расписаний для: а –  $n = 2$ ,  $m_i = 6$  ( $i = \overline{1, 2}$ ); б –  $n = 3$ ,  $m_i = 2$  ( $i = \overline{1, 3}$ )

■ **Fig. 2.** Decrease of the time of execution of the batches of tasks when optimizing schedules for: а –  $n = 2$ ,  $m_i = 6$  ( $i = \overline{1, 2}$ ); б –  $n = 3$ ,  $m_i = 2$  ( $i = \overline{1, 3}$ )



■ **Рис. 3.** Уменьшение времени выполнения пакетов заданий при оптимизации расписаний для: а –  $n = 3$ ,  $m_i = 4$  ( $i = \overline{1, 3}$ ); б –  $n = 5$ ,  $m_i = 2$  ( $i = \overline{1, 5}$ )

■ **Fig. 3.** Decrease of the time of execution of the batches of tasks when optimizing schedules for: а –  $n = 3$ ,  $m_i = 4$  ( $i = \overline{1, 3}$ ); б –  $n = 5$ ,  $m_i = 2$  ( $i = \overline{1, 5}$ )

одинакового размера). Составы партий деталей, выпускаемых на приборах КС, определяются заказами от потребителей, поступающими на предприятие. Оптимизация расписаний обработки партий деталей в КС позволяет значительно сократить время, затрачиваемое на их выпуск. Оптимизация расписаний выполнения ПЗ на обработку массивов данных дистанционного зондирования Земли позволяет значительно сократить время отклика на запросы пользователей по определению в заданных ими областях на земной поверхности наличия на ней негативных природных явлений и техногенных воздействий на окружающую среду, их характеристик и условий распространения [21].

## Заклучение

Современные методы построения расписаний выполнения ПЗ предусматривают, что обрабатывающие системы включают ВРМ. Эти методы характеризуются ограничением на размерность задач, а также невозможностью гарантированного получения решения, приближающегося к глобально оптимальному. Алгоритмы МВГ не ориентированы на оптимизацию расписаний многостадийных процессов выполнения ПЗ в КС. В связи с этим разработана математическая модель процессов выполнения ПЗ в КС, способы вычисления нижней и верхней оценок множеств решений, способ ветвления вершин в дереве

МВГ, а также непосредственно алгоритм МВГ для оптимизации расписаний выполнения ПЗ в КС. Использование разработанного алгоритма МВГ для оптимизации расписаний выполнения

ПЗ позволяет до 35 % сократить временные затраты на реализацию действий с ними по сравнению с не оптимизируемыми расписаниями.

## Литература

1. **Кротов К. В.** Комплексный метод определения эффективных решений по составам партий данных и расписаниям их обработки в конвейерных системах. *Вычислительные технологии*, 2018, т. 23, № 3, с. 58–76.
2. **Кротов К. В.** Математическая модель и алгоритм метода ветвей и границ для оптимизации решений по составам пакетов в многостадийных системах. *Информатика и автоматизация*, 2022, т. 21, № 1, с. 5–40. doi:10.15622/ia.2022.21.1
3. **Shaoxiang Z., Naiming X., Qiao W.** Single batch machine scheduling with dual setup times for autoclave molding manufacturing. *Computers and Operations Research*, 2021, vol. 133, iss. C. doi:10.1016/j.cor.2021.105381
4. **Ogun B., Cigdem A.-U.** Mathematical models for a batch scheduling problem to minimize earliness and tardiness. *Journal of Industrial Engineering and Management*, 2018, vol. 11, iss. 3, pp. 390–405. doi:10.3926/jiem.2541
5. **Li X. L., Wang Y.** Scheduling batch processing machine using max–min ant system algorithm improved by a local search method. *Mathematical Problems in Engineering*, 2018, vol. 2018, Art. ID: 3124182. doi:10.1155/2018/3124182
6. **Jin M., Liu X., Luo W.** Single-machine parallel-batch scheduling with nonidentical job sizes and rejection. *Mathematics*, 2020, vol. 8, Art. ID: 258. doi:10.3390/math8020258
7. **Fan J.** Integrated scheduling problem on a single bounded batch machine with an unavailability constraint. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 2020, vol. 12, Art. ID: 8625849. doi:10.1155/2020/8625849
8. **Halim A. H., Hidayat N. P. A., Aribowo W.** Single item batch-scheduling flow shop with m batch-processing machines to minimize total actual flow time. *International Journal of Technology*, 2022, vol. 13, no. 4, pp. 816–826. doi:https://doi.org/10.14716/ijtech.v13i4.4869
9. **Hertrich Ch., Weiß Ch., Ackermann H., Heydrich S., Krumke S. O.** Scheduling a proportionate flow shop of batching machines. *Journal of Scheduling*, 2020, vol. 23, pp. 575–593. doi:10.1007/s10951-020-00667-2
10. **Mauluddin Yu.** Three-stage flow-shop scheduling model with batch processing machine and discrete processing machine. *The 3rd Annual Applied Science and Engineering Conf.*, 2018, vol. 197, Art. ID: 14002. doi:10.1051/mateconf/201819714002
11. **Shahvari O., Logendran R.** A comparison of two stage-based hybrid algorithms for a batch scheduling problem in hybrid flow shop with learning effect. *International Journal of Production Economics*, 2018, vol. 195, pp. 227–248.
12. **Suryadhini P. P., Sukoyo S., Suprayogi S., Halim A. H.** A batch scheduling model for a three-stage flow shop with job and batch processors considering a sampling inspection to minimize expected total actual flow time. *Journal of Industrial Engineering and Management*, 2021, vol. 14, no. (3), pp. 520–537. doi:10.3926/jiem.3438
13. **Lévai T., Németh F., Raghavan B., Rétvári G.** Batching: batch-scheduling data flow graphs with service-level objectives. *17th USENIX Symp. on Networked Systems Design and Implementation (NSDI'20)*, 2020, February 25–27, Santa Clara, CA, USA, pp. 633–649.
14. **Song L., Liu Ch., Shi H., Zhu J.** An improved immune genetic algorithm for solving the flexible job shop scheduling problem with batch processing. *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 2022, Art. ID: 2856056. doi:10.1155/2022/2856056
15. **Indrapriyatna A. S., Triha H. A.** Modified branch and bound algorithm for batch scheduling in discrete manufacture system. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2018, vol. 319, Art. ID: 012074. doi:10.1088/1757-899X/319/1/012074
16. **Gmys J., Mezmaz M., Melab N., Tuytens D.** A computationally efficient branch-and-bound algorithm for the permutation flow-shop scheduling problem. *European Journal of Operational Research*, 2020, vol. 284, iss. 3, pp. 814–833. doi:10.1016/j.ejor.2020.01.039
17. **Mazda Ch. N., Kurniawati D. A.** Branch and bound method to overcome delay delivery order in flow shop scheduling problem. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2020, IOP Publishing. doi:10.1088/1757-899X/1003/1/012129
18. **Watermeyer K., Zimmermann J.** A branch-and-bound procedure for the resource-constrained project scheduling problem with partially renewable resources and general temporal constraints. *OR Spectrum*, 2020, vol. 42, pp. 427–460. doi:10.1007/s00291-020-00583-z
19. **Su Ch.-H., Wang J. Y.** A branch-and-bound algorithm for minimizing the total tardiness of multiple developers. *Mathematics*, 2022, vol. 10, Art. ID: 1200. doi:10.3390/math10071200
20. **Santi S., Selvakumari K.** Flow shop scheduling problem in neutrosophic environment using trapezoidal fuzzy numbers. *Eurasian Journal of Analytical Chemistry*, 2019, vol. 14(1), pp. 111–115.

21. Кротов К. В., Скатков А. В. Организация web-ориентированного сервиса мониторинга окружающей среды с использованием данных дистанционного зондирования Земли и конвейеризации обра-

ботки данных. *Труды учебных заведений связи*, 2021, т. 7, № 1, с. 105–121. <https://doi.org/10.31854/1813-324X-2021-7-1-105-121>

UDC 004.453

doi:10.31799/1684-8853-2023-2-15-26

EDN: WWXRRW

### A branch and bound algorithm for the optimization of batch scheduling in pipeline systems

K. V. Krotov<sup>a</sup>, PhD, Tech., Associate Professor, [orcid.org/0000-0002-9670-6141](https://orcid.org/0000-0002-9670-6141), [krotov\\_k1@mail.ru](mailto:krotov_k1@mail.ru)

<sup>a</sup>Sevastopol State University, 33, Universitetskaya St., Sevastopol, 299053, Russian Federation

**Introduction:** The optimization of batch scheduling ensures efficiency in production and computational processes. Modern methods of scheduling optimization are characterized by limitations on the dimensionality of tasks or the impossibility of obtaining solutions that approach the globally optimal ones. **Purpose:** To develop a branch and bound algorithm for the optimization of batch scheduling in pipeline systems. **Results:** We obtain a mathematical model of multistage processes that allows to identify the point in time when batch jobs start running in the appropriate positions in the sequences of the implementation of actions with them on the devices of pipeline systems. We present the criterion for optimizing solutions that corresponds to the point in time when the tasks included into the batch stop running. We formulate a method of partitioning sets of solutions into their subsets (branch tree vertices). This method involves adding a package of different types one at a time to the sequence of implementation of actions with them from the sets not included into them. We develop a method for constructing solutions according to the order of execution on the devices of the packages which are included in the formed subsets. For these subsets we calculate the values of the criterion used when updating the upper estimates. We synthesize a method for determining the values of the lower estimates of the criterion for sets of solutions corresponding to the vertices of the tree obtained as a result of branching. A branch and bound algorithm is also developed. **Practical relevance:** The studies that are conducted with the use of the software implementation of the algorithm have shown that it allows up to 35% decrease in the time for batch jobs execution as compared to the solutions without optimization. With a small number of task types, the algorithm allows one to get a solution which approximates the globally optimal one. With the increase in the number of task types, the accuracy of approximation of the solutions to the globally optimal ones is 0.9–0.95.

**Keywords** – pipeline systems, batch jobs, branch and bound method, batch scheduling.

**For citation:** Krotov K. V. A branch and bound algorithm for the optimization of batch scheduling in pipeline systems. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2023, no. 2, pp. 15–26 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2023-2-15-26, EDN: WWXRRW

### References

1. Krotov K. V. The complex method for determining effective solutions for data batch sizes and processing schedules in conveyor systems. *Computing Technologies*, 2018, vol. 23, no. 3, pp. 58–76 (In Russian).
2. Krotov K. V. Mathematical model and algorithm of branch and boundary method for optimizing solutions for package compositions in multi-stage systems. *Informatics and Automation*, 2022, vol. 21, no. 1, pp. 5–40 (In Russian). doi:10.15622/ia.2022.21.1
3. Shaoxiang Z., Naiming X., Qiao W. Single batch machine scheduling with dual setup times for autoclave molding manufacturing. *Computers and Operations Research*, 2021, vol. 133, iss. C. doi:10.1016/j.cor.2021.105381
4. Ogun B., Cigdem A.-U. Mathematical models for a batch scheduling problem to minimize earliness and tardiness. *Journal of Industrial Engineering and Management*, 2018, vol. 11, iss. 3, pp. 390–405. doi:10.3926/jiem.2541
5. Li X. L., Wang Y. Scheduling batch processing machine using max-min ant system algorithm improved by a local search method. *Mathematical Problems in Engineering*, 2018, vol. 2018, Art. ID: 3124182. doi:10.1155/2018/3124182
6. Jin M., Liu X., Luo W. Single-machine parallel-batch scheduling with non identical job sizes and rejection. *Mathematics*, 2020, vol. 8, Art. ID: 258. doi:10.3390/math8020258
7. Fan J. Integrated scheduling problem on a single bounded batch machine with an unavailability constraint. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 2020, vol. 12, Art. ID: 8625849. doi:10.1155/2020/8625849
8. Halim A. H., Hidayat N. P. A., Aribowo W. Single item batch-scheduling flow shop with m batch-processing machines to minimize total actual flow time. *International Journal of Technology*, 2022, vol. 13, no. 4, pp. 816–826. doi:https://doi.org/10.14716/ijtech.v13i4.4869
9. Hertrich Ch., Weiß Ch., Ackermann H., Heydrich S., Krumke S. O. Scheduling a proportionate flow shop of batching machines. *Journal of Scheduling*, 2020, vol. 23, pp. 575–593. doi:10.1007/s10951-020-00667-2
10. Mauluddin Yu. Three-stage flow-shop scheduling model with batch processing machine and discrete processing machine. *The 3rd Annual Applied Science and Engineering Conf.*, 2018, vol. 197, Art. ID: 14002. doi:10.1051/mateconf/201819714002
11. Shahvari O., Logendran R. A comparison of two stage-based hybrid algorithms for a batch scheduling problem in hybrid flow shop with learning effect. *International Journal of Production Economics*, 2018, vol. 195, pp. 227–248.
12. Suryadhini P. P., Sukoyo S., Suprayogi S., Halim A. H. A batch scheduling model for a three-stage flow shop with job and batch processors considering a sampling inspection to minimize expected total actual flow time. *Journal of Industrial Engineering and Management*, 2021, vol. 14, no. (3), pp. 520–537. doi:10.3926/jiem.3438
13. Lévai T., Németh F., Raghavan B., Rétvári G. Batchy: batch-scheduling data flow graphs with service-level objectives. *17th USENIX Symp. on Networked Systems Design and Implementation (NSDI'20)*, 2020, February 25–27, Santa Clara, CA, USA, pp. 633–649.
14. Song L., Liu Ch., Shi H., Zhu J. An improved immune genetic algorithm for solving the flexible job shop scheduling problem with batch processing. *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 2022, Art. ID: 2856056. doi:10.1155/2022/2856056
15. Indrapriyatna A. S., Triha H. A. Modified branch and bound algorithm for batch scheduling in discrete manufacture system. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2018, vol. 319, Art. ID: 012074. doi:10.1088/1757-899X/319/1/012074
16. Gmys J., Mez maz M., Melab N., Tuyttens D. A computationally efficient branch-and-bound algorithm for the permutation flow-shop scheduling problem. *European Journal of*

- Operational Research*, 2020, vol. 284, iss. 3, pp. 814–833. doi:10.1016/j.ejor.2020.01.039
17. Mazda Ch. N., Kurniawati D. A. Branch and bound method to overcome delay delivery order in flow shop scheduling problem. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2020, IOP Publishing. doi:10.1088/1757-899X/1003/1/012129
  18. Watermeyer K., Zimmermann J. A branch-and-bound procedure for the resource-constrained project scheduling problem with partially renewable resources and general temporal constraints. *OR Spectrum*, 2020, vol. 42, pp. 427–460. doi:10.1007/s00291-020-00583-z
  19. Su Ch.-H., Wang J. Y. A branch-and-bound algorithm for minimizing the total tardiness of multiple developers. *Mathematics*, 2022, vol. 10, Art. ID: 1200. doi:10.3390/math10071200
  20. Santi S., Selvakumari K. Flow shop scheduling problem in neutrosophic environment using trapezoidal fuzzy numbers. *Eurasian Journal of Analytical Chemistry*, 2019, vol. 14(1), pp. 111–115.
  21. Krotov K. V., Skatkov A. V. Organization of web-based environmental monitoring service using earth remote sensing data and pipelining data processing. *Proc. of Telecommunication Universities*, 2021, vol. 7, no. 1, pp. 105–121 (In Russian). <https://doi.org/10.31854/1813-324X-2021-7-1-105-121>

### УВАЖАЕМЫЕ АВТОРЫ!

Научные базы данных, включая Scopus и Web of Science, обрабатывают данные автоматически. С одной стороны, это ускоряет процесс обработки данных, с другой — различия в транслитерации ФИО, неточные данные о месте работы, области научного знания и т. д. приводят к тому, что в базах оказывается несколько авторских страниц для одного и того же человека. В результате для всех по отдельности считаются индексы цитирования, что снижает рейтинг ученого.

Для идентификации авторов в сетях Thomson Reuters проводит регистрацию с присвоением уникального индекса (ID) для каждого из авторов научных публикаций.

Процедура получения ID бесплатна и очень проста, есть возможность провести регистрацию на 12 языках, включая русский (чтобы выбрать язык, кликните на зеленое поле вверху справа на стартовой странице): <https://orcid.org>



## Стеганоанализ изображений, модифицированных алгоритмом Bit Plane Complexity Segmentation

Р. А. Солодуха<sup>а</sup>, канд. техн. наук, доцент, [orcid.org/0000-0002-3878-4221](https://orcid.org/0000-0002-3878-4221), [standartal@list.ru](mailto:standartal@list.ru)

<sup>а</sup>Воронежский государственный университет инженерных технологий, Революции пр., 19, Воронеж, 394036, РФ

**Введение:** стеганографический алгоритм Bit Plane Complexity Segmentation (BPCS) позволяет осуществить вложение до 50 % от размера контейнера. Вследствие этого программное обеспечение на основе BPCS может быть выбрано внутренним нарушителем для передачи информации из закрытой корпоративной или ведомственной компьютерной сети. При этом современные системы предотвращения утечки данных не имеют функционала, связанного с обнаружением цифровой стеганографии, в том числе по причине отсутствия соответствующего методического, алгоритмического и программного обеспечения. **Цель:** адаптировать для анализа BPCS существующие стеганоаналитические алгоритмы, сформировать векторы признаков. Экспериментально проверить эффективность векторов признаков и получить их парето-оптимальные комбинации. **Результаты:** выполнен трасологический анализ алгоритма BPCS, разработан вектор признаков на основе гистограмм сложности битовых плоскостей, его эффективность подтверждена численным экспериментом с использованием регрессионной модели машинного обучения в среде MatLab. Для обеспечения воспроизводимости эксперимента датасеты и программный код представлены в Kaggle. На основе экспериментальных данных рассчитаны базовые метрики результативности машинного обучения комбинаций векторов признаков для BPCS-стеганоанализа. Получены оптимальные по Парето комбинации векторов признаков. **Практическая значимость:** показана зависимость ошибки регрессии для комбинаций векторов признаков различной размерности для BPCS-стеганоанализа. С помощью полученных оценок аналитик может варьировать достоверность/размерность векторов признаков в зависимости от доступных вычислительных мощностей и размера обучающего множества.

**Ключевые слова** — стеганоанализ, вектор признаков, BPCS-стеганография, предотвращение утечки данных, стеганографический канал, машинное обучение, машина опорных векторов, регрессия.

**Для цитирования:** Солодуха Р. А. Стеганоанализ изображений, модифицированных алгоритмом Bit Plane Complexity Segmentation. *Информационно-управляющие системы*, 2023, № 2, с. 27–38. doi:10.31799/1684-8853-2023-2-27-38, EDN: DXURBZ  
**For citation:** Solodukha R. A. Steganalysis of Bit Plane Complexity Segmentation algorithm. *Informatsionno-upravliayushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2023, no. 2, pp. 27–38 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2023-2-27-38, EDN: DXURBZ

### Введение

Доступность стеганографических программных продуктов (обзор приведен в работе [1]) позволяет без труда осуществлять скрытый обмен информацией контрагентам с минимальными познаниями в области информационных технологий. Одним из противоправных направлений использования стеганографии является передача информации ограниченного доступа из ведомственной/корпоративной компьютерной сети.

Скрытый канал передачи данных может быть организован различными способами [2]. Методы, основанные на сетевых протоколах [3, 4], достаточно сложны для применения, требуют знаний относительно организации сети, имеют низкую пропускную способность [5]. При этом использование файловой стеганографии под силу любому пользователю компьютера. Наиболее популярными и простыми в использовании контейнерами для цифровой стеганографии являются изображения [6, 7], аудио- [8] и видеофайлы [9].

Передача файлов «наружу» не представляет труда, так как традиционный и пока не-

заменимый в большинстве бизнес-процессов сервис электронной почты доступен даже в ведомственных компьютерных сетях [10]. По данным, приведенным в «Исследовании уровня информационной безопасности в компаниях России и СНГ за 2020 год» компании «СёрчИнформ» (<https://static.searchinform.ru/uploads/sites/1/2022/05/issledovaniya-2021.pdf>), именно электронная почта является «самым популярным каналом для слива данных в компаниях — на них приходится 45 % утечек в России и 41 % в СНГ».

Следует отметить, что исторически основным направлением защиты компьютерных сетей было противодействие внешним угрозам при том, что внутренние утечки информации труднее предотвратить [11]. Актуальность противодействия внутренним угрозам, связанным с организацией скрытых каналов, нашла отражение в ГОСТ Р 53113.1-2008 «Защита информационных технологий и автоматизированных систем от угроз информационной безопасности, реализуемых с использованием скрытых каналов». В практическом аспекте это привело к появлению на рынке информационной безопасности

систем предотвращения утечек данных (DLP — Data Leakage Prevention), одной из функций которых является анализ трафика, выходящего за пределы сети.

Теоретически DLP-системы способны выявить структурную файловую стеганографию и вложения, совершенные программным обеспечением, оставляющим сигнатуру [10]. Слепой (универсальный) стеганоанализ [12] цифровой стеганографии несравнимо сложнее. Невзирая на значительное количество методов стеганоанализа [12], данный функционал в DLP-системах не заявлен [13]. На наш взгляд, это связано как с отсутствием спроса (непонимание заказчиками серьезности угрозы), так и с отсутствием методического и алгоритмического обеспечения, сложностью технической реализации проверки и принятия решения в онлайн-режиме. Следует отметить, что ряд производителей DLP, например Forcepoint (<https://www.forcepoint.com/blog/insights/stop-pictures-hiding-malicious-content>) и Forta (<https://www.clearswift.com/resources/datasheets/anti-steganography-combating-external-threats-data-loss-images>), решают проблему стеганографических каналов путем уничтожения вложения.

Следует отметить, что работы в направлении обнаружения стеганоконтента ведет компания McAfee. Веб-приложение Steganography Analysis Tool (<https://www.mcafee.com/enterprise/ru-ru/downloads/free-tools/steganography.html>) позволяет проанализировать графический файл на наличие стеганографии. Размер предполагаемого вложения отображается графически, также приводится степень достоверности анализа. Загрузка файлов доступна только в ручном режиме, сведения о включении данного функционала в продукты McAfee отсутствуют.

Можно предположить, что для инсайдера, пользующегося контейнерами-изображениями, наиболее важной характеристикой стеганографического канала является его пропускная способность, так как большой поток исходящих изображений более подозрителен и труднообъясним, нежели разовая передача изображения низкого качества. Таким образом, из средств цифровой стеганографии наиболее вероятно использование BPCS- (Bit Plane Complexity Segmentation) или LSB-стеганографии (Least Significant Bits) (последней с глубиной в несколько бит, приводящей к визуальным искажениям в изображении).

На момент написания статьи в свободном доступе находится несколько программных реализаций BPCS-стеганографии: opensource-решения на GitHub под Python (<https://github.com/mobeets/bpcs>) или Java (<https://github.com/inmank/BPCS-Steganography>) и Windows-

приложение (<http://datahide.org/BPCSe/QtechHV-download-e.html>), что делает ее вполне доступной для использования людьми с небольшими познаниями в IT-сфере.

При этом одним из основных критериев функционирования DLP-систем является быстродействие, т. е. алгоритмы обнаружения должны работать в потоковом режиме и быть относительно несложными. Другими словами, необходимо найти баланс между достоверностью и ресурсоемкостью обнаружения.

Целью данной работы является анализ результативности стеганоаналитических векторов признаков и выявление их парето-оптимальных комбинаций при атаке на основании известной стеганопрограммы применительно к задаче обнаружения BPCS-стеганографии в ведомственных компьютерных сетях. Также предлагается собственный вектор признаков.

## BPCS-стеганография

Суть алгоритма Bit Plane Complexity Segmentation [14], предложенного в 1998 г. группой из Технологического института Кюсю под руководством Ейи Кавагучи (Eiji Kawaguchi), в том, что контейнер разбивается на информативные и шумоподобные блоки в каждой битовой плоскости, затем шумоподобные блоки заменяются стегановложением. Если стеганографические методы семейства LSB позволяют внедрить 10–15 % от размеров контейнера, то BPCS поднимает эту планку до 50 % при сопоставимом уровне искажений контейнера. Эта техника использует свойство человеческого зрения не различать графические объекты в сложных бинарных шаблонах.

Для BPCS-стеганографии битовые плоскости представляются кодом Грея. Авторы называют это переходом от Pure Binary Coded (PBC) bit planes к Canonical Gray Coded (CGC) bit planes. Это связано с тем, что хотя PBC-плоскости обеспечивают больше места для стегановложения, CGC-плоскости менее подвержены эффекту Hamming cliff, когда небольшое изменение в значении цвета пикселя приводит к существенным изменениям в его битовом представлении. Например,  $127_{10} \rightarrow 0111111_2$ , а  $128_{10} \rightarrow 1000000_2$ .

Для оценки шумоподобности блока используется несколько метрик. Базовая метрика основывается на black-and-white border (BWB) complexity — сложности черно-белых границ и представляет собой суммарное количество переходов между 0 и 1 по строкам и столбцам блока. Например, один ноль в окружении единиц дает BWB-сложность 4. Сложность блока оценивается приведенной величиной

$$a = \frac{b}{2 \cdot n \cdot (n-1)},$$

$$b = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=1}^n |I_{i,j} - I_{i+1,j}| + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{n-1} |I_{i,j} - I_{i,j+1}|,$$

где  $n$  – размер блока;  $I_{i,j}$  – значение элемента блока.

Если ноли и единицы в блоке расположены с определенной периодичностью в строках или столбцах, то такие блоки для внедрения не подходят, но BWB их принимает за сложные. Поэтому в модификации [15] используют еще две метрики: иррегулярность последовательностей (Run-Length Irregularity – RLI) и шумность границ (Border Noisiness – BN).

Run-Length Irregularity основывается на гистограмме  $\mathbf{H} = \{h_i\}$  длин непрерывных серий нолей и единиц по строкам или по столбцам, где  $i$  – размер серии. RLI вычисляется по формуле Шеннона и показывает неравномерность распределения длин серий:

$$h = - \sum_{i=1}^n h_i \cdot \log_2 p_i, \quad p_i = \frac{h_i}{\sum_{j=1}^n h_j},$$

где  $n$  – максимальная длина серии. Для квадратных блоков размером  $N \times N$ , где  $r_i$  –  $i$ -я строка, а  $c_j$  –  $j$ -й столбец, вводится метрика  $\beta$ :

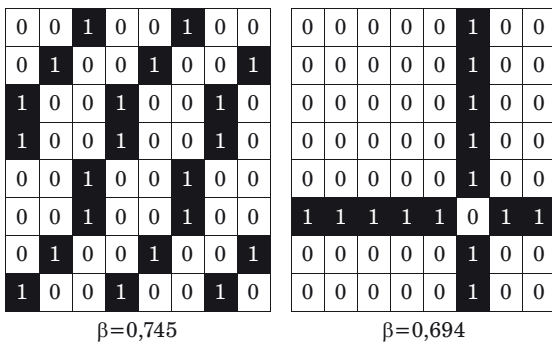
$$\beta = \min \{ \overline{\mathbf{H}(r)}, \overline{\mathbf{H}(c)} \}, \quad \mathbf{H}(r) = \{h(r_0), \dots, h(r_{N-1})\},$$

$$\mathbf{H}(c) = \{h(c_0), \dots, h(c_{N-1})\},$$

где  $\overline{\mathbf{X}}$  – среднее значение  $\mathbf{X} = \{x_0, \dots, x_{N-1}\}$ .

Run-Length Irregularity может работать некорректно, принимая простые блоки за сложные, так как не способен оценить сходство смежных строк или столбцов (рис. 1).

Если информация будет скрываться на границе шумовых и информационных областей, то



■ **Рис. 1.** Пример RLI-оценки блоков

■ **Fig. 1.** Example of blocks RLI-estimations

после внедрения общая шумность увеличится, и искажения могут стать существенными для восприятия. Шумность границ – мера сложности, показывающая, как распределены пиксели по блоку. Вычисляется на основе различий между смежными пиксельными последовательностями. Для квадратных блоков размером  $N \times N$ , где  $r_i$  –  $i$ -я строка, а  $c_j$  –  $j$ -й столбец, вводится метрика  $\gamma$ :

$$\gamma = \frac{\min \{ E(\mathbf{P}(r)), E(\mathbf{P}(c)) \}}{N},$$

$$\mathbf{P}(r) = \{p(r_0 \oplus r_1), \dots, p(r_{N-2} \oplus r_{N-1})\},$$

$$\mathbf{P}(c) = \{p(c_0 \oplus c_1), \dots, p(c_{N-2} \oplus c_{N-1})\},$$

$$E(\mathbf{X}) = \overline{\mathbf{X}} \left( \frac{1 - V(\mathbf{X})}{\max \{V(\mathbf{X})\}} \right),$$

где  $\overline{\mathbf{X}}$  – среднее значение  $\mathbf{X} = \{x_0, \dots, x_{N-1}\}$ ;  $V(\mathbf{X})$  – дисперсия;  $\oplus$  – XOR;  $p(\mathbf{X})$  – количество единиц в бинарной последовательности.

Битовая последовательность для встраивания сообщения организуется в блоки, которыми заменяются блоки изображения. Однако блоки замены могут не обладать должной сложностью и вызвать значительные искажения в контейнере. В этом случае над блоком производят операцию конъюгации. Конъюгация представляет собой побитовый XOR блока изображения  $\mathbf{P}$  с шаблоном  $\mathbf{Wc}$ . Блок до –  $\mathbf{P}$  и после конъюгации –  $\mathbf{P}^*$  соотносятся как один к одному; справедливы следующие соотношения:  $\mathbf{P}^* = \mathbf{P} \oplus \mathbf{Wc}$ ,  $(\mathbf{P}^*)^* = \mathbf{P}$  (рис. 2).

При этом самое важное то, что сложность изображения до и после конъюгации в сумме дают 1:  $\alpha(\mathbf{P}^*) = 1 - \alpha(\mathbf{P})$ .

Таким образом, если сложность внедряемого блока меньше порогового, то после конъюгации она симметрично отразится от 0,5, например:  $\alpha(\mathbf{P}) = 0,2 \Rightarrow \alpha(\mathbf{P}^*) = 0,8$ .

Алгоритм ВРС:

1. Преобразование изображения-контейнера из простого двоичного кодирования (РВС) в код Грея (CGC).

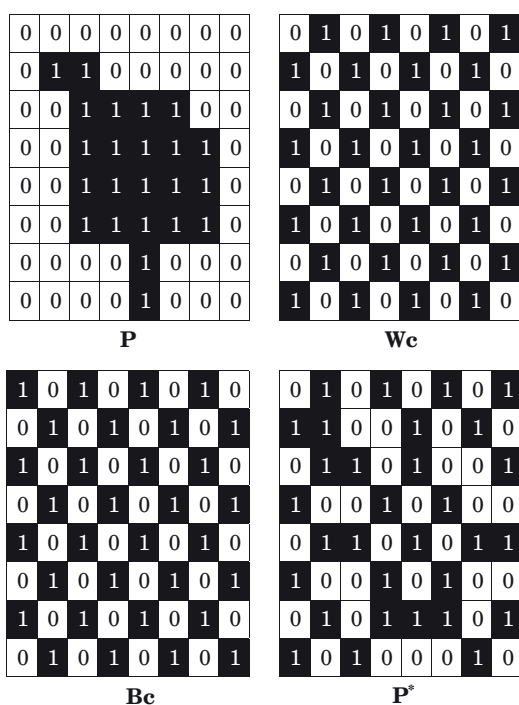
2. Разбиение изображения на битовые плоскости (изображение с глубиной цвета будет дезагрегировано в 24 плоскости).

3. Сегментирование каждой плоскости на блоки  $8 \times 8$  ( $\mathbf{P}$ ).

4. Классификация (с помощью  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ) блоков  $\mathbf{P}$  на информационные и шумоподобные.

5. Представление стегановложения в виде бинарных блоков ( $\mathbf{S}$ )  $8 \times 8$  (возможны предварительные операции шифрования и архивации).

6. Классификация блоков  $\mathbf{S}$  по сложности. В случае неудовлетворительной сложности – конъюгация блока  $\mathbf{S}$ . Данный факт необходимо



■ **Рис. 2.** Пример сопоставления P, Wc, Bc, P\*  
 ■ **Fig. 2.** Example of P, Wc, Bc, P\* matching

сохранить в «карте конъюгаций», чтобы провести еще одну конъюгацию при извлечении S\*.

7. Замена шумоподобных блоков P блоками вложения S и S\*, блоками «карты конъюгаций».

8. Преобразование контейнера из CGC в PVC.

В качестве варьируемых параметров алгоритма выступают пороговые значения  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ , размер блока, пароль шифра, последовательность замены блоков.

### Трасологический анализ ВРСС

Под трасологическим анализом понимается анализ изменений контейнера, модифицированного стеганографическим алгоритмом. Пример для файла JPEG приведен в работе [16].

В качестве стеганопрограммы выбрана бесплатная реализация ВРСС-алгоритма Qtch-HV02 с фиксированным порогом сложности, равным 40. Максимальный размер вложения рассчитывается для каждого файла и доступен для считывания, что позволяет автоматизировать процесс заполнения стеганоcontainers.

Обозначим пустой контейнер размером  $M \times N$  как C, а заполненный – как S. Оценивается модуль максимального отклонения  $\max\_diff = \max|C_i - S_i|$  и усредненное искажение в виде суммы абсолютных значений искажений, приведенных к количеству пикселей:

$$\text{mean} = \frac{1}{M \cdot N} \sum_{i=1}^{M \cdot N} |S_i - C_i|$$

Искажения, вносимые в файл, в зависимости от размера вложения в процентах от максимального приведены в табл. 1 (файл № 7 из коллекции BOSSbase 1.01 ([http://dde.binghamton.edu/download/ImageDB/BOSSbase\\_1.01.zip](http://dde.binghamton.edu/download/ImageDB/BOSSbase_1.01.zip))), откуда видно, что модификация выполняется «слоисто-поцветно», т. е. сначала заполняется LSB<sub>1</sub> красного, затем зеленого, затем синего. Далее переход на LSB<sub>2</sub> и так до LSB<sub>5</sub>. Под LSB<sub>n</sub> понимается номер битового среза: LSB<sub>1</sub> – 2<sup>0</sup>, LSB<sub>2</sub> – 2<sup>1</sup>, LSB<sub>3</sub> – 2<sup>2</sup>, LSB<sub>4</sub> – 2<sup>3</sup>, LSB<sub>5</sub> – 2<sup>4</sup>.

Изменения в плоскости красного цвета при уровнях заполнения 0, 9, 29 % от максимально возможного иллюстрирует рис. 3 (изображения получены с помощью программы WinMerge (<https://winmerge.org/downloads>)). Можно наблюдать, как алгоритм стремится сначала заполнить плоскость младшего бита во всех цветах, затем переходит к плоскости следующего по старшинству бита. Обобщенно можно сказать, что ВРСС осуществляет псевдослучайное изменение битов в каждой битовой плоскости, независимо.

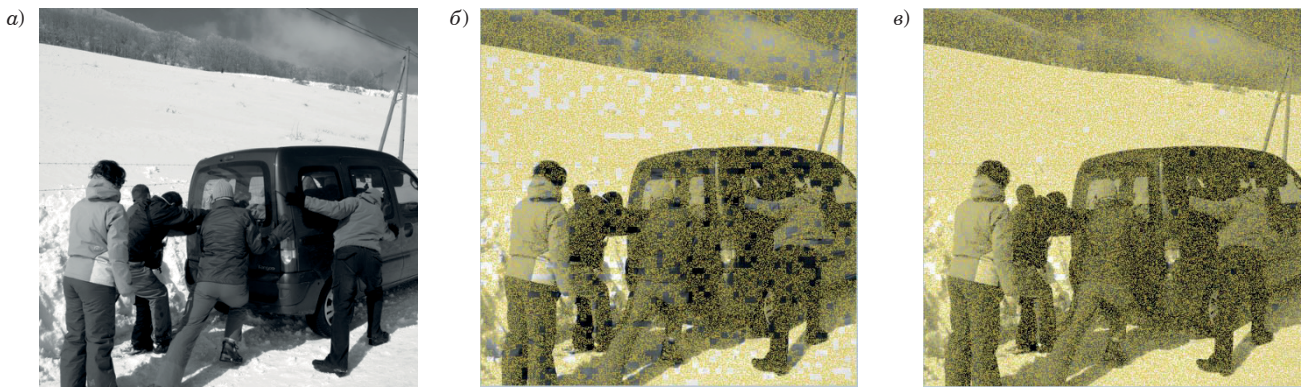
Визуальный анализ гистограмм изображения до и после ВРСС-преобразования показывает достаточно сильные искажения (рис. 4, файл № 9 из коллекции BOSSbase 1.01), что предопределяет попытку гистограммной атаки по аналогии с методом Pair of Values.

■ **Таблица 1.** Метрики искажения контейнера при реализации стегановложения

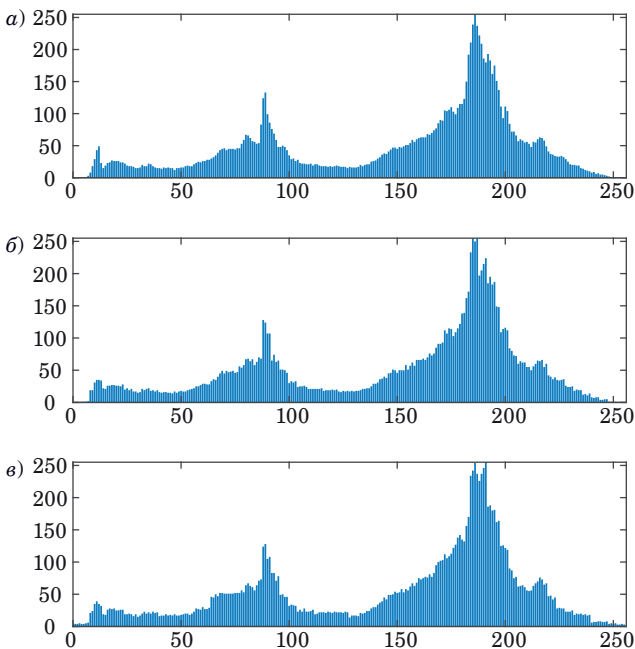
■ **Table 1.** Metrics of image distortion after payload

| %  | color | max_diff | mean | %  | color | max_diff | mean |
|----|-------|----------|------|----|-------|----------|------|
| 9  | R     | 1        | 0,4  | 59 | R     | 7        | 1,2  |
|    | G     | 0        | 0    |    | G     | 3        | 1,2  |
|    | B     | 0        | 0    |    | B     | 3        | 1,2  |
| 19 | R     | 1        | 0,5  | 69 | R     | 7        | 2    |
|    | G     | 1        | 0,4  |    | G     | 7        | 1,7  |
|    | B     | 0        | 0    |    | B     | 3        | 1,2  |
| 29 | R     | 1        | 0,5  | 79 | R     | 15       | 2,1  |
|    | G     | 1        | 0,5  |    | G     | 7        | 2    |
|    | B     | 1        | 0,4  |    | B     | 7        | 2    |
| 39 | R     | 3        | 1    | 89 | R     | 15       | 3,3  |
|    | G     | 1        | 0,5  |    | G     | 15       | 3,3  |
|    | B     | 1        | 0,5  |    | B     | 15       | 2,3  |
| 49 | R     | 3        | 1,2  | 99 | R     | 31       | 4,4  |
|    | G     | 3        | 1,1  |    | G     | 31       | 4,4  |
|    | B     | 1        | 0,5  |    | B     | 31       | 4    |





■ **Рис. 3.** Визуализация изменений исходного изображения (а) при вложении 9 % (б) и 29 % (в) от максимально возможного при модификации программой Qtech-HV02  
 ■ **Fig. 3.** Visualization of original image (а) changes after payload 9% (б), 29% (в) of maximum capacity using Qtech-HV02



■ **Рис. 4.** Гистограммы исходного изображения (а) с вложением 49 % (б) и 99 % (в)  
 ■ **Fig. 4.** Histogram of original image (а) with 49% (б) and 99% (в) payloaded image

В работе [17], одним из авторов которой является сам Ейи Кавагучи, описана уязвимость ВРСС. При построении гистограммы сложности блоков (Complexity Histogram – HC) у заполненного контейнера наблюдается провал в области выбранного порога сложности. К настоящему времени данная уязвимость осталась на уровне идеи, работы по ее реализации в свободном доступе отсутствуют.

Исходя из вышеизложенного можно определить следующие направления анализа ВРСС.

1. Использование признаков, полученных стеганоалгоритмами, не имеющими возможности адаптации к глубине искажения. В эту группу можно отнести Gradient Paths (GP) [18, 19], так как он основан на сравнении градиентных путей в исходном и  $LSB_n$ -обнуленном изображениях, и SPAM (Subtractive Pixel Adjacency Matrix) [20], прогнозирующий значение пикселя по соседям.

2. Формирование признаков с помощью одномерных детекторов LSB, применяя их к каждому искажаемому битовому срезу, обнуляя биты более младших срезов. Сюда можно отнести Sample Pairs Analysis (SP) [21], Asymptotically Uniformly Most Powerful Test (AUMP) [22], Weighted Stego-Image Method (WS) [23], Triples Analysis (T) [24]. Коррелированность данных методов проверена в работе [25].

3. Формирование признаков с помощью гистограммного детектора Pairs of Values (PoVs) [26], адаптированного к анализу изменений в нескольких битовых плоскостях.

4. Формирование признаков на основе гистограммы сложности блоков (доведение описанной в [17] уязвимости до практической реализации).

### Формирование векторов признаков

#### Модификация количественных детекторов LSB

Поскольку ВРСС вносит искажения в  $LSB_{1-5}$ , то целесообразно применить одномерные количественные детекторы для каждой из пяти битовых плоскостей. Значение каждого пикселя изображения сдвигается в сторону младшего разряда с обнулением старших (функция  $bitshift(X, n)$  в MatLab,  $X$  – матрица изображения,  $n$  – размер сдвига).

### Модификация PoVs

Pair of Values является одним из первых стеганоаналитических методов, выявляющих LSB-стеганографию на основе гистограммной атаки.

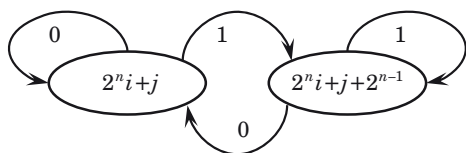
При этом в исходном виде PoVs отслеживает переходы между младшим четным и старшим нечетным значениями гистограммы, что характерно для LSB replacement. В случае с BPCS изменения затрагивают до пяти битовых плоскостей. Механизм вычисления элементов гистограммы, подлежащих попарному сравнению при вложении в разные плоскости, и диаграмма переходов представлены на рис. 5.

Также PoVs предполагается использовать в модификации без применения «функции активации по хи-квадрат», так как это преобразование практически бинаризирует результаты, делая их нулевыми или близкими к единице, что приводит к нецелесообразности применения регрессии для их анализа. В итоге с помощью модифицированного PoVs формируется 5D вектор признаков.

### Формирование вектора признаков на основе гистограммы сложности

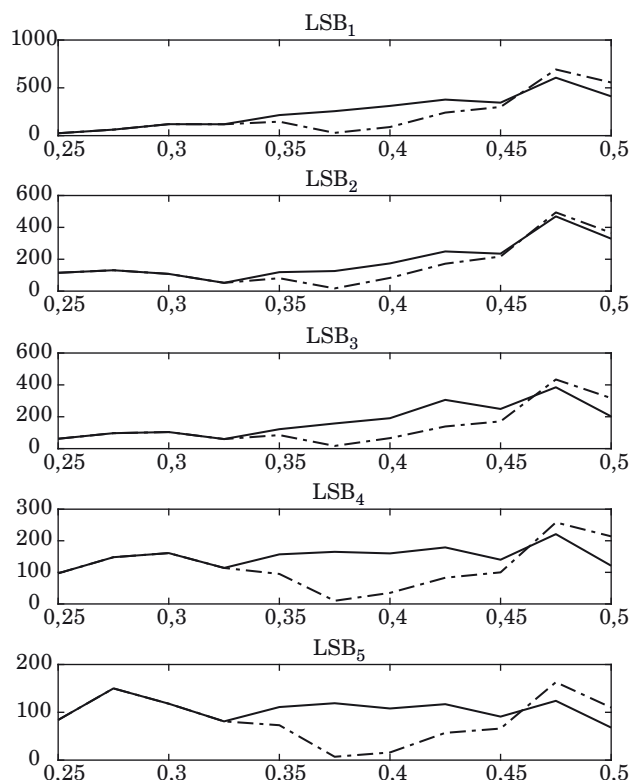
Пусть  $H = \{h(x)\}$  – гистограмма сложности изображения. Визуальный анализ гистограмм сложности показывает, что изменения затрагивают область (0,325...0,45), характерный пример – рис. 6. Очевидно, что для распознавания вложения наиболее важна область перегиба, т. е. значения  $h(0,35)$ ,  $h(0,375)$ ,  $h(0,4)$ . Однако области справа и слева от перегиба также оказывают влияние на распознавание. Предварительные эксперименты показали, что это влияние целесообразно учитывать в агрегированном виде, как площадей  $S1$ ,  $S2$  под кривой на участ-

$$LSB_n, i=0..(2^{8-n}-1), j=0..(2^{n-1}-1)$$



- LSB<sub>1</sub>: 0↔1, 2↔3, 4↔5, ..., 252↔253, 254↔255;
- LSB<sub>2</sub>: 0↔2, 1↔3, 4↔6, 5↔7, ..., 252↔254, 253↔255;
- LSB<sub>3</sub>: 0↔4, 1↔5, 2↔6, 3↔7, 8↔12, ..., 250↔254, 251↔255;
- LSB<sub>4</sub>: 0↔8, 1↔9, 2↔10, 3↔11, 4↔12, 5↔13, ..., 246↔254, 247↔255;
- LSB<sub>5</sub>: 0↔16, 1↔17, 2↔18, 3↔19, 4↔20, 5↔21, 6↔22, ..., 238↔254, 239↔255.

■ **Рис. 5.** Диаграмма переходов в первой–четвертой младших битовых плоскостях  
 ■ **Fig. 5.** Transition diagram of first–fourth least significant bit plains



■ **Рис. 6.** Гистограммы сложности блоков по битовым плоскостям (сплошная линия – без вложения, штрихпунктирная – с вложением 99%)

■ **Fig. 6.** Block complexity histograms by bit plains (solid line – original image, dot-dash line – 99% payload image)

ках (0,25...0,325) и (0,4...0,475) соответственно. Таким образом, получаем 25D вектор признаков:

$$HC = \{HC_1, \dots, HC_5\}, HC_i = \{S1_i, h_i(0,35), h_i(0,375), h_i(0,4), S2_i\}, i = 1...5.$$

### Экспериментальная часть

Количественные LSB-детекторы взяты на сайте Digital Data Embedding Laboratory, Binghamton University ([http://dde.binghamton.edu/download/structural\\_lsb\\_detectors/](http://dde.binghamton.edu/download/structural_lsb_detectors/)), остальные алгоритмы запрограммированы самостоятельно.

В качестве источника контейнеров взяты первые 2000 файлов коллекции BOSSbase 1.01 (переконвертированы из PGM в BMP). Для анализа использовалась плоскость красного цвета. Это незначительно смещает оценку размера вложения в большую сторону, так как BPCS-алгоритм, реализованный в программе Qtch-HV02, заполняет битовые слои от младшего (LSB<sub>1</sub>) к старшему (LSB<sub>5</sub>) и от красного к синему.

Поскольку эксперимент посвящен атаке на основании известной стеганопрограммы, а не стеганоалгоритма [27, 28] или его имитации [29], то необходимы контейнеры, полученные с помощью конкретного стеганографического программного обеспечения. Контейнеры заполнялись автоматически (Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2022682838 от 28.11.2022) с помощью скриптов AutoIt с шагом 10 % от максимального размера вложения от 9 до 99 %, выборка составила 22 000 контейнеров (<https://www.kaggle.com/datasets/romansolodukha/bpcs-qtech>).

В качестве прогнозной модели выбрана регрессионная, де-факто являющаяся стандартом в количественном стеганоанализе [30]. Авторы разделяют мнение, изложенное в работе [31], что с «точки зрения успеха в решении задач машинного обучения качество данных, как правило, намного важнее качества алгоритма обучения», в связи с чем использован стандартный регрессор на базе машины опорных векторов (SVM) [32] из среды машинного обучения MatLab Regression Learner, с настройками по умолчанию. В зависимости от количества признаков (D) изменялся только масштаб гауссова ядра машины опорных векторов:

$$\sqrt{D} \mid D \geq 20; \frac{1}{4}\sqrt{D} \mid D < 20.$$

Выборка делилась на обучающую/тестирующую в соотношении 50/50. В качестве метрик результативности машинного обучения [33] использованы коэффициент детерминации (R-Squared, R<sup>2</sup>) и среднеквадратическая ошибка (RMSE).

Результаты экспериментов с модифицированными детекторами LSB приведены в табл. 2. Видно, что с ростом количества признаков распознавание улучшается. LSB<sub>5</sub> практически не дает прироста результативности, так как модифицируется лишь в 1/11 части выборки. Модифицированный PoVs показал наилучшие результаты, использовать его далее нецелесообразно.

Результаты экспериментов с векторами признаков без разделения на битовые плоскости приведены в табл. 3. SPAM показал лучшие результаты, GP не достиг уровня LSB-детекторов. При исключении из комбинации GP точность повышается, поэтому из дальнейших экспериментов GP исключен.

Для определения вклада каждого вектора признаков (HC, AUMP, SP, WS, T) в точность регрессии проверены комбинации из четырех и более векторов признаков (табл. 4) путем последовательного исключения каждого вектора. Анализ табл. 4 показывает, что наибольший вклад вносит HC, несущественно влияние AUMP

■ **Таблица 2.** Результаты применения векторов признаков с разделением изображения на битовые плоскости

■ **Table 2.** Results of applying feature vectors with image division into bit planes

| Детектор LSB | Метрика   | Плоскость LSB         |                         |                         |                         |                         |
|--------------|-----------|-----------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
|              |           | LSB <sub>1</sub> (1D) | LSB <sub>1,2</sub> (2D) | LSB <sub>1,3</sub> (3D) | LSB <sub>1,4</sub> (4D) | LSB <sub>1,5</sub> (5D) |
| PoVs         | RMSE      | 31                    | 29                      | 28,5                    | 27,4                    | 26,5                    |
|              | R-Squared | 0,03                  | 0,11                    | 0,19                    | 0,24                    | 0,3                     |
| AUMP         | RMSE      | 26,2                  | 17,9                    | 10,7                    | 8                       | 7,8                     |
|              | R-Squared | 0,3                   | 0,67                    | 0,88                    | 0,93                    | 0,94                    |
| SP           | RMSE      | 27,4                  | 17,88                   | 12,3                    | 10,3                    | 9,91                    |
|              | R-Squared | 0,25                  | 0,68                    | 0,85                    | 0,89                    | 0,9                     |
| WS           | RMSE      | 26,2                  | 18                      | 12,5                    | 10,3                    | 9,9                     |
|              | R-Squared | 0,31                  | 0,67                    | 0,84                    | 0,89                    | 0,9                     |
| T            | RMSE      | 29,2                  | 19,7                    | 13                      | 10,62                   | 10,6                    |
|              | R-Squared | 0,15                  | 0,61                    | 0,83                    | 0,89                    | 0,89                    |

■ **Таблица 3.** Результаты применения векторов признаков без разделения изображения на битовые плоскости

■ **Table 3.** Results of applying feature vectors without dividing the image into bit planes

| Метрика   | Вектор признаков |          |          |
|-----------|------------------|----------|----------|
|           | SPAM (686D)      | HC (25D) | GP (16D) |
| RMSE      | 6,3              | 9,1      | 13       |
| R-Squared | 0,96             | 0,92     | 0,8      |

■ **Таблица 4.** Результаты применения комбинаций более трех векторов признаков

■ **Table 4.** Results of applying combinations of more than three feature vectors

| Метрика   | Комбинация векторов признаков |                       |                     |                    |                    |                  |                    |
|-----------|-------------------------------|-----------------------|---------------------|--------------------|--------------------|------------------|--------------------|
|           | HC+AUMP+SP+WS+T+GP (61D)      | HC+AUMP+SP+WS+T (45D) | HC+AUMP+SP+WS (40D) | HC+AUMP+SP+T (40D) | HC+AUMP+WS+T (40D) | HC+SP+WS+T (40D) | AUMP+SP+WS+T (20D) |
| RMSE      | 5,8                           | 5,6                   | 5,62                | 5,73               | 5,62               | 5,77             | 6,8                |
| R-Squared | 0,96                          | 0,97                  | 0,97                | 0,97               | 0,97               | 0,97             | 0,95               |

■ **Таблица 5.** Результаты применения комбинаций менее четырех векторов признаков

■ **Table 5.** Results of applying combinations of less than four feature vectors

| Метрика   | Комбинация векторов признаков |                |                  |                  |
|-----------|-------------------------------|----------------|------------------|------------------|
|           | HC+AUMP+WS<br>(35D)           | HC+WS<br>(30D) | AUMP+WS<br>(10D) | HC+AUMP<br>(30D) |
| RMSE      | 5,68                          | 6,07           | 6,95             | 6,06             |
| R-Squared | 0,97                          | 0,96           | 0,95             | 0,96             |

и WS, а влияние SP и T находится в рамках погрешности.

Далее, аналогичным образом, проверены комбинации из трех и менее векторов признаков (табл. 5). Подтверждается лучшая прогностическая способность HC по сравнению с AUMP и WS.

Для целей статьи важно, что ряд комбинаций векторов признаков табл. 4, 5 обеспечивают ошибку регрессии на уровне и менее, чем SPAM (686D).

### Получение парето-оптимальных решений

Если принять в качестве допущения, что ресурсоемкость каждого элемента вектора признаков одинакова, то можно сформулировать задачу оптимизации в следующем виде [34].

Пусть  $F = (f_1, \dots, f_N)$  – комбинации векторов признаков,  $N = \sum_{k=1}^M \frac{M!}{k!(M-k)!}$ ,  $M$  – количество векторов признаков.

Введем векторный критерий  $Q = (q_1, q_2)$ , где  $q_1 \rightarrow \min$  имеет смысл ошибки обнаружения,  $q_2 \rightarrow \min$  – ресурсоемкости. В качестве ограничения установим требуемый уровень достоверности.

Введем правило, позволяющее оценивать комбинации векторов признаков – безусловный критерий предпочтения [35, 36]. Вариант  $f_2$  лучше варианта  $f_1$  ( $f_1 < f_2$ ) в смысле векторного критерия  $Q$ , если  $\forall i q_i(f_1) \geq q_i(f_2)$  и хотя бы одно неравенство строгое. Если  $\forall i q_i(f_1) = q_i(f_2)$ , то вариант  $f_2$  эквивалентен варианту  $f_1$ . Из всего множества комбинаций векторов признаков безусловный критерий предпочтения позволяет выделить подмножество решений, определяющих множество Парето.

В качестве целевых функций целесообразно выбрать среднеквадратическую ошибку и

■ **Таблица 6.** Парето-оптимальные комбинации наборов векторов признаков

■ **Table 6.** Pareto-optimal combinations of feature vectors sets

| Целевая функция | Комбинация векторов признаков |               |              |                 |
|-----------------|-------------------------------|---------------|--------------|-----------------|
|                 | HC+AUMP+WS                    | HC+AUMP+SP+WS | HC+AUMP+WS+T | HC+AUMP+SP+WS+T |
| $q_1$           | 5,68                          | 5,62          | 5,62         | 5,6             |
| $q_2$           | 35                            | 40            | 40           | 45              |

количество признаков:  $q_1 = RMSE(f_i) \rightarrow \min$ ,  $q_2 = card(f_i) \rightarrow \min$ , ограничение на достоверность ввести посредством коэффициента детерминации  $\gamma \geq R^2$ . Примем  $\gamma \geq 0,97$ , тогда оптимальными по Парето являются комбинации табл. 6.

На основании парето-оптимальных комбинаций аналитик может ввести весовые коэффициенты (в зависимости от задачи, отдав приоритет точности или достоверности) на элементы  $Q$  и получить скалярный критерий выбора.

### Заключение

На основе трасологического анализа алгоритма ВРСС выявлены перспективные векторы признаков для стеганоанализа с применением машинного обучения. Выполнена модификация детекторов LSB для целей анализа ВРСС. Разработан 25D вектор признаков, базирующийся на гистограмме сложности блоков битовых плоскостей.

Осуществлен эксперимент по эффективности определения размера вложения, выполненного стеганографической программой Qtech-HV02. Использована технология машинного обучения, реализованная в среде MatLab – SVM-регрессия. Для каждого вектора признаков или их комбинации получены оценки коэффициента детерминации и среднеквадратической ошибки.

Найдены комбинации векторов признаков (от 30D), обеспечивающие меньшую ошибку регрессии, чем SPAM (686D). Сокращение количества признаков позволяет уменьшить ресурсоемкость и размер обучающей выборки, что важно для выявления стеганографии в рамках стеганоанализа

тических подсистем DLP-систем. Полученные парето-оптимальные комбинации векторов признаков позволяют настраивать соотношение достоверность/ресурсоемкость процессов противодействия утечки данных. Разработанный вектор признаков НС (25D) на основе гистограммы сложности битовых плоскостей входит во все парето-оптимальные комбинации.

Таким образом, материалы статьи развивают математическое и алгоритмическое обеспечение DLP-систем применительно к задаче обнаружения ВРС-стеганографии.

В дальнейших исследованиях по данной тематике предполагается провести аналогичный программный эксперимент на полноцветных изображениях с применением ансамблевых методов.

## Литература

1. Герлинг Е. Ю., Ахрамеева К. А. Обзор современного программного обеспечения, использующего методы стеганографии. *Экономика и качество систем связи*, 2019, № 3 (13), с. 51–58. <http://nirit.org/wp-content/uploads/2020/01/51-58.pdf> (дата обращения: 27.04.2023).
2. Орлов В. В., Алексеев А. П. Активная стеганография в сетях TCP/IP. *Инфокоммуникационные технологии*, 2009, т. 7, № 2, с. 73–78.
3. Закалкин П. В., Иванов С. А., Вершенник Е. В., Кирьянов А. В. Способ маскирования передаваемой информации. *Тр. ИСП РАН*, 2020, т. 32, вып. 6, с. 111–126. doi:10.15514/ISPRAS-2020-32(6)-9
4. Карпухин Е. О. *Методы скрытой передачи информации*. М., Горячая линия-Телеком, 2020. 80 с.
5. Шипулин П. М., Козин В. В., Шниперов А. Н. Метод организации скрытого канала передачи информации на основе протокола потоковой передачи данных. *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*, 2018, № 5, с. 834–842. doi:10.17586/2226-1494-2018-18-5-834-842
6. Пономарев И. В., Строкин Д. И. Стеганографические методы встраивания и обнаружения скрытых сообщений, использующие gif-изображения в качестве файлов-контейнеров. *Изв. Алтайского государственного университета*, 2022, № 1 (123), с. 112–115. doi:10.14258/izvasu(2022)1-18
7. Мельман А. С., Петров П. О., Шелупанов А. А., Аристов А. В., Похолков Ю. П. Встраивание информации в jpeg-изображения с маскировкой искажений в частотной области. *Докл. Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники*, 2020, т. 23, № 4, с. 45–50. doi:10.21293/1818-0442-2020-23-4-45-50
8. Воронцова Н. В., Миляева И. В. Стеганографическая защита информации. *Изв. Тульского государственного университета. Технические науки*, 2020, № 12, с. 86–95.
9. Радаев С. В., Басов О. О., Мясин К. И., Мотиенко А. И. Встраивание стеганографических сообщений в видеофайлы формата MPEG-4. *Экономика. Информатика*, 2018, т. 45, № 4, с. 769–781. doi:10.18413/2411-3808-2018-45-4-769-781
10. Солодуха Р. А. Концепция формирования системы противодействия стеганографическим каналам в компьютерных сетях органов внутренних дел. *Вестник Воронежского института МВД России*, 2021, № 1, с. 131–142.
11. Андрианов В. И., Сивков Д. И., Юркин Д. В. Методика внедрения системы предотвращения утечек информации (DLP) в коммерческую организацию для информационной сети с использованием больших данных. *Вестник Брянского государственного технического университета*, 2020, № 6, с. 38–48. doi:10.30987/1999-8775-2020-6-38-49
12. Вильховский Д. Э. Обзор методов стеганографического анализа изображений в работах зарубежных авторов. *Математические структуры и моделирование*, 2020, № 4 (56), с. 75–102. doi:10.24147/2222-8772.2020.4.75-102
13. Gutiérrez-Cárdenas J. M. Steganography and data loss prevention: An overlooked risk? *International Journal of Security and its Applications*, 2017, (11) 4, pp. 71–84. doi:10.14257/ijisia.2017.10.4.06
14. Kawaguchi E., Eason R. Principle and applications of BPCS-steganography. *Multimedia Systems and Applications*, 1998, vol. 3528, pp. 464–473.
15. Vipul Patel, Neha Soni. Uncompressed image steganography using BPCS: Survey and analysis. *IOSR Journal of Computer Engineering (IOSR-JCE)*, 2013, vol. 15, iss. 4, pp. 57–64.
16. Радаев С. В., Орлов Д. В., Басов О. О. Комбинированный стеганографический алгоритм встраивания конфиденциальной информации в цифровые изображения формата JPEG. *Экономика. Информатика*, 2017, т. 44, № 23 (272), с. 185–192.
17. Michiharu Niimi, Richard O. Eason, Hideki Noda, Eiji Kawaguchi. Intensity histogram steganalysis in BPCS-steganography. *Security and Watermarking of Multimedia Contents III*, 2001, vol. 4314, pp. 555–565. doi:10.1117/12.435440
18. Солодуха Р. А. Статистический стеганоанализ фотореалистичных изображений с использованием градиентных путей. *Вопросы кибербезопасности*, 2022, № 1 (47), с. 26–36. doi:10.21681/2311-3456-2022-1-26-36
19. Солодуха Р. А. Формирование градиентных путей изображения как предварительный этап стеганоанализа. *Вестник Воронежского института МВД России*, 2020, № 1, с. 97–106.

20. Pevný T., Bas P., Fridrich J. Steganalysis by subtractive pixel adjacency matrix. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 2010, vol. 5, no. 2, pp. 215–224. doi:10.1109/TIFS.2010.2045842
21. Dumitrescu S., Wu X., Memon D. On steganalysis of random LSB embedding in continuous-tone images. *IEEE International Conference on Image Processing*, 2002, vol. 3, pp. 641–644.
22. Fillatre L. Adaptive steganalysis of Least Significant Bit replacement in grayscale natural images. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2012, vol. 60, no. 2, pp. 556–569. doi:10.1109/TSP.2011.2174231
23. Ker A., Böhme R. Revisiting weighted stego-image steganalysis. *Proc. of SPIE*, 2008, vol. 6819, pp. 681905. doi:10.1117/12.766820
24. Ker A. A general framework for structural steganalysis of LSB replacement. *Lecture Notes in Computer Science*, 2005, vol. 3727, pp. 296–311. doi:10.1007/11558859\_22
25. Солодуха Р. А., Перминов Г. В., Атласов И. В. Редукция набора детекторов LSB с заданной достоверностью. *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*, 2022, т. 22, № 1, с. 74–81. doi:10.17586/2226-1494-2022-22-1-74-81
26. Westfeld A., Pfitzmann A. Attacks on steganographic systems: Breaking the steganographic utilities EzStego, Jsteg, Steganos and S-Tools-and Some Lessons Learned. *Lecture Notes in Computer Science*, 2000, vol. 1768, pp. 61–76. doi:10.1007/10719724\_5
27. Сирота А. А., Дрюченко М. А., Иванков А. Ю. Стегоанализ цифровых изображений с использованием методов поверхностного и глубокого машинного обучения: известные подходы и новые решения. *Вестник ВГУ. Сер.: Системный анализ и информационные технологии*, 2021, № 1, с. 33–52. doi:10.17308/sait.2021.1/3369
28. Монарев А. И., Пестунов В. А. Эффективное обнаружение стеганографически скрытой информации посредством интегрального классификатора на основе сжатия данных. *Прикладная дискретная математика*, 2018, № 40, с. 59–71. doi:10.17223/20710410/40/5
29. Сивачев А. В. Эффективность статистических методов стеганоанализа при обнаружении встраивания в вейвлет область изображения. *Вопросы кибербезопасности*, 2018, № 1 (25), с. 72–78. doi:10.21681/2311-3456-2018-1-72-78
30. Mo Chen, Mehdi Boroumand, Jessica Fridrich. Deep learning regressors for quantitative steganalysis. *Proc. IS&T Int'l. Symp. on Electronic Imaging: Media Watermarking, Security and Forensics*, 2018, pp. 160–1–160–7, doi:10.2352/ISSN.2470-1173.2018.07.MWSF-160
31. Парасич А. В., Парасич В. А., Парасич И. В. Формирование обучающей выборки в задачах машинного обучения. *Информационно-управляющие системы*, 2021, № 4, с. 61–70. doi:10.31799/1684-8853-2021-4-61-70
32. Дикий Д. И. Метод обнаружения DoS-атак на прикладном уровне в сетях «издатель-подписчик». *Информационно-управляющие системы*, 2020, № 4, с. 50–60. doi:10.31799/1684-8853-2020-4-50-60
33. Лебедев И. С. Адаптивное применение моделей машинного обучения на отдельных сегментах выборки в задачах регрессии и классификации. *Информационно-управляющие системы*, 2022, № 3, с. 20–30. doi:10.31799/1684-8853-2022-3-20-30
34. Носков С. И., Рязанцев А. И. Двухкритериальная транспортная задача. *Т-Сотт: Телекоммуникации и транспорт*, 2019, т. 13, № 2, с. 59–63. doi:10.24411/2072-8735-2018-10237
35. Подиновский В. В., Ногин В. Д. Парето-оптимальные решения многокритериальных задач. М., Наука, 1982. 256 с.
36. Пименов В. И., Пименов И. В. Анализ и визуализация данных в задачах многокритериальной оптимизации проектных решений. *Информатика и автоматизация*, 2022, № 3 (21), с. 543–571. doi:10.15622/ia.21.3.4

UDC 519.6

doi:10.31799/1684-8853-2023-2-27-38

EDN: DXURBZ

### Steganalysis of Bit Plane Complexity Segmentation algorithm

R. A. Solodukha<sup>a</sup>, PhD, Tech., Associate Professor, orcid.org/0000-0002-3878-4221, standartal@list.ru

<sup>a</sup>Voronezh State University of Engineering Technologies, 19, Revolucii Ave., 394036, Voronezh, Russian Federation

**Introduction:** Bit Plane Complexity Segmentation (BPCS) steganographic algorithm allows to payload up to 50% of the container size. Therefore, BPCS-based software is preferred by an insider to transport information from isolated corporate or departmental computer networks. At the same time, modern data leak prevention systems for corporate networks do not have a feature set related to the detection of digital steganography. One of the reasons is these systems are not provided with appropriate methodical, algorithmic and program support. **Purpose:** To develop a feature vector for BPCS steganalysis. To compare the effectiveness of steganalytical feature vectors that are adequate for our task. Using experimental data to obtain the Pareto optimal combinations of feature vectors. **Results:** We perform the tracology analysis of the BPCS algorithm. We develop the feature vector based on intensity histogram of the bit planes. We apply a regression model for machine learning procedure. Datasets are obtained by MatLab. To ensure reproducibility of the experiments the datasets and scripts are presented in Kaggle. Using experimental data we calculate the effectiveness metrics of the combinations of

feature vectors for BPCS-steganalysis. Finally, we obtain the Pareto-optimal combinations of feature vectors. **Practical relevance:** The dependence of the regression error for combinations of different dimensions feature vectors for BPCS-steganalysis is shown. With the help of the obtained estimates an analyst can vary the reliability/dimension of the feature vectors depending on the available computing power and the size of the training set.

**Keywords** – steganalysis, feature vector, BPCS-steganography, data leak prevention, steganography channel, machine learning, SVM, regression.

**For citation:** Solodukha R. A. Steganalysis of Bit Plane Complexity Segmentation algorithm. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy [Information and Control Systems]*, 2023, no. 2, pp. 27–38 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2023-2-27-38, EDN: DXURBZ

## References

- Gerling E., Ahrameeva K. The review of the modern software using steganography methods. *Ekonomika i kachestvo sistem svyazi*, 2019, no. 3 (13), pp. 51–58. Available at: <http://nirit.org/wp-content/uploads/2020/01/51-58.pdf> (accessed 23 April 2023) (In Russian).
- Orlov V. V., Alekseev A. P. Active steganography in TCP/IP nets. *Infocommunication Technology*, 2009, vol. 7, no. 2, pp. 73–78 (In Russian).
- Zakalkin P. V., Ivanov S. A., Vershennik E. V., Kir'yanov A. V. Method of masking transmitted information. *Proc. ISP RAS*, 2020, vol. 32, iss. 6, pp. 111–126 (In Russian). doi:10.15514/ISPRAS-2020-32(6)-9
- Kharpukhin E. O. *Metody skrytoy peredachi informacii [Methods of hidden information transfer]*. Moscow, Goryachaya liniya – Telekom Publ., 2020. 80 p. (In Russian).
- Shipulin P. M., Kozin V. V., Shnipirov A. N. Covert channel technique based on streaming protocol. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2018, no. 5, pp. 834–842 (In Russian). doi:10.17586/2226-1494-2018-18-5-834-842
- Ponomarev I. V., Strokin D. I. Steganographic methods for embedding and detecting hidden messages using GIF images as container files. *Izvestiya Altajskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2022, no. 1 (123), pp. 112–115 (In Russian). doi:10.14258/izvasu(2022)1-18
- Melman A. S., Petrov P. O., Shelupanov A. A., Aristov A. V., Pokholkov Y. P. Embedding information into JPEG images with distortion masking in frequency domain. *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniya i radioelektroniki*, 2020, vol. 23, no. 4, pp. 45–50 (In Russian). doi:10.21293/1818-0442-2020-23-4-45-50
- Vorontsova N. V., Milyaeva I. V. Steganographic information protection. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*, 2020, no. 12, pp. 86–95 (In Russian).
- Radaev S. V., Basov O. O., Myasin K. I., Motienko A. I. Embedding steganographic messages into MPEG-4 video files. *Economics, Information Technologies*, 2018, vol. 45, no. 4, pp. 769–781 (In Russian). doi:10.18413/2411-3808-2018-45-4-769-781
- Solodukha R. A. Conception of forming the steganographic channels counteraction system in the internal affairs computer networks. *The Bulletin of Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia*, 2021, no. 1, pp. 131–142 (In Russian).
- Andrianov V. I., Sivkov D. I., Yurkin D. V. Procedure for implementation of data leakage prevention (DLP) system to commercial company for information network using large database. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2020, no. 6, pp. 38–48 (In Russian). doi:10.30987/1999-8775-2020-6-38-49
- Vilkhovskiy D. E. A survey of steganalysis methods in the papers of foreign authors. *Matematicheskie struktury i modelirovanie*, 2020, no. 4 (56), pp. 75–102 (In Russian). doi:10.24147/2222-8772.2020.4.75-102
- Gutiérrez-Cárdenas J. M. Steganography and Data Loss Prevention: An overlooked risk? *International Journal of Security and its Applications*, 2017, (11) 4, pp. 71–84. doi:10.14257/ijisa.2017.10.4.06
- Kawaguchi E., Eason R. Principle and applications of BPCS-steganography. *Multimedia Systems and Applications*, 1998, vol. 3528, pp. 464–473.
- Vipul Patel, Neha Soni. Uncompressed Image Steganography using BPCS: Survey and Analysis. *IOSR Journal of Computer Engineering (IOSR-JCE)*, 2013, vol. 15, iss. 4, pp. 57–64.
- Radaev S. V., Orlov D. V., Basov O. O. Steganographic combination algorithm of embedding the confidential information into the JPEG. *Economics, Information Technologies*, 2017, vol. 44, no. 23 (272), pp. 185–192 (In Russian).
- Michiharu Niimi, Richard O. Eason, Hideki Noda, Eiji Kawaguchi. Intensity histogram steganalysis in BPCS-steganography. *Security and Watermarking of Multimedia Contents III*, 2001, vol. 4314, pp. 555–565. doi:10.1117/12.435440
- Solodukha R. A. Statistical steganalysis of photorealistic Images using gradient paths. *Voprosy kiberbezopasnosti*, 2022, no. 1 (47), pp. 26–36 (In Russian). doi:10.21681/2311-3456-2022-1-26-36
- Solodukha R. A. Statistical steganalysis of photorealistic images using gradient paths. *The bulletin of Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia*, 2020, no. 1, pp. 97–106 (In Russian).
- Pevný T., Bas P., Fridrich J. Steganalysis by subtractive pixel adjacency matrix. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 2010, vol. 5, no. 2, pp. 215–224. doi:10.1109/TIFS.2010.2045842
- Dumitrescu S., Wu X., Memon D. On steganalysis of random LSB embedding in continuous-tone images. *IEEE International Conference on Image Processing*, 2002, vol. 3, pp. 641–644.
- Fillatre L. Adaptive steganalysis of Least Significant Bit replacement in grayscale natural images. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2012, vol. 60, no. 2, pp. 556–569. doi:10.1109/TSP.2011.2174231
- Ker A., Böhme R. Revisiting weighted stego-image steganalysis. *Proc. of SPIE*, 2008, vol. 6819, p. 681905. doi:10.1117/12.766820
- Ker A. A general framework for structural steganalysis of LSB replacement. *Lecture Notes in Computer Science*, 2005, vol. 3727, pp. 296–311. doi:10.1007/11558859\_22
- Solodukha R. A., Perminov G. V., Atlasov I. V. Reduction of LSB detectors set with definite reliability. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2022, vol. 22, no. 1, pp. 74–81 (In Russian). doi:10.17586/2226-1494-2022-22-1-74-81
- Westfeld A., Pfitzmann A. Attacks on steganographic systems: Breaking the steganographic utilities EzStego, Jsteg, Steganos and S-Tools and Some Lessons Learned. *Lecture Notes in Computer Science*, 2000, vol. 1768, pp. 61–76. doi:10.1007/10719724\_5
- Sirota A. A., Dryuchenko M. A., Ivankov A. Yu. Steganalysis of digital images by means of shallow and deep machine learning: existing approaches and new solutions. *Proc. of VSU. Series: Systems Analysis and Information Technologies*, 2021, no. 1, pp. 33–52 (In Russian). doi:10.17308/sait.2021.1/3369
- Monarev A. I., Pestunov V. A. Efficient steganography detection by means of compression-based integral classifier. *Applied Discrete Mathematics*, 2018, no. 40, pp. 59–71 (In Russian). doi:10.17223/20710410/40/5
- Sivachev A. V. Efficiency of statistical steganalysis methods in detection embedding in wavelet domain. *Voprosy kiberbezopasnosti*, 2018, no. 1 (25), pp. 72–78 (In Russian). doi:10.21681/2311-3456-2018-1-72-78
- Mo Chen, Mehdi Boroumand, Jessica Fridrich. Deep learning regressors for quantitative steganalysis. *Proc. IS&T Int'l. Symp. on Electronic Imaging: Media Watermarking, Security, and Forensics*, 2018, pp. 160–160-7. doi:10.2352/ISSN.2470-1173.2018.07.MWSF-160
- Parasich A. V., Parasich V. A., Parasich I. V. Training set formation in machine learning tasks. Survey. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy [Information and Control Systems]*, 2021, no. 4, pp. 61–70 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2021-4-61-70
- Dikii D. I. DoS attack detection at application level in publish-subscribe networks. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy [Information and Control Systems]*, 2020, no. 4, pp. 50–60 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2020-4-50-60

33. Lebedev I. S. Adaptive application of machine learning models on separate segments of a data sample in regression and classification problems. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy [Information and Control Systems]*, 2022, no. 3, pp. 20–30 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2022-3-20-30
34. Noskov S. I., Ryazantsev A. I. Two-criteria transport problem. *T-Comm*, 2019, vol. 13, no. 2, pp. 59–63 (In Russian). doi:10.24411/2072-8735-2018-10237
35. Podinovskiy V. V., Nogin V. D. *Pareto-optimal'nye resheniya mnogokriterial'nyh zadach* [Pareto-optimal decisions of multi-criteria problems]. Moscow, Nauka Publ., 1982. 256 p. (In Russian).
36. Pimenov V., Pimenov I. Data analysis and visualization in the tasks of the project solutions multicriteria optimization. *Informatics and Automation*, 2022, vol. 21, no. 3, pp. 543–571 (In Russian). doi:10.15622/ia.21.3.4
- 

---

#### УВАЖАЕМЫЕ АВТОРЫ!

Научная электронная библиотека (НЭБ) продолжает работу по реализации проекта SCIENCE INDEX. После того как Вы регистрируетесь на сайте НЭБ (<http://elibrary.ru/defaultx.asp>), будет создана Ваша личная страничка, содержание которой составят не только Ваши персональные данные, но и перечень всех Ваших печатных трудов, имеющих в базе данных НЭБ, включая диссертации, патенты и тезисы к конференциям, а также сравнительные индексы цитирования: РИНЦ (Российский индекс научного цитирования), h (индекс Хирша) от Web of Science и h от Scopus. После создания базового варианта Вашей персональной страницы Вы получите код доступа, который позволит Вам редактировать информацию, помогая создавать максимально объективную картину Вашей научной активности и цитирования Ваших трудов.

---





## Comparison of the ways to reduce energy costs in stable massive machine-type communication systems

A. A. Burkov<sup>a</sup>, Assistant Professor, [orcid.org/0000-0002-0920-585X](https://orcid.org/0000-0002-0920-585X), [a.burkov@k36.org](mailto:a.burkov@k36.org)

<sup>a</sup>Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 67, B. Morskaya St., 190000, Saint-Petersburg, Russian Federation

**Introduction:** With the development of modern communication standards, various scenarios of the Internet of things, including massive machine-type communication, are actively considered. The main requirements for such systems are a stable operation with a potentially infinite number of devices and low energy costs. Therefore, it is an urgent task to study different ways to achieve these requirements. **Purpose:** To explore and compare the effectiveness of different approaches to reducing energy costs in systems with a potentially unlimited number of user devices. **Results:** We describe a basic system model based on an ALOHA-type algorithm for the scenario of massive machine-type communication in a channel with additive white Gaussian noise. We focus on the two ways to reduce energy consumption for the system under consideration. The first way is to use hybrid automatic repeat request methods. The second way is to use a conflict resolution algorithm with a dynamic schedule. For the basic system and the proposed methods, we carry out an analysis of the lower bounds for the signal power and costs energy-per-bit under the condition of the stable operation of the system and specified requirements for spectral efficiency. It is shown that both methods make it possible to reduce energy costs compared to the basic system. At the same time, the dynamic scheduling algorithm allows to most effectively reduce the signal power from 4.5 dB at any spectral efficiency. For energy costs per bit at spectral efficiency values less than 0.42 bit/s/Hz, hybrid automatic repeat request is most effective. However, for large values, the greatest gain comes from changing the conflict resolution algorithm. **Practical relevance:** The results obtained allow us to evaluate the potential of reducing energy costs in stable systems with a large number of user devices through the use of hybrid automatic repeat request and a conflict resolution algorithm with a dynamic schedule.

**Keywords** – massive machine-type communication, internet of things, hybrid automatic repeat request, random multiple access algorithms, spectral efficiency, energy efficiency.

**For citation:** Burkov A. A. Comparison of the ways to reduce energy costs in stable massive machine-type communication systems. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2023, no. 2, pp. 39–50. doi:10.31799/1684-8853-2023-2-39-50, EDN: EHIAOZ

### Introduction

As part of the currently unfolding 5G communication standard, as well as in the development of the next generation of 6G, Internet of Things (IoT) scenarios are actively considered [1, 2]. However, some of the most important requirements cannot be fully met within the current versions of 5G networks. The further development of the Internet of Things systems by 2030 will entail new, more stringent requirements for wireless communications in general and for the IoT in particular.

Taking into account the requirements for systems (transfer rate, delay, etc.), the following types of IoT are distinguished [3]: critical IoT, broadband IoT, industrial IoT, massive IoT.

Mass IoT is supposed to operate a huge number of simple devices that rarely transmit small amounts of data, usually powered by batteries. This system operates within a massive machine-type communication (mMTC) scenario. This scenario describes data acquisition systems with a large number of low power end devices (such as sensors) that periodically transmit a small amount of data. Examples of the mass IoT are temperature, pressure, light sensors

and meters in smart home technology. The volume of transmitted data is small, but the number of IoT devices is very large [4]. The main requirements for this scenario are [5–9]:

- a large number of devices;
- stable work of the network at high values of the intensity of the appearance of messages in the system;
- low power consumption (in order to increase the service life of the device from an autonomous power source without additional maintenance);
- delivery of messages with a given reliability;
- limitation on average delay.

The paper will consider the scenario of massive machine-type communications. In the near future, IoT devices are expected to be on the order of a million per square kilometer. In addition, each of these devices will periodically transmit a small amount of data [10]. In view of the large number of devices for the scenario under consideration, it is impossible to use methods based on the static sharing of access to a common channel resource. Therefore, it is supposed to use random multiple access algorithms [11, 12].

To support emerging system requirements, it is necessary to improve existing approaches in net-

work design. A separate task is to increase the reliability of systems by changing the structure and redundancy [13, 14]. To solve the problem of improving the energy efficiency of stable systems, two ways can be considered. The first way is to improve the methods of modulation and demodulation and the methods of error-correcting coding consistent with them [15]. For example, the use of new code modulation schemes or the use of methods for combining error-correcting coding and retransmissions, such as hybrid automatic repeat request (HARQ). The second way is to change approaches to planning and resource allocation, that is, modifying random access methods, including changing conflict resolution algorithms in the system. The use of these methods can increase the maximum of the input arrival rate to which the system operates stably, as well as reduce energy costs, which is important for devices with an autonomous power source.

In view of the foregoing, it is relevant to analyze the effectiveness of using hybrid automatic repeat request methods [16], as well as a blocked conflict resolution algorithm with a dynamic schedule [17, 18] in order to reduce the energy costs of random access systems with a potentially unlimited number of user devices.

## System model

Let us introduce a system of assumptions for the system under consideration.

*Assumption 1.* Messages of all user devices have the same length. Each message is transmitted during the same time, let's take this time as a unit of time (slot). All system working time is divided into slots. The user devices know exactly the beginning of each slot and can only transmit at the beginning of the next slot. Slots are not pinned to user devices. The number of messages appearing in the system in each slot is distributed according to the Poisson law with the parameter  $\Lambda$  [messages/slot].

*Assumption 2.* Consider a time-continuous communication channel with additive white Gaussian

noise, defined as  $Y = \sum_{i=1}^{K_t} X_i + Z$  where  $Y$  is the out-

put signal from the channel;  $X_i$  – user device signal with number  $i$  and power  $P$ ;  $Z$  is additive white Gaussian noise, with zero mean and unit variance ( $Z \sim (0, 1)$ );  $K_t$  is the number of user devices that transmitted a signal in the slot with the number  $t$ , this value is random. Such a model corresponds to a Gaussian multiple access channel. One of three events can happen in each slot:

“Success”. For a random multiple access system without HARQ methods, only one user device transmits in the slot. For a system with HRAQ methods,

only one user device transmits in the slot, as well as when two or more users transmit and the collision is successfully resolved (users who transmitted at the same time affect the probability of successful message decoding due to additional message processing on the receiving side).

“Conflict”. Two or more user devices transmit in one slot. And also when using HARQ methods – the collision was not resolved.

“Empty”. No one passes in the window.

*Remark 1.* Since the noise variance in the considered system models is equal to 1, then the signal-to-

noise ratio (SNR) in times is equal to  $\frac{P [W]}{1 [W]}$ . Thus,

the numerical value of the signal power  $P$  in watts coincides with the SNR in times. In what follows,  $P$  will mean SNR in times.

*Assumption 3.* A user device that has a message ready for transmission is said to be active. The number of users in the system is infinite (messages and users in the system are identical). Each active device sends a message to the channel with probability  $p = \frac{1}{M}$ , where  $M$  is the number of active users

known to the base station and other devices. The same message will be retransmitted until it is successfully transmitted.

*Assumption 4.* On the transmitting side, a checksum is added to all transmitted messages, after which the received data undergoes error-correcting coding and is transmitted to the channel, where noise is added to the signal. At the receiving side, error correction decoding is performed first, and then the checksum is checked. If the checksum is correct, a acknowledge is sent, if the checksum is incorrect, a negative-acknowledgement is sent. When the user receives an acknowledgement, the transmitter assumes a “Success” event occurs on the channel, when the user receives a negative-acknowledgement – “Conflict”. It is assumed that the receipt is received by the transmitter in the same slot in which the message was transmitted and cannot contain errors.

*Assumption 5.* Transmission is carried out using an error-correcting code of sufficient length with a code rate  $R = W \log_2(1 + P) - \varepsilon$ , where  $\varepsilon \rightarrow +0$ .

*Remark 2.* According to Shannon's theorem (direct coding theorem), there is such a code-modulation scheme with speed  $R$  such that the decoding error probability  $P_e$  can be arbitrarily small  $\rightarrow 0$  if the inequality  $R < C = W \log_2(1 + P)$  is satisfied. If this inequality is not satisfied, then according to Shannon's theorem (inverse coding theorem), the error probability  $\rightarrow 1$  [19].

Analysis the systems will consider signal strength and energy cost per bit for the required spectral efficiency  $T$  [bit/s/Hz].

### Analysis of the basic random multiple access system

Under the basic system is meant the operation of the ALOHA-based random access algorithm in a noisy channel.

Let's introduce the concept of signal-to-interference-plus-noise ratio (SINR), which is defined as

$$\gamma_{i,t} = \frac{\alpha_{i,t} E_i}{\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{K_t} \alpha_{j,t} E_j + N_0}, \quad (1)$$

where  $\gamma_{i,t}$  is the SINR for the  $i$ -th user device in slot number  $t$ ;  $\alpha_{i,t}$  is the signal energy loss in the channel of the  $i$ -th user device in slot number  $t$ ;  $E_i$  is the signal energy of the  $i$ -th user;  $K_t$  is the set of user devices transmitting in the slot  $t$ ;  $N_0$  is the noise energy.

Taking into account the definition of SINR, we can formulate the following statement.

*Statement 1.* The SINR ratio in the considered systems can be calculated as follows:

$$\gamma_{i,t} = \frac{1}{(K_t - 1) + P^{-1}},$$

where  $P$  is the signal strength.

*Proof:* The model of the system without attenuation and Rayleigh fading is considered, therefore for all  $i$  and  $t$  in expression (1)  $\alpha_{i,t} = 1$ . In accordance with the system of assumptions, the signal power of all user devices is the same (and the energy too), and the number of users transmitting in the slot  $t$ , taking into account the target one, is equal to  $K_t$ , then

$$\gamma_{i,t} = \frac{E}{(K_t - 1)E + N_0}.$$

Divide the numerator and denominator by the signal energy, then

$$\gamma_{i,t} = \frac{1}{(K_t - 1) + \frac{N_0}{E}}.$$

Consider separately  $\frac{N_0}{E}$ :

$$\frac{N_0 [J]}{E [J]} = \frac{P_{noise} \cdot T [W \cdot s]}{P \cdot T [W \cdot s]} = \frac{P_{noise} [W]}{P [W]}.$$

Taking into account the Assumption 2  $P_{noise} = 1$ , therefore  $\frac{N_0}{E} = \frac{1}{P} = P^{-1}$ . By substituting this value into the previous expression, we obtain Statement 1, which was required to be proved.

Let us describe the operation of a basic system with an ALOHA-type random access algorithm for a channel with AWGN, as well as give clarifications and examples.

*Remark 3.* Taking into account Assumption 5, the direct coding theorem (see Remark 2), and independent attempts to transmit a message, the following events can be defined in the system under consideration:

- successful decoding of the message occurs if  $W \log_2(1 + \gamma_{i,t}) > R$ ;
- message decoding error occurs if  $W \log_2(1 + \gamma_{i,t}) \leq R$ .

Taking into account the introduced system model, Statement 1 and Remark 3, let us specify the events occurring in the channel (see Assumption 2) for the basic system:

“Success”. Only one user  $i$  transmitted in the slot, and in this case  $\gamma_{i,t} = \frac{1}{P^{-1}} = P$ , and, consequently,  $W \log_2(1 + \gamma_{i,t}) > R$ , which corresponds to successful decoding of the message (see Remark 3).

“Conflict”. More than one user  $K_t > 1$  was transmitting in the slot. In this case, it is also easy to show that  $P > \gamma_{i,t}$  for  $K_t > 1$ . Therefore,  $W \log_2(1 + \gamma_{i,t}) \leq R$ , which corresponds to a message decoding error (see Remark 3).

“Empty”. Nobody transmitted messages and, therefore, the power at the input of the receiver are low and the base station understands that the channel is empty.

Let's consider an example of the operation of the base system from the side of the target user device (marked in Fig. 1 by the symbol \*) in the presence of other user devices in the system ( $U_i$  means the  $i$ -th user device). The events in the figure are designated as follows: “S” – success, “C” – conflict and “E” – empty. Let the signal power value in this example be  $P = 1$ .

Let's describe the events in each slot.

- First slot. Nobody sent messages – “Empty” event.
- Second slot. Passed the target (first attempt), 2nd and 4th users:

|       |   |   |   |   |   |   |   |
|-------|---|---|---|---|---|---|---|
| *     |   | 1 |   | 2 |   | 3 | 4 |
| $U_4$ |   |   |   |   |   |   |   |
| $U_3$ |   |   |   |   |   |   |   |
| $U_2$ |   |   |   |   |   |   |   |
| $U_1$ |   |   |   |   |   |   |   |
| Event | E | C | E | C | S | C | S |
|       | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |

■ Fig. 1. An example of the operation of the basic system on slots

• user  $*$  has the following SINR value  $\gamma_{*,2} = \frac{1}{2+P^{-1}} < P$ , where  $1/3 < 1$  means the message is not decoded;

• user 2:  $\gamma_{2,2} = \frac{1}{2+P^{-1}} < P$ , decoding error;

• user 4:  $\gamma_{4,2} = \frac{1}{2+P^{-1}} < P$ , decoding error.

The messages of all three users were not decoded, the base station reports the “Conflict” event.

– Third slot. Nobody sent messages – “Empty” event.

– Fourth slot. Passed target (second attempt) and 3rd users:

• user  $*$ :  $\gamma_{*,4} = \frac{1}{1+P^{-1}} < P \rightarrow 1/2 < 1$ , decoding error;

• user 2:  $\gamma_{2,4} = \frac{1}{1+P^{-1}} < P$ , decoding error.

A “Conflict” event has occurred in the slot.

– Fifth slot. Transmitted by only 1st user:

• user 1:  $\gamma_{1,5} = \frac{1}{P^{-1}} = P$ , successfully decoded the message.

The message is successfully decoded, a “Success” event occurs.

– Sixth slot. Transmitted target (third attempt), 2nd and 4th users:

• user  $*$ :  $\gamma_{*,6} = \frac{1}{2+P^{-1}} < P$ , while  $1/3 < 1$ , decoding error;

• user 2:  $\gamma_{2,6} = \frac{1}{2+P^{-1}} < P$ , decoding error;

• user 4:  $\gamma_{4,6} = \frac{1}{2+P^{-1}} < P$ , decoding error.

Event “Conflict”.

– Seventh slot. Passed only by the target user  $*$ :

• user  $*$ :  $\gamma_{*,7} = \frac{1}{P^{-1}} = P$ , successful decoding.

The message is successfully decoded, a “Success” event occurs.

Let us consider how to calculate the spectral efficiency  $T$  [bit/s/Hz] if the critical input arrival rate  $\Lambda_{cr}$  of messages/slot is known, up to which the system is stable for the systems under consideration.

*Definition 1.* The critical input arrival rate  $\Lambda_{cr}$  is related to the spectral efficiency  $T$  by the following expression:

$$T = \frac{\Lambda_{cr} R}{W}. \quad (2)$$

*Remark 4.* For systems with an ALOHA-type algorithm, the average number of transmissions  $E[S]$  is related to the critical input arrival rate  $\Lambda \leq \Lambda_{cr}$  by the following expression  $E[S] = 1/\Lambda$  [20].

Taking into account what was written earlier, we introduce the following Assumption.

*Statement 2.* The spectral efficiency for the base system is calculated as

$$T = \frac{\log_2(1+P) - \varepsilon}{e}, \quad (3)$$

where  $\varepsilon \rightarrow 0$ .

*Proof:* According to Definition 1 and Remark 4, the spectral efficiency can be redefined as follows:

$$T = \frac{R}{WE[S]}. \quad (4)$$

The average number of message transmissions is calculated as

$$E[S] = \sum_{s=1}^{\infty} s \Pr\{S = s\},$$

where  $\Pr\{S = s\} = P_e(s-1) - P_e(s)$  and  $P_e(s)$  is the probability that  $s$  transmissions in a row were unsuccessful. In accordance with the definition of the concept of successful message decoding from Remark 3, we can write the following:

$$P_e(s) = \prod_{i=1}^s \Pr\{R \geq W \log_2(1 + \gamma_{*,i})\},$$

where  $\gamma_{*,i}$  is the SINR for the target user device  $*$ . Taking into account the fact that the transmissions are independent and the distribution  $\gamma_{*,i}$  does not change with time, this expression can be rewritten as follows:

$$P_e(s) = \left( \Pr\{R \geq W \log_2(1 + \gamma_{*,1})\} \right)^s.$$

In accordance with the introduced model of the system  $R = W \log_2(1 + P) - \varepsilon$ , where  $\varepsilon \rightarrow +0$  (see Assumption 5):

$$P_e(s) = \left( \Pr\{W \log_2(1 + P) - \varepsilon \geq W \log_2(1 + \gamma_{*,1})\} \right)^s,$$

where  $\varepsilon \rightarrow 0$ .

Since the band when calculating the speed and throughput are the same, then in the condition  $\Pr\{W \log_2(1 + P) - \varepsilon \geq W \log_2(1 + \gamma_{*,s})\}$ , it can be omitted. Provided that the logarithm is a monotonically increasing function and  $\varepsilon \rightarrow 0$ , then the logarithm can be omitted in the condition and its arguments can be compared. After some simplifications, write:

$$P_e(s) = \left( \Pr\{P > \gamma_{*,1}\} \right)^s.$$

The calculation of SINR for users transmitting at time  $t$ , taking into account the system of assumptions, was defined earlier (see Statement 1). When

adding a target user to the channel, SINR for it is defined as  $\gamma_{*,s} = \frac{1}{K_s^* + P^{-1}}$ , where  $K_s^*$  is the number of users who transmitted together with the target during the  $s$ -th transmission. It can be easily seen that  $\frac{1}{K_s^* + P^{-1}} < P$ , only for  $K_s^* > 0$ . Since the system is analyzed in saturation mode, then  $K_s^*$  is distributed according to the Poisson law with parameter 1. Then:

$$\Pr\{P > \hat{\gamma}_{*,s}\} = \Pr\{K_s^* > 0\} = 1 - e^{-1}.$$

Whence it follows that

$$P_e(s) = (1 - e^{-1})^s.$$

Let's write  $\Pr\{S = s\}$ :

$$\Pr\{S = s\} = (1 - e^{-1})^{s-1} - (1 - e^{-1})^s = (1 - e^{-1})^{s-1} e^{-1}.$$

It is easy to show that in this case:

$$E[S] = \sum_{s=1}^{\infty} s(1 - e^{-1})^{s-1} e^{-1} = e.$$

Substituting the values of the code rate  $R$  in accordance with Assumption 5 and  $E[S]$  calculated earlier into expression (4), we obtain Statement 2, which was required to be proved.

*Remark 5.* As is known, the critical input arrival rate  $\Lambda_{cr}$  for the basic algorithm of the ALOHA-type is equal to  $e^{-1}$ , substituting this value into expression (2) we get a result similar to Statement 2, which is explained by Remark 4.

Let's show how to calculate the lower bounds for signal power  $P$  and energy per bit  $\frac{E_b}{N_0}$ .

*Statement 3.* The lower bound for the signal power  $P$  in the base system for a given spectral efficiency  $T$  is defined as

$$P > 2^{eT} - 1. \quad (5)$$

*Proof:* This statement follows directly from expression (3) if we express  $P$  from it.

The value of energy per bit can  $\frac{E_b}{N_0}$  be obtained by recalculating from the signal power. For this, we introduce the following definition.

*Definition 2.* The energy per bit is related to the signal power  $P$  as follows:

$$\frac{E_b}{N_0} \triangleq PE[S] \frac{W}{R},$$

where  $E[S]$  is the average number of transmissions before the successful delivery of one message;  $W$  is the channel bandwidth,

For the base system, the lower bound for energy cost per bit  $\frac{E_b}{N_0}$  is calculated according to the following statement.

*Statement 4.* The value of the lower bound on energy costs per bit  $\frac{E_b}{N_0}$  for a given spectral efficiency  $T$  for the basic system can be found as

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{2^{eT} - 1}{T}. \quad (6)$$

*Proof:* It follows from Remark 4 that, for the system under consideration, the spectral efficiency can be rewritten as  $T = \frac{R}{WE[S]}$ .

With this in mind, it can be seen that the definition of energy per bit (see Definition 2) can be written as follows:

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{P}{T},$$

where

$$P = \frac{E_b}{N_0} T.$$

Substituting this value into expression (3) from Statement 2, we get

$$T = \frac{\log_2 \left( 1 + \frac{E_b}{N_0} T \right) - \varepsilon}{e}.$$

Let us express from the given expression  $\frac{E_b}{N_0}$ , we will obtain Statement 4, which was required to be proved.

### Analysis of the system using HARQ with Chase combining

Let us describe the operation of a system with a random access algorithm of the ALOHA-type when using HARQ with Chase combining, as well as give clarifications and examples.

Taking into account Assumption 5, the direct coding theorem and the fact that the HARQ with Chase combining can be considered as signal accumulation at the receiver [16]. Then we can rewrite the calculation of SINR, taking into account Chase combining, as  $\tilde{\gamma}_{i,n} = \sum_{j=1}^n \gamma_{i,j}$ , where  $\tilde{\gamma}_{i,n}$  is the SINR

of the  $i$ -th user during the  $n$ -th attempt to send a message, taking into account the accumulation of energy;  $n$  is the number of attempts to send a message to the  $i$ -th user.

*Remark 6.* Then, taking into account the dependence that has arisen when trying to send a message, you can redefine the following events:

- successful decoding of the message. Occurs if

$$W \log_2(1 + \tilde{\gamma}_{i,n}) = W \log_2 \left( 1 + \sum_{j=1}^n \gamma_{i,j} \right) > R;$$

- message decoding error. Occurs if

$$W \log(1 + \tilde{\gamma}_{i,n}) = W \log \left( 1 + \sum_{j=1}^n \gamma_{i,j} \right) \leq R.$$

Taking into account the model introduced earlier, and the accumulation of energy due to HARQ, we will clarify the events occurring in the channel (see Assumption 2) for a system with HARQ:

“Success”. Only one user  $i$  transmitted in the slot,

and in this case  $\tilde{\gamma}_{i,n} = \sum_{j=1}^{n-1} \gamma_{i,j} + \frac{1}{P-1} = \sum_{j=1}^{n-1} \gamma_{i,j} + P$ ,

and therefore  $W \log(1 + \tilde{\gamma}_{i,n}) > R$ , which corresponds to successful decoding of the message (see Remark 6). And also when transmitting by several users, if for one of the users (\*) in the current collision

it was fulfilled  $W \log \left( 1 + \sum_{j=1}^n \tilde{\gamma}_{*,j} \right) > R$ , which

also leads to successful decoding.

“Conflict”. More than one user  $K_i > 1$  was transmitting in the slot, and for all users in the collision

$W \log \left( 1 + \sum_{j=1}^n \tilde{\gamma}_{*,j} \right) \leq R$ , which corresponds to a message decoding error for all users in the mixture (see Remark 6).

“Empty”. Nobody transmitted messages, and, therefore, the power at the input of the receiver is low and the base station understands that the channel is empty.

Let's consider an example of the operation of a system with HARQ from the side of the target user device (marked in Fig. 2 by the symbol \*) in an example similar to the previous one. As before, other user devices are designated as  $U_i$  – the  $i$ -th user device. Taking into account the fact that attempts to decode one message during retransmissions are now dependent, we will consider each transmission in more detail. Let the value of the signal strength, as before,  $P = 1$ .

– First slot. Nobody sent messages is “Empty” event.

|       |       |   |   |   |   |   |   |
|-------|-------|---|---|---|---|---|---|
| *     |       | 1 |   | 2 |   | 3 |   |
| $U_4$ |       |   |   |   |   |   |   |
| $U_3$ |       |   |   |   |   |   |   |
| $U_2$ |       |   |   |   |   |   |   |
| $U_1$ |       |   |   |   |   |   |   |
| Event | E     | C | E | C | S | S | E |
|       | 1     | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|       | Slots |   |   |   |   |   |   |

■ Fig. 2. An example of the operation of the system when using HARQ with Chase combining

– Second slot. Passed the target (first attempt), 2nd and 4th users:

- user \*:  $\tilde{\gamma}_{*,1} = \gamma_{*,2} = \frac{1}{2 + P^{-1}} < P$ ,  $1/3 < 1$ , hence decoding error;

- user 2:  $\tilde{\gamma}_{2,1} = \gamma_{2,2} = \frac{1}{2 + P^{-1}} < P$ , decoding error;

- user 4:  $\tilde{\gamma}_{4,1} = \gamma_{4,2} = \frac{1}{2 + P^{-1}} < P$ , decoding error.

Event “Conflict”.

– Third slot. Nobody sent messages is “Empty” event.

– Fourth slot. Passes target (second try) and 3rd users:

- user \*:  $\tilde{\gamma}_{*,2} = \gamma_{*,2} + \gamma_{*,4} = \frac{1}{2 + P^{-1}} + \frac{1}{1 + P^{-1}} = \frac{3 + P^{-1}}{2 + 3P^{-1} + P^{-2}} < P$ ,  $4/6 < 1$ , hence decoding error;

- user 3:  $\tilde{\gamma}_{3,1} = \gamma_{3,4} = \frac{1}{1 + P^{-1}} < P$ ,  $1/2 < 1$ , decoding error.

Both messages are not decoded, “Conflict” event.

– Fifth slot. Transmitted by only 1st user:

- user 1:  $\tilde{\gamma}_{1,1} = \gamma_{1,5} = \frac{1}{P-1} = P$ , successful decoding.

User 1's message is successfully decoded, a “Success” event occurs.

– Sixth slot. The target (third attempt), 2nd and 4th users were sent again:

- user \*:  $\tilde{\gamma}_{*,3} = \gamma_{*,2} + \gamma_{*,4} + \gamma_{*,6} = \frac{1}{2 + P^{-1}} + \frac{1}{1 + P^{-1}} + \frac{1}{2 + P^{-1}} = \frac{4 + 3P^{-1}}{2 + 3P^{-1} + P^{-2}} > P$ ,  $7/6 > 1$ , hence the successful decoding of the message;

- user 2:  $\tilde{\gamma}_{2,2} = \gamma_{2,2} + \gamma_{2,6} = \frac{1}{2 + P^{-1}} + \frac{1}{2 + P^{-1}} = \frac{2}{2 + P^{-1}} < P$ ,  $2/3 < 1$ , decoding error;

- user 4:  $\tilde{\gamma}_{4,2} = \gamma_{4,2} + \gamma_{4,6} = \frac{1}{2 + P^{-1}} + \frac{1}{2 + P^{-1}} = \frac{2}{2 + P^{-1}} < P$ , decoding error.

The target user has accumulated enough power to successfully decode, that is,  $\tilde{\gamma}_{*,3} > P$ , hence  $W \log(1 + \tilde{\gamma}_{i,n}) > R$ , which means that on the third attempt, a successful decoding occurs for the message of the target user. "Success" event for user device \*.

– Seventh slot. Nobody sent messages is "Empty" event.

During the demonstration of the example, it is shown that the use of HARQ can complicate the decoding procedure, but at the same time, in a specific example, it has reduced the number of transmissions for the target user, which also reduces power consumption and delay in the system.

Let us introduce a statement for calculating the spectral efficiency of a system with HARQ.

*Statement 5.* The spectral efficiency  $T$  of the system when using HARQ with Chase combining is defined as

$$T = \frac{\log(1 + P) - \varepsilon}{S(P)}. \quad (7)$$

The function  $S(P)$ , which is included in expression (7), determines the average number of transmissions of the message before success and is calculated as follows:

$$S(P) = \sum_{s=1}^{\infty} s(P_e(s-1) - P_e(s)),$$

where  $P_e(s) = \Pr \left\{ P > \sum_{i=1}^s \frac{1}{K_i^* + P^{-1}} \right\}$ , and  $K_1^*, K_2^*, \dots$

is a sequence of independent random variables identically distributed according to the Poisson law with parameter 1.

*Proof:* The proof is similar to the previous one, with some differences. For this type of HARQ,  $P_e(s)$  is defined as [16]

$$P_e(s) = \Pr \left\{ R \geq W \log \left( 1 + \sum_{i=1}^s \hat{\gamma}_{*,i} \right) \right\}.$$

This condition can be simplified similarly to the condition in the analysis of the basic system:

$$P_e(s) = \Pr \left\{ P > \sum_{i=1}^s \hat{\gamma}_{*,i} \right\}.$$

Taking into account the addition of the target user device to the system  $\hat{\gamma}_{*,i} = \frac{1}{K_i^* + P^{-1}}$ , where

$K_i^*$  is the number of users who transmitted with the target user device when the  $i$ -th message was sent. Since the system is analyzed in the saturation mode,

then  $K_1^*, K_2^*, \dots$  is a sequence of independent random variables identically distributed according to the Poisson law with parameter 1. Whence Assumption 5 follows and follows.

The paper does not consider the issue of numerical calculation of the function  $S(P)$ , since this is a difficult task from the field of probability theory. Given that the number of transfers is a random variable that has a finite mathematical expectation and variance for any  $P > 0$  (within the framework of the system model under consideration), then in the work, when obtaining numerical results, the Monte Carlo method will be used to calculate this function.

If possible, a way to calculate lower bounds for signal power  $P$  and energy per bit  $\frac{E_b}{N_0}$  in a HARQ system.

It follows directly from Statement 5.

*Statement 6.* The lower bound for the signal power  $P$  in the system with HARQ Chase combining for a given spectral efficiency  $T$  is defined as a solution to the equation

$$P = 2^{S(P)T} - 1. \quad (8)$$

*Proof:* This statement directly follows from expression (7) if we express  $P$  from it.

The value of energy per bit  $\frac{E_b}{N_0}$ , as before, can be obtained by recalculation from the signal strength.

*Statement 7.* The value of the lower bound costs of energy per bit  $\frac{E_b}{N_0}$  for a given spectral efficiency  $T$  for a system with the first type of HARQ can be found as a solution to the equation

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{2^{S\left(\frac{E_b}{N_0}T\right)T} - 1}{T}. \quad (9)$$

*Proof:* The proof is similar to Statement 4, so we will show briefly. It follows from Remark 4 and Statement 5 that for the system under consideration the spectral efficiency can be rewritten as

$$T = \frac{R}{WS(P)},$$

where

$$P = \frac{E_b}{N_0} T.$$

Substituting this value into expression (3) from Statement 2, we get

$$T = \frac{\log_2 \left( 1 + \frac{E_b}{N_0} T \right) - \varepsilon}{S \left( \frac{E_b}{N_0} T \right)}$$

After a number of simplifications, we obtain Statement 7, which was to be proved.

**Analysis of a system with a blocked random access algorithm with a dynamic schedule**

Consider changing the random multiple access algorithm in a noisy channel. As an algorithm, a blocked conflict resolution algorithm with a dynamic schedule will be used [17, 18]. The algorithm works in sessions. The session starts with a “Conflict” of some multiplicity (multiplicity 0 – “Empty” event, multiplicity – “Success” event, multiplicity > 1 – “Conflict” event) and lasts in accordance with the conflict resolution algorithm. Let’s change Assumption 3.

*Assumption 3\**. There are an infinite number of unique preambles, arranged in such a way that when superimposed on the channel, the base station can determine the list of preambles in the mixture, but cannot recover the user data. When a message occurs at the user device, it transmits it in the next

slot, if the system is not in scheduled mode, otherwise it postpones transmission until this mode is completed. On a collision event, when > 1 preamble is detected, the base station generates a schedule for the system to switch to the time division mode, where the preamble list determines the slot order for the user device to retransmit the message on the given schedule.

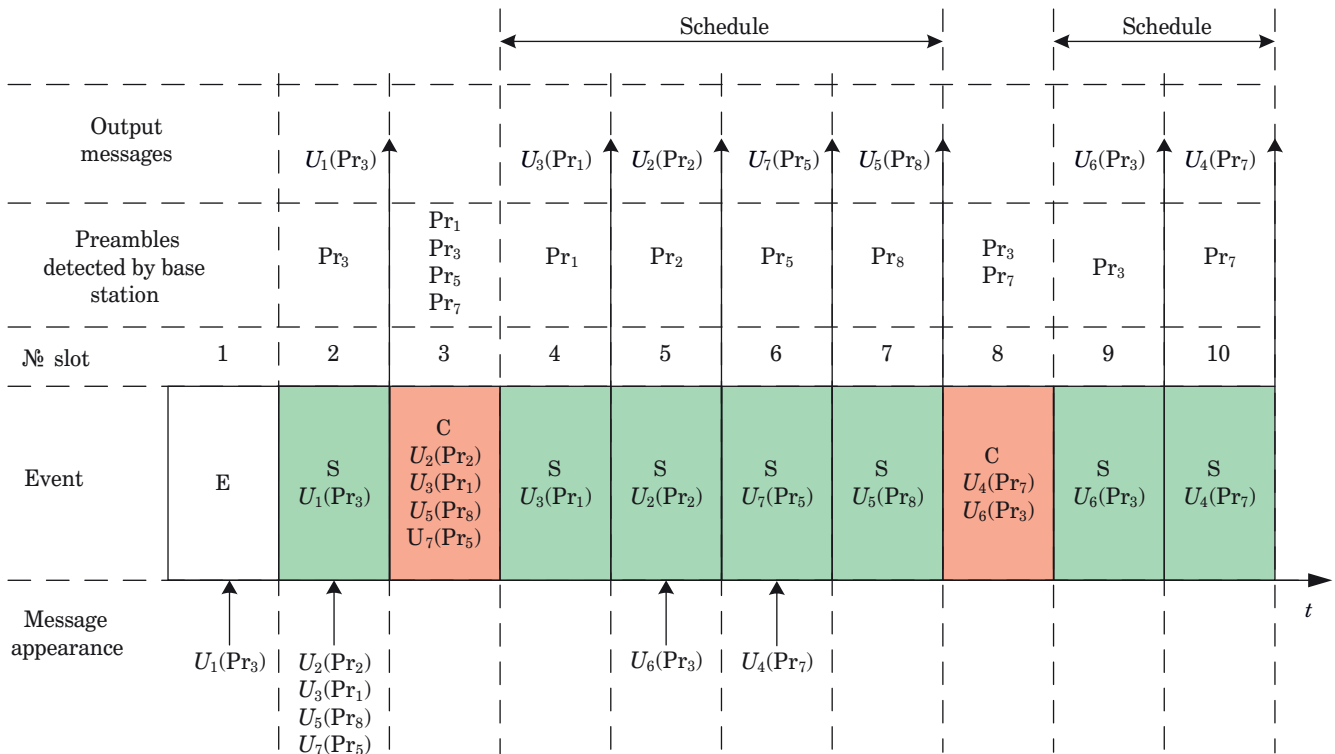
An example of the operation of the algorithm is shown in Fig. 3. Let’s describe the events in the system by slots:

– First slot. At the beginning of operation, the system is empty, that is, there are no user devices with messages ready to be transmitted. The slot has an “Empty” event. During the slot a message appears to the first user and he selects the third preamble  $U_1(Pr_3)$ .

– Second slot. At the start of the second slot, the first user has a message ready and successfully sends it. A “Success” event has occurred in the slot. During the slot, messages appear for 2, 3, 5 and 7 users who have selected 2, 1, 8 and 5 preambles respectively –  $U_2(Pr_2)$ ,  $U_3(Pr_1)$ ,  $U_5(Pr_8)$ ,  $U_7(Pr_5)$ .

– Third slot. 2, 3, 5 and 7 users decided to send the message, a “Conflict” occurred. The base station detected 2, 1, 8 and 5 preambles. According to the list of preambles, a schedule is built for the next fourth slot.

– Fourth slot. In accordance with the schedule transmits  $U_3(Pr_1)$ , the event “Success”.



■ Fig. 3. An example of the operation of a blocked conflict resolution algorithm with a dynamic schedule



– Fifth slot. In accordance with the schedule transmits  $U_2(\text{Pr}_2)$ , the event “Success”. During the slot, a message appeared for the 6th user who selected the 3rd preamble –  $U_6(\text{Pr}_3)$ . Since the system is in scheduled mode, it postpones sending the message until the mode ends.

– Sixth slot. Transmits  $U_7(\text{Pr}_5)$ , “Success” event as scheduled. During the slot, a message appeared for the 4th user who chose the 7th preamble –  $U_4(\text{Pr}_7)$ . Since the system is in scheduled mode, it postpones sending the message until the mode ends.

– Seventh slot. Transmits  $U_5(\text{Pr}_8)$ , “Success” event as scheduled.

– Eighth slot. By the beginning of the eighth slot, the system ends in schedule mode, users 6 and 4, who postponed the transmission of messages, can now transmit. A “Conflict” situation appears in the slot. The base station detected preambles 3 and 7, respectively, and generated a new schedule.

– Ninth and tenth slots. Users  $U_6(\text{Pr}_3)$  and  $U_4(\text{Pr}_7)$  successfully transmit messages in accordance with the schedule.

For the considered algorithm, the papers [17, 18] provide an analysis of the critical input arrival rate, and it is shown that  $\Lambda_{cr} = 1$ . Based on this and Definition 1, we introduce the following statement.

*Statement 8.* The lower bound for the signal power  $P$  for a given spectral efficiency  $T$  for a blocking algorithm with a dynamic schedule for an infinite number of preambles is defined as

$$P = 2^T - 1. \quad (10)$$

*Proof:* Assumption 5 implies that  $R = W \log(1 + P) - \varepsilon$ , where  $\varepsilon \rightarrow +0$ , taking into account Definition 1, we can write

$$T < \Lambda_{cr} \log(1 + P),$$

where should

$$P > 2^{\frac{T}{\Lambda_{cr}}} - 1.$$

As noted earlier, it follows from [17, 18] that for the considered algorithm  $\Lambda_{cr} = 1$ , then

$$P > 2^T - 1.$$

Which is what needed to be proven.

Now let's write a statement for calculating the lower bound costs for energy per bit  $\frac{E_b}{N_0}$  in the system under consideration.

*Statement 9.* The lower bound on the energy per bit  $\frac{E_b}{N_0}$  for a given spectral efficiency  $T$  for a block-

ing algorithm with an infinite number of preambles is defined as

$$\frac{E_b}{N_0} > \frac{2(2^T - 1)}{T}. \quad (11)$$

*Proof:* From expression (10) it follows that  $P = 2^T - 1$ . In accordance with the definition of one, we can write  $R = \frac{WT}{\Lambda_{cr}}$ , since  $\Lambda_{cr} = 1$ , then  $R = WT$ .

Taking into account Definition 2, we obtain

$$\frac{E_b}{N_0} > E[S] \frac{2^T - 1}{T}.$$

Let us describe the calculation of the average number of retransmissions  $E[S]$  for a system with a blocked conflict resolution algorithm. Consider the average number of transmissions for a target user device added to the system at a random time (this approach does not violate the system performance). If no one appeared during the previous schedule, then the user will make only 1 transfer. Otherwise, the user will get into conflict on the first transfer and will transfer a second time according to the schedule. In accordance with the system of assumptions and the features of the operation of the blocked algorithm, the user's message will be successfully delivered when scheduled. When considering the operation of the system in saturation mode, the probability that no one appeared in the system during the time schedule tends to zero. Therefore, the subscriber will send the message twice, i.e.  $E[S] = 2$ . Means

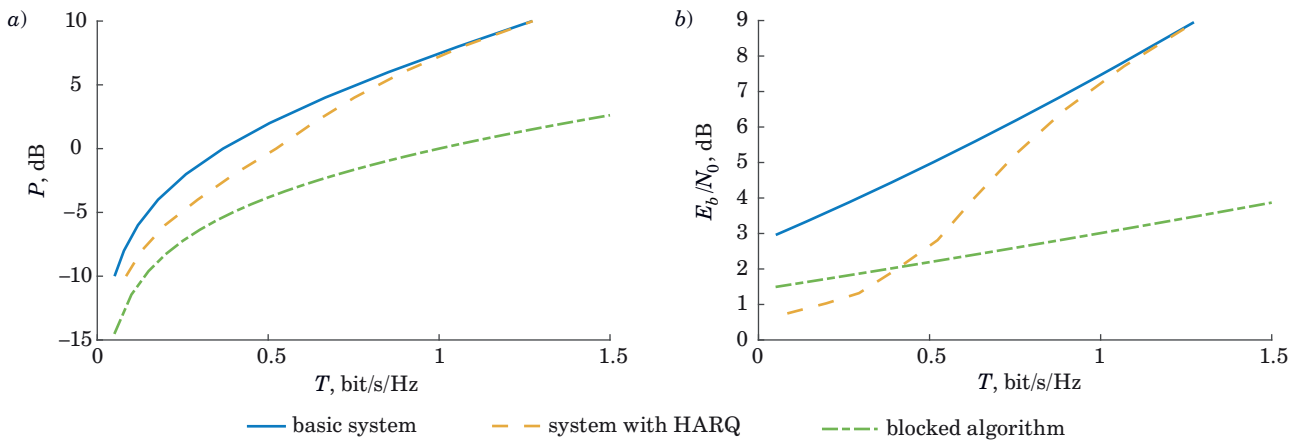
$$\frac{E_b}{N_0} > \frac{2(2^T - 1)}{T}.$$

Which is what needed to be proven.

## Numerical results

Using the formulas obtained earlier for the lower bounds of energy consumption, we will compare the considered systems.

Figure 4, *a* shows the lower bounds for the signal power obtained by formula (5) for the basic system, by formula (8) for a system with HARQ (using the Monte Carlo method for the average number of transmissions) and by formula (10) for a system with a blocked conflict resolution algorithm due to a dynamic schedule. It follows from the figure that the use of HARQ makes it possible to reduce the lower bound for the signal power  $P$  at spectral efficiency values less than 1 bit/s/Hz;



■ Fig. 4. The lower bound of the signal power (a) and on the energy per bit (b) for the systems under consideration on the required spectral efficiency

at higher values, the signal power begins to coincide with the base system. The maximum energy gain of HARQ relative to the base system is about 2 dB in the region of spectral efficiency  $T = 0.5$  bit/s/Hz. However, the blocked algorithm makes it possible to further reduce the lower bound for the signal power, gaining from 4.5 dB relative to the base system, and from 3.4 dB relative to the system with HARQ. This gain grows with the increase in the values of the spectral efficiency of the system.

Figure 4, b shows the lower bounds for energy costs per bit obtained by formula (6) for the base system, by formula (9) for a system with HARQ (using the Monte Carlo method for the average number of transmissions) and by formula (11) for systems with a blocked conflict resolution algorithm due to a dynamic schedule. It follows from the figure that the use of HARQ makes it possible to reduce the cost per bit compared to the basic system, however, as the required spectral efficiency increases, the gain decreases. The maximum energy gain is about 2.5 dB at the value of the spectral efficiency  $T = 0.28$  bit/s/Hz. The minimum gain of a system with a blocked algorithm in relation to the basic one is 1.5 dB and grows with an increase in the spectral efficiency. However, when comparing the blocked algorithm with HARQ, it can be seen that at spectral efficiency values below a certain value ( $T = 0.42$  bit/s/Hz), the blocked algorithm has higher costs energy per bit. This is due to the specifics of the algorithm's collision resolution method, which increases the average number of message transmissions in the system. But after the value of the spectral efficiency  $T = 0.42$  bit/s/Hz, the energy per bit for the blocked algorithm turns out to be lower than systems with HARQ, and the energy gain increases.

## Conclusion

The paper analyzed and compared the effectiveness of various approaches to reduce energy costs in massive machine-type communication systems with a potentially unlimited number of users. For this purpose, a basic system model was formulated and described based on the ALOHA-type algorithm for the massive machine-type scenario in a channel with additive white Gaussian noise. Two ways to reduce energy costs for were also described.

The first way to use it is to apply hybrid automatic repeat request methods based on Chase combining. For this approach, within the framework of the introduced model, an example of the operation of the system was shown with a description of the main features.

The second way is to change the random multiple access algorithm to a conflict resolution algorithm with a dynamic schedule. For this algorithm in the base model, assumption 3 from the base model was changed and an example of the system operation is given.

For all considered systems, an analysis of the lower bounds for signal power and costs energy per bit during stable working and specified requirements for spectral efficiency is given. It is shown that both methods make it possible to reduce energy costs compared to the basic system. When calculating the lower bounds in the system with hybrid automatic repeat request, the Monte Carlo method was used to determine the average number of message transmissions before successful decoding.

When analyzing the dependencies of the lower bound for the signal power on the spectral efficiency of the system, the following results were obtained. The use of HARQ allows the signal power at spectral efficiency values (less than 1 bit/s/Hz), at higher values the signal power begins to match the base

system. The maximum energy gain from using hybrid automatic repeat request relative to the base system is about 2 dB with a spectral efficiency of about 0.5 bit/s/Hz. The blocked algorithm reduces the lower bound more efficiently than hybrid automatic repeat request. Gain relative to the base system from 4.5 dB, and relative to the system with HARQ from 3.4 dB. This gain grows with the increase in the values of the spectral efficiency of the system.

When analyzing the dependence of costs energy per bit on the spectral efficiency of the system, the following results were obtained. At values of spectral efficiency less than 0.42 bit/s/Hz, the use of hybrid automatic repeat request most effectively reduces energy consumption (energy gain of the order of 2.5 dB at a spectral efficiency of 0.28 bit/s/Hz). However, for large values of the spectral efficiency, the energy per bit for the blocked algorithm is lower than for a system with HARQ.

The results obtained allow us to evaluate the potential for reducing energy costs in stable systems with a potentially unlimited number of user devices through the use of hybrid automatic repeat request and a algorithm conflict resolution with dynamic schedule. However, when analyzing the base system and the hybrid automatic repeat request, an unrealistic assumption was assumed – the system and users know exactly the number of active users. This assumption can be taken into account and corrected by using methods for estimating the number of active users (see, for example, [21, 22]).

### Financial support

The paper was prepared with the financial support of the Russian Science Foundation, project No. 22-19-00305 “Spatial-temporal stochastic models of wireless networks with a large number of users”.

### References

1. Letaief K. B., Chen W., Shi Y., Zhang J., & Zhang Y. J. A. The roadmap to 6G: AI empowered wireless networks. *IEEE Communications Magazine*, IEEE, 2019, vol. 57(8), pp. 84–90. doi:10.1109/MCOM.2019.1900271
2. Piran M. J., & Suh D. Y. Learning-driven wireless communications, towards 6G. *2019 Intern. Conf. on Computing, Electronics & Communications Engineering (iCCECE)*, IEEE, 2019, pp. 219–224. doi:10.1109/iCCECE46942.2019.8941882
3. Zaidi A., Hussain Y., Hogan M., & Kuhlins C. Cellular IoT evolution for industry digitalization. *Ericsson White Paper*, GFMC, 2019, vol. 19, p. 17.
4. Vaezi M., Azari A., Khosravirad S. R., Shirvanimoghaddam M., Azari M. M., Chasaki D., & Popovski P. Cellular, wide-area, and non-terrestrial IoT: A survey on 5G advances and the road toward 6G. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, IEEE, 2022, vol. 24(2), pp. 1117–1174. doi:10.1109/COMST.2022.3151028
5. Borisovskaya A. V., & Turlikov A. M. Reducing energy consumption in the IoT systems with unlimited number of devices. *2021 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF)*, IEEE, 2021, pp. 1–6. doi:10.1109/WECONF51603.2021.9470596
6. Stusek M., Stepanov N., Moltchanov D., Masek P., Mozny R., Turlikov A., & Hosek J. Optimizing NB-IoT communication patterns for permanently connected mMTC device. *2022 IEEE Wireless Communications and Networking Conf. (WCNC)*, IEEE, 2022, pp. 1413–1418. doi:10.1109/WCNC51071.2022.9771847
7. Stepanov N. V., Tyurlikov A. M., & Begishev V. O. Optimal device associations in machine-to-machine networks of NB-IoT and LTE-M standards. *Systems and Means of Informatics*, 2022, vol. 32, no. 3, pp. 63–70 (In Russian). doi:10.14357/08696527220306
8. Borisovskaya, A. V., Turlikov A. M. Estimation of the average age of information in random access systems with multiple departure. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy [Information and Control Systems]*, 2023, no. 1, pp. 51–60 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2023-1-51-60
9. Galinina O. S., Andreev S. D., Tyurlikov A. M. On multiple access of a large number of machine-type devices in cellular networks. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy [Information and Control Systems]*, 2018, no. 4, pp. 105–114 (In Russian) doi:10.31799/1684-8853-2018-4-105-114
10. Chen S., Liang Y. C., Sun S., Kang S., Cheng W., & Peng M. Vision, requirements, and technology trend of 6G: How to tackle the challenges of system coverage, capacity, user data-rate and movement speed. *IEEE Wireless Communications*, IEEE, 2020, vol. 27(2), pp. 218–228. doi:10.1109/MWC.001.1900333
11. Clazzer F., Munari A., Liva G., Lizaro F., Stefanovic C., & Popovski P. From 5G to 6G: Has the time for modern random access come? *arXiv preprint arXiv:1903.03063*, 2019.
12. Wu Y., Gao X., Zhou S., Yang W., Polyanskiy Y., & Caire G. Massive access for future wireless communication systems. *IEEE Wireless Communications*, IEEE, 2020, vol. 27(4), pp. 148–156. doi:10.1109/MWC.001.1900494
13. Bogatyrev V. A., Bogatyrev S. V., & Bogatyrev A. V. Model and interaction efficiency of computer nodes based on transfer reservation at multipath routing, *2019 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF)*, IEEE, 2019, pp. 1–4. doi:10.1109/WECONF.2019.8840647

14. Bogatyrev V. A., Bogatyrev A. V., & Bogatyrev S. V. Redundant multi-path service of a flow heterogeneous in delay criticality with defined node passage paths. *Journal of Physics: Conference Series*, IOP Publishing, 2021, vol. 1864, no. 1, p. 012094. doi:10.1088/1742-6596/1864/1/012094
15. Bachevsky S. V., Dvornikov S. V., Dvornikov S. S., Tsarelungo A. B. Radio speed proposals. *Questions of Radio Electronics. Series: Television Technology*, Radio electronics issues, 2021, no. 4, pp. 40–45 (In Russian).
16. Burkov A. A., Turlikov A. M. An upper estimate of the spectral efficiency for systems with hybrid automatic repeat request with a restriction on the type of modulation. *Questions of Radio Electronics. Series: Television Technology*, Radio electronics issues, 2020, vol. 1, pp. 74–83 (In Russian).
17. Burkov A., Frolov A., & Turlikov A. Contention-based protocol with time division collision resolution. *2018 10th Intern. Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT)*, IEEE, 2018, pp. 1–4. doi:10.1109/ICUMT.2018.8631217
18. Burkov A. A., Saveliev A. A. Comparison of blocked and nonblocked algorithm random multiple access with a dynamic schedule. *Scientific Session of the SUAI Collection of Reports*, Saint-Petersburg, 2019, vol. 1, pp. 306–313 (In Russian).
19. Cover T. M., & Thomas J. A. *Elements of Information Theory*. John Wiley & Sons, 2012.
20. Burkov A., Shneer S., & Turlikov A. An achievability bound of energy per bit for stabilized massive random access Gaussian channel. *IEEE Communications Letters*, IEEE, 2020, vol. 25(1), pp. 299–302. doi:10.1109/LCOMM.2020.3023461
21. Yu J., Zhang P., Chen L., Liu J., Zhang R., Wang K., & An J. Stabilizing frame slotted ALOHA-based IoT systems: A geometric ergodicity perspective. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, IEEE, 2020, vol. 39(3), pp. 714–725. doi:10.1109/JSAC.2020.3018795
22. Liu J., Seo J. B., Jin H. Online transmission control for random access with multipacket reception and reservation. *IEEE Internet of Things Journal*, IEEE, 2022, vol. 9, iss. 22. doi:10.1109/JIOT.2022.3188280

УДК 004.728.3.057.4

doi:10.31799/1684-8853-2023-2-39-50

EDN: EHYAOZ

### Сравнение способов снижения затрат энергии в стабильных системах массовой межмашинной связи

А. А. Бурков<sup>а</sup>, ассистент, orcid.org/0000-0002-0920-585X, a.burkov@k36.org

<sup>а</sup>Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Б. Морская ул., 67, Санкт-Петербург, 190000, РФ

**Введение:** при развитии современных стандартов связи активно рассматриваются различные сценарии интернета вещей, в том числе массовой межмашинной связи. Основными требованиями к таким системам являются стабильная работа при потенциально бесконечном числе устройств и низкие затраты энергии, поэтому исследование способов достижения данных требований актуально. **Цель:** исследовать и сравнить эффективность различных подходов к снижению затрат энергии в системах с потенциально неограниченным числом пользователей. **Результаты:** описана модель базовой системы на основе алгоритма типа АЛОХА для сценария массовой межмашинной связи в канале с аддитивным белым гауссовым шумом. Описаны два способа снижения энергозатрат для рассматриваемой системы: использование методов гибридной решающей обратной связи и алгоритма разрешения конфликтов с динамическим расписанием. Для базовой системы и предложенных способов проведен анализ нижних границ для мощности сигнала и затрат энергии на бит при стабильной работе системы и заданных требованиях к спектральной эффективности. Показано, что оба способа позволяют уменьшить затраты энергии по сравнению с базовой системой. При этом алгоритм с динамическим расписанием дает наибольший выигрыш по сравнению с базовой системой для мощности сигнала от 4,5 дБ при любой спектральной эффективности. Для затрат энергии на бит при значениях спектральной эффективности меньше 0,42 бит/с/Гц наиболее эффективно применение гибридной обратной связи. Однако при больших значениях наибольший выигрыш дает изменение алгоритма разрешения конфликтов. **Практическая значимость:** полученные результаты позволяют оценить потенциальные возможности уменьшения затрат энергии в стабильных системах с большим числом пользовательских устройств за счет применения гибридной обратной связи и алгоритма разрешения конфликтов с динамическим расписанием.

**Ключевые слова** — массовая межмашинная связь, интернет вещей, гибридная решающая обратная связь, алгоритмы случайного множественного доступа, спектральная эффективность, энергоэффективность.

**Для цитирования:** Burkov A. A. Comparison of the ways to reduce energy costs in stable massive machine-type communication systems. *Информационно-управляющие системы*, 2023, № 2, с. 39–50. doi:10.31799/1684-8853-2023-2-39-50, EDN: EHYAOZ

**For citation:** Burkov A. A. Comparison of the ways to reduce energy costs in stable massive machine-type communication systems. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2023, no. 2, pp. 39–50. doi:10.31799/1684-8853-2023-2-39-50, EDN: EHYAOZ



UDC 519.8, 519.7

doi:10.31799/1684-8853-2023-2-51-60

EDN: WUHAWQ

## Dynamic strategies for monitoring quality control at a complex bioengineering facility

S. I. Kolesnikova<sup>a</sup>, Dr. Sc., Tech., Professor, [orcid.org/0000-0001-7158-2747](https://orcid.org/0000-0001-7158-2747), [skolesnikova@yandex.ru](mailto:skolesnikova@yandex.ru)

A. A. Fomenkova<sup>a</sup>, Senior Lecturer, [orcid.org/0000-0002-5570-6743](https://orcid.org/0000-0002-5570-6743)

<sup>a</sup>Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 67, B. Morskaya St., 190000, Saint-Petersburg, Russian Federation

**Introduction:** Stream processing of the data generated by bioengineering facilities is still an unresolved issue during real time identification of significant patterns in them. As a result, the lack of a unified approach to diagnose the macrostates of a water purification system has led to a significant complication of correct predictive analytics and untimely precursor detection of undesirable situations. **Purpose:** To develop a dynamic procedure for a real-time selection of the most preferred set of diagnostic features from a variety of all possible sets that are obtained during the training and that are replenished during the operation of the system, the above-mentioned procedure providing a flexible optimization strategy for its monitoring and control. **Methods:** We use a new procedure to form preference relations for a set of alternatives by group accounting for their relative superiority for the huge volume of continuously updated data. **Results:** Using the dynamic decision rule for switching between sets of criteria, which depends on the actual data, we obtain correct quantitative estimates of the state for a certain type of a purification system. The key idea of a dynamic decision rule is to take into account the dependence of the number of state classification errors obtained at the historical data on the criteria set used at the current control moment. The new algorithm provides a gain in the quality of macrostate diagnosing (by 15–20%) and an exponential decrease in decision-making time compared with the classical stationary model. **Practical relevance:** The results of this study are used to develop a monitoring plan for anaerobic treatment systems and to create and maintain a data base with an essential reduction of the time of historical data processing and of computational resources for an industrial hybrid bioreactor. **Discussion:** We can assume the possibility of full automation of self-regulation of biotechnical objects when we consider the contribution to the quality of the recognition system (object states). It consequently makes a certain set of criteria in the diagnosis of various states. This may be of particular importance because of the natural instability of interrelated biophysical and chemical processes and the possibility to design a stabilizing regulator.

**Keywords** – identification system for complex object macrostates, macrostate, dynamic rule, wastewater treatment system, dynamic decision rule.

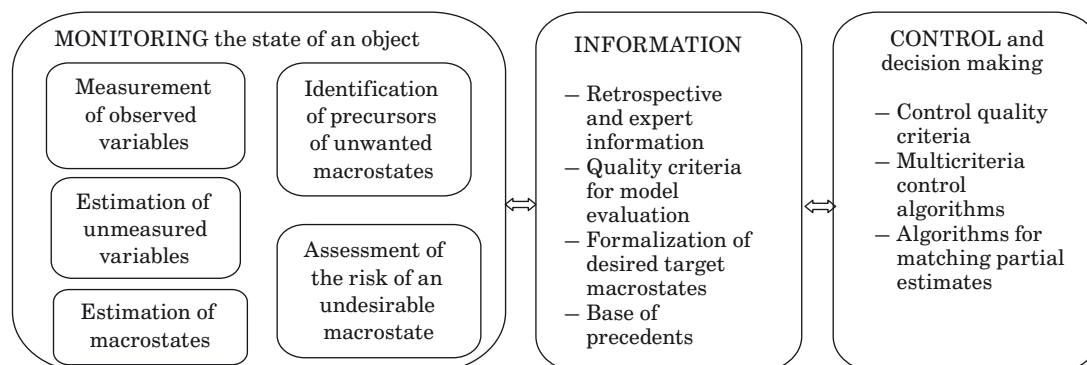
**For citation:** Kolesnikova S. I., Fomenkova A. A. Dynamic strategies for monitoring quality control at a complex bioengineering facility. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2023, no. 2, pp. 51–60. doi:10.31799/1684-8853-2023-2-51-60, EDN: WUHAWQ

### Introduction to the problem

Control over complex chemical and biotechnological systems under conditions of multiple benchmarks and control quality criteria [1–4] is often implemented based on the multiple targets and peer recommendations, frequently without using the methods of mathematical programming and decision making, despite the increasing number of pub-

lications concerning the issue of monitoring such systems (e.g., [5–8]) (Fig. 1).

The problem of monitoring and control over a bioengineering system – a multidimensional and multi-loop controlled object with unstable dynamic modes in an open-loop condition is exceptionally important and has all attributes of a complex problem [9], since the object under study is a symbiosis of certain physical, technical and biochemical param-



■ **Fig. 1.** Conceptual scheme of monitoring of a complex system

eters nonlinearly varying in time, and it is the biological component which provides a non-stationary dynamics of the predator-prey type [10].

One of the sources of type I–II errors in rendering a decision on the item-related state of a complex bioengineering object is a natural behavioral nonstationarity inherent in a (nonlinear) object, in every time interval requiring a set of indices with the best discriminating properties for the reliable differentiation of one state from the other, where the best set of indices for such an identification of one state could differ from that of the other.

Let us define the macrostates of a complex object as a subset of its phase space with certain functional constraints on the controlled (target) variables.

The *dynamic strategies of control over monitoring quality* will be here understood as an adaptive rule of observation and evaluation of the main indices of the process under study, which ensures:

- readjustment of the observer parameters in dependence of the dynamics of a process using the relevant period of its prehistory;

- changing of the set of indicators (criteria, benchmarks) in the course of the process evolution with the best properties in terms of the problem of state identification;

- real-time time of the response in the form of a state under big data conditions (multiple alternatives and criteria).

For the sake of readability and better understanding of the research results presented below, we are going to analyze a concrete complex system of anaerobic biological wastewater treatment (ABWT) [11, 12] (without loss of generality) and the problem of monitoring and control for this system [13].

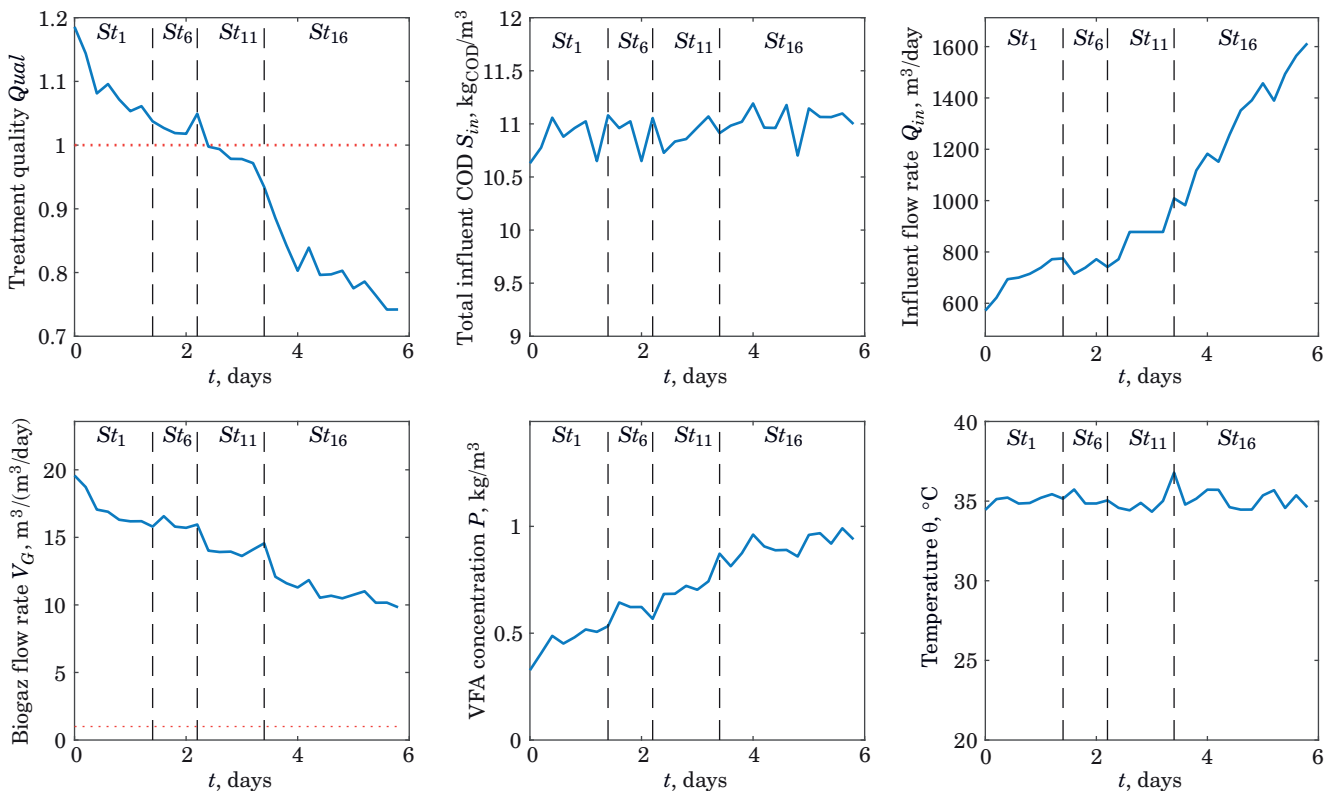
### Controlled object description and motivation of a necessary use of dynamic strategies for controlling monitoring quality

Let us turn to an object reported earlier (e.g., [13, 14]), whose mathematical description represents a system on nonlinear differential equations.

The state of ABWT is a symbiosis of certain physical, technical and biochemical parameters representing, in a formalized form, a set of dynamic variables  $\{x_i(t), i = \overline{1, n}\}$ , which comprehensively define the object's position in a given space of states and form a state vector  $\mathbf{x}(t)$ .

Let us take that the entire phase state of state vector  $\mathbf{x}(t)$  is conventionally divided into subsets  $\Omega_i \in St$ ,  $St = \{\Omega_i | i = \overline{1, N_\Omega}\}$  – macrostates with characteristic properties making it possible to distinguish between them (Fig. 2 and Table 1).

A macrostate can be prescribed analytically [14] by a limiting equality  $\psi(\mathbf{x})=0$ ,  $\mathbf{x}=\mathbf{x}(t)$ ,  $t \rightarrow \infty$ , where



■ **Fig. 2.** Results of simulation modeling of the ABWT state change  $St_1 \rightarrow St_6 \rightarrow St_{11} \rightarrow St_{16}$

$\psi(\mathbf{x}(t))$  is the prescribed function and, as a manifold, it would possess asymptotic stability.

*Remark 1.* The technical states accepted in the diagnostic problems [ ] are partial cases of macro-states.

One of the important monitoring problems – to identify and maintain the desired states – is based on the formation of a minimal set of diagnostic attributes for the analysis of ABWT processes, taking into account the biomass degradation. The table of ABWT states formed relying on the results of simulation modeling (see Table 1) for every diagnostic attribute  $\pi_j \in \Pi$ ,  $\Pi = \{\pi_j | j = \overline{1, N_\Pi}\}$  contains the ranges  $l_{ij} \in L$ ,  $L = \{l_{ij} | i = \overline{1, N_\Omega}; j = \overline{1, N_\Pi}\}$

■ **Table 1.** Types of ABWT states

| State code    | State group   | State type  |
|---------------|---|---|
| $\Omega_1$    | Up state with normal biomass activity                                 | Up state with normal biomass activity   |
| $\Omega_2$    | Up state with signs of beginning destabilization of anaerobic biomass | Impact of high substrate concentrations with attributes of bioreactor acidification |
| $\Omega_3$    |   | Insufficient feed   |
| $\Omega_4$    |   | Destruction of biomass structures   |
| $\Omega_5$    |   | Fall-out from temperature regime  |
| $\Omega_6$    |   | Increased wastewater load   |
| $\Omega_7$    |   | Partial up state with developing degradation of anaerobic biomass                   |
| $\Omega_8$    | Insufficient feed   |   |
| $\Omega_9$    | Destruction of biomass structures                                     |   |
| $\Omega_{10}$ | Fall-out from temperature regime                                      |   |
| $\Omega_{11}$ | Increased wastewater load   |   |
| $\Omega_{12}$ | Down state with considerable degradation of anaerobic mass            |   |
| $\Omega_{13}$ |   | Insufficient feed   |
| $\Omega_{14}$ |   | Destruction of biomass structures   |
| $\Omega_{15}$ |   | Fall-out from temperature regime  |
| $\Omega_{16}$ |   | Increased wastewater load   |

■ **Table 2.** Criteria for formulation of classification attributes

| Criteria name / measurement unit  | Designation  |
|---|--|
| Hydraulic retention time (HRT), days  | $HRT = V/Q \rightarrow \min$ , $V$ – bioreactor volume, $Q$ – influent flow rate                           |
| Content of volatile fatty acids (VFAs), $\text{kg}_{\text{COD}}/\text{m}^3$ | $P \rightarrow \min$   |
| Organics load rate (OLR), $\text{kg}_{\text{COD}}/(\text{m}^3\text{day})$   | $OLR = S_{in}/HRT = S_{in}Q/V \rightarrow \max$  |
| Commulative biogas production, $\text{m}^3$                                 | $G \rightarrow \max$   |
| Biogas formation rate, $\text{m}^3/(\text{m}^3\text{day})$                  | $I_G = dG/dt/V \rightarrow \max$   |
| Energy efficiency   | $Eff = \frac{E_G - E_{heating}}{E_{heating}} \rightarrow \max$   |
| Organics removal rate, $\text{kg}_{\text{COD}}/(\text{m}^3\text{day})$      | $I_{\text{COD}} = \frac{Q_{in}S_{in} - Q_{out}S_{out}}{V} \rightarrow \max$                                |
| Degree of wastewater treatment, %   | $\eta = \frac{S_{in} - (S_{out} + P_{out})}{S_{in}} 100\% \rightarrow \eta^*$ ,<br>$\eta^* \in [0.7; 0.9]$ |

of possible values of the types of system's states  $\Omega_i \in St$ ,  $St = \{\Omega_i | i = \overline{1, N_\Omega}\}$ .

The ranges of values of one and the same attribute in different types of states can coincide or partially overlap (see Fig. 2). In the case where for two different states the ranges of values of an attribute coincide or overlap, these types are thought to be indistinguishable by this attribute.

Table 2 presents some performance indicators of water treatment systems. There is also a number of information indices not presented here due to their awkwardness.

### Formulation of problem for determination of dynamic control strategies of monitoring quality

In the general formulation, the problem of searching for optimal dynamic strategies for controlling the monitoring quality of a complex biotechnical object (multidimensional, multi-loop, nonlinear) with unstable dynamic modes in an open-loop condition can be realized via solving the following local tasks:

1) formalize a dynamic rule of selecting the controlling strategies for choosing a most "suit-

able” algorithm using the minimum error criterion; the outcome is the current macrostate code (number);

2) develop an algorithm of correct upgrading of the dynamic rule in accordance with the update information incoming as the ABWT process develops;

3) obtain all possible sets of classification (diagnostic) attributes providing a correct (error-free or with an admissible number of ambiguities on a training sample) identification of the peer-selected ABWT macrostates.

Without the loss of generality and for the sake of readability of the utilized control design technology, stabilizing the CO in the neighborhood of the desired state, let us look at a generalized mathematical model of an anaerobic bioreactor with a suspended-deposited biomass [13, 14].

This class of bioreactors is used in the cases where the waste water treatment is not subject to stringent requirements and even at a small capacity demonstrates good economic performance; these reactors are highly needed in the municipal wastewater treatment facilities.

In a mixer-bioreactor, both the organic substrate and the biomass are homogeneously distributed over the working volume of the purification apparatus. A substrate is fed to a bioreactor of volume  $V$  at flow rate  $Q_{in}(t)$ , concentration of nutritious organic substances  $S_{in}(t)$  and biomass  $B_{in}(t)$ , and an equal volume of the working liquid is drained off. Due to stirring of the medium, the convective flows of substances prevail over the diffusion-induced flows. The medium homogenization allows describing the convectional component of the mass transfer process in a bioreactor according to the balance ratio (Fig. 3).

The functions

$$f_1(t) = \frac{Q_{in}(t)}{V}(S_{in}(t) - S(t)),$$

$$f_2(t) = \frac{Q_{in}(t)}{V}(B_{in}(t) - B(t)), f_3(t) = -\frac{Q_{in}(t)}{V}P(t)$$

characterize the inflow and outflow of the substrate, biomass and the biochemical reaction products. During the bioreactor operation without a recirculation flow, neither the biomass nor the substance – reaction product, is introduced into the reactor and the temperature is sustained at a constant value. Given these assumptions, the ABWT system will transform from Fig. 3 into

$$\begin{aligned} \frac{dS(t)}{dt} &= \frac{Q_{in}}{V}(S_{in} - S(t)) - \left( \frac{\mu_{max1}}{Y_{X1}} + K_{mX1} \right) \times \\ &\times \frac{S(t)B_1(t)}{K_{S1} + S(t)} - B_1(t)K_{SX1}; \quad \frac{dB_1(t)}{dt} = -\frac{Q_{in}}{V}B_1(t) + \\ &+ \mu_{max1} \frac{S(t)B_1(t)}{K_{S1} + S(t) + K_i^{-1}S^2(t)} - k_{d1}B_1(t); \\ \frac{dP(t)}{dt} &= -\frac{Q_{in}}{V}P(t) + Y_{S1}B_1(t) \times \\ &\times \left( K_{SX1} + K_{mX1} \frac{S(t)}{K_{S1} + S(t)} \right) - \left( \frac{\mu_{max2}}{Y_{X2}} + K_{mX2} \right) \times \\ &\times \frac{P(t)B_2(t)}{K_{S2} + P(t) + K_i^{-1}P^2(t)} - B_2(t)K_{SX2}; \\ \frac{dB_2(t)}{dt} &= -\frac{Q_{in}(t)}{V}B_2(t) + \mu_{max2} \frac{P(t)B_2(t)}{K_{S2} + P(t)} - k_{d2}B_2(t); \\ \frac{dG(t)}{dt} &= V_{m\max} B_2(t) \frac{P(t)}{K_m + P(t)} \cdot \frac{K_{im}}{K_{im} + P(t)} + \\ &+ \left( \mu_{max1} \frac{S(t)B_1(t)}{K_{S1} + S(t)} Y_{CO_2S} + \right. \\ &\left. + \mu_{max2} \frac{P(t)B_2(t)}{K_{S2} + P(t)} Y_{CO_2P} \right) \frac{M_{CO_2}}{M_B}. \end{aligned}$$

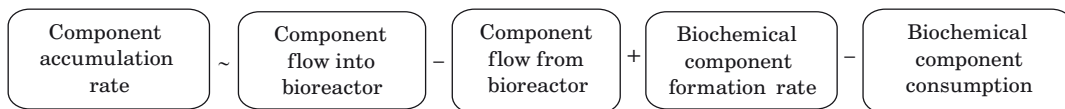
The peculiar life activity of the acidogenic and methanogenic microbial populations is characterized by a set of kinetic parameters:  $\mu_i, Y_{Xi}, K_{SXi}, K_{mXi}, K_{Si}, Y_{Si}$  and  $V_{m\max}, K_m, K_{im}$ , respectively.

### Problem solution

#### Stage 1. Rule of dynamic strategies

Let at the time point  $t=1, 2, \dots, T$  of checking the macrostate  $\Omega_i(t), i=1, N_\Omega, t=1, 2, \dots, T$  for the sake of identification of its type *b basic sets* of classification attributes  $\Pi_l, \Pi^b = \{\Pi_l | l=1, b\}$  be formed.

The algorithm for identification ABWT macrostates using set  $\Pi_l, l=1, b$  will be denoted as  $a_l = a(\Pi_l), l=1, b$ . The outcome of the algorithm  $a_l(t), t=1, T$  is the code (number) of a macrostate at time  $t$  (as the time point of inspecting the system) relying on the available information obtained in the interval  $[1, t-1]$ .



■ Fig. 3. Relationships between the rates of change in the concentration of the components with time



A linear combination of basic algorithms (algorithmic composition [15])  $a_l(t)$ ,  $t = 1, T$ :

$$a(t) = \sum_{k=1}^b w_k(t) a_k(t), \quad t = 1, 2, \dots, T;$$

$$\sum_{k=1}^b w_k(t) = 1, \quad w_k(t) = \begin{cases} k = l^*(t), \\ k \neq l^*(t), \end{cases} \quad (1)$$

with the time-updated weight coefficients  $w_k(t)$  will be termed as the dynamic strategy of the quality monitoring control of a complex bioengineering object. The weights are updated at every time point  $t = 1, 2, \dots, T$  immediately prior to calculating the outcome on the state type.

In (1),  $l^*(t)$  is the number of the 'best' model selected by the criterion of the average (r.m.s.) prediction error

$$l^*(t) = \arg \min_{k=1, \dots, b} \sum_{\tau=1}^{t-1} \gamma^{t-\tau-1} (a_k(\tau) - true(\tau))^2, \quad (2)$$

where  $true(\tau)$  is the true state number;  $\gamma \in [0, 1]$  is the algorithmic composition parameter determining the update information volume (prehistory), which is taken into account in decision making according to the rule (1), (2).

The prediction accuracy of the ABWT state type according to (1) will be estimated using the cross-validation functional within a time interval of length  $[t_0, t_1]$   $\sum_{t=t_0}^{t_1} (a(t) - true(t))^2$ . The value

of this interval is an additional optimization parameter.

In order to obtain the dynamic estimates of  $w_k(t)$  we will apply a modification of the analytic hierarchy process (AHP) (let us term it as AHP+) under the conditions of high-dimensional set of alternatives and criteria used in the monitoring and control of complex objects.

## Stage 2. Rule of updating weight coefficients of controlling strategy selection

For a better understanding of the approach proposed for a correct control over processing of the dynamically added large-volume information, let us present one by one three algorithms at the level of basic concepts, where the first key point (historically AHP [16]) remains the framework of the following two concepts but is free from its limitations.

Algorithms 1 and 2 considered below are a preamble to the main algorithm 3, on which the dynamic rule (1) and (2) for recognizing the states of a complex system is based [17, 18].

## Algorithm 1. AHP

*Input:* sets of alternatives  $\{A_i | i = \overline{1, N_A}\}$  and criteria  $\{C_j | j = \overline{1, N_C}\}$ .

1. Define the expert ratings on the scale 1÷9 for the initial sets  $w_{ij} = w(A_i/C_j)$ ,  $i = \overline{1, N_A}$ ,  $j = \overline{1, N_C}$  (assessment of alternative  $A_i$  with reference to criteria  $C_j$ ) and  $v(C_j)$ ,  $j = \overline{1, N_C}$ .

2. Form the pairwise comparison matrices (PCMs) for the criteria  $\mathbf{C} = \|v(C_i)/v(C_j)\|_{N_C \times N_C}$  and alternatives  $\mathbf{A}_j = \|w(A_i/C_j)\|_{N_A \times N_A}$  for every criterion.

3. Check all PCMs in terms of their consistency and repeat Step 2 in case it is distorted. Consistency here is understood as a transitivity of priorities in using the expert ratings (1÷9).

4. Normalize (to unity) the eigenvectors of PCMs for criteria  $\mathbf{C}$  and alternatives  $\mathbf{A}_j$  for every criterion, which are denoted as

$$\mathbf{C}^* = \|v_j^*\|_{1 \times N_C}, \quad v_j^* = v_j^{norm}, \quad \mathbf{A}_j^* = (w_{1j}^*, \dots, w_{N_A j}^*)^T,$$

$$w_{ij}^* = w_{ij}^{norm}, \quad i = \overline{1, N_A}, \quad j = \overline{1, N_C},$$

respectively.

5. Obtain the weight coefficients of alternatives as a linear criteria convolution via formula  $u_i = \sum_{j=1}^{N_C} v_j^* w_{ij}^*$ ,  $i = \overline{1, N_A}$ , followed by the resulting vector normalization  $\mathbf{u}^* = \|u_i^*\|_{1 \times N_A}$ ,  $u_i^* = u_i^{norm}$ .

Rank the set of alternatives in descending order of the weight coefficients.

*Output:* a set of normalized estimates of eigenvectors for every alternative for each criterion:

$$\mathbf{W} = \begin{pmatrix} w_{11}^* & \dots & w_{1N_C}^* \\ \dots & \dots & \dots \\ w_{N_A 1}^* & \dots & w_{N_A N_C}^* \end{pmatrix}, \quad (3)$$

where  $w_{ij}^*$  is the assessment of the  $i$ -th alternative for  $C_j$  criterion  $i = \overline{1, N_A}$ ;  $j = \overline{1, N_C}$ ,  $\sum_{i=1}^{N_A} w_{ij}^* = 1$ ,  $j = \overline{1, N_C}$ .

*Comment 1.* In the matrix notation the result of algorithm 1 is the product of  $\mathbf{u} = \mathbf{W}\mathbf{C}^{*T}$ .

A generalization of AHP+ allows correctly comparing the numerical indicators (without involving the Saaty rating scale) and increasing the set of alternatives during the assessment without breaking the earlier achieved relations between the alternatives.

Then follows a pairwise comparison of the normalized components of the alternative weight coefficients for all of the criteria with normalization (to unity) *in every pair* and a subsequent linear convolution of the criteria estimation with the assessment of alternatives *in every pair*.

**Algorithm 2. AHP+. Correct generalization of AHP**

*Input:* matrix **W** and vector of criteria-based assessment **C\***.

1. Form a set of matrices for pairwise comparisons  $\mathbf{W}_j, j = 1, N_C$ , corresponding to criteria  $C_j$  with the vector elements

$$\mathbf{W}_j = \|\mathbf{w}_j(i, k)\|_{N_A \times N_A},$$

$$\mathbf{w}_j(i, k) = (w_{ij}^*(i), w_{kj}^*(k)), i, k = 1, N_A, j = 1, N_C,$$

where the element of matrix  $\mathbf{w}_j(i, k)$  has the following structure:

$$w_{ij}^*(i) = \frac{w_{ij}^*}{w_{ij}^* + w_{kj}^*}, w_{kj}^*(k) = \frac{w_{kj}^*}{w_{ij}^* + w_{kj}^*},$$

$$w_{ij}^*(i) + w_{kj}^*(k) = 1, i, k = 1, N_A, j = 1, N_C. \quad (4)$$

*Comment 2.* Indices of element  $\mathbf{w}_j(i, k)$  stand for:  $(i, k)$  is the address of the vector element of matrix  $\mathbf{W}_j$  of the relative weights of alternatives  $A_i$  and  $A_k$  only in this pair in terms of criterion  $C_j$ .

2. For a matrix of the vector elements, whose components are the linear criteria-based convolutions given by the following:

$$\bar{\mathbf{W}} = \|\bar{\mathbf{w}}(i, k)\|_{N_A \times N_A}, \bar{\mathbf{w}}(i, k) = (\bar{w}(i), \bar{w}(k)),$$

$$\bar{w}(i) = \sum_{j=1}^{N_C} v_j w_{ij}^*(i), \bar{w}(k) = \sum_{j=1}^{N_C} v_j w_{kj}^*(k), i, k = 1, N_A.$$

3. Normalize the vector elements of matrix  $\bar{\mathbf{W}}$  via the rule (4) [17]:

$$\bar{w}^*(i) = \frac{\bar{w}(i)}{\bar{w}(i) + \bar{w}(k)}, \bar{w}^*(k) = \frac{\bar{w}(k)}{\bar{w}(i) + \bar{w}(k)},$$

$$\bar{w}^*(i) + \bar{w}^*(k) = 1, i, k = 1, N_A.$$

4. Determine the resulting weight coefficient values of alternatives  $w(A_i), i = 1, N_A$  based on the summation of the first components of the vector elements of matrix

$$\bar{\mathbf{W}}^* = \|\bar{\mathbf{w}}^*(i, k)\|_{N_A \times N_A}, \bar{\mathbf{w}}^*(i, k) = (\bar{w}^*(i), \bar{w}^*(k)),$$

$$w(A_i) = \sum_{l=1}^{N_A} \bar{w}^*(i). \quad (5)$$

*Output:* a set of normalized estimates of weight coefficients of alternatives.

*Comment 3.* The maximum effect on the computational complexity is exerted by the volume of alternatives, since the computational intensity ratio of algorithm 2 is  $O(N_A^2 N_C)$ .

Traditionally, a multi-criteria ranking problem is solved in two steps: first of all the alternatives are put in correspondence with the ‘weights’ according to some rule and then the list of alternatives is sorted out.

Algorithm 3 is based on the violation of this sequence, specifically: a sequence of selection problems is formed *on a pair of alternatives* (from the prescribed set of alternatives), where the results of solution via algorithm AHP+ are used to compare two weight coefficients. Further, using the principle of sorting a numerical array, the elements (weight coefficients) are rearranged. Running through the entire array, the synchrony of operations is implemented: comparison with new alternatives and ordering of the weight coefficients of alternatives (here algorithms  $a_t(t), t = 1, T$ ).

**Algorithm 3. AHP+SORT. Generalization of AHP+ for big data**

*Input:* matrix **W** and vector of criteria-based assessment **C\***.

1. Initialize algorithm 3. Take  $i = 1, j = i + 1, i, j \in \{1, \dots, N_A\}$ . Conventionally order the set of alternatives and select alternative  $A_1$  for comparison.

2. Select the next element  $A_j$  from the ranked set (list of alternatives)  $A$  and calculate the weights for the pair  $A_i, A_j$ , using algorithm 2 (AHP+).

3. Verify the sorting condition in the descending order of estimates of weight coefficients of alternatives:

if  $w(A_j) > w(A_i)$ , then rearrange the elements  $w(A_i), w(A_j)$  in the data series  $w(A_1), w(A_2), \dots, w(A_i), w(A_j), \dots, w(A_n)$ , otherwise take  $j := j + 1$  and proceed to Step 2.

*Outcome:* a set of normalized estimates of weight coefficients of alternatives.

*Comment 4.* Algorithm AHP+SORT uses sequential comparisons of the pairs of elements of the set of alternatives for the sake of calculating the entire set of alternatives due to modification of AHP+.

*Comment 5.* Sorting can be based a combination of different approaches, such as a fast sorting modifications [19, 20]:

- division of the input array into sub-arrays using a special algorithm;
- sorting by merge insertions from every sub-array;

– combination of the sorted sub-arrays into the final array by the modified merged sorting.

*Implementation conditions for Algorithm 3 and its properties.*

1. Algorithm AHP+ is not applied to the entire list of alternatives but rather to the pairs of alternatives during the sorting procedure, thus solving the problem of the curse of dimensionality.

2. The strongest influence on the increasing computational complexity is exerted by the volume of alternatives; the algorithmic complexities of algorithms AHP+ and AHP+SORT are estimated (without considering the number of criteria) as  $O(N_A^2)$  and  $O(N_A \log(N_A))$ , respectively.

3. Obeying the Arrow's axiom [21]: obtain a correct ranking of the dynamically added list of alternatives, while maintaining the earlier achieved relations between the alternatives.

4. A possibility of using numerical values of criteria-based assessments of alternatives, by-passing the 1÷9 scale of the classical AHP.

5. While considering the process in time, it becomes possible to determine in real time a set of attributes that "best of all" characterize the separating capacity of the algorithm for identification of the bioengineering object's states.

Paper [18] presents an example of calculating the weight coefficients of alternatives according to AHP+ in order to provide a better understanding of Algorithm 3.

At the same time, Algorithm 2 is the basis for determination of various sets of classification attributes for identification of the ABWT macrostate.

### Solution of applied problem.

#### Simulation modeling of dynamic strategies

A determination of the minimal set of diagnostic attributes, which is correct for the fixed time  $t$  of ABWT inspection, according to which all types of ABWT states (see Table 1) are pairwise-distinguishable, using a set of criteria (see Table 1) is a non-trivial problem even with the delayed (trained) data, to say nothing of the real-time mode.

Specifically, a minimal set of attributes which is optimal in terms of verifications, can be determined using the concise Yablonskii algorithm [22], according to which the stub (shortest) coverings of the discrimination matrix (a binary table where every element is equal to zero, if two states are indistinguishable by the relevant attribute, and to unity in the opposite case) are determined.

*Remark 2.* The presence of disturbances and unstable states of the object in question would lead to a certain random set of binary tables and the next task would be related to a correct processing of the resulting set for formulating a reliable (meaningful

under the conditions of this sample) final decision on the type of ABWT's state.

The cost of verification of the attributes is calculated in arbitrary units, including the costs of the instrumentation and control systems and the reagents for carrying out a single inspection, the number of check-up points where the parameters are measured in the apparatus, and the necessary laboratory tests.

The set of attributes providing the maximum information content of this analysis will contain those attributes from the set  $\Pi = \{\pi_j | j = \overline{1, N_\Pi}\}$ , which during regular inspections had to the largest extent decreased the residual entropy in the course of analysis of the system's state.

The minimal sets of diagnostic attributes obtained in the sequential two-criteria optimization based on the minimum costs of verifications ( $C_1$ ) and the Shannon data capacity ( $C_2$ ) are given in Table 3.

Here TSS – total suspended solids, mg/L. The problem of a correct formation of diagnostic attributes even using only two criteria turned out to be nontrivial, and its complexity had been due to the following factors:

1) exhaustive enumeration and comparison of the effectiveness of the sets of attributes form a large volume of the domain sets of attributes is limited by the computational performance of the algorithms available for the solution of multi-criteria selection problem;

2) sets of diagnostic attributes can differ in terms of their composition (Table 3 is an example of differences between two sets by a single parameter);

3) selection of diagnostic sets by individual attributes (or one principal attribute) does not guaranty the exhaustiveness of characteristics of the real observed state of the system (pH value in certain bioreactors cannot indirectly indicate the concentration of volatile fatty acids, VFA);

4) sets of diagnostic attributes is a function of time in the sense that in different stages of the process different groups of attributes can possess discriminating properties, since a decreased content of methane  $CH_4$  in biogas and the volumes of generated biogas  $V_G$  manifest themselves in the already

■ **Table 3.** Minimum sets of diagnostic attributes for identification of a certain ABWT state under biomass degradation

| Criteria | Physical-technical parameters | Biochemical parameters                 |
|----------|-------------------------------|--|
| $C_1$    | $Q_{in}, \theta$              | $V_G, pH, S_{out}, CH_4, TSS$          |
| $C_2$    | $Q_{in}, \theta$              | $V_G, VFA_{total}, S_{out}, CH_4, TSS$ |

developed process of biomass degradation and are not early indicators of destabilization of the anaerobic fermentation;

5) parameter  $VFA_{total}$ , in combination with the calculated OLR allows revealing the initial states of destabilization of the anaerobic fermentation but requires that additional current samples be selected during the process development over time.

### Comments on applicability of multi-criteria methods for formation of sets of performance indicators depending on object's state

According to [1], the well-known methods of solution of multi-criteria problems could be roughly divided into four following groups:

1) ranking of optimality criteria and alternatives, including the criteria-based convolutions with the weight coefficients prescribed by the decision maker (expert);

2) selection of one basic criterion and conversion of other targets into constraints (which could appear to be incompatible);

3) construction of a certain generalized criterion, based on physical considerations and peer opinion (e.g. maintaining the desired invariant of the target system);

4) use of a concept of a normalized criteria space and the search for a solution providing (in a certain metric) the minimum distance between the target functions and the optimal values.

In [23], this principle is used to search for an optimal trade-off solution on the basis of a game-theory model. However, the trade-off solution is selected not from the entire domain of determination of variables, but rather from a certain subset formed by a linear combination of the solutions optimal in terms of individual criteria. Thereby, a possibility of losing the 'best solutions' relative to the found solutions is ruled out.

In [24], the latter shortcoming was eliminated, and an optimal solution was searched for in the entire region of feasibility, not going beyond the convex programming, which is exceptionally convenient from the computational standpoint. However, there is a danger of obtaining an incorrect solution of the multi-objective problem, because in the general case, the solutions obtained upon normalization of the spaces of criteria and alternatives can disagree.

In the frames of the above-mentioned, the classification of AHP and its correct modification AHP+ are the most mathematically sound methods and represent a hybrid process involving the advantages of all approaches 1)–4).

The AHP+ modification is free from the following shortcomings of the classical AHP method [16] and essentially extends its application:

1) matrix representation of the pairwise-compared data (criteria and alternative) gives rise to an increased computational awkwardness in the case of a high power of a set of alternatives and criteria;

2) non-observance of the axiom of indifference in terms of the Arrow's alternatives: the achieved priorities can change as new candidates (alternatives) are added;

3) disturbance of the consistency of the pairwise-comparison matrix in the case where not the initial criteria and alternatives are used for comparison, but rather a well-known scale of Saaty's (AHP author) assessment ratings (1÷9), indisputably introducing an ambiguity into the assessment of the degree of preference between the compared indicators.

*Remark 3.* In [25], the authors provide an example of inconsistency of the main assumption in AHP: the scales, in which the preferred alternatives of each criterion are assessed, are taken to be neither related to each other or to the criterion priorities.

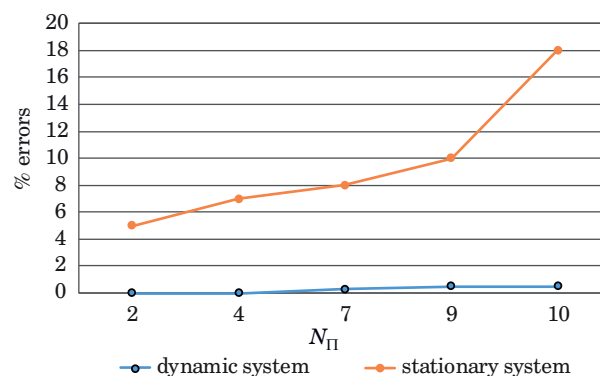
The amount of possible macrostates and sets of criteria (performance indices) in bioengineering systems can be quite large (on the order of 100 and more) and their formulation – resource- and time-consuming. Therefore, traditionally a statistical set of attributes is selected during monitoring and used in the course of the entire treatment process.

The accuracy of the rule (1) and (2) was estimated from the simulation modeling data involving the use of ABWT's mathematical model from [13, 14]. The basic algorithms used in the estimation were based on 10 sets of attributes.

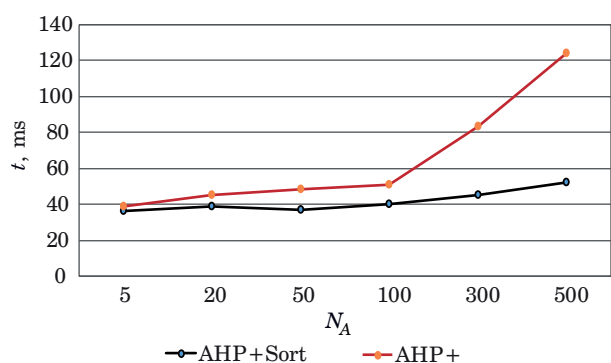
Algorithm AHP+SORT allows making a real-time decision on the most effective set of attributes and the relevant classification algorithm. The use of this algorithm allowed:

– essentially reducing the time of in-line processing of the incoming information and the time of detection of undesirable states of the system (Figs. 4 and 5);

– decreasing the number of classification errors (on model data) by 10–20%;



■ **Fig. 4.** Comparative graphs of the errors in decision-making system on solution of ranking problems versus the dimension of initial sets of criteria



■ **Fig. 5.** Comparative graphs of the time spent on solution of ranking problem versus the dimension of initial sets of alternatives

– providing a possibility of formation of correct managerial solutions.

## Conclusion

A new mathematically sound method for making correct (consistent and error-free, based on a set of baseline cases) managerial decisions has been proposed as applied to a bioengineering object containing unstable states, among its stationary states, due to the presence of a biological sub-system.

It has been shown that the accuracy of state identification for various sets of classification attributes

depends on the process evolution character and, from this standpoint, in every monitoring point it is reasonable to place reliance on that set of attributes which possesses the highest predictive accuracy based on the earliest process prehistory (baseline cases). These monitoring control approaches have been termed here as dynamic strategies.

The proposed mathematical tool for monitoring control has been tested using an example of a complex system of anaerobic biological water treatment, aiming the solution of the problem of formation of diagnostic attributes for identification of certain phase-space subsets of the dynamic ABWT model, referred to as ABWT macrostates.

The proposed algorithm of correct solution of the multi-objective selection problem can be applied to a wide range of industrial problems solved using a number of business indices (maximum product yield, profit, labor productivity, introduced innovation volumes, etc.). The software program implementing the AHP+SORT generalization algorithm makes offers real-time solutions of multicriterion problems containing on the order of  $10^3$  and more criteria with the order of matrix of alternatives  $10^5$  and over.

## Financial support

This research was supported by the Russian Science Foundation (project no. 23-29-00336).

## References

- Kafarov V. V., Lazarev G. B., Avdeev V. I. A method for solving multicriteria control problems for a complex chemical-technological system. *Reports of the USSR Academy of Sciences*, 1971, vol. 198, no. 1, pp. 62–63 (In Russian).
- Kafarov V. V. Dorokhov I. N. *Sistemnyy analiz himiko-tehnologicheskikh processov: osnovy strategii* [System Analysis of Chemical Technology Processes: Fundamentals of Strategy]. Moscow, YUrajt Publ., 2018. 499 p. (In Russian).
- Kalyuzhnyi S. V. Batch anaerobic digestion of glucose and its mathematical modeling. II. Description, verification and application of model. *Bioresource Technology*, 1997, vol. 59, pp. 249–258. doi:10.1016/S0960-8524(96)00125-3
- Vavilin V. V. Dynamics of anaerobic microorganisms community: experience in mathematical modeling. *Proc. of the Samara Scientific Center of the Russ. Acad. of Sci.*, 2009, vol. 11, no. 1(7), pp. 1615–1619 (In Russian).
- Schügerl K. Progress in monitoring, modeling and control of bioprocesses during the last 20 years. *Journal of Biotechnology*, 2001, vol. 85, pp. 149–173. doi:10.1016/S0168-1656(00)00361-8
- Sonnleitner B. Instrumentation of biotechnological processes. *Advances in Biochemical Engineering/Biotechnology*, 2000, vol. 66, pp. 1–64.
- Fehrenbach R., Comberbach M., Petre J. O. On-line biomass monitoring by capacitance measurement. *Journal of Biotechnology*, 1992, vol. 23(3), pp. 303–314. doi:10.1016/0168-1656(92)90077-M
- Lyberatos G. and Skiadas I. V. Modelling of anaerobic digestion – a review. *Global Nest Journal*, 1999, vol. 1(2), pp. 63–76.
- Rastrigin L. A. *Sovremennyye principy upravleniya slozhnymi ob'ektami* [Modern Principles of Control for Complicated Object]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1980. 232 p. (In Russian).
- Buyvolova A. G. On the issue of managing the “predator-prey” system. *Automatic Remote Control*, 1993, vol. 54, iss. 4, pp. 546–554 (In Russian).
- Batstone D. J., Keller J., Angelidaki I., Kalyuzhnyi S. V., Pavlostathis S. G., Rozzi A., Sanders W. T. M., Siegrist H., Vavilin V. A. The IWA Anaerobic Digestion Model No 1 (ADM1). *Water Science and Technology*, 2002, vol. 45, no. 10, pp. 65–73.
- Kiely G., Tayfur G., Dolan C., and Tanjif K. Physical and mathematical modelling of anaerobic digestion of organic wastes. *Water Research*, 1997, vol. 31, no. 3, pp. 534–540.

13. Kolesnikova S., Fomenkova A. Formalization of data exchange between the systems of monitoring and control over an anaerobic bioreactor. *Proc. 4th Intern. Conf. on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA)*, 2022, pp. 550–555. doi:10.1109/SUMMA57301.2022.9973923
14. Fomenkova A. A., Klucharev A. A., and Kolesnikova S. I. Formalization of target invariants and designing an adaptive control system for the model of anaerobic biological wastewater treatment. *Journal of Physics Conference Series*, 2021, 2099 012035. doi: 10.1088/1742-6596/2099/1/012035
15. Vorontsov K. V., Egorova E. V. Dynamically adaptable compositions of forecasting algorithms. *Artificial Intelligence*, 2006, no. 2, pp. 277–280 (In Russian).
16. Saaty T. L. Decision making with the analytic hierarchy process. *International Journal of Services Sciences*, 2008, vol. 1(1), 83. doi:10.1504/ijssci.2008.017590
17. Samokhvalov Y. Y. Group accounting of relative alternative superiority in decision-making problems. *Cybernetics and Systems Analysis*, 2003, vol. 39, pp. 897–900. <https://doi.org/10.1023/B:CASA.0000020231.09571.33>
18. Kolesnikova S. I., Karavanova S. A. Optimization of the multi-criteria choice algorithm with a dynamical replenished large set of alternatives. *Information Technology*, 2021, no. 5, pp. 235–241 (In Russian). doi:10.17587/it.27.235-241
19. Knuth D. E. *The Art of Computer Programming*. First ed. 1973. Vol. 3. 1997. 723 p.
20. Hoare C. Quicksort. *The Computer Journal*, 1962, vol. 5, no. 1, pp. 10–16.
21. Kenneth J. Arrow. *Social Choice and Individual Values*. 3rd ed. Yale University Press, 2012.
22. Zhuravlev Yu. I. Algorithms for constructing minimal disjunctive normal forms for functions of the algebra of logic. In: *Discrete Mathematics and Mathematical Problems of Cybernetics*. Moscow, Nauka Publ., 1974. Pp. 67–98. (In Russian).
23. Juttler H. Linear model with several objective functions. *Economics and the Mathematical Methods*, 1967, vol. 3, no. 3, pp. 397–406.
24. Ermolenko B. V., Kafarov V. V., Kazbekova N. V. Construction of a mathematical model for finding the optimal production program for a chemical enterprise. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 1969, vol. 3, no. 6, p. 903 (In Russian).
25. Podinovskiy V. V., Podinovskaya O. V. On the incorrectness of the hierarchy analysis method. *Control Sciences*, 2011, no. 1, pp. 8–13 (In Russian).

УДК 519.8, 519.7

doi:10.31799/1684-8853-2023-2-51-60

EDN: WUHAWQ

**Динамические стратегии управления качеством мониторинга сложного биоинженерного объекта**С. И. Колесникова<sup>а</sup>, доктор техн. наук, профессор, [orcid.org/0000-0001-7158-2747](https://orcid.org/0000-0001-7158-2747), [skolesnikova@yandex.ru](mailto:skolesnikova@yandex.ru)А. А. Фоменкова<sup>а</sup>, старший преподаватель, [orcid.org/0000-0002-5570-6743](https://orcid.org/0000-0002-5570-6743)<sup>а</sup>Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Б. Морская ул., 67, Санкт-Петербург, 190000, РФ

**Введение:** обработка больших потоков данных, порождаемых биоинженерными объектами, является по-прежнему нерешенной проблемой при выявлении в них значимых закономерностей в реальном времени. Отсутствие единого подхода к диагностированию макросостояний очистительной системы привело к существенному усложнению проведения корректной предиктивной ее аналитики и несвоевременности обнаружения предвестников нежелательных ситуаций. **Цель:** разработка динамической процедуры выбора в реальном времени наиболее предпочтительного набора диагностических признаков из множества полученных на обучении и пополняемых в процессе эксплуатации системы, обеспечивающей гибкую стратегию оптимизации ее мониторинга и управления. **Методы:** применяется новая процедура формирования отношений предпочтения по набору альтернатив посредством группового учета их относительного превосходства для большого объема непрерывно пополняемых данных. **Результаты:** алгоритм оценивания макросостояния системы биоочистки, основанный на правиле переключения между наборами критериев в зависимости от актуальных данных, позволил получать корректные количественные оценки работоспособности системы определенного типа. Суть идеи динамической процедуры заключается в учете зависимости числа ошибок классификации состояний, полученных на исторических данных, от используемого критериального множества в текущий момент контроля. Совместное использование алгоритма группового учета предпочтений и метода сортировки обеспечило выигрыш по качеству диагностирования макросостояний (на 15–20 %) и экспоненциальному уменьшению времени принятия решений относительно ранее разработанной стационарной классической модели парных сравнений анализируемых альтернатив. **Практическая значимость:** результаты исследований использованы при разработке мониторинга системы анаэробной очистки, создании и сопровождении базы данных и знаний с существенным сокращением времени обработки поступающих данных и вычислительных ресурсов для промышленного секционного гибридного биореактора. **Обсуждение:** учитывая вклад в качество распознающей системы состояний объекта, который вносят динамические стратегии, можно предположить возможность полной автоматизации саморегулирования биотехнических объектов. Это может иметь особое значение в связи с природной неустойчивостью взаимосвязанных биофизических и химических процессов и возможностью конструирования стабилизирующего регулятора.

**Ключевые слова** — система распознавания макросостояний сложного объекта, макросостояние, динамическое правило, система очистки сточных вод, динамическое правило принятия решения.

**Для цитирования:** Kolesnikova S. I., Fomenkova A. A. Dynamic strategies for monitoring quality control at a complex bioengineering facility. *Информационно-управляющие системы*, 2023, № 2, с. 51–60. doi:10.31799/1684-8853-2023-2-51-60, EDN: WUHAWQ

**For citation:** Kolesnikova S. I., Fomenkova A. A. Dynamic strategies for monitoring quality control at a complex bioengineering facility. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2023, no. 2, pp. 51–60. doi:10.31799/1684-8853-2023-2-51-60, EDN: WUHAWQ



## Информационные технологии и автоматизация эколого-технологического управления территориальным природно-производственным комплексом

Н. А. Жильникова<sup>а</sup>, доктор техн. наук, профессор, [orcid.org/0000-0003-1291-7150](https://orcid.org/0000-0003-1291-7150), [nataliazhilnikova@gmail.com](mailto:nataliazhilnikova@gmail.com)

А. А. Баранова<sup>а</sup>, аспирант, ассистент, [orcid.org/0000-0003-2676-4212](https://orcid.org/0000-0003-2676-4212)

<sup>а</sup>Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Б. Морская ул., 67, Санкт-Петербург, 190000, РФ

**Введение:** для осуществления сложного и трудозатратного механизма установления нормативов для всех водопользователей и перераспределения нагрузки между ними необходимо разрабатывать новые усовершенствованные информационные средства и автоматизированные геоинформационные системы, которые позволят осуществлять не только среднесрочные, но и долгосрочные прогнозы с учетом актуальных на сегодня требований природоохранного законодательства. **Цель:** обосновать нормативы качества окружающей природной среды и экологической безопасности для различных производств путем геоинформационного моделирования. **Результаты:** разработана методика сбора и систематизации геоинформационных данных, позволяющая рассчитывать основные эколого-технологические показатели производственных систем и создавать интегрированные базы данных субъектов водопользования. Предложена структура межотраслевой регионально-бассейновой базы геоинформационных данных для имитационного моделирования эколого-технологических нормативов предприятий, с помощью которой пользователь программного обеспечения имеет возможность систематизировать необходимую информацию. База данных может дополняться новыми элементами производственно-технологического назначения в соответствии со спецификой производства. По результатам моделирования создана геоинформационная моделирующая территориально-бассейновая система на основе моделей управления качеством воды и типовых моделей, описывающих конвективно-диффузионный перенос и превращение веществ в водотоках, для разработки нормативов допустимого воздействия. **Практическая значимость:** использование полученных результатов региональными отделениями Федерального агентства водных ресурсов позволило водно-бассейновым управлениям перейти на принципиально новый современный уровень принятия решений по совершенствованию системы водопользования на предприятиях путем внедрения автоматизированных информационных систем управления геоданными.

**Ключевые слова** — природно-производственный комплекс, геоинформационное моделирование, автоматизированные информационно-управляющие системы, эколого-технологическое нормирование, имитационная геоинформационная модель.

**Для цитирования:** Жильникова Н. А., Баранова А. А. Информационные технологии и автоматизация эколого-технологического управления территориальным природно-производственным комплексом. *Информационно-управляющие системы*, 2023, № 2, с. 61–68. doi:10.31799/1684-8853-2023-2-61-68, EDN: IKIOQA

**For citation:** Zhilnikova N. A., Baranova A. A. Information technologies and automation of environmental and technological management of the territorial natural-production complex. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2023, no. 2, pp. 61–68 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2023-2-61-68, EDN: IKIOQA

### Введение

Автоматизация и повышение результативности организации производства с помощью информационных технологий — на данный момент один из самых эффективных методов решения задачи рационального и гармоничного взаимодействия промышленного предприятия и окружающей среды.

Применение современного информационного обеспечения при геоинформационном моделировании систем и комплексов, а также более активное использование средств автоматизации, особенно при одновременном контроле многими параметрами, необходимо для повышения результативности управления территориально-природно-производственным комплексом (ТППК). Под ТППК понимается целостная структура,

включающая совокупность предприятий субъектов водопользования в границах одного речного бассейна в соответствии с водохозяйственным районированием, в пределах которого должны быть установлены и обеспечены нормативы экологической безопасности и качества окружающей природной среды [1, 2].

Автоматизация управления ТППК необходима в первую очередь для обеспечения экологических нормативов допустимого воздействия (НДВ) предприятий-водопользователей в пределах водного бассейна и индивидуальных нормативов допустимых сбросов (НДС) для отдельных субъектов при разработке программ и схем комплексного использования и охраны водных объектов. С другой стороны, в соответствии с изменениями в законодательстве в области технологического нормирования предприятиям

первой и второй категории негативного воздействия на окружающую среду следует гарантировать соответствие производственных процессов наилучшим доступным технологиям (НДТ) [3–5].

Современный ТППК должен обеспечить на основе эколого-технологических критериев оптимальное взаимодействие предприятия-водопользователя с водным объектом. Это предопределяет необходимость развития методов и средств математического, программного и информационного обеспечения задач прогноза и оптимизации параметров водоотведения в рамках ТППК, а также автоматизированных информационно-управляющих систем [6, 7].

### Геоинформационное моделирование для управления эколого-технологическим нормированием в территориальных бассейново-региональных природно-производственных комплексах

Для экологического нормирования качества стоков, сбрасываемых водопользователями в водные объекты, и определения техногенной нагрузки производств в ТППК требуется обработать огромный массив информации, включающей климатические, гидрологические, абиотические и другие показатели, характеризующие состояние водного объекта. Применение современных программных средств и инструментов на основе геоинформационных технологий позволяет со-

кратить трудозатраты и упростить процесс разработки НДС для отдельных субъектов ТППК и НДС для бассейна в целом [1, 2, 8–10].

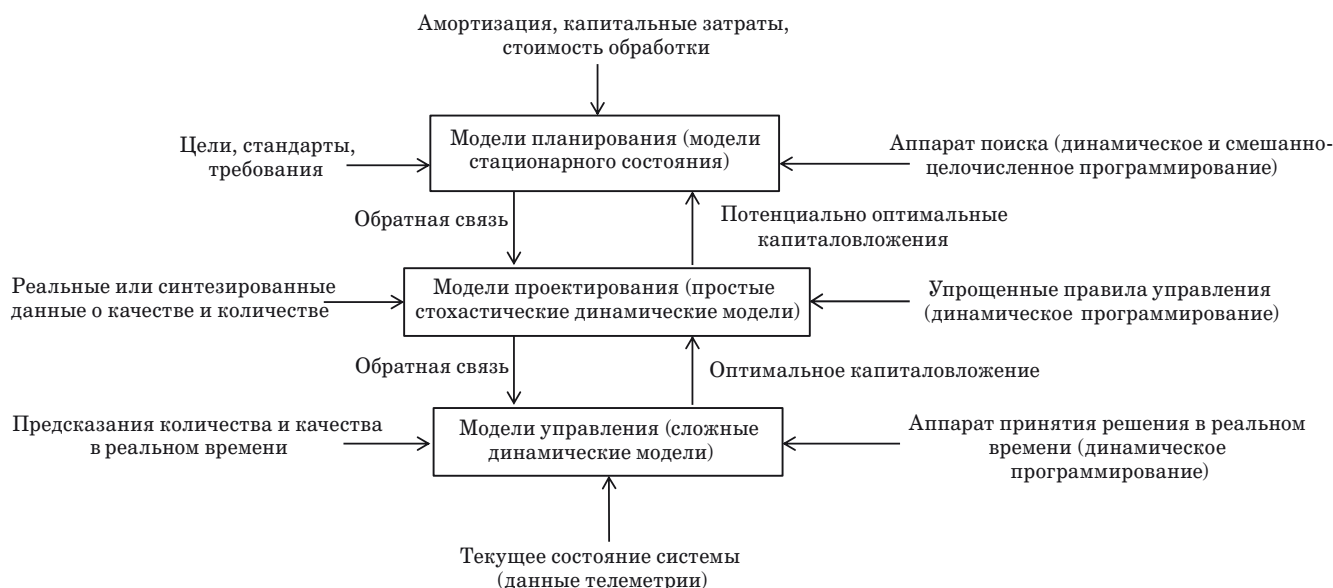
Моделирование управления качеством воды в водотоках, находящихся под негативным влиянием субъектов водоотведения, способствует повышению результативности эколого-технологического нормирования и управления им. Модели управления качеством воды в водотоках для нормирования антропогенной нагрузки водопользователей на водный объект в рамках ТППК представлены на рис. 1 [11].

«Модель расчета формирования качества воды можно представить в общем виде:

$$\frac{\partial \Omega}{\partial t} dx dt = Q dt - \left( Q + \frac{\partial Q}{\partial x} \right) dt + (Q_i + Q_{af} - Q_e) dx dt, \quad (1)$$

где  $dx$  — бесконечно малый участок реки;  $x$  — расстояние, отделяющее рассматриваемое поперечное сечение водотока от исходного сечения;  $x + dx$  — участок реки между сечениями, где соблюдается баланс массы загрязняющих веществ;  $Q(x, t)$  — расход воды через сечение  $x$  в момент времени  $t_0$ ;  $Q_i(x, t)$ ,  $Q_{af}(x, t)$ ,  $Q_e(x, t)$  — расходы воды на единицу длины участка, обозначающие соответственно инфильтрацию подземных вод, боковые притоки и испарение;  $\Omega(x, t)$  — площадь поверхности поперечного сечения реки, являющаяся функцией времени и пространства» [11] (рис. 2).

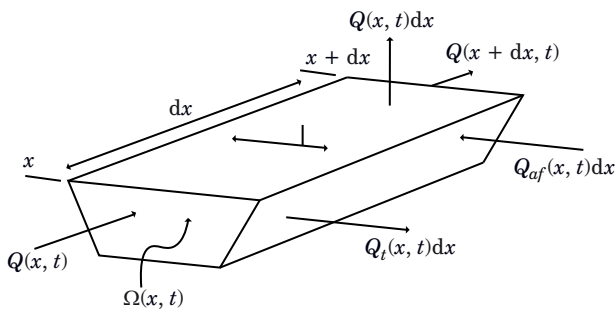
Для установления НДС отдельных производств, входящих в ТППК, с учетом всех характеристик водного объекта, а также вероятности



■ **Рис. 1.** Модели управления качеством воды в водотоках для нормирования антропогенной нагрузки водопользователей

■ **Fig. 1.** Models of water quality management in watercourses for standardizing the anthropogenic load of water users





■ **Рис. 2.** Принцип сохранения массы воды на участке реки

■ **Fig. 2.** The principle of conservation of the mass of water in the section of the river

изменения этих показателей в случае возникновения аварий, внештатных и чрезвычайных ситуаций применяются типовые стационарные модели конвективно-диффузионного переноса и превращения вещества (КДПиПВ). На основе полученных, собранных и обработанных с помощью моделей КДПиПВ геоинформационных данных создаются геоинформационные модели ТППК (блок экологического нормирования).

Предложенный в работе подход предусматривает построение имитационной системы на базе разработанного ранее математического и программного обеспечения для исследования процессов КДПиПВ [11–13]. При обычном подходе построение оптимизационных моделей систем водоотведения основывается на возможности получения достаточной априорной информации для принятия решения об управлении системой и о ее параметрах. При имитационном подходе необходимую информацию получают в результате эксперимента с моделью системы. Если исследователь находится вне рассматриваемой системы, возможна значительная формализация модели, а на основе имеющейся априорной информации — автоматизация эксперимента. Таким образом получается имитационная геоинформационная модель. Если же исследователь сам является частью исследуемой системы водоотведения, а развитие эксперимента на модели определяется принимаемыми им по ходу исследований решениями, то имитационный подход реализуется в человеко-машинной автоматизированной системе.

Выбор оптимальных параметров и структуры водоотведения может состоять из двух этапов. На первом с использованием имитационной системы получают исходные данные, а на втором решают оптимизационную задачу.

Целевая функция, минимизирующая природоохранные затраты (экологические платежи за сброс сточных вод, ущерб от негативного влия-

ния производства на окружающую среду), рассчитывается по формуле

$$S = \sum_{i=1}^n S_i * x_i \rightarrow \min;$$

$$\sum_{i=1}^n V_{ij} * x_i \leq V_j^*;$$

$$\sum_{i=1}^n x_i = 1; x_i \in \{0,1\}; i = \overline{1, n}; j = \overline{1, m}, \quad (2)$$

где  $S_i$  — стоимость очистки производственных стоков при внедрении  $i$ -й НДТ, руб.;  $V_{ij}$  — масса  $j$ -го загрязняющего вещества, сбрасываемая в водный объект после внедрения  $i$ -й НДТ, т;  $V_j^*$  — норматив допустимого сброса  $j$ -го загрязняющего вещества, т;  $x_i$  — показатели НДТ и комбинации технологий, которые могут быть использованы в основном и вспомогательных производствах предприятия для обработки промышленных сточных вод и обеспечения НДС.

$$S_i = \sum a_{ij} V_{ij}, \quad (3)$$

где  $a_{ij}$  — стоимость очистки единицы массы  $j$ -го загрязняющего вещества при использовании  $i$ -й НДТ (плата за нормативный сброс, предотвращенный ущерб водного объекта), руб.

$$V_{ij} = q_j (1 - \beta_{ij}), \quad (4)$$

где  $q_j$  — масса сбрасываемых в водный объект загрязняющих веществ ( $j = 1...m$ ), т;  $\beta_{ij}$  ( $\beta_{ij} < 1$ ) — очищенная масса воды, т.

Уравнение целевой функции решается в задаче оптимизации методом Парето, что позволяет выбрать и обосновать при фиксированных параметрах оптимальный производственный процесс, обеспечивающий заданные объемы производства и нормативный допустимый сброс. Выбор оптимального мероприятия или их комбинации по очистке сточных вод осуществляется с помощью введения в систему уравнений линейного ограничения в виде равенства  $\sum_{i=1}^n x_i = 1$ .

Целевая функция и ограничения равенства преобразуются к диагональной форме относительно базисных переменных, где каждая базисная переменная входит только в одно уравнение. За базисную переменную ( $x$ ) в работе принято одно водоохранное мероприятие.

Другим путем достижения оптимальных решений при взаимодействии системы «предприятие — водный объект» является адаптивное управление имитационным экспериментом, в результате которого создается геоинформационная моделирующая система (ГИМС) [14–16].

Программный продукт «ГИМС-река» позволяет реализовать решения практически всех применяемых в инженерной практике типов моделей КДПиПВ численными и приближенными аналитическими методами, детерминистическими и вероятностными моделями, а также производить автоматизацию аналогового программирования задач КДПиПВ [17].

## Информационное и программное обеспечение управления ТППК по экологическим и технологическим показателям

Для управления ТППК по экологическим и технологическим показателям с помощью ГИС-моделирования предложена методика сбора и систематизации геоданных, в которую входят следующие процедуры.

1. Классификация источников загрязнения, оказывающих техногенную нагрузку на водные ресурсы ТППК, по отраслям.

2. Определение специфических загрязнителей и других показателей сточных вод, характерных для отдельной отрасли.

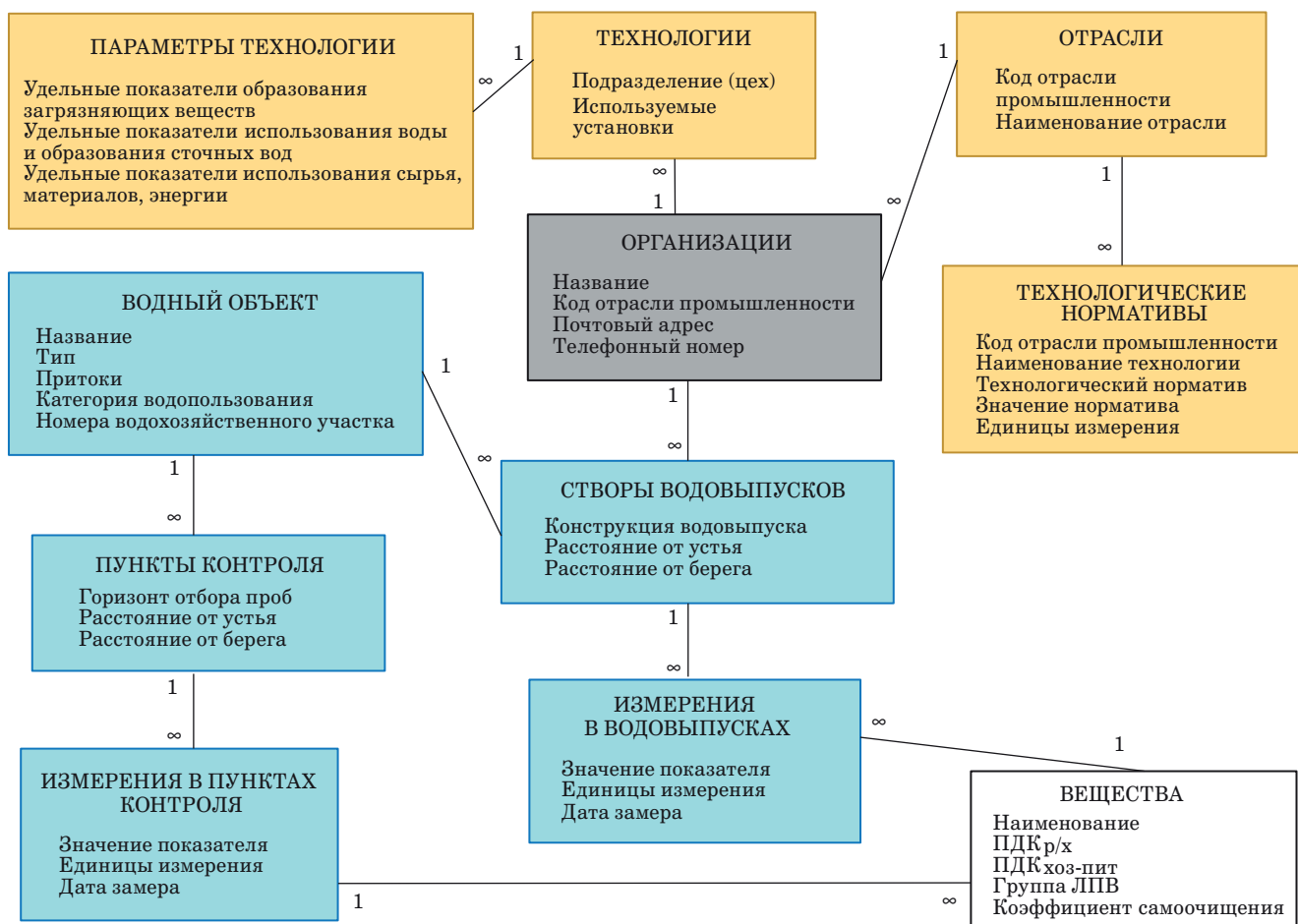
3. Систематизация и структуризация геоинформационных данных, включающих картографическую информацию, данные о результатах полевых исследований, различные архивные данные.

4. Выбор и обоснование экологических и технологических параметров отдельного регионального бассейнового ТППК.

5. Расчет эколого-технологических показателей ТППК на основе геоинформационных данных.

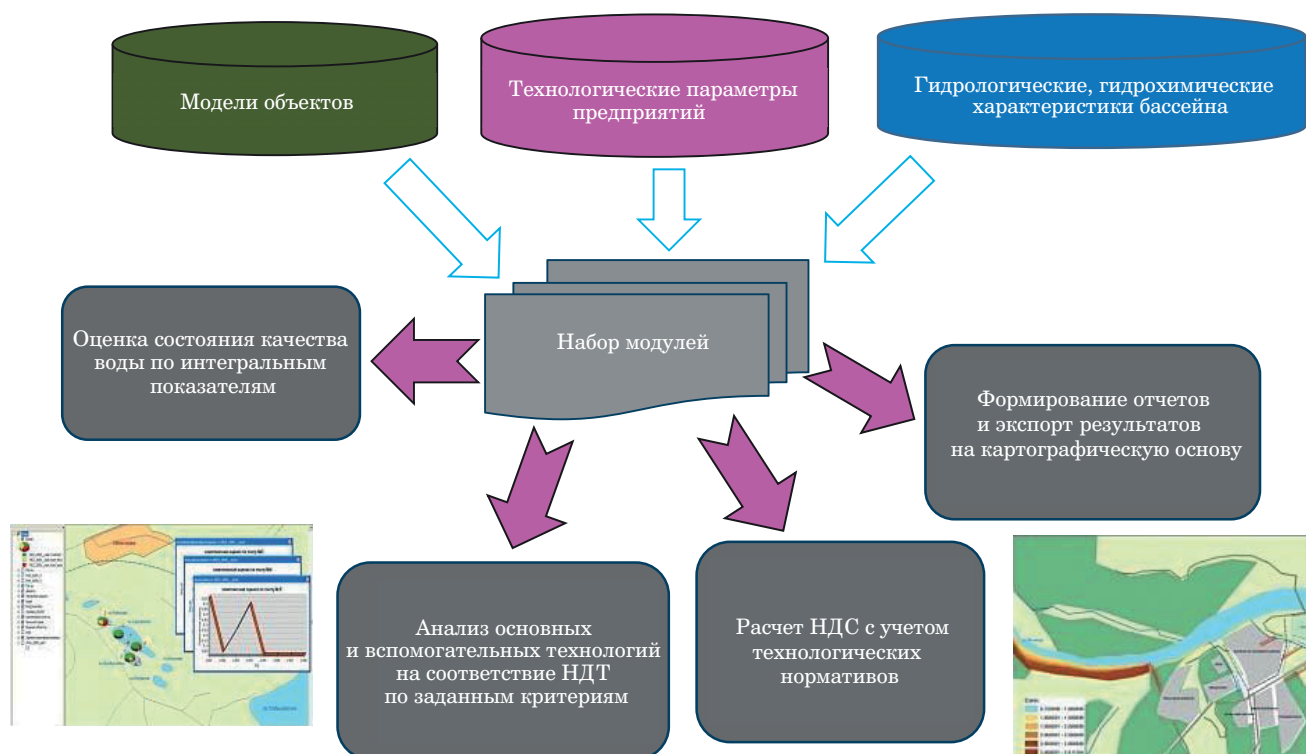
6. Формирование интегрированной базы геоданных, объединяющей информацию в единую информационно-технологическую систему ТППК.

Предложена структура межотраслевой регионально-бассейновой базы геоданных для имитационного моделирования эколого-технологических нормативов предприятий-водопользователей (рис. 3). База данных может дополняться новыми элементами производственно-технологического назначения в соответствии со спецификой производства [18].



■ **Рис. 3.** Структура межотраслевой регионально-бассейновой базы геоданных

■ **Fig. 3.** The structure of the intersectoral regional-basin geodatabase



■ **Рис. 4.** Блок моделирования и экспорта результатов в геоинформационную моделирующую систему  
 ■ **Fig. 4.** Block for modeling and exporting results to a geoinformation modeling system

Возможности имитационной системы во многом определяются составом и структурой ее прикладного программного обеспечения. Для решения рассмотренных выше задач наиболее эффективным программным продуктом является «ГИМС-река», в которой программа имитационного моделирования и оптимизация параметров систем водоотведения строятся по модульному принципу. При моделировании систем водоотведения производств, кроме модели водного объекта, в состав имитационной модели входят блоки, соответствующие подсистемам вспомогательных производств (водоочистки) и водовыпусков предприятий. Результаты моделирования представляются в виде наглядных материалов: таблиц, диаграмм, графиков и карт (рис. 4) [19].

Таким образом, на базе моделей управления качеством воды и КДПиПВ, учитывающих специфику различных водных объектов, создана территориально-бассейновая ГИМС в целях обоснования НДС и дальнейшей разработки НДВ в границах ТППК.

## Заключение

Разработанная методика используется на практике в Невско-Ладожском бассейновом водном управлении для:

- подготовки данных для геоинформационного моделирования квотирования нагрузки на водные ресурсы отдельных водопользователей;
- применения геоинформационных проектов в новом формате при проведении мониторинга состояния водных объектов ТППК и прогнозировании развития ситуаций в случае перераспределения нагрузки на водные объекты между субъектами водоотведения по разного рода сценариям;

- разработки НДВ и схем комплексного использования и охраны водных объектов с использованием цифровых инструментов.

Использование полученных результатов региональными отделениями Федерального агентства водных ресурсов позволило Невско-Ладожскому бассейновому водному управлению перейти на принципиально новый современный уровень принятия решений по совершенствованию системы водопользования на предприятиях путем внедрения автоматизированных информационных систем управления геоданными.

Кроме того, разработанная методика сбора и систематизации геоданных позволила решить задачу информационно-аналитического обеспечения при создании единой системы сбора, обмена и обработки данных в системе управления водопользованием ТППК водных объектов бассейна Финского залива, что в дальнейшем будет

способствовать достижению к 2030 году целевых показателей, установленных Федеральным агентством водных ресурсов (<http://www.nordwest-water.ru/activities/ndv/fz-33515/>):

– увеличению наполненности ГИС-проектов статистическими данными из кадастров и данными оперативного мониторинга в 2 раза;

– увеличению охвата региональных ТППК в соответствии с водохозяйственным районированием крупномасштабными спутниковыми снимками в 1,5 раза;

– повышению коммуникаций и координации между различными государственными структурами, промышленными производствами и другими заинтересованными сторонами в области управления водным хозяйством в 1,5 раза.

Таким образом, разработанная методика сбора и систематизации геоинформационных дан-

ных позволяет рассчитывать основные эколого-технологические показатели производственных систем и создавать интегрированные базы данных субъектов водопользования в различных бассейновых регионах РФ.

Предложенная в статье структура межотраслевой регионально-бассейновой базы геоинформационных данных может быть использована для имитационного моделирования эколого-технологических нормативов предприятий разного уровня организации производства.

На основе результатов моделирования создана геоинформационная моделирующая территориально-бассейновая система, позволяющая разрабатывать нормативы допустимого воздействия.

## Литература

1. Жильникова Н. А., Шишкин А. И., Епифанов А. В., Епифанова М. А. Алгоритм управления перераспределением техногенной нагрузки для территориальных природно-технических комплексов на основе геоинформационных систем. *Информационно-управляющие системы*, 2017, № 1, с. 93–101. doi:10.15217/issn1684-8853.2017.1.93
2. Алексеев В. В., Минина А. А., Орлова Н. В. Информационно-измерительные системы. Решение задач оценки состояния и идентификации ситуаций на основе результатов экологического контроля. *Приборы*, 2018, № 6 (216), с. 18–34.
3. Имекова М. П. История развития и современное правовое регулирование использования наилучших доступных технологий в Великобритании. *Вестник Томского государственного университета*, 2019, № 439, с. 195–201. doi:10.17223/15617793/439/27
4. Мочалова Л. А. Нормативно-правовое обеспечение перехода горных предприятий на наилучшие доступные технологии. *Известия вузов. Горный журнал*, 2019, № 1, с. 28–33. doi:10.17580/gzh.2019.01.06
5. Росляков П. В., Черкасский Е. В., Гусева Т. В., Тихонова И. О., Lundholm M. Технологическое нормирование объектов теплоэлектроэнергетики: наилучшие доступные технологии и нормы общего действия. *Теплоэнергетика*, 2021, № 10, с. 5–13. doi:10.1134/S0040363621100052
6. Шумилова Л. В. Стратегия технического интегрирования территориальных промышленных систем на основе геотехнологий. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*, 2021, № 5, с. 68–84. doi:10.25018/0236\_1493\_2021\_5\_0\_68
7. Амашукели С. А. Развитие цифровизации в сфере использования и охраны водных объектов. *Актуальные проблемы российского права*, 2022, т. 17, № 3 (136), с. 177–187. doi:10.17803/1994-1471.2022.136.3.177-187
8. Epifanov A. V., Antonov I. V., Frolov G. Y. Geoinformation and management systems for water management complexes. *Journal of Physics: Conf. Series: II Intern. Scientific Conf. on Metrological Support of Innovative Technologies (ICMSIT II-2021)*, Saint-Petersburg, 2021, 03–06 March. Krasnoyarsk, IOP Publishing Ltd, 2021. Vol. 1889. P. 32047. doi:10.1088/1742-6596/1889/3/032047
9. Быстров А. Ю., Майоров А. А. Обзор современных теорий и принципов построения мультифункциональных динамических мониторинговых геоинформационных систем. *Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка*, 2021, т. 65, № 1, с. 108–116. doi:10.30533/0536-101X-2020-65-1-108-116
10. Науменко Н. О., Федотова Е. В. Разработка программ для решения задач в области защиты окружающей среды на водосборных территориях. *Природообустройство*, 2020, № 5, с. 27–31. doi:10.26897/1997-6011/2020-5-27-32
11. Жильникова Н. А. Методология и инструментарий обеспечения экологичности радиоэлектронных и приборостроительных производств: дис... д-ра техн. наук. СПб., ГУАП, 2020. 409 с.
12. Рахуба А. В., Шамова М. В., Кондратьев С. А. Численное моделирование массопереноса в проточном водоеме. *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*, 2021, т. 14, № 2, с. 89–97. doi:10.7868/S2073667321020088
13. Шамова М. В., Кондратьев С. А. Некоторые вопросы оценки твердого стока водотоков Северо-Запада РФ. *Тр. Карельского научного центра Российской академии наук*, 2021, № 9, с. 26–36. doi:10.17076/lim1393
14. Zhilnikova Natalia. Geoinformation modelling system of natural technical complexes for simulation

modelling and optimization of load distribution. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 450, 2018, pp. 1–5. doi:10.1088/1757-899X/450/6/062010

15. Антонов И. В., Шишкин А. И., Чусов А. Н. Методология нормирования антропогенного воздействия на основе геоинформационной моделирующей системы. *Строительство уникальных зданий и сооружений*, 2014, № 3, с. 25–37.
16. Джорова С. М. Информационное и геоинформационное моделирование. Методы и программные средства дистанционного зондирования Земли: сб. науч. тр. / под ред. С. В. Шайтура, В. Я. Цветкова. Бурас, 2022, с. 41–52.
17. А.с. О государственной регистрации программы для ЭВМ «ГИМС-река», А. И. Шишкин, А. В. Епи-

фанов, И. В. Антонов, В. В. Алексеев, Н. И. Куракина, Е. В. Желтов. № 2009615259; дата поступл. 07.08.2009; дата регистр. 23.09.2009.

18. Куватов И. А., Шишкин И. А., Антонов И. В., Рабизода Н. Структура территориального мониторинга и базы данных для оценки техногенной нагрузки бассейна реки Вахш (Республика Таджикистан). *Гидрометеорология и экология*, 2022, № 67, с. 267–282. doi:10.33933/2713-3001-2022-67-267-282
19. Жильникова Н. А., Смирнова В. О., Шишкин И. А., Баранова А. А. Информационное обеспечение контроля и управления качеством воды в производственных системах. *Датчики и системы*, 2022, № 4 (263), с. 15–20. doi:10.25728/datsys.2022.4.3

UDC 004.9, 004.04, 504.064.4

doi:10.31799/1684-8853-2023-2-61-68

EDN: IKIOQA

### Information technologies and automation of environmental and technological management of the territorial natural-production complex

N. A. Zhilnikova<sup>a</sup>, Dr. Sc., Tech., Professor, orcid.org/0000-0003-1291-7150, nataliazhilnikova@gmail.com

A. A. Baranova<sup>a</sup>, Post-Graduate Student, Assistant Professor, orcid.org/0000-0003-2676-4212

<sup>a</sup>Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 67, B. Morskaya St., Saint-Petersburg, Russian Federation

**Introduction:** A mechanism of standard-setting and load redistribution for all water users is complicated and labor-intensive, that is why it demands new improved information tools and automated geoinformation systems which allow to carry out not only medium-term, but also long-term forecasts, taking into account the current requirements of environmental legislation. **Purpose:** To substantiate the implementation of environmental quality standards and environmental safety for various industries by geoinformation modeling. **Results:** We develop a methodology for collecting and systematizing geoinformation data, which makes it possible to calculate the main environmental and technological indicators of production systems and create integrated databases of water users. We propose the structure of an intersectoral regional-basin geoinformation database for simulating environmental and technological standards of enterprises, with the help of which the software user has the opportunity to systematize the necessary information. The database can be supplemented with new elements of production and technological purposes in accordance with the specific features of production. Using the modeling results and to develop standards for permissible impact we create a geoinformation modeling territorial-basin system based on water quality management models and standard models describing the convection-diffusion transfer and transformation of substances in watercourses. **Practical relevance:** The use of the obtained results by the regional departments of the Federal Agency for Water Resources allowed the water-basin departments to move to a fundamentally new modern level of decision-making to improve the water use system at enterprises through the introduction of automated information systems for geodata management.

**Keywords** – natural-production complex, geoinformation modeling, automated information processing and control systems, environmental and technological regulation, simulation GIS model.

**For citation:** Zhilnikova N. A., Baranova A. A. Information technologies and automation of environmental and technological management of the territorial natural-production complex. *Informatsionno-upravlyaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2023, no. 2, pp. 61–68 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2023-2-61-68, EDN: IKIOQA

### References

1. Zhilnikova N. A., Shishkin A. I., Epifanov A. V., Epifanova M. A. Algorithm of control over technogenic impact distribution for territorial natural-technical complex based on geoinformation systems. *Informatsionno-upravlyaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2017, no. 1, pp. 93–101 (In Russian). doi:10.15217/issn1684-8853.2017.1.93
2. Alekseyev V. V., Minina A. A., Orlova N. V. Information-measuring systems. Solving the problems of assessing the state and identifying situations based on the results of environmental control. *Instruments*, 2018, no. 6 (216), pp. 18–34 (In Russian).
3. Imekova M. P. History of the development and modern legal regulation of the use of the best available technologies in the UK. *Tomsk State University Journal*, 2019, no. 439, pp. 195–201 (In Russian). doi:10.17223/15617793/439/27
4. Mochalova L. A. Regulatory and legal framework for transition to the best available techniques in mining. *News of the Higher Institutions. Mining Journal*, 2019, no. 1, pp. 28–33 (In Russian). doi:10.17580/gzh.2019.01.06
5. Roslyakov P. V., Cherkasskii E. V., Guseva T. V., Tikhonova I. O., and Lundholm M. Process-related standardization of thermal electric power facilities: The best available techniques and general binding rules. *Thermal Engineering*, 2021, no. 10, pp. 5–13 (In Russian). doi:10.1134/S0040363621100052
6. Shumilova L. V. Geotechnology-based technical integration strategy for territorial industrial systems. *Mining Information and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)*, 2021, no. 5, pp. 68–84 (In Russian). doi:10.25018/0236\_1493\_2021\_5\_0\_68
7. Amashukeli S. A. Development of digitalization in the field of use and protection of water bodies. *Actual Problems of Russian Law*, 2022, vol. 17, no. 3 (136), pp. 177–187 (In Russian). doi:10.17803/1994-1471.2022.136.3.177-187

8. Epifanov A. V., Antonov I. V., Frolov G. Y. Geoinformation and management systems for water management complexes. *Journal of Physics: Conf. Series: II Intern. Scientific Conf. on Metrological Support of Innovative Technologies (ICMSIT II-2021)*, Saint-Petersburg, 2021, 03–06 March. Krasnoyarsk, IOP Publishing Ltd, 2021. Vol. 1889. P. 32047. doi:10.1088/1742-6596/1889/3/032047
9. Bystrov A. Yu., Maiorov A. A. Overview of modern theories and principles of construction multifunctional dynamic monitoring geographic information systems. *Izvestia vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*, 2021, vol. 65, no. 1, pp. 108–116 (In Russian). doi:10.30533/0536-101X-2020-65-1-108-116
10. Naumenko N. O., Fedotova E. V. Development of programs for solving tasks in the field of environmental protection on water catchment areas. *Environmental Engineering*, 2020, no. 5, pp. 27–31 (In Russian). doi:10.26897/1997-6011/2020-5-27-32
11. Zhil'nikova N. A. *Metodologiya i instrumentariy obespecheniya ekologichnosti radioelektronnykh i priborostroitel'nykh proizvodstv*. Dis. dokt. tekhn. nauk [Methodology and tools for ensuring the environmental friendliness of radio-electronic and instrument-making industries. Dr. PhD in Engineering sci. diss.]. Saint-Petersburg, GUAP, 1986, 18 p. (In Russian).
12. Rakhuba A. V., Shmakova M. V., Kondratyev S. A. Mathematical modeling of mass transfer in a flowing reservoir. *Fundamentalnaya i prikladnaya gidrofizika*, 2021, vol. 14, no. 2, pp. 89–97 (In Russian). doi:10.7868/S2073667321020088
13. Shmakova M. V., Kondratyev S. A. Some questions of estimating suspended sediment in watercourses of North-West Russia. *Proc. of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Science*, 2021, no. 9, pp. 26–36 (In Russian). doi:10.17076/lim1393
14. Natalia Zhilnikova. Geoinformation modelling system of natural technical complexes for simulation modelling and optimization of load distribution. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 450*, 2018, pp. 1–5. doi:10.1088/1757-899X/450/6/062010
15. Antonov I. V., Shishkin A. I., Chusov A. N. Methodology of rationing of admissible dumps on the basis of geoinformation modeling system. *Construction of Unique Buildings and Structures*, 2014, no. 3, pp. 25–37 (In Russian).
16. Dzhorova S. M. *Informatsionnoye i geoinformatsionnoye modelirovaniye*. In: *Metody i programmnyye sredstva distantsionnogo zondirovaniya Zemli* [Information and geoinformation modeling. In: Scientific and technical collection "Earth remote sensing methods and software"]. Eds. S. V. Shaitura, V. Ya. Tsvetkov. Burgas, 2022, pp. 41–52 (In Russian).
17. Shishkin A. I., et al. *O gosudarstvennoi registratsii programmy dlia EVM "GIMS-reka"* [On state registration of computer program geoinformation modelling System-River]. Certificate of state registration, no. 2009615259, 2009.
18. Kuvatov I. A., Shishkin I. A., Antonov I. V., Rabizoda N. Territorial monitoring structure and database for the assessment of technogenic load in the Vakhsh River basin (Republic of Tajikistan). *Hydrometeorology and Ecology*, 2022, iss. 67, pp. 267–282 (In Russian). doi:10.33933/2713-3001-2022-67-267-282
19. Zhilnikova N. A., Smirnova V. O., Shishkin I. A., Baranova A. A. Information support for control and management of water quality in production systems. *Sensors & Systems*, 2022, no. 4 (263), pp. 15–20 (In Russian). doi:10.25728/datsys.2022.4.3

**БАРАНОВА**  
**Анна**  
**Андреевна**



Аспирант, ассистент кафедры инноватики и интегрированных систем качества Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

В 2021 году окончила Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения по специальности «Техносферная безопасность».

Является автором более 25 научных публикаций.

Область научных интересов – методики и модели управления сложными водно-ресурсными системами.

Эл. адрес:

anybaranova299751@yandex.ru

**БУРКОВ**  
**Артем**  
**Андреевич**



Старший преподаватель кафедры инфокоммуникационных технологий и систем связи Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. В 2017 году окончил с отличием Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения по специальности «Инфокоммуникационные технологии и системы связи».

Является автором 24 научных публикаций.

Область научных интересов – беспроводные системы передачи данных, алгоритмы случайного множественного доступа, системы с гибридной решающей обратной связью, цифровая обработка изображений, сжатие данных.

Эл. адрес: a.burkov@k36.org

**ГЕЙДАРОВ**  
**Полад**  
**Шахмалы оглы**



Доцент, ведущий научный сотрудник Института систем управления НАН Азербайджана, Баку. В 1996 году окончил Азербайджанский политехнический институт им. Н. Туси по специальности «Инженер системотехник».

В 2022 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук.

Является автором 45 научных публикаций.

Область научных интересов – распознавания образов, нейросетевые технологии и модели, оптико-информационные системы, ГИС-системы, электронное правительство, электронная ука.

Эл. адрес:

plbaku2010@gmail.com

**ЖИЛЬНИКОВА**  
**Наталья**  
**Александровна**



Профессор кафедры инноватики и интегрированных систем качества Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. В 1992 году окончила Ленинградский технологический институт целлюлозно-бумажной промышленности по специальности «Охрана окружающей среды».

В 2020 году защитила диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук. Является автором более 120 научных публикаций.

Область научных интересов – эколого-технологическое нормирование, инновационные технологии и эколого-экономическая оценка безопасности в природно-технических системах, методы обеспечения экологической безопасности производства.

Эл. адрес:

nataliazhilnikova@gmail.com

**КОЛЕСНИКОВА**  
**Светлана**  
**Ивановна**



Профессор кафедры компьютерных технологий и программной инженерии Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

В 1980 году окончила Томский госуниверситет по специальности «Прикладная математика».

В 2011 году защитила диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук.

Является автором 160 научных публикаций и двух патентов на изобретения.

Область научных интересов – интеллектуальный анализ данных, управление нелинейными объектами с неопределенностью в описании и их применение в технических и биоинженерных исследованиях.

Эл. адрес:

skolesnikova@yandex.ru

**КРОТОВ**  
**Кирилл**  
**Викторович**



Доцент кафедры информационных систем Севастопольского государственного университета. В 1993 году окончил Севастопольский приборостроительный институт по специальности «Автоматизированные системы управления и обработки информации».

В 2003 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором более 100 научных публикаций.

Область научных интересов – теория расписаний, многоуровневая и дискретная оптимизация.

Эл. адрес: krotov\_k1@mail.ru

**СОЛОДУХА  
Роман  
Александрович**



Доцент кафедры информационных технологий, моделирования и управления Воронежского государственного университета инженерных технологий.

В 1998 году окончил Воронежскую высшую школу МВД России по специальности «Радиотехника».

В 2001 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором более 100 научных публикаций, 27 учебно-методических работ, десяти патентов на программы для ЭВМ. Область научных интересов — стеганоанализ.

Эл. адрес: [standartal@list.ru](mailto:standartal@list.ru)

**ФОМЕНКОВА  
Анастасия  
Алексеевна**



Старший преподаватель кафедры компьютерных технологий и программной инженерии Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. В 2012 году окончила Киевский политехнический университет по специальности «Оборудование фармацевтической и микробиологической промышленности».

В 2022 году защитила диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором 19 научных публикаций и одного патента на изобретения.

Область научных интересов — математическое и имитационное моделирование биотехнических систем.

Эл. адрес: [a.a.fomenkova@mail.ru](mailto:a.a.fomenkova@mail.ru)

---

### ПАМЯТКА ДЛЯ АВТОРОВ

*Поступающие в редакцию статьи проходят обязательное рецензирование.*

При наличии положительной рецензии статья рассматривается редакционной коллегией. Принятая в печать статья направляется автору для согласования редакторских правок. После согласования автор представляет в редакцию окончательный вариант текста статьи.

Процедуры согласования текста статьи могут осуществляться как непосредственно в редакции, так и по e-mail ([ius.spb@gmail.com](mailto:ius.spb@gmail.com)).

При отклонении статьи редакция представляет автору мотивированное заключение и рецензию, при необходимости доработать статью — рецензию.

*Редакция журнала напоминает, что ответственность за достоверность и точность рекламных материалов несут рекламодатели.*

---