



ISSN 2500-1833

Международный научно-практический  
электронный журнал  
Основан в 2015 году, издается ежеквартально

**Учредители:**

Региональное отделение Российской академии естественных наук,  
АО «Национальный институт радио и инфокоммуникационных технологий»

**Издатель:**

АО «Национальный институт радио и инфокоммуникационных технологий»

**Главный редактор**

Е.Е. Володина, д.э.н., акад. РАЕН

**Редакционная коллегия:**

Бабенко Л.К., д.т.н.

Бокк Г.О., д.т.н.

Веерпалу В.Э., д.т.н.

Гумеров М.Ф., д.э.н.

Дворянкин С.В., д.т.н.

Докучаев В.А., д.т.н.

Качалов Р.М., д.э.н.

Кинэ Эмиль, Ph. D., Франция

Кобылко А.А., к.э.н.

Лившиц В.Н., д.э.н.

Макаров В.В., д.э.н.

Мызникова М.Н., к.э.н.

Панов С.А. д.т.н.

Салютин Т.Ю., д.э.н.

Сю Гуанхан, д.т.н., Китай

Шаталова О.М. д.э.н.,

Шорин О.А., д.т.н.

**Ведущий редактор** Дуничева Н.С.

**Редактор** Федорова О.В.

Журнал публикует статьи, отражающие результаты исследований в соответствии со следующими разделами ГРНТИ:

06.00.00 – Экономика и экономические науки

20.00.00 – Информатика

28.00.00 – Кибернетика

47.00.00 – Электроника. Радиотехника

49.00.00 – Связь

81.93.29 – Информационная безопасность

82.00.00 – Организация и управление

90.00.00 – Метрология

**Адрес редакции:** 111024, Москва, ул. Авиамоторная, дом 8А, стр. 5.  
АО «НИРИТ»

**Тел.:** 8 (495) 643-11-86 (282) **сайт:** <http://journal-ekss.ru/> **e-mail:** [ekss@nirit.org](mailto:ekss@nirit.org)

# СОДЕРЖАНИЕ

## **ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ В ИНФОКОММУНИКАЦИЯХ. ЦИФРОВАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ ГОСУДАРСТВА И ОБЩЕСТВА. ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫЕ БИЗНЕС-ТЕХНОЛОГИИ**

*М.Ф. Гумеров*

Развитие методов выработки решений в управлении выводом на рынок IT-продукции в современных условиях 4-13

*А.А. Абрамова*

Анализ использования больших данных для принятия решений в промышленной сфере 13-21

*А.И. Панов*

Использование аналитики больших данных в здравоохранении 21-30

*Д.Б. Горошков*

Исследование решений на базе облачных технологий для совершенствования дистанционных форматов обучения в среднем профессиональном образовании и сетевом администрировании 30-36

## **СИСТЕМЫ, СЕТИ И УСТРОЙСТВА СВЯЗИ. РАДИОТЕХНИКА. АНТЕННЫ. ЭЛЕКТРОННАЯ КОМПОНЕНТНАЯ БАЗА. ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ. МЕТРОЛОГИЯ**

*Шорин О.А., Бокк Г.О., Щепнов С.Г.*

Сравнение эффективности модуляции с расширением спектра сети LoRa и традиционной техники дискретной фазовой модуляции 37-53

*Г.М. Нурудинов*

Исследование эффективных алгоритмов повышения отказоустойчивости в сетях SDN на базе искусственного интеллекта 54-59

## **ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ, СЕТИ И ТЕХНОЛОГИИ. ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ. ИНФОРМАТИКА И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ. ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ И МАШИННОЕ ОБУЧЕНИЕ**

*М.М. Добрышин, Д.С. Горбуля*

Подходы оценки качества связи и предоставления услуг связи и задачи по их совершенствованию в рамках обеспечения информационной безопасности 60-71

*Р.Т. Расулов*

Применение методов оптимизации для разработки системы распознавания речи на устройствах с ограниченными вычислительными ресурсами 71-80

*Е.В. Сюдюкова*

**Анализ развития и использования промышленного интернета  
вещей в облачном и интеллектуальном аддитивном производствах 80-89**

*А.И. Панов*

**Тенденции в развитии интеллектуального производства 89-99**

**ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ В  
ИНФОКОММУНИКАЦИЯХ.  
ЦИФРОВАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ ГОСУДАРСТВА И  
ОБЩЕСТВА. ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫЕ БИЗНЕС-  
ТЕХНОЛОГИИ**

**РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ ВЫРАБОТКИ РЕШЕНИЙ В УПРАВЛЕНИИ  
ВЫВОДОМ НА РЫНОК ИТ-ПРОДУКЦИИ В СОВРЕМЕННЫХ УСЛОВИЯХ**

*М.Ф. Гумеров, д.э.н., профессор, Московский технический университет связи и информатики, m.f.gumerov@mtuci.ru.*

**УДК 338.534**

---

**Аннотация.** Проанализированы особенности современной практики вывода на рынок ИТ-технологий как коммерческого продукта. Сделан вывод о затруднительности использования классических методов выработки решений в управлении этой деятельностью. Обоснована необходимость применения феноменологических моделей как основы выработки решений в управлении выводом на рынок ИТ-продуктов, обладающих высоким уровнем уникальности.

**Ключевые слова:** ИТ-продукция; вывод на рынок; управление; принятие решений; системный анализ; феноменологические модели.

**DEVELOPING THE METHODS OF DECISION-MAKING IN MANAGEMENT  
OF IT-PRODUCTS' ENTERING THE MARKET UNDER MODERN  
CIRCUMSTANCES**

*Marat Gumerov, doctor of economics, professor, Moscow Technical University of Communications and Informatics.*

**Annotation.** The features of the modern practice of bringing IT technologies to the market as a commercial product are analyzed. The conclusion about the difficulty of using classical methods of decision-making in the management of this activity is made. The necessity of using phenomenological models as a basis for decision-making in managing the launch of IT products with a high level of uniqueness to the market is substantiated.

**Keywords:** IT-products; entering the market; management; decision-making; system analyses; phenomenological models.

---

**Введение**

Условия развития многих сфер экономической жизни современного общества делают затруднительными применение в управлении ими известных методов выработки решений. Потому что они основаны на обработке больших массивов информации о том, как принимались и принимаются решения в проблемных ситуациях, аналогичных той, для которой вырабатывается текущее решение. Однако менеджеры современных компаний часто сталкиваются с проблемными ситуациями, требующими управленческих решений, для которых нет аналогов в опыте работы ни самой компании, где принимается решение, ни других компаний, работающих на этом же рынке. Одной из сфер, где эта сложность

проявляется особенно остро, является производство и вывод на рынок *IT*-продуктов. Потому что большинство из них облают высокой уникальностью, и для каждого нового продукта такого рода в процессе производства и вывода его на рынок оказывается затруднительным использовать опыты ведения этой работы с другими продуктами, производимыми в этой же отрасли, но имеющими другие технико-экономические характеристики. В связи с этим актуальной проблемой является поиск новых подходов к выработке решений в управлении процессами вывода на рынок *IT*-продуктов, производимых на современном этапе развития рассматриваемой отрасли. Такова цель работы, в ходе достижения которой были получены следующие результаты.

### **Обзор современных методов управления выводом на рынок *IT*-продукции**

Проанализировано современное состояние рынка *IT*-продуктов в России, сделан вывод о его особой роли по сравнению со всеми другими видами рынков в мировой и национальной экономике. Это обусловлено темпами роста объемов производства и продаж продукции, которые значительно выше, чем в других отраслях, а также более высоким стратегическим значением этой отрасли для реализации государственной политики в области инновационного подъема экономики страны [1, 2]. Но при этом важно не только количественное, но и качественное содержание изменений, происходящих в сфере производства и вывода на рынок новых *IT*-продуктов. Их ускоренное появление приводит к тому, что за этими темпами не успевают методики выработки соответствующих решений. И даже те методы для данной сферы, которые были разработаны еще 5-10 лет назад для *IT*-продуктов, рынок которых бурно развивался в то время, сейчас уже зачастую оказываются трудно применимыми для управления процессами вывода на рынок новейших видов данной продукции.

Анализ литературы позволил выделить три подхода, сформировавшихся в последнее десятилетие, предназначенных для управления процессами вывода на рынок *IT*-продуктов.

В Центральном экономико-математическом институте РАН В.Е. Дементьевым и Е.В. Устюжаниной и другими учеными развивается система методов ценообразования на рынках инновационных и программных продуктов в условиях высоких уровней несовершенной конкуренции (монополия, монополия, дуополия, олигополия) [3, 4]. Однако вопрос о применимости разработанных моделей к нашей проблематике остается дискуссионным. Потому что до конца неясно, можно ли рассматривать рынок технологий речевой аналитики в России в настоящее время как рынок с высокой степенью олигополизации. Представляется возможным использовать модели, разработанные в трудах ЦЭМИ РАН для описания поведения фирмы, входящей на рынок речевой аналитики, если представить совокупность уже действующих фирм как условного «обобщенного первого дуополиста», а рассматриваемую фирму – как нового дуополиста, бросающего ему вызов, но требуется тщательная проработка параметров подобной экономико-математической модели.

Достаточно обширное исследование проблем ценообразования на программное обеспечение проведено В.И. Соловьевым (Финансовый университет) в работах [5, 6]. Однако его практические разработки ориентированы только для случаев, когда фирма продвигает на рынок такой программный продукт, который является совершенно новым, и, следовательно, поведение фирмы по данному виду продукта моделируется как чисто монопольное. К среднестатистической фирме,

действующей на российском рынке технологий речевой аналитики, такой подход в общем случае не применим, но следует иметь его в виду как перспективный для случая, если кто-либо из участников рассматриваемого рынка создаст совершенно новый уникальный продукт и начнет продвигать его на рынок.

В этот же период достаточно объемное исследование по данной проблематике было проведено в публикациях О.Н. Антипиной (Московский государственный университет), которое, в отличие от двух описанных ранее, ориентировано на более универсальную картину рынка, вне зависимости от степени его монополизации. Среди результатов данного исследования, в первую очередь, заслуживает внимания систематизация нормативно-параметрических методов ценообразования, преломленных сквозь призму особенностей рынка программного обеспечения (в самой этой работе они рассматриваются на примере программ антивирусной защиты). Всего выделяются три метода: удельных показателей, регрессионный и балльный [7].

В исследовании [8] все три описанных подхода были проанализированы с позиции применимости к наиболее новым и инновационным видам *IT*-продукции, основанным в первую очередь на технологиях искусственного интеллекта. Сделан вывод о том, что в этой сфере относительно хорошо применимы методы, предложенные в работе [7], но лишь при условии полноты информации о текущем состоянии рынка рассматриваемого вида продукции, а это в современных условиях достижимо не во всех ситуациях. В связи с этим требуется поиск иных подходов, более ориентированных на быструю смену ситуации в рыночной среде с неполнотой информации о механизмах происходящих изменений.

### **Перспективные методы управления выводом на рынок *IT*-продукции в условиях турбулентности рынка**

Обосновывается необходимость применения феноменологических моделей для выработки управленческих решений при продвижении *IT*-продуктов на рынок, направленных на преодоление нестандартных проблем, возникающих в ходе этого процесса. Предлагаемый подход синтезирует идеи трех популярных сегодня управленческих концепций:

- феноменологического подхода к познанию [9];
- системного менеджмента (Г.Б. Клейнер), устанавливающего зависимость между особенностями управления экономической системой и ее принадлежностью к одному из четырех типов по пространственно-временному признаку (объект, среда, процесс или проект) [10, 11];
- управления изменениями (И. Адизес), рассматривающего данную деятельность как результат интеграции производительской (Р), администраторской (А), предпринимательской (Е) и интеграторской (I) управленческих функций [12, 13].

Синтезированный на базе этих трех концепций подход к выработке решений опирается на базовые понятия, которые применительно к управлению выводом на рынок *IT*-продукта, обретают следующие толкования:

- экономическое пространство – время – вместительность хозяйственных процессов, сопровождающих вывод продукта на рынок. Включает три параметра для измерения: пространство  $s$ , время  $t$  и некоторый экономический параметр  $X$ . В качестве параметра  $X$  рассматриваются показатели реализации управленческих функций, выделяемых в рамках теории И. Адизеса. Классификация управленческих функций в рамках

предложенного подхода к выработке решений в сфере вывода ИТ-продукта на рынок приведена в табл. 1.

Таблица 1.

Управленческая функция	Экономический показатель
Производительская (Р)	Краткосрочная результативность
Администраторская (А)	Краткосрочная эффективность
Предпринимательская (Е)	Долгосрочная результативность
Интеграторская (I)	Долгосрочная эффективность

- управляемая объектная система (обозначение –  $\delta M$ ;  $\delta$  – объект,  $M$  – *managed*, управляемый) – это компания, ресурсами которой имеет право распоряжаться лицо принимающее решение; в результате принятия им управленческого решения компания направляет часть своих ресурсов в систему – проект, связанный с выводом продукта на рынок;
- релевантные объектные системы – другие компании, направляющие или потенциально способные направлять свои ресурсы на проекты, аналогичные тому, что реализует наша компания (обозначение -  $\delta I \dots \delta n$ );
- средовая система ( $\alpha$ ) – рынок, на котором действуют все упомянутые выше компании;
- процессная система ( $\beta$ ) обеспечивает передачу ресурсов схожими компаниями на схожие проекты;
- проектная система ( $\gamma$ ) – результат направления конкретной компанией ресурсов на конкретные действия, связанные с выводом на рынок ИТ-продукта.

Мегасистема, объединяющая все четыре типа систем, в рамках предлагаемого подхода рассматривается как экономическая тетрада, обеспечивающая цифровую трансформацию бизнеса компаний, работающих на рынке нового вида ИТ-продукции. Здесь управляемая компания  $\delta M$  и релевантные ей компании, работающие на этом же рынке  $\delta I \dots \delta n$ , взаимодействуют с  $k$ -м количеством процессных систем, и в результате данного взаимодействия возникают проекты цифровой трансформации бизнесов всех этих компаний в количестве  $(n+1)*k$ . Каждый такой проект обозначается двузначным индексом, где первый знак – номер объекта ( $1 \dots n, M$ ), второй знак – номер процесса ( $1 \dots k$ ). При этом в виду того, что каждая компания является элементом рыночной среды, его экономический показатель  $x_\delta$  рассматривается в зависимости от показателя этой среды  $x_\alpha$  ( $x_\delta = x_\delta(x_\alpha) = x_\delta(x_{\delta 1} \dots x_{\delta n})$ ). При этом каждый проект цифровой трансформации рассматривается как элемент процесса, соответственно  $x_\gamma$  измеряется в зависимости от  $x_\beta$  ( $x_\gamma = x_\gamma(x_\beta)$ ). Таким образом, в системе координат  $s - t - x$  помещается полная экономическая тетрада цифровой трансформации (рис. 1).

Взаимодействие управляемой компании с каждым новым процессом должно вести к установлению равновесия между ними, которое можно описать феноменологической моделью:

$$x_{t.eq} = f_{t.eq} \left[ \frac{dx_{\delta M}}{dx_\alpha}, \frac{dx_{\gamma M}}{dx_\beta} \right] \quad (1)$$

Здесь:  $\frac{dx_{\delta.M}}{dx_{\alpha}}$  и  $\frac{dx_{\gamma.M}}{dx_{\beta}}$  – приращения функций  $x_{\delta.M} = x_{\delta.M}(x_{\alpha})$  и  $x_{\gamma.M} = x_{\gamma.M}(x_{\beta})$

соответственно;  $x_{\tau.eq}$ , – равновесный экономический показатель тетрады в целом (в его нижнем индексе  $\tau$  – первая буква греческого слова *тетра́да*), является эндогенной переменной функции  $f_{\tau.eq}$ , описывающей приведение к положению равновесия графиков движения  $x_{\delta.M}(x_{\alpha})$  и  $x_{\gamma.M}(x_{\beta})$ .

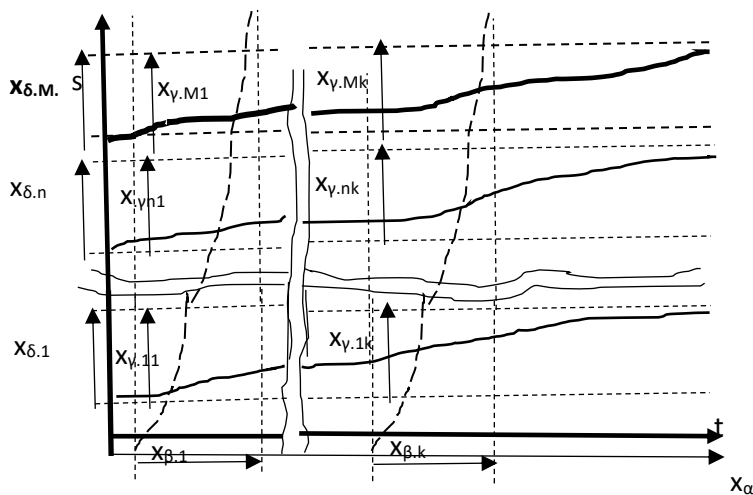


Рисунок 1

При этом феноменологическое моделирование характеризуется в первую очередь тем, что базируется на отказе от попыток выявления каких-либо четких закономерностей в развитии познаваемого объекта. В рамках разрабатываемой в настоящем исследовании концепции вводится принцип, согласно которому в момент принятия решения о вступлении компании в определенный процесс цифровой трансформации бизнеса менеджер все прошлые опыты вступления его компании-объекта в аналогичные процессы и опыты участия в этом процессе других аналогичных компаний рассматривает как примеры равновесного процессно-объектного взаимодействия. Он делает это на том основании, что все эти взаимодействия не привели ни саму компанию, ни процесс цифровой трансформации к прекращению их движения в экономическом пространстве – времени, и их траектории движения дошли до текущей пространственно-временной точки.

Проиллюстрируем данное положение в системе координат экономического пространства – времени. Ранее на рис. 1 была введена общая схема размещения в данной системе координат экономической тетрады, включающей компанию, проходящую через цифровую трансформацию бизнеса, как объект управления ( $\delta.M$ ),  $n$ -е количество релевантных с ней компаний-объектов,  $k$ -е количество процессов цифровой трансформации и проекты по ее реализации в количестве  $(n+1)*k$ . Для описания ситуации, связанной с принятием экстренного решения нестандартной проблемы в ходе цифровой трансформации бизнеса компании, в данное системное представление вводится еще один элемент – новый процесс, под которым понимается цифровая трансформация бизнеса, в которую наша компания-объект управления диффундирует в результате принимаемого в текущий момент решения. В обозначении данного процесса и всех связанных с ним проектов будет присутствовать буква  $N$  – new, новый. С учетом введения данного элемента общая схема экономической тетрады принимает вид, представленный на рис. 2.



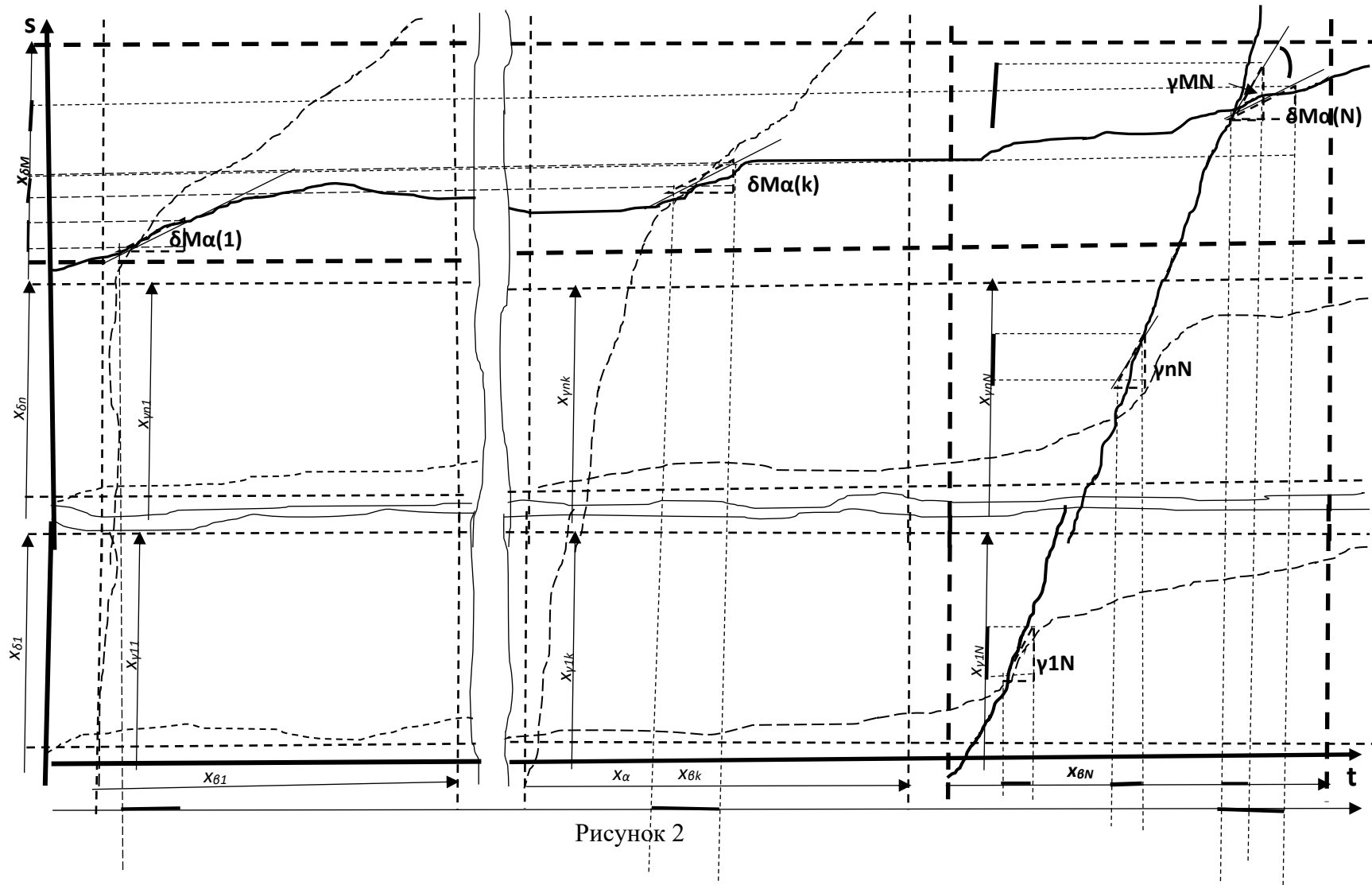


Рисунок 2

Сформулированный принцип устойчивости равновесных углов формализуется следующим образом:

$$x_{\tau.eq}^{nom.} = \frac{dx_{\delta M(N)}}{dx_{\alpha(N)}} + \frac{dx_{\gamma MN}}{dx_{\beta N(M)}} = \frac{dx_{\delta M(1)}}{dx_{\alpha(1)}} \dots \frac{dx_{\delta M(k)}}{dx_{\alpha(k)}} + \frac{dx_{\gamma 1N}}{dx_{\beta N(1)}} \dots \frac{dx_{\gamma nN}}{dx_{\beta N(k)}} \quad (2)$$

Здесь  $x_{\tau.eq}^{nom.}$  – условное равновесное значение экономического параметра тетрады, рассчитывается как сумма тангенсов углов наклона касательных к графикам движения объекта управления и нового процесса в точке взаимодействия. При этом следует учитывать, что:

$$dx_{\delta M(N)} = dx_{\delta M(N)}^o + K_x \quad (3)$$

$$dx_{\beta N(M)} = dx_{\beta N(M)}^o + K_x \quad (4)$$

Здесь  $dx_{\delta M(N)}^o$  и  $dx_{\beta N(M)}^o$  – части изменений соответственно  $dx_{\delta M(N)}$  и  $dx_{\beta N(M)}$ , которые не зависят от решения менеджера,  $K_x$  – изменение в развитии объекта управления, которое вводится в него менеджером. Тогда:

$$\frac{dx_{\delta M(N)}^o + K_x}{dx_{\alpha(N)}} + \frac{dx_{\gamma MN}}{dx_{\beta N(M)}^o + K_x} = \frac{dx_{\delta M(1)}}{dx_{\alpha(1)}} \dots \frac{dx_{\delta M(k)}}{dx_{\alpha(k)}} + \frac{dx_{\gamma 1N}}{dx_{\beta N(1)}} \dots \frac{dx_{\gamma nN}}{dx_{\beta N(k)}} \quad (5)$$

Далее в исследовании рассматривается ситуация, когда менеджер разрабатывает экстренное управленческое решение нестандартной проблемы о параметрах диффузии своей компании-объекта в некий новый процесс цифровой трансформации бизнеса и использует информацию за довольно ограниченный период времени – как правило, не более 1-1,5 лет, предшествующих моменту принятия решения. А этот временной отрезок характеризуется тем, что уже с самого его начала имеет место движение в экономическом пространстве – времени не только управляемой компании (который по времени никогда не ограничен), но и нового процесса цифровой трансформации, предполагаемого к взаимодействию с ней в результате принятия решения. Процесс цифровой трансформации бизнеса, согласно определению, ограничен во времени, но на краткосрочном интервале времени он по данному параметру оказывается не ограничен так же, как объект. Т.е. траектории движения управляемой компании-объекта  $\delta M$  и нового процесса цифровой трансформации  $\beta N$  при построении модели на основе информации, взятой за краткосрочный интервал времени, оказываются в одной области экономического пространства – времени. При этом само взаимодействие  $\delta M$  и  $\beta N$  происходит в строго определенный момент времени, на котором заканчивается пространственно-временная область, в которую помещена экономическая тетрада, описывающая проблемную область рассматриваемого управленческого решения – поэтому далее это временной параметр будет обозначаться как  $t_{кон}$ . До наступления этого момента времени компания-объект управления  $\delta M$  на рассматриваемом временном интервале диффундирует с различными группами процессов трансформации бизнеса, количество групп составляет от 1 до  $n$ , и этим взаимодействиям соответствуют моменты времени  $t_1 \dots t_n$ . На этом же интервале времени новый процесс цифровой трансформации  $\beta N$  диффундирует с различными группами других компаний (число данных групп  $1 \dots k$ , взаимодействия происходят в моменты времени  $t_1 \dots t_k$ ).

В ходе дальнейшего исследования взаимодействия компании-объекта управления с различными группами процессов и взаимодействия нового процесса с различными группами объектов предлагается рассматривать через равные интервалы времени в пределах рассматриваемой области экономического пространства времени. То есть, предлагается весь интервал времени, данные за который используются для построения феноменологической модели, разделить на  $l$  равных промежутков, заканчивающихся в точках соответственно  $t_1 \dots t_l$ , и в каждый из этих моментов времени должны оцениваться соответствующие ему параметр взаимодействия объекта управления в общую совокупность всех процессов, с которыми он диффундирует именно в этот момент, и параметр взаимодействия нового процесса в совокупность всех объектов, с которыми он диффундирует также именно в этот момент времени. Тогда уравнение (5) принимает вид:

$$\frac{dx_{\delta M}^o(t_{\text{кон}}) + K_x}{dx_{\alpha}(t_{\text{кон}})} + \frac{dx_{\gamma}(t_{\text{кон}})}{dx_{\beta N}^o(t_{\text{кон}}) + K_x} = \left( \frac{dx_{\delta M}(t_1)}{dx_{\alpha}(t_1)} + \frac{dx_{\gamma}(t_1)}{dx_{\beta N}(t_1)} \right) \dots \left( \frac{dx_{\delta M}(t_l)}{dx_{\alpha}(t_l)} + \frac{dx_{\gamma}(t_l)}{dx_{\beta N}(t_l)} \right) \quad (6)$$

Конкретизировав показатели по табл. 1, получаем:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dP_{\delta M}^o(t_{\text{кон}}) + g_P(K_{x=P,A,E,I})}{dP_{\alpha}(t_{\text{кон}})} + \frac{dP_{\gamma}(t_{\text{кон}})}{dP_{\beta N}^o(t_{\text{кон}}) + g_P(K_{x=P,A,E,I})} = \left( \frac{dP_{\delta M}(t_1)}{dP_{\alpha}(t_1)} + \frac{dP_{\gamma}(t_1)}{dP_{\beta N}(t_1)} \right) \dots \left( \frac{dP_{\delta M}(t_l)}{dP_{\alpha}(t_l)} + \frac{dP_{\gamma}(t_l)}{dP_{\beta N}(t_l)} \right) \\ \frac{dA_{\delta M}^o(t_{\text{кон}}) + g_A(K_{x=P,A,E,I})}{dA_{\alpha}(t_{\text{кон}})} + \frac{dA_{\gamma}(t_{\text{кон}})}{dA_{\beta N}^o(t_{\text{кон}}) + g_A(K_{x=P,A,E,I})} = \left( \frac{dA_{\delta M}(t_1)}{dA_{\alpha}(t_1)} + \frac{dA_{\gamma}(t_1)}{dA_{\beta N}(t_1)} \right) \dots \left( \frac{dA_{\delta M}(t_l)}{dA_{\alpha}(t_l)} + \frac{dA_{\gamma}(t_l)}{dA_{\beta N}(t_l)} \right) \\ \frac{dE_{\delta M}^o(t_{\text{кон}}) + g_E(K_{x=P,A,E,I})}{dE_{\alpha}(t_{\text{кон}})} + \frac{dE_{\gamma}(t_{\text{кон}})}{dE_{\beta N}^o(t_{\text{кон}}) + g_E(K_{x=P,A,E,I})} = \left( \frac{dE_{\delta M}(t_1)}{dE_{\alpha}(t_1)} + \frac{dE_{\gamma}(t_1)}{dE_{\beta N}(t_1)} \right) \dots \left( \frac{dE_{\delta M}(t_l)}{dE_{\alpha}(t_l)} + \frac{dE_{\gamma}(t_l)}{dE_{\beta N}(t_l)} \right) \\ \frac{dI_{\delta M}^o(t_{\text{кон}}) + g_I(K_{x=P,A,E,I})}{dI_{\alpha}(t_{\text{кон}})} + \frac{dI_{\gamma}(t_{\text{кон}})}{dI_{\beta N}^o(t_{\text{кон}}) + g_I(K_{x=P,A,E,I})} = \left( \frac{dI_{\delta M}(t_1)}{dI_{\alpha}(t_1)} + \frac{dI_{\gamma}(t_1)}{dI_{\beta N}(t_1)} \right) \dots \left( \frac{dI_{\delta M}(t_l)}{dI_{\alpha}(t_l)} + \frac{dI_{\gamma}(t_l)}{dI_{\beta N}(t_l)} \right) \end{array} \right.$$

Таковы результаты адаптации моделей феноменологического типа применительно к описанию процессов цифровой трансформации бизнеса современных компаний в ходе вывода ими на рынок новых видов ИТ-продукции. Ранее автором в работах [14, 15] были описаны более детально методы построения данных моделей для хозяйствующих систем промышленного и финансового

секторов. Дальнейшие направления исследований будут связаны с детализацией этих методов применительно к сферам ИТ и инфокоммуникаций.

### **Заключение**

В ходе проведенного исследования были разработаны основы нового методологического подхода к выработке экстренных решений нестандартных проблем в ходе управления цифровой трансформацией бизнеса компании, выводящей на рынок новый ИТ-продукт. Этот подход далее подлежит адаптации к особенностям конкретных ситуаций, возникающих в данной сфере. Дальнейшие исследования в этой сфере связаны с разработкой программной оболочки разработанного нотационного языка моделирования экономических тетрад, в которых реализуются данные процессы.

### **Литература**

1. Кузовкова Т.А., Кухаренко Е.Г., Салютин Т.Ю. Обоснование эволюции критериев цифрового развития экономики и общества // Экономика и качество систем связи, 2019. – № 2 (12). – С. 13-20.
2. Пастух С.Ю., Володина Е.Е., Девяткин Е.Е., Девяткина М.Е., Плоский А.Ю. Рыночный потенциал интернета вещей // Электросвязь, 2016. – № 9. – С. 28-32.
3. Дементьев В.Е., Евсюков С.Г., Устюжанина Е.В. Модель ценообразования на рынке сетевых благ в условиях дуополистической конкуренции // Экономика и математические методы, 2018. – № 1. – С. 26-42.
4. Дементьев В.Е., Евсюков С.Г., Устюжанина Е.В. О важности стратегического подхода при ценообразовании на рынках сетевых благ // Журнал Новой экономической ассоциации, 2020. – № 2 (46). – С. 57-71.
5. Соловьев В.И. Экономико-математическое моделирование рынка программного обеспечения. – М.: Вега-Инфо, 2009. – 176 с.
6. Соловьев В.И. Математическое моделирование рынка программного обеспечения: Дис. докт. экон. наук: 08.00.13; [Место защиты: ЦЭМИ РАН]. – М., 2010. – 272 с.
7. Антипина О.Н. Ценообразование в информационной экономике: Дис. докт. экон. наук: 08.00.01; [Место защиты: МГУ им. М.В. Ломоносова]. – М., 2009. – 340 с.
8. Салютин Т.Ю., Гумеров М.Ф., Каберова А.Р., Платунина Г.П. Принятие решений в управлении ценовой политикой на рынке речевой аналитики // Beneficium, 2023. – № 2 (47). – С. 20-27.
9. Герасимова Е.Б. Феноменология анализа финансовой устойчивости кредитной организации: Дис. докт. экон. наук: 08.00.12; [Место защиты: Финансовый университет]. – М., 2007. – 371 с.
10. Клейнер Г.Б. Новая теория экономических систем и ее приложения // Вестник Российской академии наук, 2011. – № 9. – С. 794-811.
11. Клейнер Г.Б. Системная парадигма и системный менеджмент // Вестник Российской академии наук. Журнал менеджмента, 2008. – № 3. – С. 27-50.
12. Дрогобыцкий И.Н. Поведенческая экономика: сущность и этапы становления // Стратегические решения и риск-менеджмент, 2018. – № 1 (104). – С. 26-31.
13. Дрогобыцкий И.Н. Системная кибернетизация организационного управления. – М.: ИНФРА-М, 2016. – 333 с.
14. Гумеров М.Ф. Прикладные аспекты применения феноменологического моделирования в организационном управлении экономическими системами // Российский экономический интернет-журнал, 2017. – № 1. – С. 13.

15. Гумеров М.Ф. Феноменологическое моделирование как инструмент обоснования оперативных решений в организационном управлении // РИСК: Ресурсы, Информация, Снабжение, Конкуренция, 2017. – № 1. – С. 211-215.

## АНАЛИЗ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ БОЛЬШИХ ДАННЫХ ДЛЯ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В ПРОМЫШЛЕННОЙ СФЕРЕ

*А.А. Абрамова, Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, nastya-abramova-2017@bk.ru.*

**УДК 65.011.56:614.2:004.4**

---

**Аннотация.** В соответствии с тенденцией экономической глобализации интеллектуальное производство привлекло большое внимание со стороны науки и промышленности. Связанные с этим технологии делают обрабатывающую отрасль более прогрессивной. В статье представлена теоретическая основа анализа технологий, базирующихся на больших данных, для принятия решений в интеллектуальном производстве, которая включает проблемы и будущие исследования в данной области.

**Ключевые слова:** производство; искусственный интеллект; ИИ; большие данные; принятие решений.

## ANALYSIS OF BIG DATA USAGE FOR DECISION MAKING IN THE INDUSTRIAL SECTOR

*A.A. Abramova, Nizhny Novgorod State University N.I. Lobachevsky.*

**Annotation.** In accordance with the trend of economic globalization, intellectual production has attracted a lot of attention from science and industry. Related technologies make the manufacturing industry more progressive. This article presents a theoretical framework for analyzing big databased technologies for decision-making in intelligent manufacturing that includes problems and future research in this area.

**Keywords:** manufacturing; artificial intelligence; AI; big data; decision-making.

---

### Введение

В эпоху больших данных огромное количество генерируемой информации имеет многочисленные характеристики [1]. Использование данных огромной размерности их потенциальной ценности и разработка модели потока, подходящей для новой производственной среды, является сложной задачей [2]. В настоящее время анализ, основанный на больших данных (*Big Data, BD*), может принести много преимуществ промышленному сектору при взаимной поддержке соответствующих инновационных технологий на фоне новой промышленной революции.

Решения, построенные на базе анализа *BD* и умных вычислениях, постепенно используются для снижения сложности обработки значительных объемов информации. Компании все чаще применяют сильную стратегию, основанную на анализе данных, для повышения своей конкурентоспособности [2]. В последние годы анализ больших данных стал основной движущей силой для предприятий, делая промышленный бизнес более прогрессивным.

Анализ больших данных – это революционный скачок в традиционной обработке информации. Характеристики *BD* обобщены и представлены на рис. 1 [2-4]: объем (большой объем данных), вариативность (данные, генерируемые различными источниками, появляются в разных формах), скорость генерации (данные генерируются и обновляются с высокой скоростью), ценность (огромная потенциальная ценность, скрытая в данных) и точность. По сравнению с традиционной системой анализа, данные, управляемые платформой *BD*, поступают как от физических объектов, так и из виртуального цифрового окружения.



Рисунок 1

Интеллектуальное производство охватывает многие аспекты промышленной сферы, не только технологии, но и интеграцию, направленную на преобразование данных, полученных на протяжении всего жизненного цикла продукта, в производственную информационную базу. Анализ *BD* может предлагать решения в режиме реального времени для решения разнообразных проблем. Методы, основанные на больших данных, окажут влияние на управление качеством, а анализ, связанный с качеством продукции, сможет обеспечить поддержку принятия решений для контроля и гарантии в производственной системе. Интеллектуальное производство направлено на создание высокоинтегрированной промышленной экосистемы, которая может реагировать на динамично меняющиеся требования и условия окружающей среды во всей цепочке создания стоимости в режиме реального времени.

В сегодняшних конкурентных условиях компании заинтересованы не только в понимании технических аспектов аналитики больших данных, но и все чаще, в том, чтобы научиться использовать информацию и потенциал *BD* для генерации перспективных идей и, чтобы эффективно использовать их в своих стратегических и оперативных процессах принятия решений и инновациях.

### **Архитектура и компонентные механизмы платформы, управляемой большими данными**

На данном этапе в промышленных процессах применяются системы сбора данных через интернет вещей (*Internet of things, IoT*) и киберфизическая концепция. Как правило, большая часть данных процесса обнаруживается и собирается в среде с информационным шумом. В промышленном процессе входными данными

модели прогнозирования часто являются данные процесса, полученные путем быстрой выборки, а выходные обычно являются критическим фактором качества. Однако на самом деле только несколько наборов данных помечены, а большинство из них часто не имеют маркировки. Эти немаркированные данные могут также содержать большое количество информации о процессе, которая внесет существенный вклад в моделирование. Чтобы решить эту проблему, некоторые организации внедряют полуконтролируемые методы моделирования в анализ данных промышленных процессов, максимизируя ценность обрабатываемой информации, включая помеченные и немаркированные данные. Однако ряд методов моделирования, таких как полуконтролируемая вероятностная регрессия главных компонент, ограничены малыми наборами данных и не подходят для больших. Интеллектуальное производство – это совокупность технологий, использующая взаимосвязанные машины и инструменты для оптимизации производительности [4].

С позиции инклюзивности модель производства и потребления можно интерпретировать как перераспределение, которое показывает перестройку функциональной системы между предприятиями и заинтересованными лицами. «Перераспределение» означает, что потребители демонстрируют более активное участие в процессе проектирования и производства. В источнике [5] выдвинуты семь требований к процессу обработки больших данных в промышленной сфере:

- Предоставить расширяемый метод для распределения и настройки сенсорного оборудования на протяжении всего производственного процесса, а также для хранения данных в описательных процессах и моделях.
- Предоставить методы обнаружения и устранения сложных производственных событий в развернутом потоке данных датчика.
- Предоставить методы хранения данных в реальном времени и выполнять корреляционный анализ больших наборов и потоков данных в соответствии с конкретными параметрами.
- Предоставить методы для постоянной корректировки и адаптации к сложным моделям прогнозирования событий.
- Установить метод создания сигнала тревоги в качестве ожидаемого отклонения от запланированного производственного задания на основе расчетного анализа.
- Предоставить предложения и методы автоматического принятия решений для уменьшения производственных ошибок.
- Предоставить метод активной адаптации к производственному процессу на основе расчета и анализа.

В связи с глобализацией и растущим спросом на мелкосерийную продукцию по индивидуальному заказу производственная деятельность становится все более и более рассредоточенной. Чтобы повысить эффективность делового сотрудничества производственных компаний и сократить цикл разработки продукта, предлагается общая системная архитектура облачного технологического оборудования в рамках концепции «киберфизическое производство» и анализа *BD*. Эта архитектура соединяет оборудование с облаком для предоставления услуг по требованию, которые легко настраивают и оптимизируют производительность в соответствии с целевыми потребностями. Была разработана концептуальная основа анализа больших данных, позволяющая обрабатывать влияние их на перераспределение производства [5], извлекать более конкретную информацию и

делать стоимость анализа более инклюзивной. В эпоху *BD* принятие решений по управлению цепочками поставок все больше зависит от данных, а не от традиционного опыта. Была применена децентрализованная архитектура распределения данных [6], которая использовала парадигму туманных вычислений для улучшения потенциальной доступности информации. Сквозное проектирование всего жизненного цикла продукта относится к интеграции и оцифровке данных, что включает в себя процесс принятия решений от производства до поставки и эксплуатации.

### Источники промышленных больших данных

Промышленные *BD* делятся на системные данные (данные, генерируемые различными корпоративными информационными системами) и данные *IoT* (данные, собираемые датчиками, такими как считыватели радиочастотной идентификации и считыватели штрих-кодов). Первичные источники промышленных больших данных показаны на рис. 2. Встраивание датчиков в интеллектуальные устройства позволяет собирать большое количество информации о производственных процессах, оборудовании цеха и состоянии продукции. Обработывающая промышленность часто представляет собой производственную и операционную среду, которая непрерывно генерирует все более сложные структуры данных. Тем не менее, руководство использует только небольшую часть и не извлекает из данных максимальную выгоду. Существует множество источников *BD*, таких как приложения электронной коммерции, записи о покупках, банковские транзакции, социальные сети, сетевые устройства и т.д. Во многих передовых производственных средах проанализированные данные передаются лицам, принимающим решения, практически в режиме онлайн и предоставляют больше возможностей для более эффективного управления [6]. Источники данных в производстве обычно делятся на следующие категории:

- Данные о производственных ресурсах. Данные о производительности интеллектуальных устройств в режиме реального времени, собранные с помощью технологии промышленного интернета вещей.
- Данные производственных систем. Включают в себя проектирование продукта, конфигурацию заказа, распределение материалов, планирование, управление бизнесом и т.д.
- Интернет-данные. Открытые веб-сайты, платформы электронной коммерции и социальных сетей.



Рисунок 2



### **Сбор и передача больших данных**

С непрерывным ростом и совершенствованием современных предприятий многие данные, описывающие производственные процессы, собираются и сохраняются большим количеством датчиков. Обычно они анализируются и оцениваются с помощью передовой технологии мониторинга. Тем не менее, лучший технологический процесс отслеживания должен сортировать данные и группировать их в классы перед их анализом, но для этого требуется много ресурсов [7]. В противном случае в результате причина отслеживаемой неисправности, например, может быть неизвестна.

Для создания релевантных прогнозов функционирования производственных систем необходимы сбор информации для различных уровней детализации, контекстно-зависимый анализ и оценка на основе исторических и полученных в режиме реального времени данных [8]. Выходные данные прогноза запускают механизм самокоординации системы, чтобы выполнять функции распределения и самонастройки для снижения частоты сбоев производства. Хранение и сбор информации имеют жизненно важное значение для предприятий. Однако способы хранения данных зачастую недостаточно безопасны. На безопасность влияют многие факторы, такие как права доступа, программные и аппаратные сбои и нестабильность системы, что приводит к коллапсу и финансовым потерям. Вопросы, связанные с конфиденциальностью и безопасностью, привлекают все больше внимания со стороны соответствующего персонала. Избыточная система остаточных чисел может использоваться для разделения файлов пользовательских данных на несколько реплицируемых блоков и их параллельного распределения среди гибридных мультиоблачных поставщиков хранилищ [8]. Она гарантирует конфиденциальность данных с помощью стратегий обфускации и шифрования. В процессе прогностического моделирования датчиков из-за шумности могут возникать такие проблемы, как неполная передача данных, погрешность измерений и так далее. Метод обнаружения аномалий обычно используется для мониторинга данных, которые отклоняются от ожидаемой тенденции. Полуконтролируемый способ используется для работы с потерянными и непомяченными данными. Однако эти методы не подходят для обнаружения аномалий в режиме онлайн и не могут решить проблемы отсутствующих данных и шума в режиме реального времени. Способ, основанный на дистанционном опознавании и динамическом обучении, может реализовать поиск отклонений данных, прогнозировать значение целевых переменных и временного диапазона, а также определять положение источника информации. Умные узлы собирают *BD* и передают их в облако по беспроводной сети. Была предложена [9] структура сбора информации на основе компрессионного зондирования для снижения энергопотребления, которая могла бы свести к минимуму объем сбора при обеспечении качества собираемых данных.

### **Хранение и анализ больших данных**

Интеллектуальность производственной системы зависит от способности накапливать и анализировать большие данные. Обработка *BD* может улучшить обслуживание клиентов, повысить качество продукции и иметь большую ценность для предприятий.

Выявление реальных взаимосвязей и закономерностей, скрытых в данных, может сыграть существенную роль [9]. Инструменты интеллектуального анализа данных являются эффективным методом обработки для всех видов данных для поддержки принятия решений. Для работы с *BD* была применена модель фабрики, управляемая обобщенными данными. Эта модель охватывает процессы сбора,

передачи, интеграции, хранения и анализа. Ее основной принцип заключается в содействии обмену данными между поставщиками и пользователями путем пакетной обработки и приверженности функциональной совместимости и стандартизации. Промышленные *BD*, организованные каким-то образом с помощью аналитики, могут быть ценным ресурсом для предприятий. В среде с интенсивным использованием данных решение руководителей и внешних организаций о создании сети для совместной работы оказывает положительное влияние на корпоративную эффективность. Анализ *BD* также является нематериальным ресурсом. Таким образом, стратегическая цель эффективного использования инструментов больших данных создаст устойчивые конкурентные преимущества для компаний [10].

### **Интеллектуальный анализ и интерпретация *BD***

Одной из основных задач аналитики больших данных является корректная интерпретация результатов для поддержки принятия решений на всех уровнях обрабатывающей промышленности. Способность предприятий адаптироваться к экономическим изменениям определяет развитие рыночной экономики. Динамика и гибкость обрабатывающей промышленности повышают ее конкурентоспособность, а постоянная эволюция структуры производственной сети также является серьезной проблемой.

В настоящее время цифровое интеллектуальное оборудование и автоматизированные линии широко внедрены на предприятиях по производству сложной продукции. Из-за высокой стоимости сбора данных методы динамического накопления информации в реальном времени в некоторых изолированных промышленных средах частично ограничены технологией радиочастотной идентификации, которая не может эффективно оценивать процесс онлайн. В промышленности концепция цифрового двойника используется для того, чтобы система производственного субъекта и цифро-аналоговая концепция были соединены эквивалентно, сокращали временную задержку передачи информации, обеспечивали согласованность и единство процесса и позволяли контролировать изготовление продукции в режиме реального времени для повышения визуальной прозрачности информации для полной поддержки стратегического и операционного плана предприятия [11].

### **Проектирование и внедрение системы управления большими данными в интеллектуальном производстве**

Системы больших данных, как правило, состоят из шести необходимых подсистем: генерация, сбор, передача, обработка, хранение и методы анализа [11]. Исследован новый интеллектуальный фабричный фреймворк с функцией независимого агента и интеграцией обратной связи и координации анализа *BD* [12]. Программная платформа органично сочетает в себе промышленную сеть, облако и терминалы контроля и управления с интеллектуальными объектами цехов (машинами, конвейерами и продуктами и т.д.) и делит интеллектуальное моделирование объектов на четыре типа, процесс эффективно работает за счет автономного принятия решений и распределяет сотрудничество между агентами, определяет центрального координатора в хранилище для обратной связи, а также предлагает интеллектуальный механизм переговоров для облегчения межведомственного взаимодействия и сотрудничества.

Для более эффективной реализации умного производства базовая архитектура платформы, управляемая большими данными, показана на рис. 3, которая в целом охватывает следующие три характеристики [13]:

- Горизонтальная интеграция через сеть создания стоимости. Содействие сотрудничеству между предприятиями и формирование эффективной операционной системы посредством плавной интеграции и взаимной корреляции.
- Вертикальная интеграция и сетевые производственные системы. Это означает очень гибкое, реконфигурируемое, интеллектуальное предприятие. Динамическая конфигурация управления производством реализуется с помощью исполнительных механизмов и датчиков. Для повышения прозрачности производственного процесса собирается и обрабатывается большой объем данных.
- Сквозная цифровая интеграция всей цепочки создания стоимости. Сквозная интеграция означает участие пользователей в настройке изготавливаемой продукции.

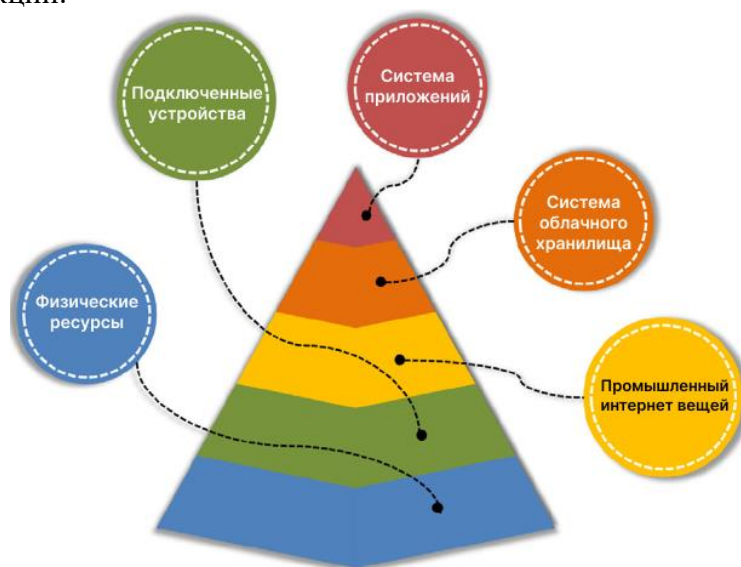


Рисунок 3

### **Проблемы промышленных больших данных в интеллектуальном производстве**

Развитие технологий, основанных на *BD*, также сталкивается со многими серьезными проблемами, обусловленными временем. Они заключаются в следующем:

1. Проблема управления качеством данных. Высококачественные *BD* играют важную роль в интеллектуальном производстве. Масштаб набора данных выходит за пределы допустимого диапазона обычных программных средств, что приводит к неудовлетворительной обработке. Большое количество полезной информации практически не используется, чтобы помочь менеджменту принимать точные решения, что приводит к пустой трате ресурсов [14].

2. Проблема безопасности данных и защиты конфиденциальности. Разработка и применение инструментов анализа *BD* требует больших инвестиций и дополнительной работы. Существующая технология управления большими данными является дорогостоящей. В настоящее время большинство технологий не могут удовлетворить текущие требования к инфраструктуре и нет стратегии обмена информацией между организациями. Различные типы данных из разных

источников могут привести к усложнению интеграции. При предоставлении пользователям достаточной информации посредством интеллектуального анализа, возникает серьезная угроза конфиденциальности и безопасности данных.

3. Проблема общности концептуальной основы в реальном производстве. Решение не может описывать практический метод представления результатов анализа и фактических условий в реальной производственной среде и не может дать полную и правильную информацию для пользователей и лиц, принимающих решения. Большинство концептуальных основ и методов анализа полезны только для определенного типа производства, но не универсальны в промышленной деятельности. Они недостаточно подробно описывают методы процесса обработки и не охватывают критические элементы, необходимые для разработки конкретных схем анализа данных [15].

4. Проблема обработки интеграции данных в промышленных производственных системах. Промышленные *BD* зашумлены и избыточны, а при потере ценных для предприятия данных, финансовые потери слишком значительны. Объем данных огромен и разнообразен, традиционный анализ с однократной обработкой не может быстро интегрироваться для получения разнородных знаний и целевой информации из-за различных характеристик, вопросов безопасности и других причин.

5. Проблема доступа к первичным производственным данным. Доступность данных всей производственной сети поддерживает массивные потоки информации для определения производительности, необходимой для принятия стратегических решений. Столкнувшись с неполными или недействительными данными, извлечь и преобразовать первичные данные непросто. Платформа анализа информации не может напрямую использовать данные в производственной системе для обработки. Ей необходимо открыть функцию доступа к информации, экспортировать образцы для хранения, а затем перейти на этап предварительной диагностики [16].

### **Заключение**

В данной статье был представлен анализ использования промышленных больших данных для интеллектуального принятия решений, а также рассмотрены проблемы в этой области. В реальной производственной деятельности утечка информации, помехи и другие факторы будут оказывать косвенное влияние на принятие решений. Эта концептуальная основа новой парадигмы вводит промышленный анализ на основе больших данных в производственную систему. Однако гипотетическая модель анализа больших данных построена в идеальной среде, надежность и практичность этой концептуальной основы нуждается в дальнейшей проверке.

### **Литература**

1. Kumar S., Mohbey K.K. A review on big data based parallel and distributed approaches of pattern mining, J. King. Saud. Univ. Comput. Inf. Sci. DOI: 10.1016/j.jksuci.2019.09.006.
2. Kuo Y.H., Kusiak A. From data to big data in production research: the past and future trends, Int. J. Prod. Res. 57, 2018. – pp. 4828-4853.
3. Tang M., Liao H. From conventional group decision making to large-scale group decision making: What are the challenges and how to meet them in big data era? A state-of-the-art survey, Omega? 2019. – P. 100.
4. Ghobakhloo M., Ching N.T. Adoption of digital technologies of smart manufacturing in smes, J. Ind. Inf. Integr, 2019. – P. 16.

5. Akerman M., Lundgren C., Barring M., Folkesson M., Berggren V., Stahre J., Engström U., Friis M. Challenges building a data value chain to enable data-driven decisions: A predictive maintenance case in 5G-enabled manufacturing, in: Proc. FAIM Conf., 2018. – pp. 411-418.
6. Manavalan E., Jayakrishna K. A review of internet of things (IOT) embedded sustainable supply chain for industry 4.0 requirements, Comput. Ind. Eng. 127, 2019. – pp. 925-953.
7. Hoffmann Souza M.L., C.A. da Costa, G. de Oliveira Ramos, R. da Rosa Righi. A survey on decision-making based on system reliability in the context of industry 4.0, J. Manuf. Syst. 56, 2020. – pp. 133-156.
8. Babiceanu R.F., Seker R. Big data and virtualization for manufacturing cyber-physical systems: A survey of the current status and future outlook, Comput. Ind. 81, 2016. – pp. 128-137.
9. Peres R.S., Rocha A.D., Leitao P., Barata J., Idarts - towards intelligent data analysis and real-time supervision for industry 4.0, Comput. Ind. 101, 2018. – pp. 138-146.
10. Kong L., Zhang D., He Z., Xiang Q., Wan J., Tao M. Embracing big data with compressive sensing: A green approach in industrial wireless networks, IEEE Commun. Mag. 54, 2016. – pp. 53-59.
11. Guerreiro G., Costa R., Figueiras P., Graca D., Jardim-Goncalves R. A self- adapted swarm architecture to handle big data for «factories of the future», in: Proc. IFAC Conf., 2019. – pp. 916-921.
12. Ghasemaghaei M., Calic G. Can big data improve firm decision quality? The role of data quality and data diagnosticity, Decis. Support. Syst. 120, 2019. – pp. 38-49.
13. Kotenko I., Saenko I., Branitskiy A. Improving the performance of manufacturing technologies for advanced material processing using a big data and machine learning framework, Mater. Today: Proc. 11, 2019. – pp. 380-385.
14. Kozjek D., Vrabic R., Rihtaršc B., Lavrac N., Butala P. Advancing manufacturing systems with big-data analytics: A conceptual framework, Int. J. Comput. Integr. Manuf. 33, 2020. – pp. 169-188.
15. Wu J.Z., Tiao P.J. A validation scheme for intelligent and effective multiple criteria decision-making, Appl. Soft. Comput. 68, 2018. – pp. 866-872.
16. Francis J., Bian L. Deep learning for distortion prediction in laser-based additive manufacturing using big data, Manuf. Lett. 20, 2019. – pp. 10-14.

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АНАЛИТИКИ БОЛЬШИХ ДАННЫХ В ЗДРАВООХРАНЕНИИ**

*А.И. Панов, Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, [aleks.npc481@gmail.com](mailto:aleks.npc481@gmail.com).*

**УДК 65.011.56:614.2:004.4**

---

**Аннотация.** Внедрение в сферу здравоохранения аналитики больших данных (*Big data analytics, BDA*) позволит использовать новые технологии как в лечении пациентов, так и в управлении самой отрасли. В данной статье предложены способы использования аналитики больших данных в медицинских учреждениях, а также отражены проблемы и преимущества, связанные с ее эксплуатацией.

**Ключевые слова:** большие данные; *BDA*; здравоохранение; аналитика; информационные технологии.

## THE USE OF BIG DATA ANALYTICS IN HEALTHCARE

*A.I. Panov, Nizhny Novgorod State University N.I. Lobachevsky.*

**Annotation.** Big Data Analytics (*BDA*) are methods and tools used to analyze and extract information from big data. Its introduction into the healthcare sector will allow the use of new technologies both in the treatment of patients and in the management of the industry itself. The article presents the means of using big data analytics, and shows the problems and advantages associated with its operation.

**Keywords:** big data; *BDA*; healthcare; analytics; information technology.

---

### Введение

Большие данные – это огромное количество наборов данных, которые невозможно сохранить, обработать или проанализировать с помощью традиционных инструментов. Из-за отсутствия четко определенной схемы работа с информацией затруднена, и, следовательно, требуется специальная технология и метод извлечения ценности из них [1]. Таким образом, раскрывается потенциал аналитики больших данных. *BDA* – это методы и инструменты, используемые для анализа и извлечения информации из больших данных. Результаты анализа больших данных могут быть использованы для прогнозирования будущего. Они также помогают в отслеживании тенденций в прошлом. Когда речь идет о здравоохранении, *BDA* позволяет анализировать большие наборы данных от тысяч пациентов, выявлять кластеры и корреляцию, а также разрабатывать прогностические модели с использованием методов интеллектуального анализа данных [2].

В данной статье в качестве объекта исследования в области аналитики больших данных рассматривается здравоохранение. Здравоохранение – это сложная система с различными заинтересованными сторонами: пациентами, врачами, больницами, фармацевтическими компаниями и лицами, принимающими решения в данной области. Этот сектор также ограничен строгими правилами и нормами. Однако во всем мире можно наблюдать отход от традиционного подхода «врач-пациент». Врач становится партнером, а пациент вовлекается в терапевтический процесс [3]. Здравоохранение больше не сосредоточено исключительно на лечении пациентов. Приоритетом для лиц, принимающих решения, должно быть содействие надлежащему отношению к здоровью и профилактика заболеваний, которых можно избежать [4]. Это стало заметным и важным, особенно во время эпидемии *Covid-19* [5]. Пандемия показала, что пациенты должны иметь доступ к информации о состоянии своего здоровья, возможность цифрового анализа этих данных и доступ к надежной медицинской поддержке в режиме онлайн. Мониторинг состояния здоровья и сотрудничество с врачами с целью профилактики заболеваний могут фактически произвести революцию в системе здравоохранения. Одним из наиболее важных аспектов изменений, необходимых в данной сфере, является постановка пациента в центр системы по учету состояния здоровья.

Технологий недостаточно для достижения этих целей. Поэтому изменения должны быть сделаны не только на технологическом уровне, но и в управлении и проектировании полных процессов здравоохранения, и, более того, они должны

повлиять на бизнес-модели поставщиков услуг. Использование *BDA* становится все более распространенным на предприятиях [4, 5]. Тем не менее, медицинские учреждения по-прежнему не могут идти в ногу с информационными потребностями пациентов, врачей, администраторов и политики разработчиков. Внедрение подхода анализа больших данных позволит реализовать персонализированную медицину, основанную на личной информации, предоставляемой в режиме реального времени и адаптированной к индивидуальным пациентам.

### **Использование аналитики больших данных в здравоохранении**

В последние годы наблюдается постоянно растущий спрос на решения, предлагающие эффективные аналитические инструменты. Эта тенденция заметна и при анализе больших объемов данных (*Big data, BD*). Организации ищут способы использовать возможности больших данных для улучшения процесса принятия решений, конкурентного преимущества или эффективности бизнеса [5]. Считается, что *BD* предлагают потенциальные решения для государственных и частных организаций [6].

Здравоохранение всегда генерировало огромные объемы данных, и в настоящее время внедрение электронных медицинских карт, а также огромное количество данных, отправляемых различными типами датчиков или генерируемых пациентами в социальных сетях, приводит к постоянному росту потоков информации. Кроме того, медицинская промышленность включает различные протоколы, медицинские изображения, геномные данные и прочее. Проблема связана не только с обработкой большого количества клинических данных, но и со сложностью их обработки.

*BD* можно рассматривать как массивные и постоянно генерируемые цифровые наборы данных, которые создаются посредством взаимодействия с онлайн-технологиями [6]. Описывая большие данные, нельзя упускать из виду, что этот термин относится скорее к явлению, чем к конкретной технологии. Все больше авторов описывают *BD*, давая им характеристики, включающие набор, связанный с их природой [5-7]:

- Объем (относится к объему данных и является одной из самых больших проблем в аналитике больших данных).
- Скорость генерации – скорость, с которой генерируются новые данные (задача состоит в том, чтобы иметь возможность эффективно управлять данными в режиме реального времени).
- Разнообразие – множество различных типов медицинских данных (задача состоит в том, чтобы получить понимание, рассматривая все доступные разнородные данные целостным образом).
- Вариативность – несогласованность данных (задача состоит в том, чтобы исправить интерпретацию данных, которая может значительно варьироваться в зависимости от контекста).
- Достоверность (насколько достоверны данные, их качество).
- Интерпретируемость (способность интерпретировать данные и результирующие идеи).
- Ценность – цель *BDA* (обнаружить скрытые знания из огромных массивов данных).

Организации должны по-другому подходить к этому типу неструктурированной информации. Прежде всего, организации должны начать

рассматривать данные как потоки, а не запасы, что влечет за собой необходимость внедрения так называемой потоковой аналитики [7]. Указанные особенности обуславливают необходимость использования новых ИТ-инструментов, позволяющих наиболее полно использовать имеющиеся массивы данных [8].

Концепция *BD* постоянно развивается, и в настоящее время она фокусируется не на огромных объемах данных, а скорее на извлечении из них ценной информации [8]. Большие данные собираются из различных источников, которые имеют разные свойства и обрабатываются разными организационными подразделениями, в результате чего создается целая цепочка таких данных [8]. В сфере здравоохранения потоки *BD* состоят из различных типов данных, а именно [8, 9]:

- Клинические данные, т.е. данные, полученные из электронных медицинских карт, больничных информационных систем, имидж-центров, лабораторий, аптек и других организаций, предоставляющих врачебные услуги, данные о состоянии здоровья, сгенерированные пациентом, заметки врача в свободном тексте, геномные данные, данные физиологического мониторинга [9].
- Биометрические данные, предоставляемые с различных типов устройств, которые контролируют вес, давление, уровень глюкозы и т.д.
- Финансовые данные, составляющие полный отчет о хозяйственных операциях, отражающий осуществляемую деятельность.
- Данные научно-исследовательской деятельности, т.е. результаты исследований, разработки медицинских изделий и новых методов лечения.
- Данные, предоставляемые пациентами, включая описание предпочтений, уровня удовлетворенности, информацию из систем самоконтроля их активности: упражнения, сон, рацион и т.д.
- Данные из социальных сетей.

Информация, которая была сгенерирована до сих пор в секторе здравоохранения, хранится как в бумажной, так и в цифровой форме. Таким образом, сущность и специфика процесса анализа больших данных означает, что организациям необходимо столкнуться с новыми технологическими и организационными вызовами [10].

Поэтому потенциал виден в анализе больших данных, особенно в аспекте повышения качества медицинской помощи, спасения жизней или снижения организационных и операционных затрат [10]. Извлечение заданных правил, моделей и тенденций позволит поставщикам медицинских услуг и другим заинтересованным сторонам в секторе здравоохранения предлагать более точные и более исчерпывающие диагнозы пациентов, персонализированное лечение, наблюдение за пациентами, профилактическую медицину, поддержку медицинских исследований и здоровья населения, а также лучшее качество медицинских услуг и ухода за пациентами при возможном снижении издержек, как показано на рис. 1.





Рисунок 1

Основная проблема, связанная с *BD*, заключается в том, как обрабатывать такой объем информации и использовать ее для принятия решений на основе данных во многих областях. Еще одна серьезная задача заключается в настройке хранения больших данных, представления результатов анализа и выводов на их основе в клинических условиях. Системы анализа данных, внедряемые в здравоохранении, предназначены для описания, интеграции и представления сложных данных соответствующим образом, чтобы повысить их интерпретируемость, как показано на рис. 2. Это повысит эффективность сбора, хранения, анализа и визуализации больших данных в сфере здравоохранения.

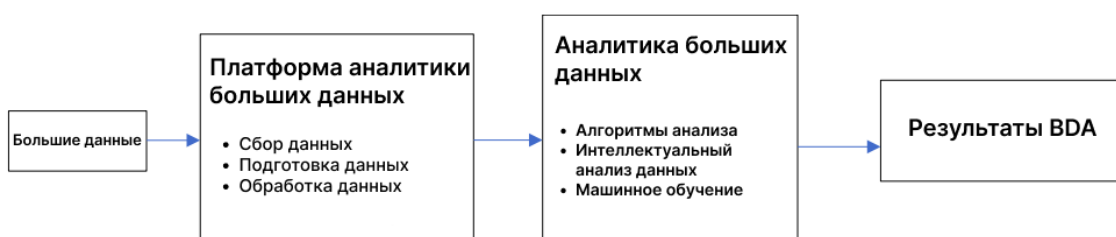


Рисунок 2

Под *BDA* в медицине и здравоохранении понимается интеграция и анализ большого количества сложных разнородных данных, таких как различные омики (геномика, эпигеномика, транскриптомика, протеомика, метаболомика, интерактомика, фармакогенетика, диасомика), биомедицинские данные, телемедицина (датчики, данные медицинского оборудования) и информация электронных медицинских карт [10]. Анализируя феномен *BD* в сфере здравоохранения, следует отметить, что его можно рассматривать с точки зрения трех направлений: эпидемиологической, клинической и деловой.

1. С клинической точки зрения анализ больших данных направлен на улучшение здоровья и состояния пациентов, позволяет делать долгосрочные прогнозы о состоянии их здоровья и проводить соответствующие терапевтические процедуры. В конечном счете, использование анализа данных в медицине заключается в том, чтобы позволить адаптировать терапию к конкретному пациенту, т.е. персонализированную медицину.
2. С эпидемиологической точки зрения желательно получить точный прогноз заболеваемости, чтобы заблаговременно реализовать профилактические программы.

3. В бизнес-контексте анализ больших данных может позволить предложить персонализированные пакеты коммерческих услуг или определить вероятность возникновения отдельных заболеваний и инфекций. Стоит отметить, что *BD* означает не только сбор и обработку информации, но, прежде всего, вывод и визуализацию данных, необходимых для получения конкретных преимуществ для бизнеса.

Для внедрения новых методов управления и новых решений с точки зрения эффективности и прозрачности возникает необходимость сделать данные более доступными, цифровыми, а также анализируемыми и визуализируемыми.

Ожидается, что в сфере здравоохранения *BDA* улучшит качество жизни и снизит операционные расходы [11]. Также она позволяет организациям улучшать и углублять понимание информации, содержащейся в данных.

Аналитику больших данных в здравоохранении можно разделить на следующие категории [11-13]:

- Описательная аналитика в здравоохранении используется для понимания прошлых и текущих решений в данной области, преобразования данных в полезную информацию для понимания и анализа, результатов и качества медицины. Ее можно использовать для создания отчетов (например, о госпитализациях пациентов, производительности врачей, управлении использованием), визуализации, настраиваемых отчетов, детализированных таблиц или выполнения запросов на основе исторических данных.
- Прогнозная аналитика работает с прошлыми показателями, чтобы предсказать будущее, изучая исторические или обобщенные данные о состоянии здоровья, обнаруживая закономерности взаимосвязей, а затем экстраполируя эти отношения для прогнозирования. Она может быть использована для исследования реакции различных групп пациентов на различные лекарства (дозировки) или воздействия (клинические испытания), прогнозирования риска и нахождения взаимосвязей данных о состоянии здоровья и выявления скрытых закономерностей. Таким образом, можно прогнозировать распространение эпидемии, предвидеть спрос на обслуживание и планировать ресурсы здравоохранения.
- Предписывающая аналитика возникает, когда проблемы со здоровьем связаны со слишком большим количеством вариантов или альтернатив. Этот вид аналитики использует здоровье и медицинские знания в дополнение к данным или информации. Предписывающая аналитика используется во многих областях здравоохранения, включая рецепты на лекарства и альтернативы лечения. Персонализированная медицина и доказательная медицина поддерживаются предписывающей аналитикой.

Успех анализа больших данных и его точность во многом зависят от инструментов и методов, используемых для анализа, способности предоставлять надежную, актуальную и ценную информацию различным заинтересованным сторонам. Считается, что внедрение *BDA* организациями здравоохранения может принести много пользы в ближайшие годы, включая снижение затрат, лучшую диагностику и предсказание заболеваний и их распространения, улучшение ухода за пациентами и разработку протоколов предотвращения повторной госпитализации, оптимизацию персонала и оборудования, прогнозирование потребности в больничных койках, операционных, лечение и совершенствование цепочки поставок лекарств [14].

## **Проблемы и потенциальные преимущества использования аналитики больших данных в здравоохранении**

Современная аналитика дает возможность не только получить представление об исторических данных, но и обрести информацию, необходимую для понимания того, что может произойти в будущем, даже когда речь идет о прогнозировании действий, основанных на фактах. Многие плательщики и поставщики проводят анализ данных для снижения риска, выявления мошенничества, повышения эффективности и спасения жизней. Таким образом, некоторые области, в которых расширенный анализ данных и аналитика могут дать наибольшие результаты, включают различные заинтересованные стороны в области здравоохранения.

Организации здравоохранения видят возможность роста за счет инвестиций в *BDA*. Стоит отметить, что в структуре сферы медицины происходит множество изменений. Цифровизация и эффективное использование больших данных в здравоохранении могут принести пользу каждой заинтересованной стороне в этом секторе. Отдельные специалисты выиграют так же, как и вся система здравоохранения. Потенциальные возможности достижения преимуществ и эффектов от *BD* в медицине можно разделить на четыре группы [15]:

### *Повышение качества медицинских услуг*

- Оценка диагнозов, поставленных врачами, и способа лечения указанных ими заболеваний на основе системы поддержки принятия решений, работающей на сборах *BD*.
- Выявление более эффективных, с медицинской точки зрения, и более экономичных способов диагностики и лечения пациентов.
- Анализ больших объемов данных для получения практической информации, полезной для выявления потребностей, внедрения новых услуг здравоохранения, предотвращения и преодоления кризисных ситуаций.
- Прогнозирование заболеваемости.
- Выявление тенденций, которые приводят к улучшению здоровья и образа жизни общества.
- Анализ генома человека для внедрения персонализированного лечения.

### *Поддержка работы медицинского персонала*

- Сравнение врачами текущих медицинских случаев со случаями из прошлого для лучшей диагностики и корректировки лечения.
- Выявление заболеваний на более ранних стадиях, когда их легче и быстрее вылечить.
- Выявление эпидемиологических рисков.
- Выявление пациентов, которые, по прогнозам, имеют наибольший риск специфических, угрожающих жизни заболеваний, путем сопоставления данных об истории наиболее распространенных заболеваний.
- Управление здоровьем каждого пациента в отдельности (персонализированная медицина) и управление здоровьем всего общества.
- Сбор и анализ больших объемов данных из больниц в режиме реального времени, устройства мониторинга жизни для безопасности и прогнозирования нежелательных явлений.

- Анализ профилей пациентов для выявления людей, для которых следует применять профилактику, изменить образ жизни или подход к профилактической помощи.
- Способность прогнозировать возникновение конкретных заболеваний или ухудшение результатов прохождения лечения пациентами.
- Прогнозирование прогрессирования заболевания, оценка риска осложнений.
- Выявление лекарственных взаимодействий и их побочных эффектов.

#### *Поддержка научно-исследовательской деятельности*

- Поддержка работы над новыми препаратами и клиническими испытаниями, благодаря возможности анализа множества потенциальных образцов вместо выбора одного исследуемого образца.
- Возможность выявлять пациентов со специфическими биологическими особенностями, которые будут принимать участие в специализированных клинических исследованиях.
- Подбор группы пациентов, для которых исследуемый препарат, скорее всего, окажет желаемый эффект и не будет иметь побочных эффектов.
- Использование моделирования и прогностического анализа для разработки более совершенных лекарств и устройств.

#### *Бизнес и менеджмент*

- Сокращение затрат и противодействие злоупотреблениям в практике консультирования.
- Более быстрое и эффективное выявление некорректных или несанкционированных финансовых операций с целью предотвращения злоупотреблений полномочиями и устранения ошибок.
- Повышение рентабельности за счет выявления пациентов, генерирующих высокие затраты, или выявления врачей, чья работа, процедуры и методы лечения стоят больше всего, и предложения им решений, которые уменьшают количество затрачиваемых средств.
- Выявление необязательных медицинских процедур, например, дубликатов анализов.

Приведенная выше спецификация не является полным перечнем потенциальных областей использования анализа больших данных в здравоохранении, поскольку возможности эксплуатации практически не ограничены. Кроме того, передовые аналитические инструменты позволяют обрабатывать данные из всех возможных источников и проводить перекрестный анализ для лучшего понимания [16].

Большие данные в свою очередь порождают множество проблем, таких как трудности в их сборе, хранении данных, анализе и визуализации [17]. Основные вызовы связаны с такими вопросами, как: структура данных (большие данные должны быть удобными для пользователя, прозрачными, но они фрагментированы, рассредоточены, редко стандартизированы и их трудно агрегировать и анализировать); безопасность – безопасность данных, конфиденциальность и конфиденциальность медицинских данных (существуют значительные опасения, связанные с конфиденциальностью); стандартизация данных (данные хранятся в форматах, совместимых не со всеми приложениями и технологиями); хранение и передача (особенно затраты, связанные с защитой, хранением и передачей

неструктурированных данных); управленческие навыки, такие как управление данными, отсутствие соответствующих аналитических навыков и проблемы с аналитикой в реальном времени (здравоохранение должно иметь возможность использовать большие данные в режиме реального времени) [6-8].

### **Заключение**

Таким образом, можно сказать, что большие данные и аналитика больших данных представляют собой мощный инструмент для преобразования здравоохранения, повышения эффективности и улучшения результатов лечения. Использование этих технологий может привести к более точным диагнозам, персонализированному подходу и более эффективному использованию медицинских ресурсов, что способствует улучшению здоровья и благополучия пациентов. Но необходимо учитывать, что существует множество подводных камней, связанных с использованием больших данных и их аналитикой, поэтому необходимо рационально подходить к интеграции *BDA* в здравоохранении.

### **Литература**

1. Bainbridge M. Big data challenges for clinical and precision medicine. In: Househ M., Kushniruk A., Borycki E., editors. Big data, big challenges: a healthcare perspective: background, issues, solutions and research directions. Cham: Springer, 2019. – p. 17-31.
2. Bartuś K., Batko K., Lorek P. Business intelligence systems: barriers during implementation. In: Jabłoński M., editor. Strategic performance management new concept and contemporary trends. New York: Nova Science Publishers, 2017. – p. 299-327. ISBN: 978-1-53612-681-5.
3. Williams N., Ferdinand N.P., Croft R. Project management maturity in the age of big data. *Int J Manag Proj Bus*, 2014. – № 7 (2). – P. 311-317.
4. Wang Y., Kung L., Wang W., Yu C., Cegielski C.G. An integrated big data analytics-enabled transformation model: application to healthcare. *Inf Manag*, 2018. – № 55 (1). – P. 64-79.
5. Schmarzo B. Big data: understanding how data powers big business. Indianapolis: Wiley, 2013.
6. Provost F., Fawcett T. Data science and its relationship to big data and data-driven decisionmaking. *Big Data*, 2013. – № 1 (1). – P. 51-59.
7. Olszak C.M. Toward better understanding and use of business intelligence in organizations. *Inf Syst Manag*, 2016. – № 33 (2). – P. 105-123.
8. Ohlhorst F. Big data analytics: turning big data into big money, vol. 65. Hoboken: Wiley, 2012.
9. Mohammadi M., Al-Fuqaha A., Sorour S., Guizani M. Deep learning for IoT big data and streaming analytics: a survey. *IEEE Commun Surv Tutor*, 2018. – № 20 (4). – P. 2923-2960.
10. Mikalef P., Krogstie J. Big data analytics as an enabler of process innovation capabilities: a configurational approach. In: International conference on business process management. Cham: Springer, 2018. – P. 426-441.
11. Marconi K., Dobra M., Thompson C. The use of big data in healthcare. In: Liebowitz J., editor. Big data and business analytics. Boca Raton: CRC Press, 2012. – P. 229-48.
12. Madsen L.B. Data-driven healthcare: how analytics and BI are transforming the industry. Hoboken: Wiley, 2014.
13. Lytras M.D., Papadopoulou P. Applying big data analytics in bioinformatics and medicine. IGI Global: Hershey, 2017.

14. Kruse C.S., Goswamy R., Raval Y.J., Marawi S. Challenges and opportunities of big data in healthcare: a systematic review. JMIR Med Inform, 2016. – № 4 (4). – P. 38.
15. Knapp M.M. Big data. J Electron Resourc Med Libr, 2013. – № 10 (4). – P. 215-222.
16. Janssen M., van der Voort H., Wahyudi A. Factors influencing big data decision-making quality. J Bus Res, 2017. – № 70. – P. 338-345.
17. Gupta V., Singh V.K., Ghose U., Mukhija P. A quantitative and text-based characterization of big data research. J Intell Fuzzy Syst, 2019. – № 36. – P. 4659-4675.

## **ИССЛЕДОВАНИЕ РЕШЕНИЙ НА БАЗЕ ОБЛАЧНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ДИСТАНЦИОННЫХ ФОРМАТОВ ОБУЧЕНИЯ В СРЕДНЕМ ПРОФЕССИОНАЛЬНОМ ОБРАЗОВАНИИ И СЕТЕВОМ АДМИНИСТРИРОВАНИИ**

*Д.Б. Горошков, Московский технический университет связи и информатики,  
zet.6@yandex.ru.*

**УДК 004:34.018.432**

---

**Аннотация.** Статья посвящена исследованию и анализу возможностей облачных технологий в сфере дистанционного образования с акцентом на среднее профессиональное образование (СПО) и область сетевого администрирования. Проведено сравнение существующих решений и предложены методы интеграции облачных сервисов для улучшения качества обучения.

**Ключевые слова:** СПО; облачные технологии; сетевое администрирование; виртуальные лаборатории; коллаборативное обучение; адаптивное обучение; безопасность данных.

## **RESEARCH OF SOLUTIONS BASED ON CLOUD TECHNOLOGIES TO IMPROVE DISTANCE LEARNING FORMATS IN SECONDARY VOCATIONAL EDUCATION AND NETWORK ADMINISTRATION**

*Denis Goroshkov, Moscow Technical University of Communications and Informatics.*

**Annotation.** The article is devoted to the research and analysis of the possibilities of cloud technologies in the field of distance education with an emphasis on Secondary Vocational Education (SVE) and the field of network administration. The comparison of existing solutions is carried out and methods of integration of cloud services improving the quality of training are proposed.

**Keywords:** SVE; cloud technologies; network administration; virtual laboratories; collaborative learning; adaptive learning; data security.

---

### **Введение**

Облачные технологии стали ключевым фактором в трансформации дистанционного образования, предоставляя гибкие и масштабируемые решения, которые могут адаптироваться к различным образовательным потребностям. Они позволяют интегрировать новые образовательные методики, такие как гибридное и смешанное обучение, и поддерживать активное взаимодействие между

студентами и преподавателями независимо от их географического расположения<sup>1</sup> [1-3].

В контексте среднего профессионального образования (СПО) и сетевого администрирования специфика материала и необходимость практического опыта делают важным выбор подходящих технологических решений. Облачные технологии могут предоставить виртуальные лаборатории, облегчить доступ к специализированным ресурсам и поддерживать сотрудничество студентов через виртуальные классы и форумы.

Кроме того, учитывая многообразие социальных и экономических условий, в которых обучаются студенты, важно, чтобы решения на базе облачных технологий были доступны и инклюзивны. Это включает в себя обеспечение доступа к ресурсам для студентов с ограниченными возможностями, а также для тех, кто находится в регионах с ограниченным доступом к высокоскоростному интернету [4].

### **Облачные технологии в СПО**

#### *Характеристики и возможности*

Облачные технологии представляют собой эффективный способ улучшения качества и доступности образования в СПО. Они обеспечивают ряд характеристик, которые способствуют эффективной организации образовательного процесса [5, 6]:

- **Масштабируемость.** Облачные решения могут легко масштабироваться в соответствии с потребностями учебного заведения. Это позволяет учителям и студентам получать доступ к необходимым ресурсам, независимо от количества пользователей.
- **Доступность.** Студенты и преподаватели могут получить доступ к учебным материалам и ресурсам из любой точки мира, где есть интернет.
- **Сотрудничество.** Облачные технологии упрощают совместную работу, позволяя студентам и преподавателям обмениваться материалами, работать над проектами и общаться в реальном времени.
- **Экономия ресурсов.** Использование облачных решений снижает необходимость в закупке дорогостоящего оборудования и программного обеспечения (ПО), а также сокращает расходы на их обслуживание.
- **Безопасность данных.** Облачные провайдеры обычно предоставляют решения для безопасного хранения и резервного копирования данных.

#### *Примеры решений:*

1. *Google Classroom.* Это популярное облачное решение предоставляет учителям инструменты для создания, распределения и оценки заданий в бесшовной и интегрированной среде. Студенты могут легко сдавать задания, участвовать в дискуссиях и получать обратную связь от преподавателей. *Google Classroom* также интегрирован с другими сервисами *Google*, такими как *Google Drive*, что облегчает хранение и доступ к учебным материалам.
2. *Microsoft 365 Education.* Этот набор облачных инструментов от *Microsoft* включает в себя не только традиционные офисные приложения, такие как *Word* и *Excel*, но и мощные средства совместной работы, такие как *Microsoft*

---

<sup>1</sup> ГОСТ Р 56846-2015 «Дистанционное образование. Термины и определения».

*Teams*. *Microsoft Teams* позволяет организовывать виртуальные классы, проводить онлайн-семинары и обеспечивать совместную работу над документами в реальном времени. В *Microsoft 365 Education* также имеется интеграция с *OneDrive*, что обеспечивает облегченное хранение и обмен файлами.

3. *Canvas*. Это облачная система управления обучением, предназначенная для создания онлайн-курсов и управления ими. *Canvas* предлагает функциональность для размещения мультимедийных материалов, создания тестов, обсуждений и организации совместной работы.
4. *Amazon Web Services for Education*. *AWS* предоставляет облачные решения, специально адаптированные для образовательных учреждений. Это включает в себя виртуальные машины, хранилище данных и возможность создания виртуальных лабораторий для практических занятий, что может быть особенно полезно для СПО, где технические и практические навыки играют ключевую роль.
5. *Moodle*. Это одна из самых популярных систем управления обучением, которая предоставляет облачные решения для образовательных учреждений. *Moodle* предлагает гибкие инструменты для создания курсов, тестов, управления учащимися и поддерживает совместную работу.

### **Потенциальные применения в СПО**

В рамках СПО облачные технологии могут быть применены для<sup>2,3</sup>:

1. Виртуальных лабораторий. Создание виртуальных лабораторий для практических занятий, особенно в технических дисциплинах. Студенты могут проводить эксперименты и работать над проектами в симулированной среде.
2. Совместной работы. Облачные технологии позволяют студентам и преподавателям эффективно сотрудничать над проектами, делаясь файлами и работая над документами в реальном времени.
3. Дистанционного доступа к материалам. Обеспечивает студентам доступ к учебным материалам, лекциям и тестам, независимо от их местоположения.
4. Персонализации обучения. Анализ данных студентов для создания персонализированных учебных планов и материалов, которые соответствуют индивидуальным потребностям и темпу обучения каждого студента.
5. Проведения онлайн-семинаров и вебинаров. Использование облачных решений для организации и проведения онлайн-лекций, семинаров и вебинаров, что способствует взаимодействию между студентами и преподавателями.
6. Управление курсами и оценками. Системы управления обучением (*LMS*) на базе облачных технологий позволяют учителям эффективно управлять курсами, заданиями, оценками и обратной связью.

Облачные технологии представляют собой мощный инструмент для совершенствования дистанционного формата обучения в СПО. Они предлагают гибкость, масштабируемость и широкий спектр возможностей для совместной работы, доступа к материалам и практического обучения. С использованием

---

<sup>2</sup> ГОСТ Р 56846-2015/ ISO/TS 16058:2004. Дата обращения 17.03.2023 docs.cntd.ru/document/1200134318.

<sup>3</sup> ГОСТ Р 56846-2015 Информатизация здоровья. Взаимодействие систем дистанционного обучения. Дата обращения 17.03.2023 allgosts.ru/35/240/gost\_r\_56846-2015.



облачных технологий учебные заведения могут создавать более инклюзивное и персонализированное образовательное пространство, которое отвечает современным требованиям и потребностям студентов.

Тем не менее, важно тщательно рассматривать вопросы безопасности и конфиденциальности, связанные с использованием облачных сервисов, а также обеспечивать подготовку преподавательского состава и студентов для эффективного использования этих технологий<sup>4</sup>.

С учетом быстрого темпа технологического развития, облачные технологии, вероятно, продолжат играть важную роль в развитии образовательного сектора, и их потенциал для совершенствования процессов обучения и сотрудничества в СПО будет расти.

## **Облачные технологии в сетевом администрировании**

### *Характеристики и возможности*

В дополнение к упомянутым возможностям облачные технологии предоставляют несколько дополнительных характеристик, которые могут быть полезными в сетевом администрировании<sup>5,6</sup>:

1. Быстрые деплоймент и масштабируемость. Облачные решения позволяют быстро развертывать сетевую инфраструктуру и масштабировать ее в соответствии с потребностями. Это полезно для поддержания высокой производительности и удовлетворения изменяющихся требований сети.
2. Уменьшение затрат на оборудование и поддержку. Так как облачные сервисы работают на удаленных серверах, предприятиям не требуется инвестировать в дорогостоящее оборудование и затраты на его обслуживание.
3. Резервное копирование и восстановление данных. Облачные решения часто включают сервисы резервного копирования и восстановления данных, что крайне важно для обеспечения непрерывности бизнес-процессов и защиты от потери данных.
4. Глобальное присутствие. Облачные провайдеры имеют центры обработки данных по всему миру, что обеспечивает глобальное присутствие и позволяет сетевым администраторам легко управлять ресурсами независимо от географического положения.

### *Примеры решений*

1. *Azure Networking Services: Microsoft Azure* предлагает широкий набор сетевых сервисов, включая виртуальные сети, балансировщики нагрузки и *CDN* (сети доставки контента). Эти инструменты могут помочь в управлении сложными сетевыми архитектурами и оптимизации производительности.
2. *VMware NSX*. Это решение фокусируется на сетевой виртуализации, позволяя создавать, управлять и оптимизировать виртуальные сети и безопасность.

---

<sup>4</sup> ГОСТ Р 56846-2015. Дата обращения 17.03.2023 [nd.gostinfo.ru/document/6138397.aspx](http://nd.gostinfo.ru/document/6138397.aspx).

<sup>5</sup> ГОСТ Р 56846-2015. Дата обращения 17.03.2023 [protect.gost.ru/document1.aspx?control=31&baseC=6&page=6&month=11&year=-1&search=&id=203272](http://protect.gost.ru/document1.aspx?control=31&baseC=6&page=6&month=11&year=-1&search=&id=203272).

<sup>6</sup> ГОСТ Р 56846-2015. Дата обращения 17.03.2023 [proinfosoft.ru/news/2016/avgust/gost-r-56846-2015](http://proinfosoft.ru/news/2016/avgust/gost-r-56846-2015).

### *Интеграция облачных решений для совершенствования обучения*

1. Обучение через симуляцию. Облачные платформы, такие как *GNS3* или *Cisco Packet Tracer*, позволяют студентам создавать сложные сетевые симуляции, что является неоценимым ресурсом для практического изучения принципов сетевого администрирования.
2. Облачные среды разработки. Облачные среды разработки, такие как *AWS Cloud9* или *Microsoft Azure Cloud Shell*, предоставляют студентам инструменты для практики сценариев сетевого администрирования в реальном времени без необходимости устанавливать сложное локальное ПО.
3. Сертификации и обучающие материалы. Облачные провайдеры, такие как *AWS*, *Azure*, и *Google Cloud*, предлагают сертификационные программы и обучающие материалы по сетевому администрированию, что может быть полезным для студентов, желающих углубить свои знания.

Облачные технологии в сетевом администрировании предоставляют гибкость, масштабируемость и мощные инструменты для управления сетевой инфраструктурой. В контексте образования это предоставляет студентам возможности практического обучения, симуляции реальных сетевых сценариев и доступа к ресурсам для профессионального развития [7].

Как области СПО, так и сетевого администрирования необходимо принимать во внимание растущую значимость облачных технологий и интегрировать их в образовательные программы. Это поможет подготовить кадры, способные эффективно работать с современными сетевыми технологиями и способствовать их инновационному развитию.

### **Вопросы безопасности и доступности**

1. Обеспечение кибербезопасности. С учетом возросших киберугроз, необходимо интегрировать механизмы защиты данных, такие как шифрование, двухфакторная аутентификация и регулярное резервное копирование. Также следует рассмотреть возможность внедрения системы управления инцидентами безопасности и реагирования на них.
2. Создание доступных образовательных материалов. Для обеспечения доступности ресурсов следует рассмотреть создание адаптивных образовательных материалов, которые могут быть оптимизированы для различных типов устройств и качества интернет-соединения. Также возможно использование технологий, таких как кеширование и сжатие данных для уменьшения объема трафика.
3. Сотрудничество с провайдерами облачных решений. Учебные заведения могут взаимодействовать с провайдерами облачных решений для разработки специализированных решений, которые удовлетворяют потребности образовательного процесса. Это может включать в себя соглашения о уровне обслуживания (*SLA*), которые гарантируют определенный уровень доступности и безопасности.
4. Вовлечение студентов в процесс принятия решений. Для того, чтобы обеспечить максимальную эффективность и доступность облачных решений, полезно привлекать студентов к процессу принятия решений. Это может включать в себя опросы, фокус-группы и другие формы сбора обратной связи от студентов.

5. Обучение студентов основам кибербезопасности. Поскольку студенты являются активными пользователями облачных ресурсов, важно обеспечить их осведомленность о принципах кибербезопасности. Это может включать в себя обучение по основам защиты аккаунтов, безопасного обмена данными и принципов этичного поведения в сети.
6. Развитие экосистемы партнеров. Сотрудничество с другими образовательными учреждениями, организациями и стейкхолдерами для создания совместных проектов и обмена лучшими практиками в использовании облачных технологий в образовании.

### **Заключение**

Облачные технологии представляют собой мощный инструмент для совершенствования дистанционного образования, особенно в сферах СПО и сетевого администрирования. Использование облачных решений позволяет усилить коллаборативное обучение, оптимизировать доступ к ресурсам и создавать адаптивные системы обучения [8].

Однако с увеличением зависимости от облачных решений, вопросы безопасности и доступности становятся все более актуальными. Учебные заведения должны принимать меры для обеспечения защиты данных и гарантировать, что образовательные ресурсы доступны всем студентам [9].

В рамках дальнейшего развития рекомендуется акцентировать внимание на оценке потребностей, подготовке персонала, мониторинге и оценке результатов, а также на сотрудничестве с провайдерами облачных решений и активном вовлечении студентов в процесс принятия решений [10].

Будущее дистанционного образования тесно связано с развитием технологий, и облачные решения играют в этом ключевую роль. Для обеспечения устойчивого и эффективного обучения необходимо системное и ответственное применение этих технологий с учетом потребностей и благосостояния студентов и преподавательского состава.

### **Литература**

1. Розенберг Д.М., Михайлова Л.В., Федотова О.В. Эффективность дистанционного обучения в высшей школе // Наука, техника и образование, 2020. – № 10 (4). – С. 43-49.
2. Рожкова Н.Ю., Дедова Е.Н. Оценка качества дистанционного образования на основе опроса студентов в условиях COVID-19 // Образование и наука в современном мире, 2021. – № 3. – С. 48-56.
3. Жукова Т.А. Опыт использования цифровых технологий в учебном процессе на практических занятиях // Современные технологии в науке и образовании, 2021. – № 2. – С. 13-16.
4. Пышкина О.И. Интерактивные технологии в обучении и оценке знаний студентов на дистанционном обучении // Известия Волгоградского государственного педагогического университета, 2020. – № 5. – С. 35-40.
5. Лернер И.Я. Дидактические основы методов обучения – М.: Педагогика, 1981. – 186 с.
6. Молчанова А.А. Дистанционное обучение как средство обеспечения качества образования в условиях пандемии COVID-19 // Информационные технологии в образовании и науке, 2020. – № 2. – С. 56-61.

7. Дистанционные образовательные технологии // spravochnick.ru URL: [https://spravochnick.ru/pedagogika/obrazovatelnye\\_tehnologii/distancionnye\\_obrazovatelnye\\_tehnologii/](https://spravochnick.ru/pedagogika/obrazovatelnye_tehnologii/distancionnye_obrazovatelnye_tehnologii/) (дата обращения: 17.03.2023).
8. Виды обучения: дистанционное, электронное, онлайн – суть и технологии // profguide.io URL: <https://www.profguide.io/article/chem-otlichaetsya-distancionnoe-obuchenie-ot-ehlektronnogo-i-onlajn.html> (дата обращения: 17.03.2023).
9. Дистанционные образовательные технологии // nsportal.ru URL: <https://nsportal.ru/shkola/raznoe/library/2021/03/14/distantsionnye-obrazovatelnye-tehnologii> (дата обращения: 17.03.2023).
10. Дистанционное обучение – Википедия // ru.wikipedia.org URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Дистанционное\\_обучение](https://ru.wikipedia.org/wiki/Дистанционное_обучение) (дата обращения: 17.03.2023).

# **СИСТЕМЫ, СЕТИ И УСТРОЙСТВА СВЯЗИ. РАДИОТЕХНИКА. АНТЕННЫ. ЭЛЕКТРОННАЯ КОМПОНЕНТНАЯ БАЗА. ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ. МЕТРОЛОГИЯ**

## **СРАВНЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ МОДУЛЯЦИИ С РАСШИРЕНИЕМ СПЕКТРА СЕТИ LORA И ТРАДИЦИОННОЙ ТЕХНИКИ ДИСКРЕТНОЙ ФАЗОВОЙ МОДУЛЯЦИИ. ЧАСТЬ 1.**

*О.А. Шорин, д.т.н., профессор, Московский технический университет связи и информатики, oshorin@nxtt.org;*

*Г.О. Бокк, д.т.н., директор по науке ООО «НИРИТ-СИНВЭЙ Телеком Технолоджи», bgo@nxtt.org;*

*С.Г. Щепнов, Главный эксперт, ФГУП «Космическая связь», sschepnov@rscs.ru.*

### **УДК 621.39**

**Аннотация.** Предложена методика сопоставления энергетической эффективности радиолиний стандарта *LoRaWAN* и радиолиний с традиционными схемами квадратурной модуляции, учитывающая перезапросы испорченных кадров *ARQ*. Показано, что в случаях, допускающих когерентную обработку, энергетическая эффективность радиолиний *LoRa* может быть повышена на 0,5-0,6 дБ. Предложена усовершенствованная обработка сигналов *LoRa* с помощью дополнительной коррекции ошибок в испорченных блоках *FEC*. Показано, что такое усовершенствование увеличивает энергетическую эффективность на 1,0-1,5 дБ. С помощью предложенной методики установлено, что радиолинии со схемами квадратурной модуляции обладают более высокой энергетической эффективностью. В случаях без применения усовершенствования потери радиоканала *LoRaWAN* для малых показателей расширения спектра *SF* могут достигать 4 дБ. На примере сервисной спутниковой геостационарной линии сети интернета вещей показано, что сигналы *Single Tone 3,75* стандарта *NB-IoT* обладают преимуществом более 1,8 дБ над наилучшим вариантом сигнала *LoRaWAN*. Установлено, что только режим *SF9* при *FEC 4/7* делает возможным прием сигнала *LoRaWAN* (с информационной скоростью не хуже 1200 бит/с) на геостационарном спутнике сети интернета вещей.

**Ключевые слова:** *LoRaWAN*; *NB-IoT*; режим перезапросов *ARQ*; *FEC* коды; *BER*; энергия сигнала; спутниковая сеть интернета вещей; кодек Витерби.

## **COMPARISON OF THE MODULATION EFFICIENCY WITH THE EXPANSION OF THE LORA NETWORK SPECTRUM AND THE TRADITIONAL TECHNIQUE OF DISCRETE PHASE MODULATION**

*Oleg Shorin, Doctor of Technical Sciences, Professor, Moscow technical university of communications and informatics;*

*German Bokk, Doctor of Technical Sciences, LLC «NIRIT – XINWEY Telecom technologies»;*

*S.G. Shchepnov, Chief expert, FSUE «Space Communications».*

**Annotation.** The article introduced a method for comparing the energy efficiency of *LoRaWAN* standard radio lines and radio lines with traditional quadrature modulation schemes, taking into account the re-requests of corrupted *ARQ* frames. In cases allowing

coherent processing, the energy efficiency of *LoRa* radio lines can be increased by 0,5-0,6 dB. An improved processing of *LoRa* signals with the help of additional error correction in corrupted FEC blocks is proposed. This improvement increases the energy efficiency by 1,0-1,5 dB. The application of the given methodology shows that radio lines with quadrature modulation schemes have higher energy efficiency. In cases without the use of the improvement, the loss of the *LoRaWAN* radio channel for small *SF* spectrum expansion indicators can reach 4 dB. Using the example of a service satellite geostationary line of the Internet of Things network shows that Single Tone 3,75 signals of the *NB-IoT* standard have an advantage of more than 1,8 dB over the best variant of the *LoRaWAN* signal. We can observe that only the *SF9* mode at *FEC* 4/7 makes it possible to receive the *LoRaWAN* signal (with an information speed of at least 1200 bits/s) on a geostationary satellite of the Internet of Things network.

**Keywords:** *LoRaWAN*, *NB-IoT*, *ARQ* re-request mode, *FEC* codes, *BER*, signal energy, Internet of Things satellite network, Viterbi codec.

---

## Введение

Эффективность сигналов информационного обмена по каналам связи занимает ключевое место в вопросах разработки и эксплуатации современных и перспективных систем связи. Глобальные проекты интернета вещей (*IoT*) открыли собой новый кластер условий работы в радиоканале для систем информационного обмена. Он отличается требованиями дешевизны терминалов, низких энергетических затрат, малыми объемами информации посылок, спонтанно возникающих на терминалах, малыми допустимыми задержками доставки и возможности обмена на больших расстояниях.

Как развитие традиционного подхода к организации связи по радиоканалу, в серии стандартов *3GPP* для сетей *4G/5G* возникли проект и технология *NB-IoT*, ориентированные на реализацию интернета вещей. В них устанавливается использование сигналов с традиционными видами дискретной фазовой и квадратурной модуляции. Как альтернатива подходу *3GPP* возник проект и серия стандартов *LoRa*, продвигаемых в мире *LoRa* Альянсом, устанавливающие использование радиосигналов с *Chirp Spread Spectrum (CSS)* модуляцией (посылки в виде ЛЧМ импульсов с информационным параметром в виде циклического сдвига по задержке), которые достаточно хорошо проявили себя в условиях больших потерь на трассах. В результате появился ряд научно-популярных работ, утверждающих, что *CSS*-модуляция заметно превосходит по показателю чувствительности традиционные варианты сигналов с фазовой (*DBPSK*, *BPSK*, *DQPSK*, *QPSK*) и квадратурной (*QAMn*) модуляциями. Такие выводы без указания условий сопоставления вызывают сомнения.

Сравнение традиционных схем модуляции, применяемых в каналах без расширения спектра, с *CSS*-модуляцией нельзя сделать непосредственно. Не существует понятного общепринятого варианта масштабируемой проекции энергетических ресурсов, требуемых для режима без расширения спектра, на энергетические ресурсы, требуемые для работы в режиме расширения спектра. Применяемые коды *FEC* для коррекции ошибок в *LoRa* не предполагают мягких решений, широко используемых в современных высокоэффективных вариантах коррекции (например, *LDPC*, *TPC*-кодах). Остается неясным, насколько режим перезапросов испорченных кадров (*ARQ*) способен повысить эффективность надежной передачи информации в системе *LoRa*. Поэтому сопоставление сигнальных конструкций *LoRa* с системами, использующими традиционные схемы модуляции и кодов исправления ошибок, не может рассматриваться в рамках только

указанных схем обработки. Требуется анализ с охватом режима *ARQ*, который может оказать существенное влияние на результаты. А для такого комплексного анализа нужна специальная обоснованная методика.

### Методика сравнения квадратурной модуляции с модуляцией *CSS* сети *LoRa*

В качестве основы методики сравнения предлагается использовать показатель минимума энергии сигнала, затрачиваемой на бит передачи информации с учетом режима *ARQ*, для ряда широко известных современных схем модуляции/кодирования и соответствующих схем *LoRa*. При этом использовать возможности гибкой настройки полосы радиоканала для традиционных схем модуляции так, чтобы обеспечивалось условие равенства скорости информационного потока с системой *LoRa*.

В качестве дополнительного условия принять размер фрейма данных в кадрах физического уровня равным максимальному значению (табл. 1), предписываемому для параметра *SF* (расширения спектра) в схемах модуляции *LoRa* [1, 2]. Это обеспечит однотипность условий работы в режимах перезапросов *ARQ*.

Таблица 1.

Скорость передачи	<i>M</i> , октет (максимальный размер)
0 ( <i>SF</i> =12, 125 кГц)	59
1 ( <i>SF</i> =11, 125 кГц)	59
2 ( <i>SF</i> =10, 125 кГц)	59
3 ( <i>SF</i> =9, 125 кГц)	123
4 ( <i>SF</i> =8, 125 кГц)	230
5 ( <i>SF</i> =7, 125 кГц)	230
6 ( <i>SF</i> =7, 250 кГц)	230
7 <i>FSK</i> 50 кбит/с	230

К сожалению, четких полных рекомендаций по установке технических параметров системы *LoRa* в технических спецификациях не приводится. Одни из них остаются даже без упоминания, а другие оставлены на усмотрение операторов. В указанный перечень попадает ряд показателей, конкретная установка которых прямо влияет на производительность работы в канале связи. К ним относятся:

- 1) установка режима когерентной/некогерентной обработки для демодулятора *LoRa*;
- 2) выбор информационной скорости кодека *FEC*, исправляющего ошибки;
- 3) использование/не использование дополнительного алгоритма исправления ошибок в испорченных фрагментах, обнаруженных при декодировании *FEC*;
- 4) использование/не использование процедуры перемежения между операциями *FEC* кодирования и *Chirp*-модуляции для распределения группирующихся ошибок в случаях искажения символов;
- 5) выбор порога для максимального числа попыток перезапросов коррекции искаженных кадров в режиме *ARQ*.

Кроме того появились:

- модернизированная версия *LoRa* с названием *LR-FHSS*, использующая вместо *Chirp*-модуляции прыжки по частоте с модуляциями *GMSK* ( $FT=0,3; 0,5; 0,7$  и  $1,0$ ) или *QPSK* [2];
- перспективное усовершенствование с использованием *Chirp*-импульсов как с положительными, так и с отрицательными наклонами зависимостей мгновенной частоты от времени [3].

Для версии *LR-FHSS* снова остался неопределенным ряд параметров. Среди них значимыми для оценки работы радиоканала являются: неопределенная длина сдвиговых регистров кодеров Витерби (с  $R=1/3, 2/3$ ), правило выбора  $FT$  ( $0,3; 0,5; 0,7$  или  $1,0$ ) для *GMSK*-модуляции, вопрос применения/неприменения стандартной каскадной конструкции с подключением кодера *RS*, а также максимальное число перезапросов *ARQ* процедуры.

Все это делает невозможным проведение однозначного сопоставления системы *LoRa* и ее модификаций с традиционными системами, использующими сигналы с фазовой и/или квадратурной модуляциями. Вопрос выливается в комплексное исследование.

Предложенная выше методика позволяет найти приемлемые решения в сложившихся условиях путем выделения для системы *LoRa* наиболее эффективных режимов работы, исходя из принципа наименьшей затрачиваемой энергии на передачу бита. Поэтому в процессе анализа пришлось дополнительно решать и задачу параметрической оптимизации системы *LoRa*. Это в итоге позволило получить однозначные результаты, привязанные к конкретным возможным техническим ограничениям, связанным с аппаратной реализацией. Кроме того, удалось выявить самые критичные параметры системы *LoRa*, которые необходимо дорабатывать для достижения потенциальных показателей работы, сопоставимых с показателями, демонстрируемыми традиционными схемами квадратурной модуляции в сочетании с известными кодерами исправления ошибок.

### Параметры радиоканала сети *LoRa*

В сети *LoRa* для передачи данных по каналу связи используются сигнальные импульсы с модуляцией ЛЧМ, за которыми в мировой литературе утвердилось название *Chirp*-импульсов. Информационным параметром *Chirp*-импульса в сети *LoRa* является значение циклического сдвига частотно-временной формы импульсов, как показано на рис. 1. Фактически изменение циклического сдвига на физическом уровне эквивалентно изменению параметра задержки или смещению начальной частоты ЛЧМ сигнала. При этом перескок частоты с верхней границы диапазона на нижнюю можно не принимать во внимание, так как применяемые в режиме обработки алгоритмы дискретного преобразования Фурье настраиваются точно на рабочий диапазон. Поэтому спектральные характеристики сигнала, сдвинутые на частоту, кратную ширине рабочего диапазона, в этих алгоритмах неразличимы. В правой части рис. 1 показано как изменяется такт и частотно-временная структура *Chirp*-импульса *LoRa* при уменьшении на единицу параметра расширения спектра  $SF$ .

Сдвиг частоты  $cs$  на каждом интервале символа кодирует данные согласно формуле:

$$cs_k = d_k \frac{BW}{2^{SF}}, \quad (1)$$



где:  $K$  – номер символьного интервала,  $d_K$  – одно из целочисленных значений диапазона  $[0; 2^{SF}-1]$ , кодирующее информацию.

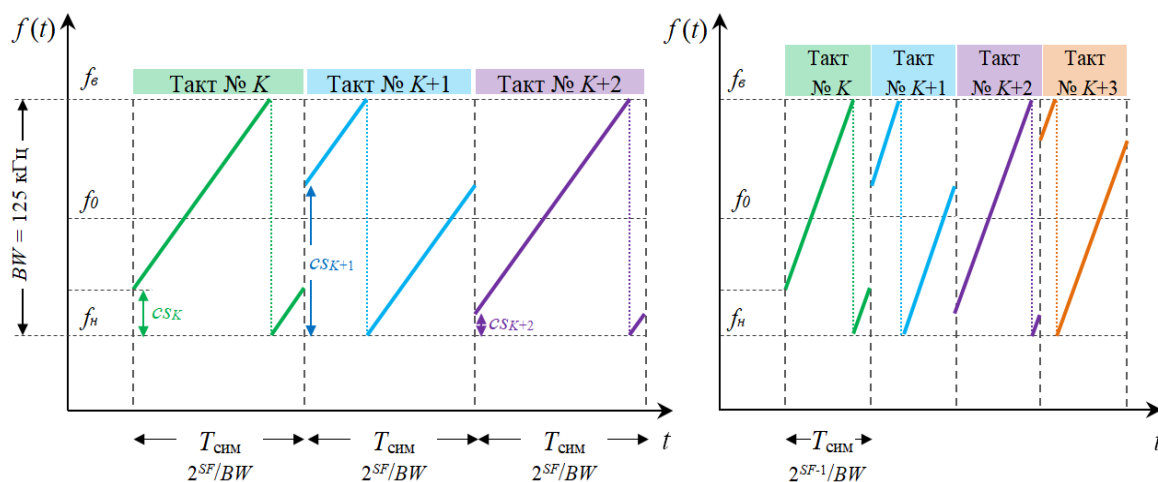


Рисунок 1

Сам сигнал импульса, с точностью до перескока частоты, не имеющего, как отмечалось выше, принципиального значения, будет иметь вид:

$$S(t) = A \cos \left( 2\pi \left( f_n + cs_K + \frac{BW^2}{2^{SF+1}} (t - t_K) \right) (t - t_K) + \pi \frac{d_K^2}{2^{SF}} + \varphi_{0K} \right), \quad (2)$$

где:  $A$  – постоянная амплитуда *Chirp* импульса (символа);  $t_K$  – начальный момент  $K$ -го символа;  $\varphi_{0K}$  – случайная составляющая начальной фазы *Chirp*-импульса, возникающая при распространении и прохождении сигнала через передающий и приемный тракт. Если стабильность генераторов частоты в системе высокая и скорости перемещения абонентов умеренные, то случайные составляющие  $\varphi_{0K}$  остаются примерно одинаковыми от символа к символу во всем кадре. Если же стабильность генераторов не высокая, то  $\varphi_{0K}$  может сильно изменяться от момента начала кадра физического уровня до момента его окончания.

На рис. 2а,б для примера показаны спектры (синим – действительная компонента, красным – мнимая) *Chirp*-импульсов (2) для случая с  $SF=7$  и  $d_K=2$ ,  $d_K=10$ , соответственно. Начальная фаза фиксирована  $\varphi_{0K} = \pi/4$ . На рис. 2в показан спектр опорного импульса с  $SF=7$ ,  $d_0 = 0$  и  $\varphi_0 = 0$ . Штриховые синие зависимости на рис. 2 показывают амплитуды спектров. На рис. 3а,б показаны результаты преобразования спектров *Chirp*-импульсов с рис. 2а,б после умножения на сопряженный спектр опорного импульса.

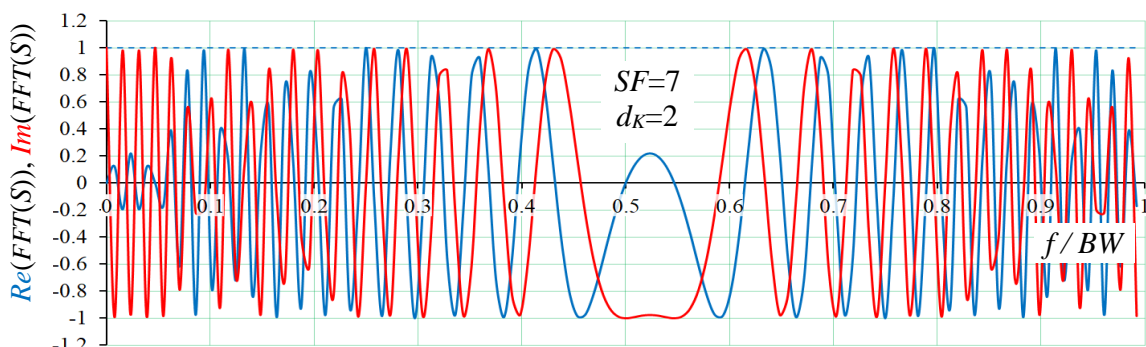


Рисунок 2а)

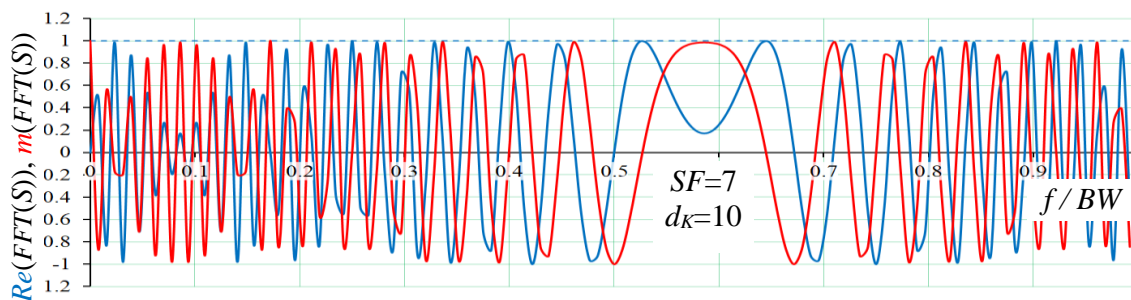


Рисунок 2б)

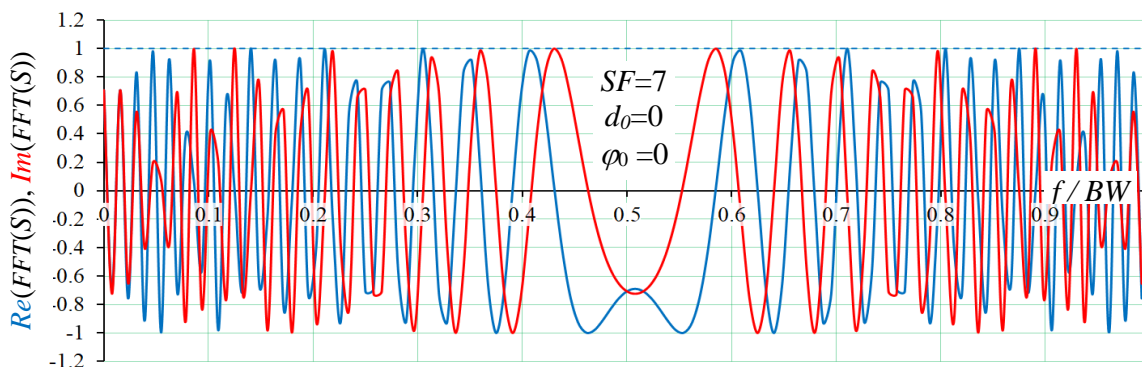


Рисунок 2в)

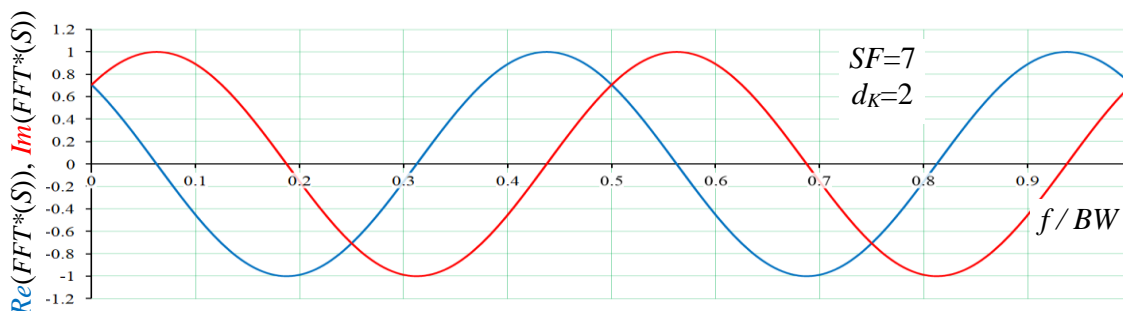


Рисунок 3а)

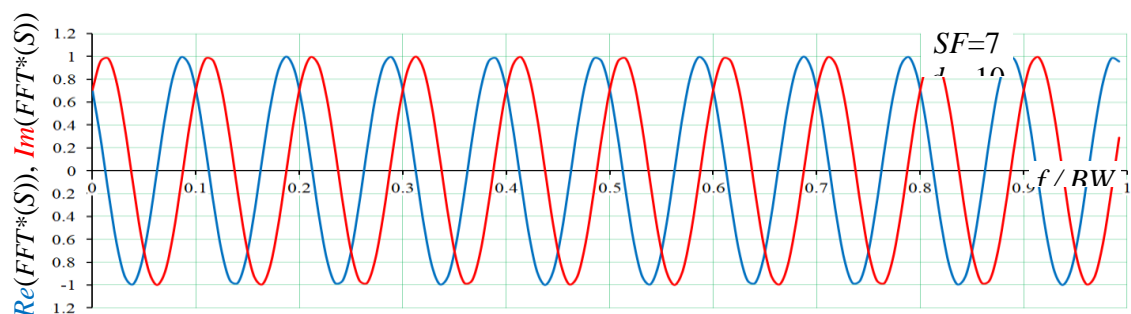


Рисунок 3б)

При этом случайная начальная фаза  $\varphi_{0k}$  (в примере рис. 2  $\varphi_{0k} = \pi/4$ ) из сигнальной конструкции импульса во времени переходит в параметр начальной фазы закона, описывающего изменение компонент комплексного преобразованного спектра. Операция обратного дискретного (быстрого) преобразования Фурье (ОДПФ) естественным образом, как следует из результатов рис. 3, покажет сигнальный выброс в позиции задержки, соответствующей переданному символу  $d_k$ . В других дискретных позициях задержек ОДПФ будут только шумовые составляющие. При этом, если аппаратура использует генераторы частоты высокой стабильности, случайная начальная фаза  $\varphi_{0k}$  остается

практически неизменной и ее в сети *LoRa* можно с высокой точностью оценивать по преамбулам кадров физического уровня. В таких условиях демодуляция *Chirp*-импульсов может выполняться в когерентном режиме, как указано в [4], согласно правилу:

$$\hat{d}_K = \arg \left( \max_{i \in (0, 1, \dots, 2^{SF} - 1)} (R_K(i) \cos(\hat{\varphi}_0) + I_K(i) \sin(\hat{\varphi}_0)) \right), \quad (3)$$

где:  $R_K(i), I_K(i), i \in (0, 1, \dots, 2^{SF} - 1)$  – действительная и мнимая компоненты  $i$ -го дискретного отсчета, сформированного на приеме путем последовательного применения к принятому *Chirp*-импульсу  $K$ -го символьного интервала операций: ДПФ( $2^{SF}$ ); умножения на сопряженный спектр опорного импульса; ОДПФ( $2^{SF}$ ).

Из-за нестабильности генератора  $\delta = \Delta f / f_0$  (здесь  $\Delta f$  – отклонение частоты,  $f_0$  – рабочая частота генератора) за время передачи кадра физического уровня  $T_F$  произойдет случайный набег фазы  $\Delta\varphi = \delta 2\pi f_n T_F$ . Поэтому при использовании алгоритма (3) возникнут эффективные энергетические потери, составляющие:

$$\varepsilon = 10 \lg(\cos^2(\Delta\varphi)) \text{ дБ}. \quad (4)$$

Оценку показателя кратковременной нестабильности частоты  $\delta$  для современных кварцевых генераторов можно найти в технической документации [5]. Она для работы внутри помещения генераторов с термокомпенсацией (*ТСХО*) при замерах за 1 секунду составляет  $1ppb = 10^{-9}$ . Более высокие показатели с  $\delta \sim 0,01 ppb$  имеют термостатированные кварцевые генераторы (*ОСХО*), но они недоступны для типовых абонентских устройств *LoRa* из-за высокого энергопотребления (более 50 мВт, согласно [6, 7]), которое приводит к необходимости подзарядки абонентских терминалов через каждые несколько дней. Используя размер кадра физического уровня из табл. 1 для самого медленного режима передачи данных с  $SF=12$  получаем длительность:

$$T_F = 8[\text{бит/байт}] * 59[\text{байт}] / (125 \text{ кГц} * (2^{-12} [\text{символ}] * 12[\text{бит/символ}])) = 1288,875 \text{ мс} = 1,28875 \text{ с}.$$

При работе на несущих частотах  $f_n$  диапазонов 800-1000 МГц, широко используемых сетями *LoRa*, случайный набег фазы к концу кадра может достигать значений:

$$\Delta\varphi = \pm \delta 2\pi f_n T_F = \pm 2\pi 10^{-9} 1000 \text{ МГц} 1,28875 \text{ с} = \pm 2\pi 1,28875$$

Т.е. мы получили результат, говорящий о том, что случайный набег фазы реально будет равномерно распределен на интервале всех допустимых значений  $[0; 2\pi]$ . Поэтому потери (4) для когерентного режима могут быть бесконечными. В связи с этим в сетях *LoRa* демодуляцию проводят в режиме некогерентной обработки, которая согласно [4] при равновероятном распределении данных в потоке должна выполняться по оптимальному правилу:

$$\hat{d}_K = \arg \left( \max_{i \in (0, 1, \dots, 2^{SF} - 1)} (R_K^2(i) + I_K^2(i)) \right). \quad (5)$$

В соответствии с вышеизложенным демодуляция символов *LoRa* принципиально может выполняться в двух режимах:

- 1) когерентном (когда наблюдается высокая стабильность частоты на длительности кадра физического уровня);
- 2) некогерентном (когда стабильности частоты на длительности кадра

физического уровня недостаточно для сохранения начальных фаз в пределах малых границ отклонений).

Поскольку неверная демодуляция символа в сети *LoRa* связана с аномальной ошибкой оценки позиции сдвига частоты (или задержки), то в среднем половина бит из переносимых символом в таких ситуациях будет искажена. В результате вероятность ошибки на бит (*BER*) на выходе схемы демодуляции будет равна:

$$BER = P_b = \frac{1}{2} P_{Err\_Sim}, \quad (6)$$

где:  $P_{Err\_Sim}$  – вероятность ошибки демодуляции символа.

Зависимости вероятности ошибки демодуляции символа  $P_{Err\_Sim}$  от уровня сигнал/шум хорошо изучены в связи с технологией многочастотной модуляции (*N-FSK*). Для канала с аддитивным белым гауссовским шумом (АБГШ) известны точные аналитические соотношения указанных зависимостей как для когерентного (см. например, [4, 8]), так и некогерентного (см. например, [4]) режимов.

$$P_{Err\_Sim} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} \left(1 - (1 - Q(y))^{2^{SF}-1}\right) \exp\left(-\frac{1}{2}\left(y - \sqrt{\frac{2SF E_b}{N_0}}\right)^2\right) dy =$$

$$= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} \left(1 - (1 - Q(y))^{2^{SF}-1}\right) \exp\left(-\frac{1}{2}\left(y - \sqrt{\frac{2E_s}{N_0}}\right)^2\right) dy, \quad \text{для когерентного режима,} \quad (7)$$

и

$$P_{Err\_Sim} = \int_0^{+\infty} \left(1 - \left(1 - \exp\left(-\frac{1}{2}y^2\right)\right)^{2^{SF}-1}\right) y \exp\left(-\frac{y^2}{2} - \frac{SF E_b}{N_0}\right) I_0\left(y \sqrt{\frac{2SF E_b}{N_0}}\right) dy =$$

$$= \int_0^{+\infty} \left(1 - \left(1 - \exp\left(-\frac{1}{2}y^2\right)\right)^{2^{SF}-1}\right) y \exp\left(-\frac{y^2}{2} - \frac{E_s}{N_0}\right) I_0\left(y \sqrt{\frac{2E_s}{N_0}}\right) dy, \quad \text{для некогерентного режима,} \quad (8)$$

где:  $E_b$  – энергия, приходящаяся на бит модуляции;  $E_s = SF \cdot E_b$  – энергия, приходящаяся на символ модуляции *LoRa*;  $N_0$  – односторонняя спектральная плотность мощности АБГШ в канале;  $Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) du$  – дополнительная

интегральная функция нормального распределения;  $I_0(\bullet)$  – модифицированная функция Бесселя 0-го порядка.

Контроль возникающих ошибок *LoRa* выполняет с использованием *FEC* кодов [2, 9]. Для этого поток данных сначала подвергается операции перемежения [10, 11], потом разбивается на фрагменты из 4 бит, каждый из которых дополняется проверочными битами числом от 1 до 4, генерируемыми кодом Хэмминга, как показано на рис. 4. В результате информационная скорость *FEC* кода в зависимости от условий может устанавливаться равной  $R=4/5$ ,  $4/6$ ,  $4/7$  или  $4/8$ . Также согласно, например [1], опционально допускается режим *LoRa* без *FEC* кодирования, с  $R=1$ .

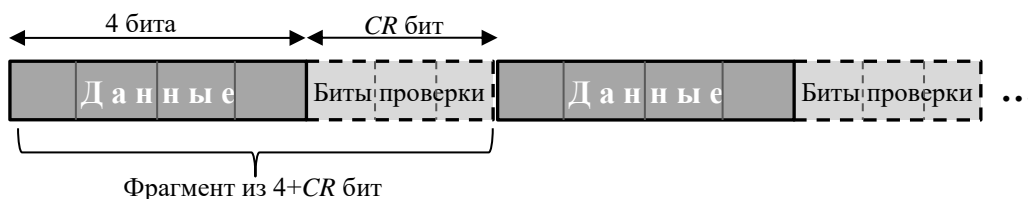


Рисунок 4

Согласно [11, 12] *FEC* кодирование со скоростями  $R=4/5$ ,  $4/6$  обеспечивает обнаружение одной ошибки во фрагменте; со скоростью  $R=4/7$  обеспечивает исправление одной ошибки или обнаружение двух ошибок во фрагменте; со скоростью  $R=4/8$  исправление одной ошибки или обнаружение до трех ошибок во фрагменте.

При этом нужно отметить совершенно очевидный факт, состоящий в том, что *FEC* кодирование в сочетании с алгоритмом перемежения открывает возможность использовать блоки с обнаруженными ошибками как вспомогательную функцию локатора ошибок внутреннего кода. Так путем сокращенного перебора возможных позиций ошибок в испорченных блоках, обнаруженных *FEC*, и последующим контролем результата по *CRC* коду, закрывающему данные (*PHYPayload*) кадра физического уровня *LoRa*, можно перейти от обнаружения ошибок к их исправлению. Это существенно сократит число обращений к процедуре перезапросов *ARQ*.

Такая комбинированная работа *FEC* кодов с процедурами перемежения (*interleaving*) [13] и с дополнительными кодами (например, *LDPC* [14]) не является новой. Поэтому при анализе работы радиоканала *LoRa* пришлось учитывать и такой недокументированный вариант (см. п.3 перечня в предыдущем разделе). С учетом вышеизложенного вероятность потери кадра физического уровня можно записать так:

$$P_{PER} = 1 - (P_{FEC})^K, \quad (9)$$

где:  $K = \left\lfloor \frac{8M}{4/R} \right\rfloor = \lfloor 2MR \rfloor$  – число *FEC* блоков в кадре физического уровня размером

$M$  байт;  $M$  – максимальный размер кадра физического уровня в октетах (табл. 1);  $R$  – информационная скорость *FEC* кода,

$$P_{FEC} = \sum_{k=0}^n C_{4/R}^k (1 - P_b)^{\frac{4}{R} - k} (P_b)^k - \quad (10)$$

вероятность ситуации, позволяющей исправить ошибки в *FEC*-блоке;  $C_N^k = N! / (N - k)! k!$  – биномиальные коэффициенты;  $n$  – число ошибок, которое можно исправить;  $P_b$  – вероятность ошибки на бит модуляции, задаваемая (6) (с учетом (7) или (8)).

Вероятность (9) будет ниже использоваться для расчета вероятности перехода к перезапросам *ARQ* и, как следствие, к расчету увеличения энергетических затрат. Параметр  $n$  зависит от числа проверочных бит  $CR$  в блоке *FEC*. Если дополнительные алгоритмы исправления ошибок, обнаруженных *FEC* не используются, то  $n$  будет иметь значения, показанные в табл. 2.

В табл. 3 приведены значения  $n$  для случая применения дополнительных процедур коррекции на испорченных блоках, обнаруженных *FEC* кодом.

Таблица 2.

<i>FEC</i>	$n$
4/4 (Без <i>FEC</i> )	0
4/5	0
4/6	0
4/7	1
4/8	1

Таблица 3.

<i>FEC</i>	<i>n</i>
4/4 (Без <i>FEC</i> )	0
4/5	1
4/6	1
4/7	2
4/8	3

### Результаты анализа радиоканала сети *LoRa*

Используя градиентный метод [15] были найдены оптимальные значения  $E_b/N_0$ , при которых достигается минимум показателя отношения средней энергии  $E_b^* = E_b \langle N_{ARQ} \rangle$ , затрачиваемой на передачу бита информации с учетом перезапросов *ARQ*. Здесь  $\langle N_{ARQ} \rangle$  – среднее значение числа попыток *ARQ*, затрачиваемое для достижения безошибочной передачи кадра физического уровня. Полученные значения минимальных  $E_b^*/N_0$  и среднего числа попыток  $\langle N_{ARQ} \rangle$  для режима некогерентной обработки без дополнительной процедуры коррекции ошибок приведены в табл. 4 и 5.

Таблица 4.

<i>FEC</i>	<i>SF</i>							
	6	7	8	9	10	11	12	FSK
без <i>FEC</i>	7,063	6,594	6,203	5,743	5,297	5,052	4,834	13,403
4/5	8,032	7,564	7,173	6,713	6,267	6,021	5,804	14,373
4/6	8,824	8,356	7,965	7,504	7,06	6,814	6,597	15,165
4/7	7,524	7,134	6,811	6,411	6,069	5,87	5,695	12,996
4/8	8,144	7,752	7,428	7,027	6,684	6,484	6,308	13,638

Таблица 5.

<i>FEC</i>	<i>SF</i>							
	6	7	8	9	10	11	12	FSK
без <i>FEC</i>	1,085	1,085	1,082	1,073	1,073	1,071	1,069	1,112
4/5	1,085	1,085	1,082	1,073	1,073	1,071	1,069	1,112
4/6	1,085	1,085	1,082	1,072	1,073	1,071	1,069	1,112
4/7	1,071	1,067	1,064	1,064	1,058	1,056	1,054	1,095
4/8	1,07	1,066	1,063	1,063	1,058	1,056	1,054	1,105

В табл. 6 и 7 приведены соответствующие результаты, полученные для режима некогерентной обработки при применении дополнительной процедуры коррекции ошибок. В табл. 6 – минимальное  $E_b^*/N_0$  (дБ) с учетом процедуры *ARQ* при некогерентной обработке сигнала *LoRa* с применением дополнительной процедуры коррекции ошибок. В табл. 7 – среднее число попыток  $\langle N_{ARQ} \rangle$  процедуры *ARQ* при некогерентной обработке сигнала *LoRa* с применением дополнительной процедуры коррекции ошибок.

Таблица 6.

<i>FEC</i>	<i>SF</i>							
	6	7	8	9	10	11	12	<i>FSK</i>
без <i>FEC</i>	7,063	6,594	6,203	5,743	5,297	5,052	4,834	13,403
4/5	5,954	5,57	5,251	4,875	4,508	4,313	4,141	11,359
4/6	6,806	6,419	6,098	5,697	5,356	5,159	4,985	12,248
4/7	6,375	6,039	5,761	5,41	5,096	4,928	4,781	11,136
4/8	6,191	5,894	5,649	5,332	5,047	4,902	4,774	10,37

Таблица 7.

<i>FEC</i>	<i>SF</i>							
	6	7	8	9	10	11	12	<i>FSK</i>
без <i>FEC</i>	1,085	1,085	1,082	1,073	1,073	1,071	1,069	1,112
4/5	1,074	1,07	1,066	1,072	1,061	1,058	1,055	1,113
4/6	1,073	1,068	1,065	1,065	1,057	1,055	1,055	1,109
4/7	1,066	1,062	1,058	1,058	1,051	1,051	1,051	1,112
4/8	1,063	1,058	1,055	1,055	1,051	1,051	1,05	1,118

В табл. 8 и 9 приведены соответствующие результаты, полученные для режима когерентной обработки без применения дополнительной процедуры коррекции ошибок. В табл. 8 – минимальное  $E_b/N_0$  (дБ) с учетом процедуры *ARQ* при когерентной обработке сигнала *LoRa*. В табл. 9 – среднее число попыток  $\langle N_{ARQ} \rangle$  процедуры *ARQ* при когерентной обработке сигнала *LoRa*.

Таблица 8.

<i>FEC</i>	<i>SF</i>							
	6	7	8	9	10	11	12	<i>FSK</i>
без <i>FEC</i>	6,494	6,05	5,643	5,197	4,76	4,535	4,336	12,587
4/5	7,463	6,98	6,612	6,167	5,73	5,505	5,306	13,557
4/6	8,255	7,812	7,404	6,958	6,523	6,298	6,099	14,349
4/7	6,717	6,376	6,096	5,721	5,404	5,237	5,09	11,666
4/8	7,343	6,999	6,716	6,341	6,023	5,854	5,706	12,326

Таблица 9.

<i>FEC</i>	<i>SF</i>							
	6	7	8	9	10	11	12	<i>FSK</i>
без <i>FEC</i>	1,095	1,095	1,085	1,078	1,079	1,076	1,074	1,133
4/5	1,095	1,085	1,085	1,077	1,079	1,076	1,074	1,133
4/6	1,095	1,095	1,085	1,078	1,079	1,076	1,074	1,133
4/7	1,083	1,077	1,072	1,066	1,064	1,062	1,059	1,139
4/8	1,081	1,076	1,071	1,066	1,063	1,061	1,059	1,136

В табл. 10 и 11 приведены результаты, полученные для режима когерентной обработки с дополнительной процедурой коррекции ошибок. В табл. 10 – минимальное  $E_b/N_0$  (дБ) с учетом процедуры ARQ при когерентной обработке сигнала LoRa с применением дополнительной процедуры коррекции ошибок. В табл. 11 – среднее число попыток  $\langle N_{ARQ} \rangle$  процедуры ARQ при когерентной обработке сигнала LoRa с применением дополнительной процедуры коррекции ошибок.

Таблица 10.

FEC	SF							
	6	7	8	9	10	11	12	FSK
без FEC	6,494	6,05	5,643	5,197	4,76	4,535	4,336	12,587
4/5	5,133	4,8	4,525	4,176	3,834	3,672	3,528	9,987
4/6	5,993	5,656	5,378	5,003	4,687	4,522	4,376	10,901
4/7	5,432	5,163	4,942	4,627	4,361	4,233	4,105	9,323
4/8	5,151	4,934	4,756	4,484	4,254	4,138	4,049	8,11

Таблица 11.

FEC	SF							
	6	7	8	9	10	11	12	FSK
без FEC	1,095	1,095	1,085	1,078	1,079	1,076	1,074	1,133
4/5	1,085	1,08	1,075	1,072	1,067	1,064	1,061	1,147
4/6	1,084	1,078	1,073	1,066	1,065	1,063	1,06	1,143
4/7	1,077	1,071	1,066	1,066	1,059	1,057	1,051	1,157
4/8	1,074	1,068	1,063	1,062	1,056	1,051	1,051	1,179

На рис. 5а) - 5г) показаны зависимости минимально необходимых  $E_b^*/N_0$  от показателя расширения спектра SF.

Характеристики CSS сигналов LoRa для разных случаев FEC кодирования показаны зависимостями с маркерами в целочисленных позициях показателя SF. Как можно видеть, самые хорошие показатели по энергетике в традиционном варианте работы (некогерентная обработка и без дополнительной процедуры коррекции ошибок) имеет опциональный вариант сигнала CSS без применения FEC. Это указывает на то, что код FEC мало эффективен. Лучше осуществлять больший вклад в энергетический бит путем увеличения показателя расширения спектра SF, чем тратить энергию на увеличение числа проверок FEC. Но ситуация изменяется, если провести доработку алгоритма приема и ввести дополнительную процедуру локализации и коррекции ошибок в испорченных FEC-блоках. Это демонстрируют результаты рис. 5б) и 5г), на которых лучшие энергетические показатели демонстрирует FEC-код со скоростью  $R = 4/7$ , способный корректно обнаруживать испорченные блоки, содержащие не более двух ошибок. Причем его показатели для значений  $SF > 8$ , уступают только режиму BPSK с каскадным кодом Витерби 1/3 + Рид-Соломон (RS).

Для сравнения CSS (LoRa) с общеизвестными сигнальными структурами, применяемыми в системах связи, на рисунках 5а)-5г) приведены результаты, полученные с помощью предложенной методики для случаев модуляции BPSK и кодов исправления ошибок Витерби с различными информационными скоростями (1/3, 1/2, 2/3), работающих монополюсно и в сочетании с кодом RS (219, 201).



Указанные комбинации кодов были выбраны потому, что они не требуют большого буфера хранения данных и поэтому более всего подходят для обмена короткими сообщениями.

Техника расчета показателей для сигналов с рядом традиционных видов модуляций и кодов исправления ошибок будет подробно изложена во второй части данной статьи. Также во второй части будет рассмотрен модифицированный вариант сигналов *LR-FHSS*.

Сопоставление результатов показывает, что известные схемы (конкретно, Витерби 1/3 + *RS*) при квазикогерентном приеме (с 4 обучающими *Pilot*-символами) могут в режиме скоростей, соответствующих  $SF < 9$ , обеспечить выигрыш над наилучшим вариантом сигнала *LoRa*, выражающийся в эффективном увеличении уровня сигнала более 3 дБ. Эти результаты находятся в согласии и подтверждают выводы работы [16].

Также результаты на рис. 5б) и 5г) показывают, что переход на когерентную обработку позволяет добиться эффективного энергетического выигрыша для сигналов *LoRa* порядка 0,5 дБ. А усовершенствование путем введения дополнительной процедуры коррекции ошибок приводит к выигрышам от 1,0 до 1,5 дБ.

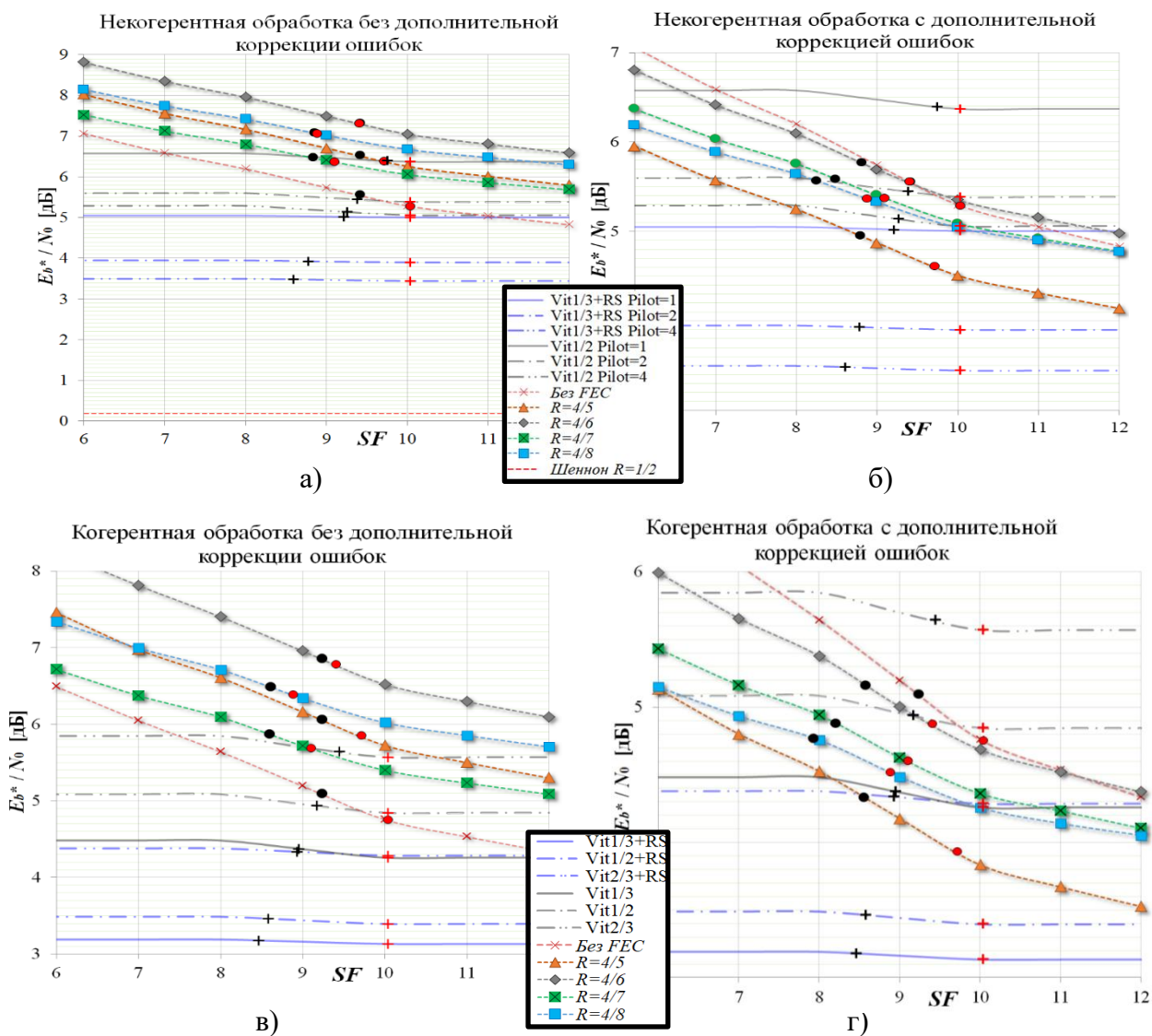


Рисунок 5

На рис. 5 показаны минимально достижимые показатели средней энергии, затрачиваемой на передачу бита от показателя расширения спектра  $SF$  сигналов *LoRa*.

- а) случай обычной некогерентной обработки;
- б) случай некогерентной обработки с усовершенствованием в виде дополнительной процедуры коррекции ошибок;
- в) случай обычной когерентной обработки;
- г) случай когерентной обработки с усовершенствованием в виде дополнительной процедуры коррекции ошибок.

### ***LoRa* для геостационарного спутникового канала сети спутникового интернета вещей**

В качестве практического применения выполненного исследования был рассмотрен вопрос возможности применения *LoRa* для организации сервисного канала связи «вверх»: от абонентских устройств до геостационарного спутника класса «Экспресс» в сети спутникового интернета вещей. Сервисный канал связи «вверх» является самым критичным по энергетике в силу жестких ограничений, накладываемых на уровень излучения и геометрические размеры антенн абонентских устройств. В табл. 12 приведены данные бюджета такой сервисной радиолинии и ряд ее технических параметров. На основе данных табл. 12 для каждой рабочей характеристики *LoRa* (а также сигналов *BPSK* с модуляцией Витерби) был проведен расчет двух позиций:

- 1) точки ограничения роста параметра  $SF$ , за которой в зоне справа нарушается требование минимальной скорости информационного обмена 1200 бит/с;
- 2) точки, блокирующей уменьшение параметра  $SF$ , слева от которой нельзя достигнуть уровня  $E_b^*/N_0$ , задаваемого рассматриваемой рабочей характеристикой.

Таблица 12.

<b>Параметры сервисной линии «вверх» (АС → Спутник)</b>	
Диапазон частот, МГц	5 800
Высота орбиты спутника, км	35 786
Наклонная дальность максимальная, км	41 000
<b>Минимальные требования (<i>Nb-IoT Cat NB1</i>)</b>	
Требуемая информационная скорость передачи C-3/3-C, бит/с	1 200
Излучаемая мощность с передатчика (устройство) на канал, Вт	0,2
К-т усиления передающей антенны конечного устройства, $G_{tx}$ , дБi	14,2
Линейные размеры рупорной антенны, м	0,12
Ширина ДН расчетная по -3 дБ, град	30,2
Потери в свободном пространстве, дБ	200,0
Дополнительные суммарные потери, дБ	1,0
Потери за счет неточности наведения, дБ	0,5
Уровень сигнала на входе антенны спутника, дБВт	-194,2
К-т усиления приемной антенны спутника, $G_{pr}$ (1), дБi	29,0
Диаметр антенны спутника, м	0,624
Ширина ДН спутника расчетная по -3 дБ, град	7,1
Шумовая температура антенны спутника, $T_a$ , К	180,0
Шумовая температура приемного тракта спутника, $T_c$ , К	38,0
Расчетное $E_b/N_0$ на входе демодулятора спутника, дБ	6,80

На рабочих характеристиках сигналов *LoRa* на рис. 5 точки п. 1 показаны в виде красных кружков с черной границей. Точки п. 2 показаны как кружки черного цвета. На рабочих характеристиках сигналов с *BPSK* модуляцией точки п. 1 показаны крестиками красного цвета, а точки п. 2 – черными крестиками.

На рис. 5а можно видеть, что в случае стандартной организации работы *LoRa* (с некогерентной обработкой без дополнительной процедуры коррекции ошибок) интервал между точками п. 1 и п. 2 достаточно мал. В результате почти во всех случаях такие интервалы не содержат точек с целыми значениями аргумента *SF*. Поэтому дефицит мощности в сочетании с дискретным принципом настройки сигнальных параметров *LoRa* не позволяют согласовать характеристики канала с требованиями по скорости обмена сервисной радиолинии. Исключением является единственный штатный случай с *FEC R=4/7* и *SF = 9*. Подходит также режим без *FEC* и *SF=10*, но он является опциональным, что не позволяет говорить о его применимости во всех случаях. В перспективе просматривается режим с адаптивным управлением лучами антенны абонентского устройства [17, 18], который позволит снизить дефицит мощности спутниковой линии, но такие устройства пока только проектируются.

Доработка стандарта *LoRa* путем введения процедуры дополнительной коррекции ошибок в обнаруженных испорченных блоках *FEC* повышает энергетический запас. При этом, как видно из рис. 5б, интервалы между ограничивающими точками на характеристиках увеличиваются и для всех скоростей *FEC* (кроме *R=4/8*) появляются допустимые решения. А при переходе на когерентную обработку (см. рис. 5г) появляется допустимый вариант работы с *SF=8* для *FEC* кода с *R=4/8*, что дает информационную скорость в линии 1953бит/с. С традиционными сигналами, использующими модуляцию *BPSK*, ситуация проще. Для них нет требования привязки к целочисленным значениям задающего полосу параметра *SF*. Также обеспечивается энергетический выигрыш над сигналами *LoRa*, который приводит к заметному увеличению интервалов между ограничивающими позициями, указанных выше в п. 1 и п. 2. Поэтому даже в самых низкоэффективных режимах с дифференциальной фазовой модуляцией, показанной на рис. 5а, 5б характеристиками с *Pilot=1*, есть рабочая зона, удовлетворяющая требованиям сервисной линии с геостационарным спутником.

Особого внимания заслуживают зависимости «*Vit1/3*» и «*Vit2/3*» на рис. 5в, 5г. Они в окрестности значений точек, помеченных красным крестиком, соответствуют показателям для радиоканала линии «вверх» стандарта *NB-IoT* (режим *Single Tone 3,75* с кодеком *Turbo 1/3* (см. 3GPP.TS.36.201.V17.0.0 (2022))) и радиоканала стандарта *LR-FHSS* (режим с кодеком *Viterbi 2/3* и *BF=0,5; 0,7; 1,0*), соответственно. Как можно видеть, в ситуации рассматриваемой спутниковой линии сигнал *NB-IoT Single Tone 3,75* обладает преимуществом над наилучшим штатным вариантом *LoRa* с *R=4/7* (когерентная обработка) в 1,2 дБ. При некогерентной работе выигрыш над указанным штатным вариантом составляет 1,8 дБ. При этом нужно учесть, что коды *Turbo* обладают выигрышем над кодами Витеби. Поэтому реальный выигрыш стандарта *NB-IoT* будет выше, чем показывают результаты рис. 5.

Выигрыш для *LR-FHSS Vit2/3* над наилучшим из штатных вариантов *LoRa R=4/7* наблюдается только в режиме некогерентной работы и без процедуры дополнительной коррекции ошибок. Он составляет 0,5 дБ. Во всех других вариантах, представленных на рис. 5, лучшие варианты настройки канала *LoRa* обладают преимуществом над *LR-FHSS*. Объясняется это тем, что *LR-FHSS* ориентирована на работу с более низкими скоростями, чем требуется для

рассматриваемой спутниковой линии.

### Заключение

Предложена методика сопоставительного анализа эффективности сигналов с расширением спектра сети *LoRa* и сигналов с традиционной техникой дискретной модуляции, учитывающая режим перезапросов испорченных кадров *ARQ*. На примере сигналов с *BPSK* и каскадными кодами коррекции ошибок класса «Витерби + *RS*» показано, что модуляция, применяемая в *LoRa* с кодами *FEC*, существенно уступает по эффективности. Особенно заметные потери возникают при малых значениях показателя расширения спектра *SF* и могут составлять более 3 дБ по эффективному уровню сигнала.

Предложен вариант усовершенствованной обработки на приеме сигналов *LoRa* путем дополнительной процедуры исправления ошибок в испорченных блоках *FEC*, повышающий эффективный уровень сигнала примерно на 1 дБ.

На примере сервисной геостационарной линии показано, как сигналы *LoRa* могут быть использованы для организации сети спутникового интернета вещей. Установлено, что среди штатных вариантов только режим *LoRa* с *FEC*  $R=4/7$  и параметром  $SF=9$  подходит для организации геостационарной сервисной линии «Вверх» в сети спутникового интернета вещей.

В следующей публикации авторами будет рассмотрена энергетическая эффективность радиолиний модифицированного стандарта *LoRa*, известного как *LR-FHSS*, а также эффективность радиоканалов с расширенным перечнем видов модуляции и разными кодами коррекции ошибок. Будут приведены результаты анализа рабочих характеристик линий, работающих с дифференциальными видами модуляции, обучающими *pilot*-последовательностями конечной длины и перекрытием формирующих импульсов.

### Литература

1. Обзор технологии *LoRa/iTech*: Технологии связи/ Интернет ресурс URL: <https://itechinfo.ru/content/%D0%BE%D0%B1%D0%B7%D0%BE%D1%80-%D1%82%D0%B5%D1%85%D0%BD%D0%BE%D0%BB%D0%BE%D0%B3%D0%B8%D0%B8-lora#%D1%85%D0%B0%D1%80%D0%B0%D0%BA%D1%82%D0%B5%D1%80%D0%B8%D1%81%D1%82%D0%B8%D0%BA%D0%B8>, название с интернета 04.08.2023.
2. RP002-1.0.2 *LoRaWAN*® Regional Parameters // *LoRa Alliance*. A companion document to the *LoRaWAN*® protocol specification. October, 2020. – P. 94.
3. Noor-A-Rahim Md., Khyam O., Mahmud A., Li X., Pesch D., Poor V. Hybrid Chirp Signal Design for Improved Long-Range (*LoRa*) Communications// *Signals*, 2022. – № 3. – С. 1-10. Интернет ресурс URL: <https://doi.org/10.3390/signals3010001>, название с интернета 27.08.2023.
4. Прокис Дж. Цифровая связь. – М.: Радио и связь, 2000. – 800 с.
5. Application Note 200-2: Fundamentals of Quartz Oscillators/ *Hewlett-Packard*, 1997. – 28 p.
6. Сайт фирмы *Rakon*. Интернет ресурс URL: <https://www.rakon.com/products/tcxo>, название с интернета 27.08.2023.
7. Кварцевые генераторы: Термостатированные. Официальный сайт фирмы ОАО "Морион"/ Интернет ресурс URL: <https://morion.com.ru/oscillators>, название с интернета 27.08.2023.

8. Reynders B., Pollin S. Chirp Spread Spectrum as a Modulation Technique for Long Range Communication // Conference: 2016 Symposium on Communications and Vehicular Technologies (SCVT), November 2016. Интернет ресурс URL: <https://www.researchgate.net/publication/311980840>, название с интернета 27.08.2023.
9. SX1278 Datasheet (PDF). Semtech.Corporationhttps. Интернет ресурс URL: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/800241/SEMTECH/SX1278.html>, название с интернета 27.08.2023.
10. Ghanaatian R., Afisiadis O., Burg P., Cotting P. Lora Digital Receiver Analysis and Implementation // 2019 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), May 2019. Интернет ресурс URL: [https://www.researchgate.net/publication/332791105\\_Lora\\_Digital\\_Receiver\\_Analysis\\_and\\_Implementation](https://www.researchgate.net/publication/332791105_Lora_Digital_Receiver_Analysis_and_Implementation), название с интернета 27.08.2023.
11. Knight M., Seeber B. Decoding LoRa: Realizing a Modern LPWAN with SDR. Интернет ресурс URL: <https://www.ebredder.org/archived/19sp/SP19ETR241/Week6/decodingLoRa-KnightM.pdf>, название с интернета 27.08.2023.
12. Soklic J., Arthaber H. Interference Analysis of LoRaWAN Systems/ Technische Universitat Wien. 2021. – 76 p. Интернет ресурс URL: [https://www.interreg-interop.eu/fileadmin/t/InterOp/Interference\\_Analysis\\_of\\_LoRaWAN\\_Systems.pdf](https://www.interreg-interop.eu/fileadmin/t/InterOp/Interference_Analysis_of_LoRaWAN_Systems.pdf), название с интернета 27.08.2023.
13. Korhonen J., Huang Y., Wang Ye. Generic forward error correction of short frames for IP streaming applications // Multimed Tools Appl, 2006.– № 29. – P.305-323. Интернет ресурс URL: [https://www.researchgate.net/publication/220664097\\_Generic\\_forward\\_error\\_correction\\_of\\_short\\_frames\\_for\\_IP\\_streaming\\_applications](https://www.researchgate.net/publication/220664097_Generic_forward_error_correction_of_short_frames_for_IP_streaming_applications), название с интернета 27.08.2023.
14. Yang K., Du W. LDPC: A Low-Density Parity-Check Coding Scheme for LoRa Networks/ SenSys '22, November 6-9, 2022. Boston, MA, USA. – P.193-206. Интернет ресурс URL: [https://www.researchgate.net/publication/367402593\\_LDPC\\_A\\_Low-Density\\_Parity-Check\\_Coding\\_Scheme\\_for\\_LoRa\\_Networks](https://www.researchgate.net/publication/367402593_LDPC_A_Low-Density_Parity-Check_Coding_Scheme_for_LoRa_Networks), название с интернета 27.08.2023.
15. Горгадзе С.Ф., Бокк Г.О. Планирование и обработка результатов эксперимента в радиотехнике и инфокоммуникационных системах. – М.: Горячая линия – Телеком, 2020.
16. Леушин А.В. LoRa как новый вид модуляции. Принципы работы, основные параметры, помехоустойчивость// Техника радиосвязи. Сер. Радиолинии и системы радиосвязи, 2022. – Вып. 2 (53). – С. 28-42.
17. Бокк Г.О. ММО: Оптимизация управления числом логических каналов // В книге: Мобильный бизнес: перспективы развития и реализации систем радиосвязи в России и за рубежом. Сборник материалов (тезисов) XXXVIII международной конференции РАЕН, 2016. – С. 6
18. Аджемов С.С., Бокк Г.О., Зайцев А.Г., Миненко П.В., Струев А.В. Модифицированный алгоритм пространственного разрешения источников радиоизлучения SDS-MUSIC, работающий при многолучевом распространении сигналов // Радиотехника, 2003. – № 11. – С. 80.

# ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНЫХ АЛГОРИТМОВ ПОВЫШЕНИЯ ОТКАЗОУСТОЙЧИВОСТИ В СЕТЯХ SDN НА БАЗЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

*Г.М. Нурудинов, Московский технический университет связи и информатики, g.nurudinov@mail.ru.*

**УДК 004.855.5**

**Аннотация.** В статье представлена разработка и исследование алгоритмов, направленных на повышение отказоустойчивости в сетях *SDN*, с использованием ИИ. Модель, предложенная в этой статье, учитывает способность ИИ обрабатывать большие объемы данных и принимать решения в режиме реального времени для эффективного управления сетевым трафиком и ресурсами. Также освещены гибридные подходы, которые интегрируют ИИ с традиционными сетевыми механизмами, демонстрируя возможность адаптации к динамичным условиям сети и предотвращения сбоев. Анализ эффективности предложенных алгоритмов осуществляется с применением симуляционных технологий.

**Ключевые слова:** *SDN*; ИИ; отказоустойчивость; алгоритмы; гибридные подходы; управление сетевым трафиком; динамическая оптимизация; симуляция; машинное обучение; централизованное управление.

## RESEARCH OF EFFECTIVE ALGORITHMS FOR INCREASING FAULT TOLERANCE IN SDN NETWORKS BASED ON ARTIFICIAL INTELLIGENCE

*Gasan Nurudinov, Moscow Technical University of Communications and Informatics.*

**Annotation.** The article presents the development and research of algorithms aimed at improving fault tolerance in *SDN* networks using AI. The model proposed in this article takes into account the ability of AI to process large amounts of data and make real-time decisions for effective management of network traffic and resources. It also highlights hybrid approaches that integrate AI with traditional network mechanisms, demonstrating the capabilities to adapt to dynamic network conditions and prevent failures. Analysis of the effectiveness of the proposed algorithms is carried out using simulation technologies.

**Keywords:** *SDN*; AI; fault tolerance; algorithms; hybrid approaches; network traffic management; dynamic optimization; simulation; machine learning; centralized management.

### Введение

С появлением *Software-Defined Networking (SDN)* сетевые архитектуры стали гораздо более гибкими и масштабируемыми, предоставляя возможности, которые были труднодоступны в традиционных сетевых конфигурациях. Основное преимущество *SDN* заключается в декомпозиции традиционных сетевых архитектур, а именно в разделении управления и передачи данных на два отдельных слоя. Это позволяет администраторам централизованно управлять сетевым трафиком и ресурсами, обеспечивая большую гибкость и контроль над сетевой инфраструктурой [1-4].

Тем не менее, с гибкостью и централизацией управления в *SDN* приходят и новые вызовы в области обеспечения надежности и отказоустойчивости. Так как

управление сетью сконцентрировано в центральном контроллере, это может создать узкие места и повысить риск сбоев или атак, что, в свою очередь, может оказать влияние на всю сетевую инфраструктуру.

В этом контексте, искусственный интеллект (ИИ) представляет огромный потенциал для повышения отказоустойчивости в *SDN*. Способность ИИ к обработке и анализу больших объемов данных в режиме реального времени, а также его способность обучаться и адаптироваться к изменяющимся условиям, делает его мощным инструментом для совершенствования сетевых систем.

С помощью ИИ можно реализовать механизмы прогнозирования для обнаружения потенциальных сбоев, прежде чем они произойдут, и принятия соответствующих мер. Кроме того, с применением алгоритмов машинного обучения, *SDN* может адаптироваться к различным сценариям сетевого трафика, оптимизируя маршрутизацию и уменьшая вероятность перегрузки сети [5, 6].

Также стоит отметить, что совместное использование ИИ и *SDN* не ограничивается только вопросами надежности, но и открывает новые горизонты для безопасности, управления полосой пропускания и сокращения времени отклика в сетевых системах.

### **Актуальность применения ИИ в *SDN***

С ростом сложности сетевых систем и увеличением объемов данных, передаваемых через сети, становится все более важным иметь возможность эффективного управления сетью, а также обеспечивать ее надежность и безопасность. Традиционные методы управления сетью, основанные на статических правилах и политиках, становятся неадекватными в динамично меняющемся сетевом окружении. В этом контексте, применение ИИ в *SDN* предоставляет уникальные возможности для автоматизации, оптимизации и улучшения отказоустойчивости сетевых систем [7].

### **Основные понятия и проблемы**

*SDN* представляет собой подход к созданию сетей, в котором управление сетью централизовано и отделено от аппаратных средств. Это позволяет сетевым администраторам легче управлять трафиком и ресурсами, но также вводит риск отказа центрального контроллера или проблем с коммуникацией между контроллером и сетевыми устройствами.

Основные вызовы в области отказоустойчивости *SDN* включают [8, 9]:

- Обнаружение и восстановление от сбоев сети.
- Обеспечение непрерывности работы сети при отказе одного или нескольких узлов.
- Защита от сетевых атак.
- Роль искусственного интеллекта.

ИИ может быть использован для повышения отказоустойчивости *SDN* сетей, обеспечивая:

- Прогнозирование сбоев: используя машинное обучение можно анализировать исторические данные о работе сети, чтобы предсказать возможные сбои и принять меры по их предотвращению.
- Адаптивное управление трафиком: алгоритмы ИИ могут адаптировать маршруты трафика в режиме реального времени для минимизации задержек и предотвращения перегрузок, что улучшает надежность сети.



- Обнаружение и смягчение атак: ИИ может быть использован для мониторинга сетевого трафика на предмет аномалий, которые могут указывать на сетевую атаку, и автоматически применять меры по смягчению угроз.

### **Исследование алгоритмов**

#### *Глубокое обучение для прогнозирования сбоев*

Один из подходов к повышению отказоустойчивости *SDN* – использование глубокого обучения для прогнозирования сбоев. Глубокие нейронные сети (ГНС) обучаются на больших наборах данных о производительности сети, чтобы предсказать вероятность сбоев в определенных узлах или компонентах сети. Это позволяет операторам сети принимать проактивные меры для предотвращения сбоев или минимизации их воздействия на сеть [10].

#### *Обучение с подкреплением для адаптивного управления трафиком*

Обучение с подкреплением (*RL*) представляет собой тип машинного обучения, в котором агент обучается, взаимодействуя с окружающей средой. В контексте *SDN*, алгоритмы *RL* могут быть использованы для адаптации маршрутов трафика в режиме реального времени. Агент, управляющий трафиком, может учиться оптимизировать маршруты, уменьшать задержки и предотвращать перегрузку сети, получая вознаграждение за улучшение производительности сети.

#### *Анализ временных рядов для обнаружения аномалий*

Анализ временных рядов с использованием ИИ может быть эффективным подходом к обнаружению аномалий в сетевом трафике, которые могут указывать на сбои или атаки. Методы, такие как *LSTM (Long Short-Term Memory)*, могут использоваться для анализа паттернов сетевого трафика и выявления отклонений от нормы.

### **Интеграция ИИ и *SDN***

#### *Динамическая оптимизация маршрутизации*

ИИ может быть использован для анализа сетевого трафика в режиме реального времени и динамической оптимизации маршрутов передачи данных. Алгоритмы машинного обучения, такие как обучение с подкреплением, помогают в определении наиболее эффективных путей для передачи данных на основе текущих условий сети, минимизируя задержки и предотвращая перегрузку сетевых узлов [11].

#### *Обнаружение и смягчение атак*

Используя техники глубокого обучения и анализа временных рядов, ИИ может выявлять аномальные шаблоны в сетевом трафике, которые могут указывать на сетевые атаки или сбои. Это позволяет системам *SDN* быстро реагировать на потенциальные угрозы и применять стратегии смягчения для обеспечения непрерывности работы сети.

#### *Автоматическое восстановление после сбоев*

С помощью ИИ *SDN* системы могут автоматически восстанавливать себя после сбоев, перенаправляя трафик через альтернативные маршруты и восстанавливая сетевые услуги без значительных прерываний.



## **Гибридные подходы: комбинирование искусственного интеллекта и традиционных методов для повышения отказоустойчивости в SDN**

Помимо использования чистого ИИ для улучшения отказоустойчивости в SDN, гибридные подходы, которые комбинируют ИИ с традиционными методами управления сетью, становятся все более популярными. Это связано с тем, что такие подходы позволяют совместить лучшие стороны обеих технологий [12].

### *Применение ИИ для предсказания сбоев*

Одним из способов интеграции ИИ в SDN является использование алгоритмов машинного обучения для предсказания потенциальных сбоев в сети. Модели ИИ, обученные на исторических данных о сетевом трафике и производительности, могут предсказывать вероятность сбоев и предупреждать систему заблаговременно.

### *Традиционные механизмы устойчивости для реагирования на сбои*

После того, как система была предупреждена о потенциальном сбое с помощью ИИ, традиционные механизмы отказоустойчивости, такие как протоколы маршрутизации с отказоустойчивостью, могут использоваться для обеспечения непрерывности работы сети. Это включает в себя перенаправление трафика через резервные маршруты, использование техник быстрого восстановления и другие методы.

### *Адаптивная оптимизация сетевых ресурсов*

Гибридные системы также могут использовать ИИ для динамической оптимизации сетевых ресурсов, адаптируясь к изменяющимся условиям сети. В то же время, статические политики и правила, основанные на традиционных методах, являются основой для гарантирования стабильности и соблюдения стандартов безопасности.

### *Преимущества гибридного подхода*

- Большая гибкость и способность адаптации к динамично меняющимся условиям.
- Комбинирование предсказательных возможностей ИИ с проверенными временем традиционными механизмами устойчивости для более надежного управления сетью.
- Снижение вероятности ложных срабатываний, поскольку традиционные методы могут служить проверкой достоверности предсказаний ИИ.
- Улучшение эффективности ресурсов путем оптимального распределения сетевого трафика и загрузки.

### *Недостатки и вызовы гибридного подхода*

- Сложность интеграции: комбинирование ИИ с традиционными механизмами вероятно увеличит сложность системы, что затрудняет ее внедрение и обслуживание.
- Потребность в точных данных: для обеспечения эффективного прогнозирования сбоев, ИИ должен быть обучен на большом объеме качественных данных, что может быть ресурсоемким.
- Возможные конфликты между решениями, принятыми ИИ, и традиционными механизмами управления.

Гибридный подход, который комбинирует Искусственный Интеллект с традиционными методами управления сетью, предлагает перспективное решение для повышения отказоустойчивости в *SDN*. Тем не менее, это также влечет за собой ряд вызовов, которые должны быть преодолены для обеспечения эффективности и надежности данного подхода [13].

Для успешного применения гибридных подходов необходимо обеспечить тесное взаимодействие между компонентами ИИ и традиционными сетевыми протоколами, а также уделить внимание сбору и обработке данных высокого качества для обучения моделей ИИ.

По мере развития технологии, гибридные системы, которые могут адаптироваться и реагировать на изменения в сетевой среде, становятся все более важными для поддержания высокого уровня отказоустойчивости и обеспечения надежного функционирования сетей.

### **Будущие перспективы**

Для дальнейшего улучшения отказоустойчивости *SDN* на базе ИИ следует рассмотреть несколько направлений исследований:

- Гибридные модели ИИ: интеграция различных методов машинного обучения, таких как глубокое обучение и обучение с подкреплением, возможно приведет к созданию более эффективных систем прогнозирования и адаптивного управления.
- Автономные сети: разработка сетей, способных автономно адаптироваться к изменяющимся условиям и восстанавливать себя после сбоев, с минимальным вмешательством человека.
- Интеграция с другими технологиями: совмещение ИИ с другими технологиями, такими как блокчейн, для создания безопасных и отказоустойчивых сетевых систем.
- Этические и правовые аспекты: изучение этических и правовых аспектов применения ИИ в управлении сетями, включая вопросы приватности, безопасности и ответственности.

### **Заключение**

*SDN* представляет собой переломный момент в сфере сетевых технологий, обеспечивающих гибкость, масштабируемость и централизованное управление сетевыми ресурсами. Однако, с новыми возможностями возникают и новые вызовы, особенно в области обеспечения отказоустойчивости и надежности сетей. ИИ возникает как мощный инструмент, способный внести значительный вклад в решение этих проблем, благодаря своей способности обрабатывать большие объемы данных и принимать решения в режиме реального времени.

В статье были рассмотрены различные аспекты применения ИИ для повышения отказоустойчивости в *SDN*, включая использование машинного обучения для предсказания сетевых сбоев, оптимизации маршрутизации и управления сетевым трафиком. Особое внимание было уделено гибридным подходам, которые комбинируют ИИ с традиционными сетевыми протоколами и механизмами управления.

Несмотря на значительные преимущества, которые ИИ может принести в *SDN*, существует ряд вызовов, включая сложность интеграции, потребность в высококачественных данных для обучения, а также вопросы безопасности и приватности.

## Литература

1. Гетьман А.И., Маркин Ю.В., Евстропов Е.Ф., Обыденков Д.О. Обзор задач и методов их решения в области классификации сетевого трафика // Труды ИСП РАН, 2017. – Т. 29. – № 3. – С. 117-150. DOI: 10.15514/ISPRAS-2017-29(3)-8.
2. Boutaba R., Salahuddin M. A., Limam N., Ayoubi S., Shahriar N., Solano F. E., Rendon O. M. A comprehensive survey on machine learning for networking: evolution, applications and research opportunities // Journal of Internet Services and Applications, 2018. – № 9. – P. 1-99. <https://doi.org/10.1186/s13174-018-0087-2>.
3. Harkut Dr Dinesh. An Overview of Network Traffic Classification Methods. 2015.
4. Шелухин О.И., Ерохин С.Д., Ванюшина А.В. Классификация IP-трафика методами машинного обучения. Под ред. О.И. Шелухина. М.: Горячая линия – Телеком, 2018. – 282 с.
5. Xie J. et al. A Survey of Machine Learning Techniques Applied to Software Defined Networking (SDN): Research Issues and Challenges // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2018. P. 393-430. <https://doi.org/10.1109/comst.2018.2866942>.
6. Zhao Y., Li Y., Zhang X., Geng G., Zhang W. and Sun Y. A Survey of Networking Applications Applying the Software Defined Networking Concept Based on Machine Learning // IEEE Access, 2019. – V. 7. – P. 95397-95417. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2928564>.
7. Mohammed A.R., Mohammed S.A. and Shirmohammadi S. Machine Learning and Deep Learning Based Traffic Classification and Prediction in Software Defined Networking // Proc. 2019 IEEE International Symposium on Measurements & Networking (M&N). – P. 1-6. <https://doi.org/10.1109/IWMN.2019.8805044>.
8. Singhal P., Mathur R., Vyas H. State of the Art Review of Network Traffic Classification based on Machine Learning Approach // Proc. International Conference on Recent Trends in Engineering & Technology, 2013. – P. 12-15.
9. Nguyen T., Grenville A. A survey of techniques for internet traffic classification using machine learning // IEEE Communications Surveys and Tutorials, 2008. – V. 10. – P. 56-76.
10. Patcha A. and Park J.-M. An overview of anomaly detection techniques: Existing solutions and latest technological trends // Computer Networks, 2007. – V. 51. – № 12. – P. 3448-3470.
11. Latah M., Toker L. Artificial Intelligence Enabled Software Defined Networking: A Comprehensive Overview // IET Networks, 2018. – V. 8. <https://doi.org/10.1049/ietnet.2018.5082>.
12. Buczak A. L. and Guven E. A survey of data mining and machine learning methods for cyber security intrusion detection // IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2016. – V. 18. – № 2. – P. 1153-1176.
13. Hodo E., Bellekens X. J., Hamilton A. W., Tachtatzis C., and Atkinson R. C. Shallow and Deep Networks Intrusion Detection System: A Taxonomy and Survey // ArXiv, 2017. [abs/1701.02145](https://arxiv.org/abs/1701.02145).

**ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ, СЕТИ И ТЕХНОЛОГИИ.  
ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ.  
ИНФОРМАТИКА И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ.  
ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ И МАШИННОЕ ОБУЧЕНИЕ**

**ПОДХОДЫ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА СВЯЗИ И ПРЕДОСТАВЛЕНИЯ УСЛУГ  
СВЯЗИ И ЗАДАЧИ ПО ИХ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЮ В РАМКАХ  
ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ**

*М.М. Добрышин, к.т.н., Академия ФСО России, dobrithin@ya.ru;  
Д.С. Горбуля, Академия ФСО России, gorbulya@ya.ru.*

**УДК 004.942**

**Аннотация.** В статье представлен краткий анализ нормативно-правовой базы, регламентирующий процессы оценки качества связи и предоставления услуг связи. На основании проведенного анализа сформирована система свойств, позволяющая на гипотетическом уровне показать взаимосвязь между свойствами, характеризующими услуги связи и сеть связи в условиях проведения компьютерных атак в отношении элементов сети. Предложенные гипотетические связи требуют дальнейшего теоретического и эмпирического изучения, результаты которого позволят повысить достоверность оценки уровня информационной безопасности и повысить уровень информационной безопасности предоставляемых услуг и сети связи.

**Ключевые слова:** теория информационной безопасности; система обеспечения информационной безопасности; качество связи и услуг связи; свойства.

**APPROACHES TO ASSESSING THE QUALITY OF COMMUNICATION AND  
THE PROVISION OF COMMUNICATION SERVICES AND TASKS FOR  
THEIR IMPROVEMENT IN THE FRAMEWORK OF INFORMATION  
SECURITY**

*M.M. Dobryshin, Candidate of Technical Science, Academy of the Federal Security Service of Russia.  
D.S. Gorbulya, Academy of the FSS of Russia.*

**Annotation.** The article presents a brief analysis of the regulatory framework governing the processes of assessing the quality of communication and the provision of communication services. Based on the conducted analysis, a system of properties has been formed that allows to show at a hypothetical level the relationship between the properties characterizing communication services and the communication network in the conditions of computer attacks against network elements. The proposed hypothetical connections require further theoretical and empirical study, the results of which will increase the reliability of the assessment of the level of information security and increase the level of information security of the services provided and the communication network.

**Keywords:** information security theory; information security system; quality of communication and communication services; properties.

## Введение

Парадигма процесса предоставления услуг связи абонентам на современном этапе развития техники изменилась от «подстройки» абонента под возможности сети связи (СС) к требованию абонентов по предоставлению услуг связи «здесь и сейчас». Совершенствование телекоммуникационного оборудования позволило существенно усилить требования абонентов к качеству предоставляемых услуг связи (если на этапе становления междугородней телефонии абоненты заказывали сеанс связи, и время ожидания измерялось в часах, то в настоящий момент требования ко времени соединения исчисляются единицами секунд) [1, 2].

Качество связи – совокупность свойств, характеризующих качество СС, качество услуг связи и восприятия качества услуги связи потребителями. Особое внимание следует уделить тому, что свойства, характеризующие качество связи и услуг связи, концептуально отличаются от свойств, применяемых при описании процессов функционирования СС, оборудования и программного обеспечения [3].

Увеличение количества организаций, предоставляющих услуги связи (провайдеров), позволило на уровне регламентирующих документов не определять численные значения параметров, характеризующих качество предоставления услуг связи, а использовать ресурсы провайдера, соотношение цена/качество у которого удовлетворяет абонента – ориентация на потребителя [4].

Такой подход действительно позволяет превзойти допустимые требования из принятых стандартов предыдущих поколений при функционировании СС в условиях отказов и сбоев телекоммуникационного оборудования и программного обеспечения.

Однако, отсутствие сгруппированной однозначной системы свойств и нормированных значений параметров качества связи и параметров качества предоставления услуг связи не позволяют в полной мере оценить способность СС выполнять свои функции по предоставлению услуг связи с требуемым качеством в условиях внешних дестабилизирующих факторов и в частности при реализации компьютерных атак (КА).

## Система свойств, характеризующих качество предоставления услуг связи

Анализ нормативно-правовых документов показывает многовекторность и разрозненность предметной области оценки качества связи и предоставления услуг связи. В настоящий момент задачу оценки качества предоставления услуг связи определяют и регламентируют №126-ФЗ «О связи», Закон №2300-1 «О защите прав потребителей», приказами Министерства цифрового развития, связи и массовых коммуникаций Российской Федерации, а также группой международных стандартов и рекомендаций (МСЭ-Т E.800 (09/2008), МСЭ-Т E.802 (02/2007), МСЭ-Т Y.1540 (12/2019), МСЭ-Т Y.1541 (02/2006), ETSI ETR 003, ETSI EG 202 057 и др.), государственных стандартов (ГОСТ ISO 9000-2011, ГОСТ Р 55390-2012, ГОСТ Р 55387-2012, ГОСТ Р 55542-2013, ГОСТ Р 55543-2013, ГОСТ Р 56087.(1, 2)-2014, ГОСТ Р ИСО 9000-2015, ГОСТ Р 54536-2011 (2020), ГОСТ Р 57193-2016, ГОСТ Р 55273-2012 (ISO/IEC/TR 90005:2008) и др.).

Основные понятия описываются в рекомендациях ETSI:

- ETSI ETR 003 – определения качества обслуживания (*QoS*) и качества сети связи (*NP*), а также взаимосвязи между ними.
- ETSI EG 202 057-1 v1.3.1. – определяет параметры, характеризующие *QoS* для различных услуг связи; общие рекомендации по измерению основных параметров и порядку сбора статистических данных.

- *ETSI EG 202 057-4 v1.1.1.* – определяет параметры, характеризующие *QoS* для сети Интернет; общие рекомендации по измерению основных параметров и порядку сбора статистических данных.
- *3GPP TS 29.213* – описывает модель отображения параметров *QoS* между протоколами верхнего и нижнего уровней модели *ISO*.

На основе анализа приведенных документов сформулированы схемы процесса оценки качества предоставляемых услуг связи (рис. 1, 2) и схема системы свойств качества связи (рис. 3).

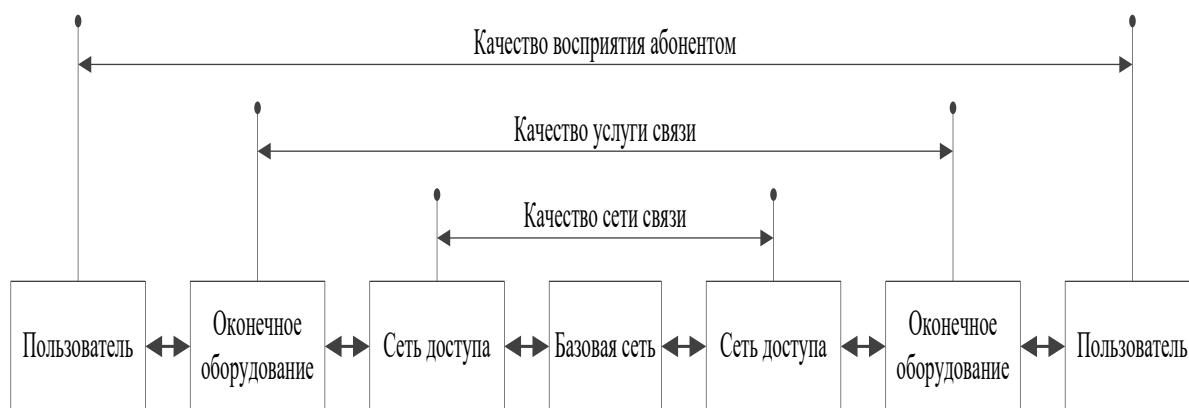


Рисунок 1

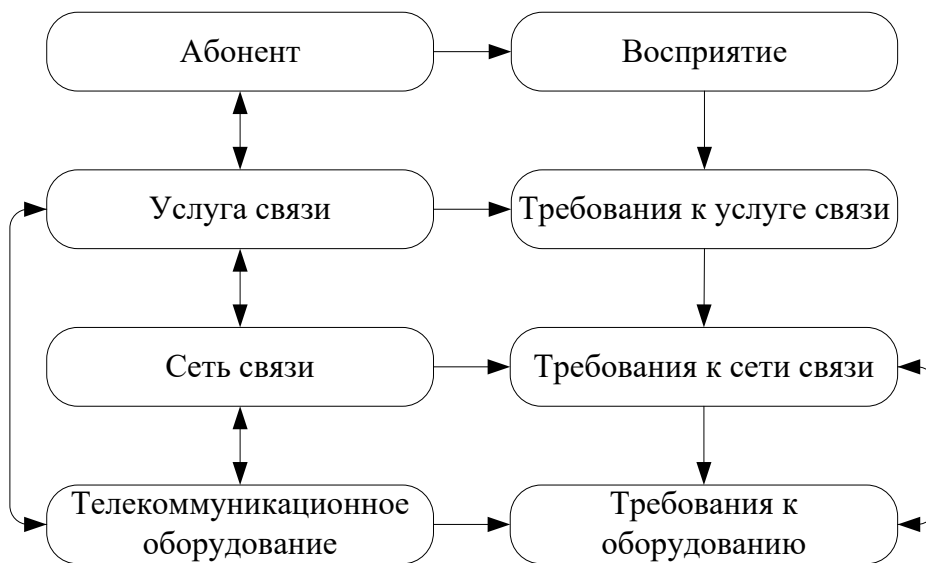


Рисунок 2

Мониторинг качества связи и предоставления услуг связи включает:

- определение показателей качества услуг связи и норм на них;
- разработка методик измерений, включая определения условий и применяемых средств измерений;
- проведение измерений значений параметров качества.

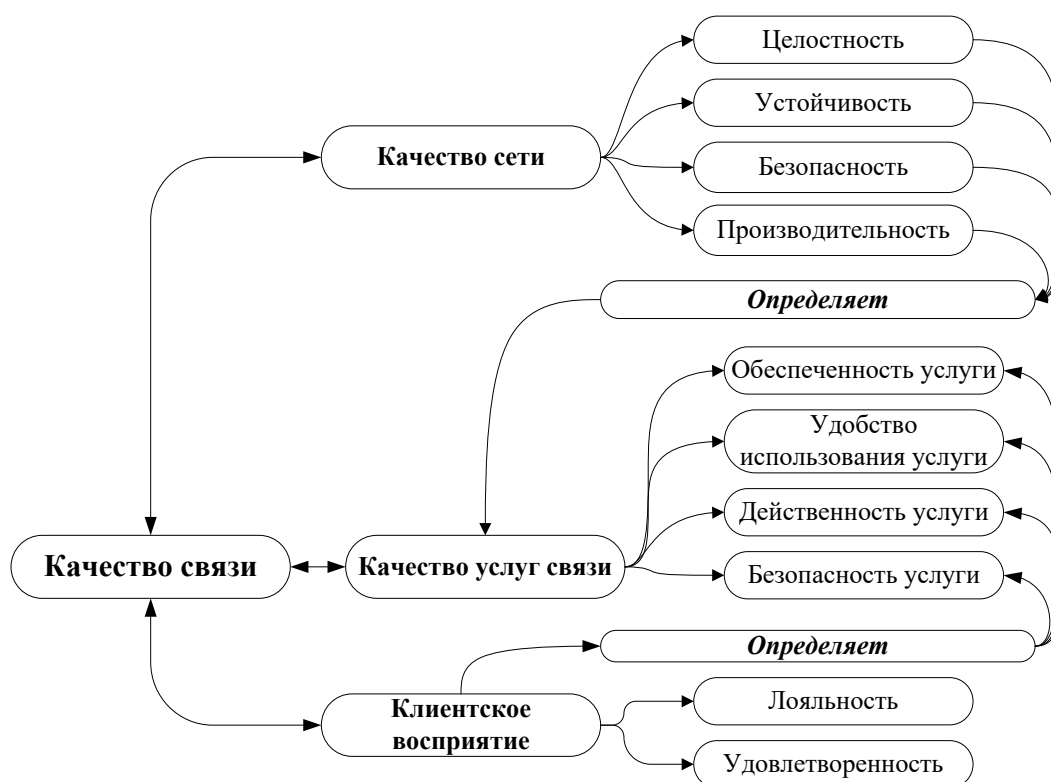


Рисунок 3

Ниже перечислены показатели качества и некоторые нормированные значения этих параметров. Для отдельных показателей нормативно-правовые документы не определяют нормированных значений, в этих случаях по договоренности между провайдером и абонентом оценка качества осуществляется на основе метода *SLA* (из конца в конец, *Service Level Agreement*). *SLA* регламентируется рекомендациями *ITU-T E.860*.

Исходя из того, что пользователем услуги связи является человек, то конечная оценка качества услуги связи основывается на индивидуальных ощущениях восприятия. Под восприятием качества услуги связи (*QoE, Quality of Experience*) понимается – совокупность ощущений абонента (пользователя), отражающих степень его ожиданий и удовлетворенности услугами связи. Оценка качества производится путем проведения опросов, сбора и анализа жалоб, а также использованием данных, получаемых на основе единичных субъективных оценок качества каждой услуги, формируемой с использованием, установленного на оборудовании абонента программного обеспечения (приложения) [5]. В качестве основной характеристики качества восприятия услуги связи выступает удовлетворенность абонентов. Оценка абонентом качества предоставленной услуги декомпозируется на два направления: удовлетворенность абонентов провайдером связи и удовлетворенность абонента от использования услуги связи.

В качестве отдельных показателей удовлетворенности абонентов провайдером связи выступают параметры, описывающие процесс получения и использования абонентом услуг связи (без привязки к конкретной услуге связи)<sup>1</sup>. Типовые параметры и их нормированные значения представлены в табл. 1.

<sup>1</sup> ГОСТ Р 54536-2011. Системы менеджмента качества. Межотраслевые требования.

Таблица 1.

Показатель качества, единица измерения	Нормированное значение
Своевременность выполнения заявки на подключение клиента к сети связи, %	не менее 99
Количество повреждений в расчете на одну абонентскую линию в год, единиц	не более 0,001
Доступность службы оператора, мин.	не более 5
Правильность счетов, выставяемых за услуги связи %	не менее 99,9
Число претензий, удовлетворенных в установленные сроки, %	не менее 95

В качестве отдельных показателей удовлетворенности абонентов от использования услуги связи выступает субъективное мнение абонентов и оценивается<sup>2</sup>:

- единичный критерий оценки одного пользователя (по пятибалльной шкале): отлично; хорошо; удовлетворительно; плохо; очень плохо;
- общий критерий оценки всех пользователей: все пользователи удовлетворены, многие пользователи удовлетворены, некоторые пользователи не удовлетворены; многие пользователи не удовлетворены; почти все пользователи не удовлетворены.

Очевидно, что указанные подходы к оценке качества предоставления услуг связи не способны адекватно и достоверно описать изучаемый процесс и, в частности, оценить качество предоставляемых услуг в условиях воздействия КА на сеть связи и ее элементы. Вследствие этого оценке подлежат непосредственно предоставляемые абонентам услуги связи, реализуемые на технологическом уровне (установление соединения – обмен данными – завершение соединения).

Качество услуги связи – совокупность существенных свойств услуги, обуславливающих ее пригодность для удовлетворения потребностей абонента (пользователя) [5]. Под материальной основой понятия «услуга связи» (услуга связи – деятельность по приему, обработке, хранению, передаче, доставке сообщений электросвязи или почтовых отправлений) следует понимать набор технологических действий, реализуемых телекоммуникационным оборудованием и операций программного обеспечения, которые совершает абонент, оператор и телекоммуникационное оборудование. К основным свойствам, описывающим качество услуги связи относятся<sup>3</sup> [6]:

Обеспеченность услуги – способность оператора связи предоставлять услугу (набор услуг) и обеспечивать обслуживание пользователя с наилучшим образом. Обеспеченность услуги характеризуется результативностью процессов предоставления услуг связи, планированию и управлению сетью связи; описывается наличием ресурсов и информации, необходимых для поддержания этих процессов и их мониторинга. К основным ресурсам относятся:

- человеческие ресурсы, показатели: уровень компетентности, уровень подготовки и уровень осведомленности персонала;
- инфраструктура сети, показатели: уровень укомплектованности, уровень оснащенности, зона покрытия, максимальная пропускная способность;

<sup>2</sup> ГОСТ Р 56087.2-2014. Методика проведения опроса пользователей.

<sup>3</sup>ГОСТ Р 53724 -2009. Качество услуг связи. Общие положения.



- информационные ресурсы, показатели: планы размещения подразделений, телекоммуникационного оборудования и средств обслуживания, планы действий в различных условиях эксплуатации;
- производственная среда – условия, в которых выполняют работу, включая физические, экологические и другие факторы (такие как шум, температура, влажность, освещенность или погодные условия).

Удобство (простота) использования услуги – свойство услуги, характеризующее, насколько успешно и просто пользователь может ее получить. В качестве основных параметров удобства использования выступают параметры, описывающие характеристики эргономики, функциональности и понятности дизайна; простоты обновления программного обеспечения.

Безопасность услуги – свойство услуги быть защищенной от несанкционированного доступа, злонамеренного и неправильного использования, преднамеренной порчи, ошибок человека и стихийных бедствий.

В контексте свойств качества предоставления услуг связи термин «безопасность» используется в смысле сведения к минимуму уязвимостей активов и ресурсов которое может быть использовано для нарушения системы или информации, которую она содержит. В обобщенном виде безопасность услуги объединяет безопасность информации и безопасность информационной технологии. Под информационной технологией понимаются приемы, способы и методы применения средств вычислительной техники при выполнении функций сбора, хранения, обработки, передачи и использования данных<sup>4</sup> [7].

Основные свойства информации с точки зрения информационной безопасности широко известны: целостность, доступность, конфиденциальность, достоверность и подотчетность<sup>5</sup>.

В силу принципов и механизмов реализации компьютерных атак, особое внимание следует уделить применяемым информационным технологиям, т.к. компьютерные атаки в большей степени направлены на изменения правильности функционирования приемов, способов и методов применения средств вычислительной техники при выполнении функций сбора, хранения, обработки, передачи и использования данных. Основные свойства и параметры информационных технологий перечислены на рис. 4, порядок определения значений указанных параметров описан в<sup>6</sup>.

Анализ свойств и показателей информационных технологий показывает, что при оценке уровня ИБ необходимо рассматривать не только свойство безопасности, а систему свойств в целом [8]. Системность рассмотрения свойств информационной безопасности обусловлено тем, что воздействие осуществляется с целью воздействия на функциональную пригодность [9] за счет воздействия на используемые ресурсы (в том числе временные и пропускную способность), противодействие КА. Минимизация ущерба и устранение последствий осуществляется за счет свойств надежности, пригодности для обслуживания, удобства использования и совместимости [10, 11].

Действенность услуги – свойство услуги быть предоставленной тогда, когда это необходимо пользователю, и продолжаться без чрезмерного ухудшения в

<sup>4</sup> ГОСТ Р 52448-2005. Защита информации. Обеспечение безопасности сетей электросвязи. Общие положения.

<sup>5</sup> ГОСТ Р ИСО/ТО 13569-2007. Рекомендации по информационной безопасности.

<sup>6</sup> ГОСТ Р ИСО/МЭК 25023-2021. Системная и программная инженерия. Требования и оценка качества систем и программной продукции (*SQuaRE*). Измерения качества системы и программной продукции.

течение требуемого времени (в пределах определенных допусков и в заданных условиях).



Рисунок 4

Действенность услуги связи декомпозируется на:

- доступность услуги – свойство услуги быть предоставленной тогда, когда это необходимо пользователю;
- непрерывность (надежность) услуги – свойство услуги, будучи предоставленной, продолжаться в течение требуемого времени;
- целостность услуги – свойство услуги, будучи предоставленной, обеспечиваться без чрезмерного ухудшения.

Типовые показатели (без указания вида услуги связи), характеризующие действенность услуги, представлены в табл. 2.

Таблица 2.

Свойство	Показатель качества, единица измерения
Доступность услуги	Успешность регистрации с сети оператора, %
	Доля неуспешных попыток установления соединения, %
Непрерывность услуги	Доля обрывов успешно установленных соединений, %
Целостность услуги (по отдельным видам услуг)	Средняя разборчивость речи на соединение
	Доля недоставленных сообщений, %
	Доля неуспешных сессий, %
	Среднее значение скорости передачи данных

Параметр качества услуги – подлежащая определению путем непосредственного наблюдения, количественная характеристика одного или

нескольких свойств услуги, рассматриваемая применительно к определенным условиям ее оказания или потребления.

Показатель качества услуги – подлежащая определению путем расчета количественная характеристика одного или нескольких свойств услуги, входящих в ее качество, рассматриваемая применительно к определенным условиям ее оказания или потребления (например, для телефонии – доля неуспешных попыток установления голосового соединения).

Параметры, показатели качества услуг и порядок их оценки регламентируется соответствующими методическими документами и правовыми актами. В качестве ограничения при оценке выступает условие, что оценке подлежат не все услуги, которыми потенциально способен воспользоваться потребитель, а только те, которые он использует или хочет использовать на оцениваемый промежуток времени.

Взаимосвязь свойств услуги связи в контексте влияния на обеспечение информационной безопасности (ИБ) представлена на рис. 5:



Рисунок 5

1. Оператор связи для обеспечения предоставления пользователю услуги связи обязан поддерживать систему защиты в адекватном и эффективном состоянии.
2. Оператор связи обязан предоставить услугу связи в требуемый момент времени и допустимой продолжительности с требуемым качеством, в том числе в условиях воздействия КА.
3. Оператор связи обязан сформировать систему защиты, обеспечивающую требуемую защиту от злонамеренных действий, не затрудняющую деятельность пользователя услуги.

В пояснениях к рис. 5 и последующих рисунках используется термин «обязан», который применен как декларация деятельности оператора, а не как законодательно установленное (предписывающее) действие.

Перечисленные свойства, характеризующие качество предоставления услуги связи, базируются, с одной стороны, на качестве телекоммуникационного оборудования, а с другой – на качестве СС, ресурсами которой пользуется абонент. Причем качество телекоммуникационного оборудования, из которого состоит СС, влияет, но не определяет качество СС.

Качество сети связи (*NP – Network Performance*) – степень соответствия СС установленным требованиям к ее доступности, устойчивости, целостности и безопасности (не связано с конкретной услугой связи), необходимыми для оказания услуг связи [11, 12]:

- доступность СС – наличие возможности отправить оператору запрос на предоставление услуги связи с использованием пользовательского (оконечного) оборудования;
- целостность СС – способность взаимодействия входящих в состав сети связи элементов, при котором становится возможным установление

соединения и (или) передача информации между пользователями услугами связи<sup>7</sup>;

- устойчивость функционирования СС – способность СС выполнять свои функции при выходе из строя части элементов сети в результате воздействия дестабилизирующих факторов<sup>8</sup>;
- безопасность СС – способность СС противодействовать определенному множеству угроз, преднамеренных или непреднамеренных дестабилизирующих воздействий на входящие в состав СС: средства, линии связи и технологические процессы (протоколы), что может привести к ухудшению качества услуг, предоставляемых сетью<sup>9</sup>.

Помимо указанных свойств для определенных условий функционирования СС, возможно рассматривать свойства, описывающие качество автоматизированных систем<sup>10</sup>:

- адаптивность автоматизированной системы (АС) – свойство АС, характеризующее возможность изменения ее конфигурации для сохранения своих эксплуатационных показателей в заданных пределах при изменениях внешней среды;
- живучесть автоматизированной системы – свойство АС, характеризующее способность выполнять установленный объем функций в условиях воздействий внешней среды и отказов компонентов системы в заданных пределах;
- интероперабельность автоматизированной системы – способность двух или более автоматизированных систем или компонентов к обмену информацией и к использованию информации, полученной в результате обмена;
- надежность автоматизированной системы – комплексное свойство АС сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность АС выполнять свои функции в заданных режимах и условиях эксплуатации;
- помехоустойчивость автоматизированной системы – свойство АС, характеризующее способность выполнять свои функции в условиях воздействия помех;
- совместимость автоматизированных систем – комплексное свойство двух или более АС, характеризующее их способность взаимодействовать при функционировании.

Совместимость АС включает техническую, программную, информационную, организационную, лингвистическую и, при необходимости, метрологическую совместимость:

- целостность автоматизированной системы – свойство, характеризующее состояние АС, при котором обеспечивается достижение целей ее функционирования.

---

<sup>7</sup> Приказ Министерства информационных технологий и связи Российской Федерации от 27.09.2007 № 113 «Об утверждении Требований к организационно-техническому обеспечению устойчивого функционирования сети связи общего пользования».

<sup>8</sup> ГОСТ Р 53111-2008. Устойчивость функционирования сети связи общего пользования. Требования и методы проверки.

<sup>9</sup> ГОСТ Р 53801-2010. Связь федеральная. Термины и определения.

<sup>10</sup> ГОСТ Р 59853-2021 Информационные технологии. Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Автоматизированные системы. Термины и определения.

Взаимосвязь свойств СС в контексте решения задачи обеспечения ИБ показана на рис. 6:

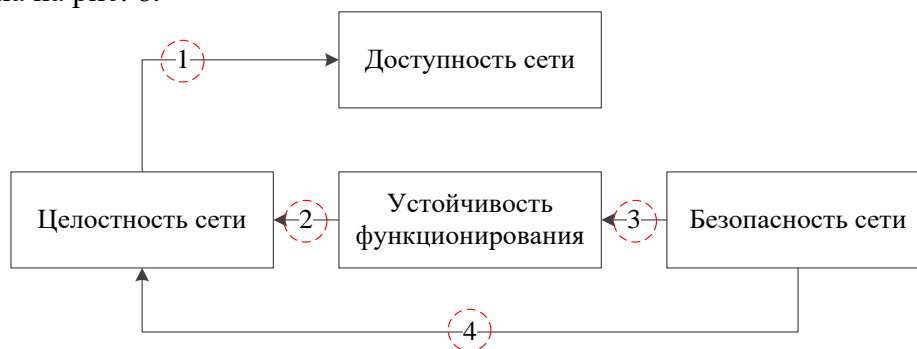


Рисунок 6

- 1, 2. Оператор обязан сформировать структуру СС, позволяющую обеспечивать установления соединения и передачу информации между пользователями в условиях выхода из строя элементов сети вследствие воздействия КА на эти элементы.
3. Оператор сети связи обязан сформировать систему защиты СС, позволяющую снизить количество элементов, вышедших из строя из-за КА.
4. Оператор сети связи должен сформировать систему защиты СС, позволяющую поддерживать встречную работу элементов сети (в том числе средств защиты, в том числе в условиях КА), минимизировать деструктивное воздействие и не затруднять работу телекоммуникационного оборудования и протоколов взаимодействия.

Взаимосвязь свойств характеризующих качество услуг связи и качество СС в контексте обеспечения ИБ представлена на рис. 7.

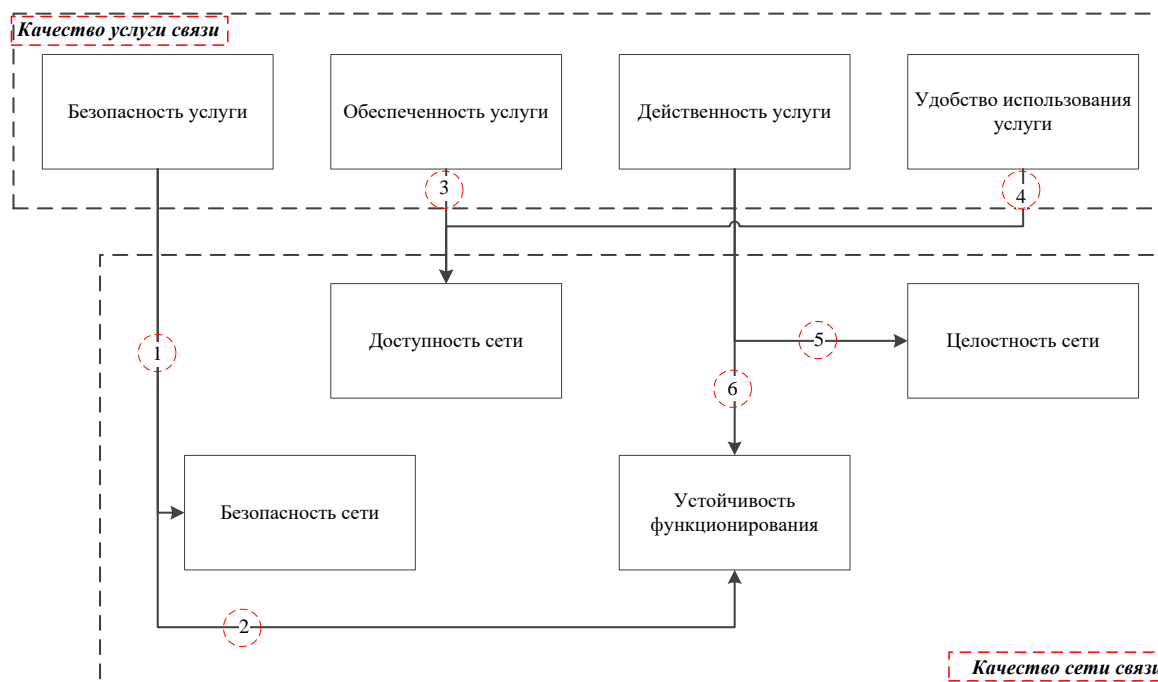


Рисунок 7

1. Для обеспечения защищенности услуг связи от КА необходимо устранить или минимизировать количество уязвимостей телекоммуникационного оборудования, линий связи, технологических процессов (протоколов), которые возможно использовать для реализации угроз ИБ.
2. Структура СС не должна допускать или минимизировать ухудшение качества услуг связи в условиях КА, направленных на элементы сети.

3. Структура СС при наличии к ней доступа пользователя должна позволять предоставлять требуемые услуги связи с требуемым уровнем ИБ.
4. Мероприятия, механизмы и средства защиты, обеспечивающие защиту элементов сети, не должны препятствовать использованию услуг связи легальному пользователю.
5. Применяемые средства связи должны поддерживать единые режимы работы и протоколы, позволяющие устанавливать соединения и обеспечивать передачу информации между пользователями, в том числе в условиях КА.
6. Изменение структуры (топологии) СС в условиях КА, направленных на элементы сети, не должно привести к чрезмерному ухудшению качества услуги связи.

### **Новые научные задачи по совершенствованию процессов оценки качества связи и предоставления услуг связи в условиях противодействия компьютерным атакам**

Основываясь на результатах проведенного анализа подходов оценки качества и в рамках обеспечения ИБ сформулированы следующие выводы и научные задачи:

1. Качество связи и качество услуг связи характеризуются системой свойств, описывающих свойства сети связи и телекоммуникационного оборудования, входящего в ее состав, а также применяемых информационных технологий (программных средств).

2. Задача по обеспечению требуемого качества связи и услуг связи в условиях КА с системной точки зрения необходимо описывать взаимосвязанной группой свойств как непосредственно услуги связи, так и свойств сети связи, телекоммуникационного оборудования и применяемых информационных технологий (программных средств), однако в настоящий момент времени требуется уточнение, как состава указанной системы качества, так и взаимосвязи между ее элементами.

3. Система свойств качества связи и услуг связи требуют представления с системной точки зрения, т.е. определения зависимостей между параметрами, описывающими рассматриваемые свойства.

4. Взаимосвязь отдельных свойств услуг связи, сети связи и телекоммуникационного оборудования и применяемого программного обеспечения между собой требуют более углубленного изучения для нахождения зависимостей между параметрами, описывающими рассматриваемые свойства.

5. Взаимосвязь отдельных свойств услуг связи, сети связи и телекоммуникационного оборудования, применяемого программного обеспечения со свойствами, характеризующими компьютерные атаки, а также основными дефинициями процесса обеспечения ИБ (угроза, уязвимость, ущерб), требуют более углубленного изучения для нахождения зависимостей между параметрами, описывающими рассматриваемые свойства.

### **Заключение**

Проведенный анализ нормативно-правовой базы и тенденций оценки качества связи и услуг связи позволил сформулировать группу актуальных научных задач оценки качества связи и услуг связи в рамках обеспечения информационной безопасности. Разрешение сформулированных научных задач позволит, с одной стороны, повысить достоверность оценки уровня ИБ, а с другой стороны – при успешном выявлении новых зависимостей между параметрами, описывающими различные свойства, повысить уровень ИБ как предоставляемых услуг связи, так и сети, обеспечивающей данный процесс.

## Литература

1. Ушакова В.Н. Из истории изобретения и начального периода развития радиосвязи: Сб. документов и материалов. – СПб.: Изд-во «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), 2008. – 288 с.
2. <https://www.company.rt.ru/press>
3. МСЭ-Т Е.800. Серия Е: общая эксплуатация сети, телефонная служба, функционирование служб и человеческие факторы Определение терминов, относящихся к качеству обслуживания. Обзор рынка предоставления услуг связи.
4. Проект концепции управления качеством связи в Российской Федерации. Министерство связи и массовых коммуникаций Российской Федерации, 2015.
5. МСЭ-Т Е.802 Серия Е: Общая эксплуатация сети, телефонная служба, функционирование служб и человеческие факторы. Качество услуг электросвязи: концепции, модели, цели и планирование надежности работы. Термины и определения, связанные с качеством услуг электросвязи. Принципы и методики определения и применения параметров QoS.
6. Проект концепции создания системы контроля качества предоставления услуг связи в Российской Федерации. Министерство связи и массовых коммуникаций Российской Федерации, 2012.
7. Белов А.С., Добрышин М.М., Шугуров Д.Е. Научно-методический подход к оцениванию качества систем обеспечения информационной безопасности // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика, 2022. – № 11. – С. 34-40.
8. Белов А.С., Добрышин М.М., Горбуля Д.С., Шугуров Д.Е. Концептуальная модель обмена информацией между органами управления, учитывающая используемые информационные технологии и качество информационных потоков // Известия Тульского государственного университета. Технические науки, 2022. – № 9. – С. 126-130.
9. Добрышин М.М. Подход к формированию обобщенного критерия оценки эффективности системы обеспечения информационной безопасности // Известия Тульского государственного университета. Технические науки, 2021. – № 9. – С. 113-121.
10. Квятковская И.Ю., Фам Куанг Хиен. Система показателей оценки качества телекоммуникационных услуг и метод их оценки // Вестник АГТУ. Сер.: Управление, вычислительная техника и информатика, 2013. – № 2. – С. 98-103.
11. Белов А.С., Добрышин М.М., Шугуров Д.Е. Функциональный подход к комплексной оценке уровня информационной безопасности элемента корпоративной сети связи // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика, 2023. – № 3. – С. 30-39.
12. МСЭ-Т Е.802 (02/2007) Серия Е: Общая эксплуатация сети, телефонная служба, функционирование служб и человеческие факторы. Принципы и методики определения и применения параметров QoS.

## **ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ОПТИМИЗАЦИИ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ СИСТЕМЫ РАСПОЗНАВАНИЯ РЕЧИ НА УСТРОЙСТВАХ С ОГРАНИЧЕННЫМИ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫМИ РЕСУРСАМИ**

*Р.Т. Расулов, Московский технический университет связи и информатики, r99r12t28@mail.ru.*

**Аннотация.** В данной статье рассматривается применение методов оптимизации для систем распознавания речи на устройствах с ограниченными вычислительными ресурсами. Обзор существующих методов распознавания речи выявляет их ограничения на таких устройствах. Представлены методы оптимизации, такие как компрессия данных, сокращение размера моделей и оптимизация вычислений с подробным рассмотрением их применимости и преимуществ. Приводятся примеры реальных приложений и систем распознавания речи, разработанных с использованием методов оптимизации, а также дается оценка их эффективности. Подчеркивается значимость применения методов оптимизации для создания эффективных систем распознавания речи на устройствах с ограниченными вычислительными ресурсами.

**Ключевые слова:** распознавание речи; оптимизация; ограниченные вычислительные ресурсы; компрессия данных; сокращение размера моделей; оптимизация вычислений.

## APPLICATION OF OPTIMIZATION METHODS FOR THE DEVELOPMENT OF A SPEECH RECOGNITION SYSTEM ON DEVICES WITH LIMITED COMPUTING RESOURCES

*R.T. Rasulov, Moscow Technical University of Communications and Informatics.*

**Annotation.** This article examines the application of optimization methods for speech recognition systems on devices with limited computational resources. An overview of existing speech recognition methods reveals their limitations on such devices. Optimization methods such as data compression, model size reduction and computational optimization are presented, with a detailed consideration of their applicability and advantages. Examples of real applications and speech recognition systems developed using optimization methods are provided and their effectiveness is assessed. The significance of applying optimization methods to create efficient speech recognition systems on devices with limited computational resources is emphasized.

**Keywords:** speech recognition; optimization; limited computational resources; data compression; model size reduction; computational optimization.

---

### Введение

Распознавание речи является одной из ключевых технологий в сфере обработки естественного языка. Однако, с развитием мобильных устройств, встроенных систем и других устройств с ограниченными вычислительными ресурсами, возникает необходимость разработки эффективных систем распознавания речи, которые могут работать на таких устройствах. Это вызвано ограничениями устройств, включая ограниченную производительность процессоров, ограниченный объем оперативной памяти и ограниченную емкость батареи [1, 2].

Актуальность темы исследования обусловлена значительным ростом использования мобильных устройств и встроенных систем в различных сферах, таких как здравоохранение, автомобильная промышленность, умные дома и другие. В этих сферах требуется возможность выполнения распознавания речи на устройствах с малой вычислительной мощностью без необходимости подключения к интернету или облачным сервисам. Это позволяет реализовать мгновенное и



локальное распознавание речи с повышением удобства использования и обеспечения более высокого уровня конфиденциальности данных.

Данная статья представляет обзор существующих методов распознавания речи и их требований к вычислительным ресурсам, а также освещает проблемы, возникающие при использовании этих методов на устройствах с ограниченной вычислительной мощностью. Кроме того, рассмотрены различные методы оптимизации, которые могут быть применены для разработки эффективных систем распознавания речи на таких устройствах.

### **Обзор существующих методов распознавания речи**

Классические методы распознавания речи являются основой для современных систем и исторически представляли собой сложные статистические модели, основанные на скрытых марковских моделях (СММ) и гауссовых смесях (ГС). Однако эти методы требуют значительных вычислительных ресурсов, включая высокую производительность процессора и большой объем оперативной памяти. Это ограничивает их применимость на устройствах с ограниченной вычислительной мощностью.

Современные подходы к распознаванию речи на устройствах с ограниченной вычислительной мощностью включают в себя использование нейронных сетей, в частности, глубоких нейронных сетей (ГНС). ГНС основаны на концепции обучения с учителем и способны извлекать сложные характеристики речевого сигнала. Они позволяют достичь высокой точности распознавания речи, однако требуют значительных ресурсов для обучения и выполнения предсказаний. Это ставит ограничения на их использование на устройствах с ограниченными вычислительными ресурсами.

При использовании существующих методов распознавания речи на устройствах с ограниченной вычислительной мощностью возникают несколько проблем и ограничений. Во-первых, высокая вычислительная сложность методов может привести к задержкам и неэффективному использованию ресурсов. Во-вторых, большие размеры моделей и требования к памяти могут превышать доступные ресурсы на устройствах с ограниченным объемом оперативной памяти. В-третьих, высокое энергопотребление может ограничивать автономность работы устройств.

Исследование этих проблем и ограничений позволит нам выявить основные вызовы, связанные с применением существующих методов распознавания речи на устройствах с ограниченной вычислительной мощностью. Это будет служить основой для разработки и применения методов оптимизации, которые помогут преодолеть эти ограничения и обеспечить эффективную работу систем распознавания речи на устройствах с ограниченными вычислительными ресурсами.

### **Методы оптимизации для систем распознавания речи на устройствах с ограниченными вычислительными ресурсами**

Разработка эффективных систем распознавания речи на устройствах с ограниченными вычислительными ресурсами требует применения методов оптимизации. В данном разделе рассмотрены несколько ключевых методов оптимизации и их применимость для разработки таких систем.

1. Компрессия данных и сокращение размера моделей:
  - Методы сжатия данных, такие как алгоритмы Хаффмана, *Lempel-Ziv-Welch*

(LZW) и алгоритмы сжатия без потерь, могут быть использованы для уменьшения объема аудиоданных, передаваемых или хранимых на устройстве. Это позволяет сократить вычислительные затраты при обработке данных.

- Сжатие моделей распознавания речи является еще одним подходом для сокращения требований к памяти и вычислительным ресурсам. Методы сжатия моделей, например, методы прунинга (отбрасывание ненужных параметров) и квантизации (уменьшение точности представления чисел), позволяют сохранить эффективность моделей при сокращении их размера.

## 2. Квантизация и оптимизация вычислений:

- Квантизация представляет собой метод, при котором значения параметров модели представлены с меньшей точностью. Это позволяет уменьшить требования к процессору и памяти без значительной потери точности распознавания. Техники квантизации включают в себя бинаризацию (представление параметров в виде бинарных значений), кластеризацию (группировку близких значений параметров) и др.
- Оптимизация вычислений направлена на улучшение производительности путем оптимизации алгоритмов и структур данных. Использование эффективных алгоритмов и оптимизированных реализаций может снизить требования к процессору и ускорить процесс распознавания речи.

Исследование и применение этих методов оптимизации позволяют разработчикам создавать эффективные системы распознавания речи на устройствах с ограниченными вычислительными ресурсами. Однако, при использовании методов оптимизации необходимо учитывать их потенциальные ограничения.

### **Адаптация алгоритмов распознавания речи**

Адаптация алгоритмов распознавания речи является еще одним важным аспектом для разработки систем на устройствах с ограниченными вычислительными ресурсами. Исследование и применение адаптивных методов позволяют адаптировать существующие алгоритмы распознавания речи для эффективной работы на таких устройствах.

Одним из подходов к адаптации алгоритмов распознавания речи является оптимизация параметров и настроек алгоритмов для лучшего соответствия требованиям устройств с ограниченными вычислительными ресурсами. Это может включать изменение значений порогов, чувствительности алгоритмов, а также упрощение или сокращение некоторых вычислительных операций. Такие адаптивные настройки позволяют достичь оптимальной производительности на устройствах с ограниченными ресурсами.

Кроме того, разработка новых методов адаптации алгоритмов распознавания речи специально для устройств с ограниченными вычислительными ресурсами является активной областью исследований. Эти методы учитывают особенности устройств, такие как ограниченная производительность процессора, малый объем оперативной памяти и ограниченная энергетическая емкость. Они стремятся создать оптимальные алгоритмы, которые обеспечивают баланс между точностью распознавания и вычислительными требованиями.

Применение адаптивных алгоритмов распознавания речи на устройствах с ограниченными вычислительными ресурсами позволяет достичь более

эффективной работы системы. Это включает улучшение скорости распознавания, снижение потребления энергии и оптимальное использование ограниченных вычислительных ресурсов.

Однако, важно отметить, что адаптация алгоритмов распознавания речи на устройствах с ограниченными вычислительными ресурсами может сталкиваться с вызовами и ограничениями. Например, упрощение алгоритмов может привести к потере точности распознавания, поэтому необходимо тщательно балансировать между оптимизацией и качеством результатов.

Одним из подходов к адаптации алгоритмов распознавания речи на устройствах с ограниченными вычислительными ресурсами является использование инкрементальных методов обработки речи. Эти методы позволяют обрабатывать речевой сигнал поэтапно, анализируя его порциями или потоковыми блоками. Это снижает объем данных, которые нужно обработать одновременно, и позволяет более эффективно использовать вычислительные ресурсы устройства.

Также разработчики исследуют возможность применения техник передачи обучения (*transfer learning*) для адаптации моделей распознавания речи на устройствах с ограниченными ресурсами. При передаче обучения модель обучается на больших вычислительных ресурсах и затем применяется на устройствах с ограниченными ресурсами. Это позволяет использовать заранее обученные модели, которые обладают высокой производительностью, и адаптировать их для работы на устройствах с ограниченными вычислительными ресурсами, например, путем сокращения числа параметров или изменения архитектуры модели.

Важно отметить, что разработка и адаптация алгоритмов распознавания речи на устройствах с ограниченными вычислительными ресурсами является активной областью исследований. Комбинация различных методов оптимизации и адаптации позволяет создавать эффективные системы распознавания речи, способные работать на устройствах с ограниченными вычислительными ресурсами без значительной потери точности и качества. В табл. 1 представлено сравнение методов адаптации алгоритмов распознавания речи для устройств с ограниченными вычислительными ресурсами.

Таблица 1.

Метод адаптации	Описание	Применимость
Оптимизация параметров	Изменение значений порогов, чувствительности и других настроек алгоритмов для лучшей адаптации к ограниченным вычислительным ресурсам	Широко применим
Упрощение вычислений	Сокращение или упрощение вычислительных операций в алгоритмах распознавания речи для уменьшения вычислительных требований	Широко применим
Инкрементальная обработка	Обработка речевого сигнала поэтапно, анализ его порциями или потоковыми блоками для более эффективного использования вычислительных ресурсов	Особенно полезно для ресурсоемких задач
Передача обучения	Использование заранее обученных моделей, разработанных на вычислительно мощных устройствах, и	Полезно для снижения вычислительной нагрузки

Метод адаптации	Описание	Применимость
	их адаптация для работы на устройствах с ограниченными ресурсами	
Динамическое изменение параметров	Автоматическое изменение параметров алгоритмов распознавания речи в зависимости от ресурсов устройства и текущих условий работы	Полезно для динамической оптимизации

Из представленной сводной таблицы методов адаптации алгоритмов распознавания речи на устройствах с ограниченными вычислительными ресурсами можно сделать следующие выводы:

- Оптимизация параметров алгоритмов позволяет настроить их для более эффективной работы на устройствах с ограниченными вычислительными ресурсами. Изменение порогов, чувствительности и других настроек может привести к снижению вычислительных требований без значительной потери точности.
- Упрощение вычислений является эффективным подходом для снижения требований к процессору и памяти. Сокращение или упрощение вычислительных операций позволяет улучшить производительность системы распознавания речи на устройствах с ограниченными ресурсами.
- Инкрементальная обработка речи позволяет обрабатывать аудиопоток поэтапно, что уменьшает объем данных, требующих обработки одновременно. Этот подход позволяет более эффективно использовать вычислительные ресурсы и обеспечивает более отзывчивую работу системы.
- Передача обучения является полезным методом для адаптации заранее обученных моделей на устройства с ограниченными ресурсами. Это позволяет использовать высокопроизводительные модели, разработанные на вычислительно мощных устройствах, и адаптировать их для работы на ограниченных устройствах.
- Динамическое изменение параметров алгоритмов позволяет адаптировать их в реальном времени в зависимости от ресурсов устройства и текущих условий работы. Это позволяет более гибко управлять вычислительными ресурсами и обеспечивать оптимальную производительность системы.

Использование сочетания этих методов адаптации позволяет разработчикам создавать эффективные системы распознавания речи на устройствах с ограниченными вычислительными ресурсами. Выбор конкретных методов зависит от требований и ограничений конкретного приложения, и каждый метод имеет свои преимущества и недостатки. Правильная адаптация алгоритмов распознавания речи на устройствах с ограниченными вычислительными ресурсами играет ключевую роль в обеспечении оптимальной производительности и эффективного использования доступных ресурсов. Выбор конкретных методов адаптации должен основываться на балансе между точностью распознавания, потребляемыми ресурсами и ограничениями конкретного приложения или устройства.

### **Применение методов оптимизации в практике**

Применение методов оптимизации в практике играет важную роль при разработке систем распознавания речи на устройствах с ограниченными вычислительными ресурсами. В данном разделе мы рассмотрим примеры реальных

приложений и систем, где были использованы методы оптимизации, и оценим их эффективность и результаты.

*Пример №1. Мобильное приложение для распознавания голоса в реальном времени.*

В этом примере имеется ввиду мобильное приложение, которое позволяет пользователю голосовыми командами управлять умным домом. Приложение должно работать на устройствах с ограниченными вычислительными ресурсами, такими как смартфоны и планшеты. Для достижения оптимальной производительности были применены методы оптимизации, включая компрессию аудиоданных, сокращение размера моделей и оптимизацию вычислений. Это позволило снизить требования к ресурсам устройств и обеспечить быстрое и точное распознавание голосовых команд.

Оценка эффективности. Применение методов оптимизации в данном приложении позволило достичь высокой производительности и точности распознавания речи на устройствах с ограниченными вычислительными ресурсами. Пользователи отмечали быструю реакцию приложения на голосовые команды, а также его надежность и стабильность работы.

*Пример 2. Встроенная система распознавания речи в автомобиле.*

В данном примере имеется ввиду встроенная система распознавания речи в автомобиле, которая позволяет водителю управлять различными функциями автомобиля с помощью голосовых команд. Устройства в автомобиле обладают ограниченными вычислительными ресурсами, поэтому были применены методы оптимизации, такие как сжатие аудиоданных, квантизация моделей и оптимизация вычислений. Это позволило обеспечить быструю и надежную работу системы распознавания речи даже при ограниченных ресурсах.

Оценка эффективности. Применение методов оптимизации во встроенной системе распознавания речи в автомобиле позволило достичь высокой производительности и надежности работы системы на устройствах с ограниченными вычислительными ресурсами. Водители отмечали точность и отзывчивость системы при распознавании голосовых команд, что значительно повышает удобство и безопасность управления автомобилем.

*Пример 3. Медицинская система распознавания речи на носимом устройстве.*

В этом примере имеется ввиду медицинская система распознавания речи, которая позволяет медицинским специалистам делать заметки с помощью голосовых команд на носимом устройстве, таком как умные часы. У таких устройств ограниченная вычислительная мощность и память. Для обеспечения эффективной работы системы были применены методы оптимизации, включая сокращение размера моделей, квантизацию параметров и оптимизацию вычислений. Это позволило обеспечить плавную и быструю запись голосовых заметок на носимом устройстве.

Оценка эффективности. Применение методов оптимизации в медицинской системе распознавания речи на носимом устройстве дало положительные результаты. Медицинские специалисты отмечали удобство и быстроту записи заметок с помощью голосовых команд, а система демонстрировала высокую точность распознавания даже на ограниченных ресурсах устройства.

Примеры реальных приложений и систем распознавания речи, разработанных с использованием методов оптимизации на устройствах с ограниченными вычислительными ресурсами, подтверждают эффективность и важность применения таких методов. Они позволяют достичь высокой

производительности и точности распознавания речи на ограниченных устройствах, что является ключевым фактором для создания удобных и эффективных систем в различных областях применения, таких как автомобильная промышленность, медицина, умные дома и др.

### **Преимущества и ограничения применения методов оптимизации для систем распознавания речи на устройствах с ограниченными вычислительными ресурсами**

Преимущества применения методов оптимизации для систем распознавания речи на устройствах с ограниченными вычислительными ресурсами:

- Улучшенная производительность. Методы оптимизации позволяют снизить требования к вычислительным ресурсам, что приводит к улучшению производительности системы распознавания речи. Это особенно важно для устройств с ограниченным процессорным временем и памятью, таких как мобильные устройства или встроенные системы.
- Экономия энергии. Оптимизация алгоритмов распознавания речи позволяет сократить энергопотребление устройств. Это полезно для мобильных устройств и других батарейных устройств, где продолжительность работы от батареи является важным фактором.
- Уменьшение размера моделей. Оптимизация может включать сокращение размера моделей для распознавания речи. Это позволяет уменьшить объем памяти, необходимый для хранения моделей, и сэкономить пространство на устройстве.
- Ограничения и компромиссы при применении методов оптимизации для систем распознавания речи на устройствах с ограниченными вычислительными ресурсами.
- Потеря точности. В процессе оптимизации могут использоваться различные техники, которые приводят к некоторой потере точности распознавания речи. Важно балансировать между производительностью и точностью, чтобы достичь оптимального компромисса.
- Время обработки. Некоторые методы оптимизации могут требовать дополнительного времени для обработки речевых данных. Это может быть неприемлемо для систем, где требуется быстрая обратная связь или реакция на голосовые команды.
- Зависимость от данных. Некоторые методы оптимизации могут быть зависимыми от конкретного набора данных или языка. Это создает ограничения в применимости методов оптимизации для различных языков или специфических контекстов использования.

В целом, применение методов оптимизации для систем распознавания речи на устройствах с ограниченными вычислительными ресурсами является важным и полезным подходом, который может принести множество преимуществ. Однако важно учитывать ограничения и компромиссы, связанные с таким применением.

Для достижения оптимальных результатов при применении методов оптимизации в системах распознавания речи на устройствах с ограниченными ресурсами, рекомендуется учитывать следующие факторы:

- Контекст использования. При выборе методов оптимизации необходимо учитывать конкретный контекст использования системы распознавания речи. Различные приложения и устройства могут иметь разные требования к производительности, точности и времени обработки.

- Адаптация к конкретному устройству. Методы оптимизации должны быть специально настроены и адаптированы к конкретному устройству с ограниченными вычислительными ресурсами. Это позволит достичь наилучшего сочетания производительности и точности при распознавании речи.
- Тестирование и оценка. Важно проводить тщательное тестирование и оценку эффективности применяемых методов оптимизации. Это позволит оценить потерю точности, производительность и другие параметры системы на устройствах с ограниченными ресурсами.
- Компромиссы между производительностью и точностью. При оптимизации системы распознавания речи на ограниченных устройствах необходимо сделать компромисс между производительностью и точностью. Важно найти оптимальный баланс, чтобы система обеспечивала достаточно высокую точность, несмотря на ограничения ресурсов.

В целом, применение методов оптимизации для систем распознавания речи на устройствах с ограниченными вычислительными ресурсами может значительно улучшить производительность и эффективность таких систем. Однако необходимо тщательно учитывать ограничения и проводить адаптацию методов оптимизации к конкретному контексту использования, чтобы достичь наилучших результатов.

### **Заключение**

В данной статье были рассмотрены важные аспекты разработки систем распознавания речи на устройствах с ограниченными вычислительными ресурсами. Существующие методы распознавания речи требуют значительных вычислительных ресурсов, что ограничивает их применимость на устройствах с ограниченной вычислительной мощностью.

Однако, применение методов оптимизации позволяет эффективно работать с системами распознавания речи и на таких устройствах. Оптимизация с помощью методов компрессии данных, сокращения размера моделей, квантизации параметров и оптимизации вычислений позволяют снизить требования к вычислительным ресурсам и повысить производительность.

Реальные приложения и системы распознавания речи, разработанные с использованием методов оптимизации, подтверждают их эффективность и важность. Они позволяют достичь высокой точности и быстродействия при распознавании речи на устройствах с ограниченными вычислительными ресурсами, что является важным фактором для создания удобных и эффективных систем в различных областях применения.

Однако, следует учитывать и ограничения методов оптимизации. Некоторые методы могут привести к небольшой потере точности распознавания или увеличению времени обработки. Поэтому необходимо находить компромисс между оптимизацией ресурсов и сохранением качества распознавания речи при разработке систем на устройствах с ограниченными вычислительными ресурсами.

В целом, методы оптимизации играют решающую роль в разработке эффективных систем распознавания речи на устройствах с ограниченными вычислительными ресурсами. Они позволяют справиться с ограничениями и достичь высокой производительности, точности и быстродействия систем распознавания речи, что является важным фактором для удобства и эффективности использования в различных областях применения, в том числе в автомобильной промышленности, медицине, умном доме и др.

## Литература

1. Данильчук Т.И., Трофимов И.М. Обработка и анализ речевых фраз с использованием математических алгоритмов уровней сигналов // Baikal Research Journal, 2013. – № 6. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/obrabotka-i-analiz-rechevyh-fraz-s-ispolzovaniem-matematicheskikh-algoritmov-urovney-signalov> (дата обращения: 23.04.2023).
2. Садыкова А.А., Амиргалиев Е.Н. Изучение применения автоматического распознавания речи // Colloquium-journal, 2020. – № 11 (63). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/izuchenie-primeneniya-avtomaticheskogo-raspoznavaniya-rechi> (дата обращения: 23.04.2023).
3. Титов Ю.Н. Современные технологии распознавания речи // Вестник российских университетов. Математика, 2006. – № 4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sovremennye-tehnologii-raspoznavaniya-rechi> (дата обращения: 23.04.2023).
4. Пресняков И.Н., Омельченко А.В., Омельченко С.В. Автоматическое распознавание речи в каналах передачи // Радиоэлектроника и информатика, 2002. – № 1 (18). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/avtomaticheskoe-raspoznavanie-rechi-v-kanalah-peredachi> (дата обращения: 23.04.2023).
5. Алимуратов А.К. Параметры и классификация систем распознавания речи // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе, 2014. – № 1 (9). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/parametry-i-klassifikatsiya-sistem-raspoznavaniya-rechi> (дата обращения: 23.04.2023).
6. Малиновкин В.А., Валуйских Н.В., Шведов Н.Н., Кенин С.Л., Гребенникова Н.И. Сравнительный анализ средств голосового интерфейса и технологий распознавания речи // Вестник ВГТУ, 2022. – № 1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sravnitelnyu-analiz-sredstv-golosovogo-interfeysa-i-tehnologii-raspoznavaniya-rechi> (дата обращения: 23.04.2023).
7. Егунов В.А., Панюлайтис С.В. Распознавание речевых команд с использованием нейронных сетей // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. 2020. – № 3 (51). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/raspoznavanie-rechevyh-komand-s-ispolzovaniem-neyronnyh-setey> (дата обращения: 23.04.2023).
8. Дьячковская М.А., Протодьяконова Г.Ю. Исследование распознавания человеческого голоса с помощью нейронных сетей // Автоматика и программная инженерия, 2016. – № 4 (18). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-raspoznavaniya-chelovecheskogo-golosa-s-pomoschyu-neyronnyh-setey> (дата обращения: 23.04.2023).

## АНАЛИЗ РАЗВИТИЯ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРОМЫШЛЕННОГО ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ В ОБЛАЧНОМ И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОМ АДДИТИВНОМ ПРОИЗВОДСТВАХ

*Е.В. Сундюкова, Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, [sundukova234k@gmail.com](mailto:sundukova234k@gmail.com).*

**УДК 004.7:004.9:67**

**Аннотация.** Облачные технологии удаленного сбора данных в совокупности с промышленным интернетом вещей предоставляют возможность модификации моделей во всех производственных подразделениях, включая



новейшие и быстро развивающиеся технологии аддитивного производства. В данной статье представлен анализ концепции облачных вычислений, облачного производства, интернета вещей, а также их взаимосвязи в эпоху четвертой промышленной революции.

**Ключевые слова:** интернет вещей; облачные технологии; облачное производство; аддитивное производство; интеллектуальное производство.

## ANALYSIS OF THE DEVELOPMENT AND USE OF THE INDUSTRIAL INTERNET OF THINGS IN CLOUD AND INTELLIGENT ADDITIVE MANUFACTURING

*E.V. Syundyukova, Nizhny Novgorod State University N.I. Lobachevsky.*

**Annotation.** Cloud technologies of remote data collection in combination with the industrial Internet of Things provide the possibility of model modification in all production units, including the latest and rapidly developing additive manufacturing technologies. This article presents an analysis of the concept of cloud computing, cloud manufacturing, the Internet of Things, as well as their relationship in the era of the Fourth Industrial Revolution.

**Keywords:** internet of things; cloud technologies; cloud manufacturing; additive manufacturing; intelligent manufacturing.

---

### Введение

Информационные технологии (*Information technologies, IT*) меняют производство во всем мире, переходя к цифровым и сложным современным промышленным процессам, которые можно назвать «умным производством» или «Индустрией 4.0» [1]. Технология аддитивного производства (*Additive Manufacturing, AM*) оказывает большее влияние на четвертое поколение промышленной революции, чем другие производственные технологии. Интернет вещей является одним из ключевых компонентов Индустрии 4.0 [2]. Сегодня Индустрия 4.0, использующая ключевые технологии для значительного повышения эффективности распределения ресурсов на сетевом уровне, совместно использует динамические сервисы *AM* в облачной производственной среде (*Cloud Manufacturing, CM*) [3]. Система *AM* претерпевает серьезные изменения из-за неопределенности и новых требований, предъявляемых глобализацией и растущим использованием интернета вещей [4]. Согласно Международному комитету *ASTM F42* [7], *AM* – это набор процессов комбинирования материалов, который позволяет изготавливать детали по данным *3D*-модели, обычно послойно. Он включает в себя интеграцию различных типов наборов данных, начиная с файла проектирования, преобразование файла проектирования в файл, читаемый принтером, данные, генерируемые принтером и бортовыми диагностическими датчиками, и, наконец, данные, генерируемые в ходе производственного анализа деталей [5]. Эта новая методология промышленной деятельности, обеспечивающая одноступенчатое производство компонентов сложной геометрии, имеющих форму сетки, с компьютерным управлением, обеспечивает быструю разработку продукта. *AM* зарекомендовало себя как смена парадигмы в сфере производства, которое традиционно в значительной степени опиралось на цепочки поставок, использование крепежных элементов или процессов соединения для сборки деталей в рамках компонента, а также традиционно доступные материалы, ограничивающие его возможности в дальнейшем повышении функциональности и

эффективности компонентов. Кроме того, формирующаяся модель *СМ* может облегчить доступ к различным ресурсам *АМ* с минимальными инвестициями. Ожидается, что *СМ* сосредоточится на поддержке процесса *АМ* и потребностей клиентов на протяжении всего производственного процесса от проектирования до печати, а не на предоставлении простых услуг 3D-печати [6].

Первое приложение *СМ* связано с производственным процессом *АМ*, включающим подключение и эксплуатацию текущих производственных ресурсов (например, машин *АМ/3D*-принтеров и соответствующих устройств). В связи с этим *АМ* может быть использовано внутри концепции *СМ*. Следующее приложение имеет отношение к службам конечных пользователей, которые используют интернет-ресурсы *АМ/3D*-печати вместо своего 3D-принтера на месте [7]. Такое удаленное, а также интегрированное на месте передовое аддитивное производство для своей эффективности должно использовать подход к управлению производственной системой (*Manufacturing system management, MSM*) в *СМ*, который включает принятие ресурсов, распределенные ресурсы, подключение, цифровую базу данных, поиск, сопоставление, всестороннюю оценку, выбор услуг, конфигурацию, планирование, транзакции, сервисную сеть, систему безопасности и прикладную систему [8]. *MSM* в перспективе свяжет интернет вещей (*Internet of things, IoT*), большие данные (*Big data, BD*) и облачные вычисления (*Cloud Computing, CC*) в *СМ* [9].

*СМ* позволяет подключать к *АМ* сервисную платформу на базе интернета вещей. Платформа *СМ* способна интегрировать программные приложения и цифровые сервисы в производственный процесс в веб-среде для предоставления доступа как поставщику услуг, так и пользователю через интернет. Облачная платформа может планировать выбранные задачи для всех подключенных и распределенных 3D-принтеров. Эти задачи могут включать планирование групповых деталей при каждой печати (загрузка чертежа компонента) или размещение отдельной детали в процессе печати для каждого элемента. Этот список задач необходимо запланировать с использованием определенного алгоритма, чтобы клиенты могли гибко и быстро реагировать на любые изменения, когда они захотят добавить, отредактировать или удалить задачи для печати [10].



Рисунок 1

*СМ* – это интеллектуальная платформа, основанная на знаниях [11], которая может повысить устойчивость и эффективность производства на протяжении всего процесса и производственного цикла четырьмя способами. Эти способы включают совместное проектирование, улучшенную автоматизацию, повышенную устойчивость процессов и сокращение отходов или повторных этапов. На рис. 1 представлено предлагаемое графическое изображение интегрированного *АМ* с интеллектуальным облаком.

### **Облачная платформа**

Облачная платформа – это сервис или решение для изменения производства, распространения, потребления и ценообразования программного обеспечения. Она нужна для разработки функций и приложений по требованию, чтобы изменить преобладающие ИТ-модели в отрасли [12].

#### *Облачные вычисления*

Для *СС* были разработаны масштабируемые и эффективные системы управления базами данных, согласованные с новыми архитектурами обработки данных. Облачные данные, состоящие из языка запросов, среды выполнения, хранилища и инфраструктуры, будут контролироваться в рамках многоуровневой архитектуры.

*СС* – это сочетание компьютерных технологий и модели решений, основанных на информационных технологиях. *СС* может преобразовать приложения и системы из базы, ориентированной на продукт, в глобальную, распределенную и сервисно-ориентированную базу. *СС* обладает такими возможностями, как управляемый интерфейс, независимость от местоположения и источников, отслеживаемость, универсальный и виртуальный доступ. *СС* – это комбинация общего пула по требованию и настраиваемых вычислительных ресурсов. *СС* трансформирует процессы, сети и масштабы бизнеса и развивает его динамические возможности [13].

Как правило, рассматриваются два варианта внедрения *СС* в производство: Индустрия 4.0 (умное производство) и *СМ*. Первый частично использует облачные сервисы, в то время как второй – полностью поддерживается с их помощью.

#### *Облачное производство*

*СМ* – это сервисно-ориентированная и распределенная сеть с включенным моделированием производства, которая быстро развивается. Она поддерживает переход от производственного процесса к процессу, основанному на обслуживании системы *СМ*, что особенно подходит для технологии *АМ*. Эта концепция и модель описывают функциональные производственные подсистемы. *СМ* – это интегрированная структура *СС* и *IoT*, которая обеспечивает виртуализированные ресурсы, ориентированные на обслуживание. Наиболее важные вопросы, которые могут быть рассмотрены в *СМ*, включают планирование, системы управления, гибкость, комбинацию ресурсов, бизнес-модели, совместимость данных, безопасность, поставщиков данных, координацию между машинами, автоматизацию и эффективное взаимодействие.

*СМ* использует и расширяет концепцию *СС* для преобразования процессов в компонентные и интегрированные производственные мощности с глобальными оптимизированными ресурсами. Для поддержки двух типов облачных пользователей – клиентских и корпоративных – были разработаны методы обслуживания с использованием согласованных моделей данных для описания

облачного сервиса. Облачные технологии, помимо совместного использования ресурсов и экономической эффективности, приносят обрабатывающей промышленности ряд преимуществ, таких как оперативность и масштабируемость производства [14].

Умное *СМ* – это следующий эволюционный этап *СМ*, основанный на повсеместном внедрении, включающем интернет, *IoT*, мобильную, телекоммуникационную и цифровые сети, информационные технологии. Операционные процессы от проектирования до производства интегрированы в виде сервисов *СМ* [14]. Одной из типичных характеристик *СМ* является использование по требованию, что окупает производственные возможности. Поэтому так важно учитывать затраты, связанные с облачным сервисом *СМ*. Различные аспекты этой стоимости в *СМ* включают стоимость всего цикла функционирования облачного сервиса.

Производственные возможности в *СМ* состоят из различных аппаратных и программных ресурсов, человеческих знаний и возможностей. Стоимость всего цикла *СМ* включает в себя эксплуатационные расходы, анализ рынка, налоги, стоимость консультаций, бизнес-аутсорсинга, логистической транспортировки, обработки и проверки продукции и услуг [15]. Важные преимущества *СМ* связаны с производственными возможностями, которые включают моделирование обслуживания, управление и оценку баланса спроса и предложения. Эти возможности могут быть использованы в области управления данными и интеграции возобновляемых источников энергии. Изменение сочетания этих возможностей может привести к развитию облачных структур для получения практических и устойчивых преимуществ.



Рисунок 2

*СМ* предлагает различные решения, которые могут преодолеть барьеры, препятствующие устойчивому производству. На рис. 2 описаны компоненты облачной платформы и решения для аддитивного производства. Данные собираются, хранятся и передаются по всей цепочке поставок. Накопление, интеграция, а затем потоки данных в облаке являются сложной задачей, поскольку общий доступ к ним должен показывать, какими данными делятся пользователи сети, в каком объеме и с кем.

Облачная технология управления объединяет взаимодействие машин (*Machine to machine, M2M*), *IoT*, *BD* и *CC* для ускорения коммуникации и оптимизации потока данных как показано на рис. 3. Анализ больших данных помогает осуществлять мониторинг и проверку компонентов процесса производства на каждом этапе. *M2M* способствует коммуникации и обмену информацией между машинами. Ограниченный обмен данными может происходить между пользователями облака и заказчиками на начальных этапах.



Рисунок 3

### Интернет вещей

Интернет вещей потенциально помогает решать производственные задачи. *IoT* и *CM* взаимосвязаны. *CM* может динамически увеличивать или уменьшать ресурсы в соответствии с потребностями пользователей облака, управлять и планировать их использование для обеспечения эффективности производства [16]. *CM* позволяет обрабатывать данные, относящиеся к конструкции, свойствам исходного сырья, а также генерируемые в процессе производства, включая данные журнала регистрации и диагностических датчиков. Технологическая производственная платформа объединяет множество функций, требует поддержки *CM* на различных этапах – от проектирования до фактического изготовления детали. Приложения интернета вещей включают оптимизацию и мониторинг производительности оборудования, контроль качества продукции и интерфейс «человек-машина». Интернет вещей занимает определенное положение в отрасли, изменяя способы производства, планирования, распределения, обслуживания и доработки товаров. Интернет вещей поддерживает специальные промышленные сервисы, такие как сбор, хранение и анализ данных устройств для облегчения производственных процессов. Огромный потенциал приложения интернета вещей требует постоянных капиталовложений и усовершенствованных инноваций как в сервисах, так и в приложениях [17].

С точки зрения продвинутого производства, сервисы, основанные на *IoT*, позволили осуществлять мониторинг процесса, необходимый для обеспечения производства детали без дефектов [17]. Аддитивное производство включает в себя множество этапов, выполняемых автоматизированной системой, и ошибка в исполнении может привести к потере времени и ресурсов. Системы, основанные на *IoT*, могут отслеживать процесс и предупреждать пользователя заранее. В качестве

расширения система, основанная на *IoT*, также может быть использована для защиты процесса производства от кибератак [18].

### *Промышленный интернет вещей*

Появление машин с полноценным программным обеспечением и других элементов для взаимодействия с физическим миром привело к тому, что обрабатывающая промышленность внедрила технологию промышленного интернета вещей (*Industrial internet of things, IIoT*). *IIoT* обеспечивает более высокий уровень автоматизации, что снижает когнитивные нагрузки, возлагаемые на оператора за счет удаленного мониторинга. Кроме того, *IIoT* играет «умную» роль за кулисами в управлении производственной системой. Стандартная архитектура систем *IIoT* в общем виде приобретает каркас и структуру путем объединения существующих функций и добавления «умных» технических возможностей для обеспечения самоконтролируемой системы обратной связи. Появление *IIoT* выгодно для обрабатывающей промышленности в следующих аспектах:

- Разработка машин со средствами удаленного управления и мониторинга.
- Подход к человеко-машинной коммуникации как к киберфизической системе (*Cyber physical system, CPS*).
- Внедрение технологических инфраструктур *IIoT*, таких как *5G*, *M2M*, умного производства.
- Всестороннее изменение процесса производства.
- Вспомогательные логистические услуги, такие как планирование, распределение, сервисное обслуживание и комплектация продукции.

*IIoT* и облачные приложения не только могут улучшить производственные операции на всех уровнях, но и позволят оптимизировать интеллектуальное производство. Интеграция операций *IIoT* в облако – сложный и требующий решения процесс, поскольку производители должны уделять внимание подготовке стандартизированного планирования для решения этих задач. *IIoT* помогает сократить время простоя, повысить оперативность и производительность, экономичность и рентабельность затрат.

### **Взаимосвязь между *СС*, *IoT*, *СМ* и *IIoT***

*СМ* – это концепция и модель, основанные на *СС*, *IoT* и других передовых технологиях в среде информационного производства. *СМ* сможет продвигать производственную индустрию на объединенной сетевой, интеллектуальной, сервисно-ориентированной платформе и, таким образом, поднимет объем собираемой производственной информации до желаемого уровня [19]. *IoT* и *СС* были изучены и применены во многих областях, поскольку они могут интерпретировать *M2M*-связь (включая взаимодействие человека с человеком, человека с машиной и машины с машинами), а также использование по требованию и совместную эксплуатацию ресурсов.

*СМ* объединяет *IoT* и *СС* для улучшения оперативности принятия решений, безопасности, эффективности, снижения затрат и ориентировано на обслуживание *АМ*, что приводит к созданию продвинутого *АМ*. На рис. 4 показан цикл *АМ* от этапа проектирования до изготовления конечных продуктов, которые могут быть реализованы в среде *СМ* через взаимосвязи между *СС* и *IoT*. Фактически *СМ* использует эту взаимосвязь для интеграции производственных ресурсов в процесс *АМ*. Взаимосвязь между *СМ*, *IoT* и *СС* проявляется во взаимном и разделяемом

влиянии между *IoT* для анализа производственных ресурсов и возможностей на основе *СС* и сети пользователей на протяжении всего жизненного цикла продукта [19].

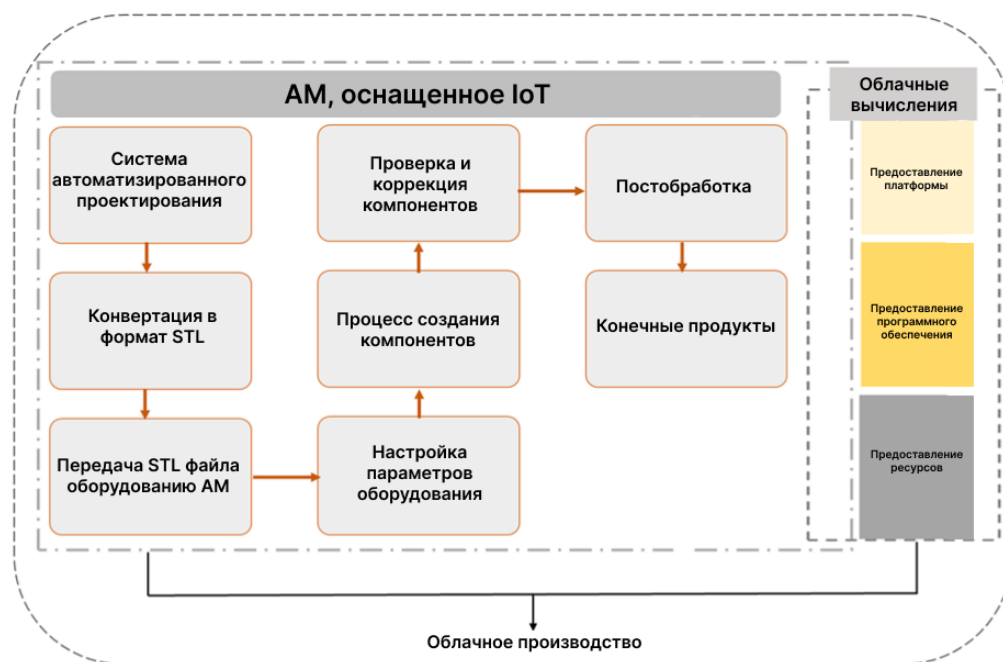


Рисунок 4

*СМ* сервис предоставляет вспомогательные системы, необходимые для управления операциями на облачной производственной платформе. Услуги *СМ* включают в себя:

- Поддержку мультиагентной работы и безопасности данных.
- Оптимизацию производственного процесса.
- Дистанционный подход к управлению и мониторингу производства в режиме реального времени.
- Урегулирование внештатных ситуаций.
- Объединение данных и их преобразование.
- Контроль доступа для нескольких пользователей.
- Настройку функций платформы.

### Заключение

Технологии *АМ* объединяют несколько стадий производства с последовательным набором этапов для получения готового продукта, близкого к чистовому. Таким образом, *АМ* по своей сути подходит для интеграции с облачной системой. Встроенные *СМ* технологии управления *АМ* на основе облачных технологий позволяют использовать такие функции, как мониторинг датчиков, удаленный сбор данных и интеллектуальное взаимодействие между машинами, обеспечивая, таким образом, огромный потенциал для изменения стандартной схемы во всех секторах производства. Появляющаяся сегодня адаптация промышленных платформ на базе интернета вещей в передовую производственную систему может помочь использовать существующие устаревшие инфраструктуры для потенциального превращения их в инфраструктуры с добавленной стоимостью в эпоху больших данных.

## Литература

1. Петров В.А. Программно-целевая организация производства и оперативного управления в условиях групповой технологии и гибких автоматизированных производств. – М.: Лениздат, 1984. – 176 с.
2. Rudolph J.P., Emmelmann C. A cloud-based platform for automated order processing in additive manufacturing. *Procedia Cirp*, 2017. – № 66. – P. 412-417.
3. Simeone A., Caggiano A., Zeng Y. Smart cloud manufacturing platform for resource efficiency improvement of additive manufacturing services. *Procedia CIRP*, 2020. – № 88. – P. 387-392.
4. Haseltalab V., Yaman U. A Cloud manufacturing application for additive manufacturing methods. In *2019 IEEE Int Conf Mech (ICM)*, 2019. – № 1. – P. 287-292.
5. Lehmhus D., Wuest T., Wellsandt S., Bosse S., Kaihara T., Thoben K.D., Busse M. Cloud-based automated design and additive manufacturing: a usage data-enabled paradigm shift. *Sensors*, 2015. – № 15 (12). – P. 32079-32122.
6. Tao F., Zhang L., Liu Y., Cheng Y., Wang L., Xu X. Manufacturing service management in cloud manufacturing: overview and future research directions. *J. Manuf Sci Eng*, 2015. – № 137 (4).
7. ASTM Committee F42 on Additive Manufacturing Technologies. Standard terminology for additive manufacturing general principles and terminology. *ISO/ASTM52900-15*, 2015.
8. Wang Y., Zheng P., Xu X., Yang H., Zou J. Production planning for cloud-based additive manufacturing. A computer vision- based approach. *Robot Comput Integr Manuf*, 2019. – № 58. – P. 145-157.
9. Fisher O., Watson N., Porcu L., Bacon D., Rigley M., Gomes R.L. Cloud manufacturing as a sustainable process manufacturing route. *J. Manuf Syst*, 2018. – № 47. – P. 53-68.
10. Schmidt B., Wang L. Cloud-enhanced predictive maintenance. *Int J. Adv Manuf Tech*, 2018. – № 99 (1). – P. 5-13.
11. Giessmann A., Legner C. Designing business models for cloud platforms. *Inf Syst J*, 2016. – № 26 (5). – P. 551-579.
12. Battleson D.A., West B.C., Kim J., Ramesh B., Robinson P.S. Achieving dynamic capabilities with cloud computing: An empirical investigation. *Eur J Inf Syst*, 2016. – № 25 (3). – P. 209-230.
13. Fielt E., Bohmann T., Korthaus A., Conger S., Gable G. Service management and engineering in information systems research. *J. Strateg Inf Syst*, 2013. – № 22 (1). – P. 46-50.
14. Trembley D.K., Haghnegahdar L., Wang Y. A survey of advanced manufacturing with legacy machinery: The Internet of Other Things. In *Proceedings of the 2018 IISE Annual Conference 1-6*, 2018.
15. Loeser F., Recker J., Brocke J.V., Molla A., Zarnekow R. How IT executives create organizational benefits by translating environmental strategies into Green IS initiatives. *Inf Syst J*, 2017. – № 27 (4). – P. 503-553.
16. Morelli D.A., de Arruda Ignacio P.S. Assessment of research and case studies on Cloud Manufacturing: A bibliometric analysis, 2021.
17. Verboeket V., Krikke H. The disruptive impact of additive manufacturing on supply chains: A literature study, conceptual framework, and research agenda? 2019. – № 111. – P. 91-107.
18. Guo L. A system design method for cloud manufacturing application system // *Int J Adv Manuf Tech*, 2016. – № 84 (1-4). – P. 275-289.



19. Skarlat O., Borkowski M., Schulte S. Towards a methodology and instrumentation toolset for cloud manufacturing. In 2016 1st International Workshop on Cyber-Physical Production Systems (CPPS) 1-4. IEEE, 2016.

## ТЕНДЕНЦИИ В РАЗВИТИИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

*А.И. Панов, Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, alexs.npc481@gmail.com.*

**УДК 004.75:004.08:65.011.56**

**Аннотация.** Интеллектуальное производство – это развивающаяся форма производства, использующая концепции киберфизических систем, основанных на интернете вещей, облачных и сервис-ориентированных вычислениях, искусственном интеллекте и науке о данных. В статье отражена суть интеллектуального производства, проанализированы ожидаемые изменения в области обработки материалов и транспортировки и их интеграция с производством, а также будущие тенденции в данной области.

**Ключевые слова:** производство; промышленность; интеллектуальное производство; анализ данных; автоматизация.

## TENDENCIES IN THE DEVELOPMENT OF SMART MANUFACTURING

*A.I. Panov, Nizhny Novgorod State University N.I. Lobachevsky.*

**Annotation.** Intelligent manufacturing is an evolving form of manufacturing using the concepts of cyber – physical systems based on the Internet of Things, cloud and service-oriented computing, artificial intelligence and data science. The article reflects the essence of intelligent manufacturing, analyzes the expected changes in the field of material processing and transportation and their integration with manufacturing, as well as future trends in this area.

**Keywords:** manufacturing; industry; intelligent manufacturing; data analysis; automation.

### Введение

В последние годы концепция интернета вещей привлекла внимание производственного сообщества. Она фокусируется на интеграции физических активов производства с киберпространством для формирования киберфизических систем. Эта новая концепция была принята отдельными компаниями, промышленными консорциумами, регионами и странами [1].

Общепринятого определения «умного производства» не существует. По данным Национального института стандартов и технологий, интеллектуальное производство – это полностью интегрированная совместная производственная система, которая в режиме реального времени реагирует на изменяющиеся требования и условия на заводе, в сети поставок и в соответствии с потребностями клиентов [2].

Интеллектуальное производство объединяет технологии сегодняшнего дня с датчиками, вычислительными платформами, коммуникационными технологиями, моделированием с интенсивным использованием данных, контролем и прогностической инженерией. Интеллектуальное производство использует концепции киберфизических систем, интернета вещей, облачных и сервис-ориентированных вычислений, искусственного интеллекта и науки о данных. Общая концепция интеллектуального производственного предприятия проиллюстрирована на рис. 1.

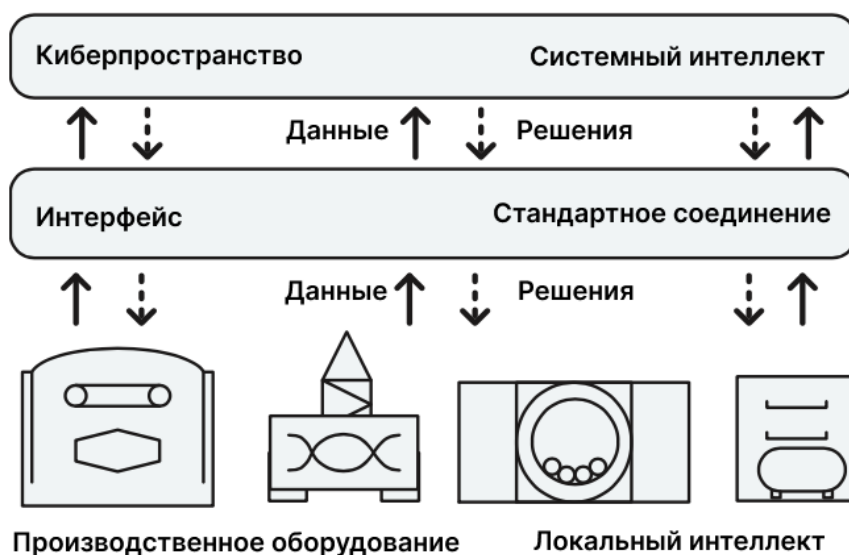


Рисунок 1

Концепция, показанная на рис. 1, включает в себя два основных уровня: уровень производственного оборудования и киберуровень, связанные интерфейсом. Производственное оборудование обладает собственным интеллектом, в то время как общесистемный интеллект обеспечивается киберуровнем.

Интеллектуальное производство привлекло внимание промышленности, правительственных организаций и научных кругов. Были сформированы различные консорциумы и дискуссионные группы для разработки архитектур, дорожных карт, стандартов и программы исследований [3].

### Основы интеллектуального производства

Интеллектуальное производство было вдохновлено концепциями, в значительной степени разработанными в области вычислительной техники. Хотя производство по-прежнему будет извлекать выгоду из этих концепций и других идей, которые появятся (например, квантовые вычисления могут стать серьезным прорывом) [4], у него есть своя специфика, отраженная в шести основных принципах, которые представлены на рис. 2. Они не являются ни исчерпывающими, ни стационарными. Основные принципы будут определяться исследованиями, разработкой технологий и приложениями, которые появятся в будущем. Конечные элементы могут быть формально определены несколькими способами, включая группировку исследовательских работ, промышленных отчетов и информации о новых технологиях с использованием алгоритмов текстового и интеллектуального анализа данных [5].



Рисунок 2

Шесть столпов интеллектуального производства – это производственные технологии и процессы, материалы, данные, проектирование с учетом прогнозов, устойчивое развитие, совместное использование ресурсов и создание сетей. Названия и степень важности этих шести принципов менялись, однако они были присущи производству на протяжении всей его истории. Например, данные были неотъемлемой частью производства. В эпоху интеллектуального производства они превратилось в большие данные. Далее подробно рассматриваются шесть основных принципов интеллектуального производства.

### 1. *Производственные технологии и процессы*

В недалеком будущем ожидается появление производственных технологий и процессов. Появятся новые материалы, компоненты и продукты [6]. Аддитивное производство может служить примером новой технологии, которая подтолкнула к разработке новых материалов, повлияла на разработку и производство продуктов и открыла двери для новых отраслей, таких как биопроизводство [7]. Производственные инструменты были разработаны для интеграции различных операций, например, станки, способные выполнять горизонтальное и вертикальное фрезерование, а также сверление (обрабатывающий центр). Появятся новые комбинированные процессы, например, гибриды традиционных и аддитивных процессов, лазерное производство и изготовление сетчатой формы. Аддитивное производство на больших и малых площадях расширит свое присутствие на заводах. Новое поколение недорогих роботов повысит уровень автоматизации производства. Датчики и возможности программного обеспечения сделают новое производственное оборудование более адаптивным и совместимым с заводскими и внешними коммуникациями [8].

### 2. *Материалы*

Интеллектуальное производство не требует особой разработки материалов, например, сплавов с памятью формы или функционально дифференцированных ресурсов. Вполне возможно, что «умные» материалы и продукты будут развиваться своими собственными путями [9]. Интеллектуальное производство открыто для всех типов ресурсов, включая органические и биоматериалы, необходимые для производства будущих продуктов. Важность извлечения материалов из изделий в

конец их жизненного цикла будет возрастать [10]. Вполне возможно, что свалки превратятся в новые шахты по добыче различных ресурсов. Некоторые новые материалы потребуют новых технологических процессов, которые должны быть разработаны и внедрены в интеллектуальное производство. Само по себе аддитивное производство внесет большой вклад в поиск новых материалов и их смесей [11].

### *3. Данные*

Мы являемся свидетелями возрождения использования данных в производстве. Отчасти это было вызвано внедрением датчиков, беспроводных технологий и прогрессом в области анализа данных. Появился более широкий сбор данных из различных источников, начиная от свойств материалов и технологических параметров и заканчивая заказчиками и поставщиками. Эти данные будут использоваться для обеспечения работы любого предполагаемого приложения, включая построение прогностических моделей. Более того, это будет лучший источник для сохранения прошлой и извлечения новой информации, связанной с производством [12].

### *4. Разработка прогнозов*

Предиктивный инжиниринг – это одно из последних дополнений в области производственных решений, которое приведет к созданию предприятия, ориентированного скорее на прогноз, чем на реактивное производство [13]. Так, традиционно обрабатывающая промышленность сосредоточена на использовании данных для анализа, мониторинга и контроля, например, анализа производительности, мониторинга технологических процессов и контроля качества. Прогнозирующая инженерия предлагает новую парадигму построения высокоточных моделей (цифровых представлений) интересных явлений. Такие широкомасштабные модели могут способствовать реструктуризации. Вполне возможно, что некоторые производства станут сильно распределенными, а некоторые могут быть централизованы. Например, продукция, чувствительная к стоимости транспортировки, срокам выхода на рынок и индивидуализации, может производиться в местах, расположенных в непосредственной близости от потребителей [14].

### *5. Устойчивое развитие*

Экологичность будет иметь первостепенное значение в производстве. Целями усилий по обеспечению устойчивого развития будут материалы, производственные процессы, энергия и загрязняющие вещества, связанные с производством. Отправными точками являются продукт и рынок. Нет сомнений в том, что наибольшие выгоды достигаются тогда, когда разработка осуществляется в соответствии с критериями устойчивого развития. Из-за устойчивости грань между производством и обслуживанием останется размытой. Например, восстановление использованного изделия не является традиционной промышленной деятельностью, однако оно может войти в новый производственный словарь [15].

### *6. Разделение ресурсов*

Поскольку производство становится виртуальным, большая часть творческой деятельности и принятия решений будет осуществляться в цифровом

пространстве. Такое цифровое и физическое разделение позволит совместно использовать ресурсы между предприятиями, в том числе конкурирующими [16].

Обработывающая промышленность столкнулась с моделями обслуживания и контрактов, при которых производство осуществляется на предприятиях, управляемых третьей стороной. Сервисная модель быстрого прототипирования (*Rapid manufacturing*) была создана десятилетия назад в результате высокой стоимости технологии, низкого уровня использования, кривой обучения и неопределенности в отношении полезности технологии. Модели совместного использования ресурсов добились успеха и расширяются: от совместных поездок, направленных на сокращение трафика на шоссе, до «Uber» в сфере транспорта и «Airbnb» в сфере услуг по размещению. Интеллектуальное производство, вероятно, выиграет от этих концепций для совместного использования производственного оборудования, программного обеспечения, экспертных знаний и, самое главное, пространства для совместного моделирования и творчества [17].

### Погрузочно-разгрузочные работы и транспортировка

Обработка материалов и транспортировка являются неотъемлемыми функциональными областями производства, включающими расстояния, измеряемые в масштабе от нанометров до километров. Термин «погрузочно-разгрузочные работы» обычно используется для описания перемещения материалов, компонентов и изделий по цепочкам поставок, охватывающим регионы, страны и континенты. Обработка материалов и транспортировка могут вносить значительный вклад в ценовую характеристику продукта, например, 8% стоимости башни ветряной турбины приходится на транспортировку [18], а более высокий процент (например, 20%) – на другие компоненты.

Вполне вероятно, что из-за распределенного характера производства транспортировка материалов, компонентов, изделий и людей станет значительной частью затрат в производстве. Это, естественно, приведет к оптимизации расходов на транспортировку и использование персонала, поддерживающего физическую и цифровую инфраструктуру на нескольких производственных объектах. А эффективность транспортировки материалов, компонентов, изделий и людей повлияет на стоимость производства. Транспортные сети, включающие в себя снабжение и дистрибуцию (включая доставку клиентам), подобные той, что показана на рис. 3, вероятно, будут играть значимую роль. Ограничение рассмотрения вопросов устойчивости рамками производства привело бы к неоптимальному решению из-за взаимосвязи производства с поставками и распределительными сетями. Качество обслуживания клиентов тесно связано с уровнем запасов, временем реагирования производства и транспортировкой [19].



Рисунок 3

## Умные транспортные средства

Многие погрузочно-разгрузочные и транспортные средства, работающие сегодня, отправляют и получают данные. Подключение транспортных средств к общим сетям станет более интенсивным, благодаря активному участию в обмене информацией, например, для связи между транспортными средствами или с центром их технического обслуживания для удаленной диагностики и ремонта.

Круг транспортных технологий на рис. 4 классифицирует транспортные средства в зависимости от их типа, топлива и автономности и использования. Регистрируются транспортные средства, основанные на любой комбинации характеристик, например, очевидно, что они могут быть автономными и электрическими. Это относится к системам погрузочно-разгрузочных работ, личным автомобилям, грузовикам и общественному транспорту. Похоже, что технология естественным образом тяготеет к тому, чтобы связать понятия транспорта, энергетики и устойчивого развития с производством. Транспортное средство любого типа, например, вилочный погрузчик, легковой автомобиль, грузовик или поезд дальнего следования могут быть электрическими и автономными. Кроме того, транспортные средства можно было бы использовать совместно [20].



Рисунок 4

Помимо автономности, транспортные средства становятся все более надежными. Прогностические инженерные решения позволят предвидеть будущие события, начиная от компонента транспортного средства, который может нуждаться в ремонте, и заканчивая потенциальной аварией. Бортовая система принятия решений предложит наилучшие варианты действий, чтобы избежать поломки компонента или несчастного случая, влияющего на сроки поставки. Обо всех сбоях будет сообщаться производственным предприятиям, которые могут пострадать в результате транспортировки.

Для поддержки цепочек поставок и распределения продукции будут использоваться различные формы и виды транспорта. Вероятно, для перевозки специалистов, обслуживающих производственные системы, а также материалов, деталей и изделий будет применяться общий вид транспорта [21].

## Будущее интеллектуального производства

Интеллектуальное производство открывает новые возможности и ставит новые задачи. Самая большая проблема заключалась бы в принятии формирующейся производственной реальности и перемен. Новая волна автоматизации будет поддерживаться следующим поколением недорогой робототехники. Одно это приведет к созданию новых «кибер» рабочих мест, а не традиционных. «Кибернетическая» часть «умной фабрики» сама по себе является

предприятием внутри предприятия с определяемыми должностными инструкциями и рабочей силой, подлежащей обучению [22].

Некоторые характеристики будущего производства отражены в десяти предположениях, изложенных далее. Для каждой гипотезы приводится краткое обоснование. Эти предположения призваны отразить суть интеллектуального производства. Некоторые из них могут подтвердиться или стать менее заметными или даже отброшенными со временем, при этом могут сформироваться новые гипотезы. Они, вероятно, улучшат понимание основных производственных проблем, а также выявят тенденции и изменения, влияющие на интеллектуальное производство.

#### *Гипотеза 1: Цифровизация производства*

Производство будет все больше зависеть от данных, что подразумевает необходимость сбора большего их количества. Более широкое использование данных уже происходит во многих секторах обрабатывающей промышленности. Одной из практик, от которой могло бы извлечь выгоду производство, является ветроэнергетика, где используются системы диспетчерского управления и сбора данных (*Supervisory Control And Data Acquisition, SCADA*) для хранения больших объемов данных о параметрах технологического процесса. Решения *SCADA* предлагают удобный способ сбора, хранения и совместного использования технологических данных.

#### *Гипотеза 2: Возросшая зависимость от моделирования, оптимизации и симуляции*

Растущий объем данных (гипотеза 1) в интеллектуальном производстве естественным образом откроет двери для извлечения выгоды из данных. Подходы к моделированию, основанные на данных, получают все большее распространение, поскольку они позволяют интегрировать параметры из различных областей (например, продукта, процесса и логистики) в модели, которые было бы трудно построить с помощью традиционных методологий. Динамические прогностические модели будут часто использоваться в интеллектуальном производстве. Виртуальная, дополненная реальность и прогностические модели получат широкое распространение.

#### *Гипотеза 3: Феномен «Материал-продукт-процесс»*

Число экземпляров, в которых одновременно разрабатываются новый материал, технологический процесс и продукт, будет расти. Некоторые из прошлых инноваций имели место, когда новый материал и технологический процесс создавались одновременно. Вполне вероятно, что в будущем разработка материалов, процессов и изделий приведет к инновациям, например, модель детали, напечатанной на 3D-принтере, будет оптимизирована в сочетании с новым материалом и технологическим процессом.

#### *Гипотеза 4: Вертикальная делимость физических активов и киберпространства*

На многих интеллектуальных предприятиях физический уровень и уровень логистики будут спроектированы таким образом, чтобы обеспечить простоту и скорость подключения устройств друг к другу. Растущая потребность в настройке и реконфигурации физических ресурсов для лучшей поддержки меняющихся потребностей в продуктах, поддерживаемых расширяющейся цифровизацией и

стандартизацией, приведет к появлению новых системных архитектур. Новая архитектура будет характеризоваться простотой вертикального разделения физического и кибернетического уровней предприятия.

*Гипотеза 5: Корпоративная дихотомия*

Вероятно, появятся две экстремальные модели интеллектуального предприятия: одна, в которой физические активы и логистика тесно связаны (гипотеза 3), а другая – с вертикальной делимостью двух уровней (гипотеза 4). Модели жесткой вертикальной связности или вертикальной делимости (дихотомия) могут возникнуть согласно описанию гипотез 3 и 4 соответственно.

*Гипотеза 6: Большая горизонтальная связность и интероперабельность*

Степень горизонтальных внутренних и внешних связей и интероперабельности интеллектуальных производственных предприятий будет возрастать. Это будет обусловлено необходимостью реконфигурации физических и логистических активов внутри и между различными предприятиями. Стандартизация будет способствовать этому на обоих уровнях. Растущий объем и скорость потока данных на современном предприятии естественным образом приведут к внедрению решений, поддерживающих более широкие горизонтальные связи и интероперабельность систем, обеспечивающих поток данных.

*Гипотеза 7: Совместное использование ресурсов*

Совместное использование производственных и транспортных ресурсов в рамках производственных цепочек вполне может стать повсеместной практикой. Беспрецедентная степень горизонтальной взаимосвязанности интеллектуальных предприятий (гипотеза 6) в сочетании с динамикой рынков облегчит совместное использование производственного оборудования, транспорта и других ресурсов. Инновации в области производственного оборудования могли бы выиграть от совместного использования ресурсов, поскольку компании могут приобретать оборудование, основываясь на явном предположении, что оно будет общим.

*Гипотеза 8: Автономность мониторинга, диагностики и ремонта оборудования*

Диагностика и прогнозирование неисправностей оборудования станут рутинной активностью в интеллектуальном производстве. В некоторых случаях может потребоваться автоматический ремонт. Мониторинг оборудования генерирует данные (гипотеза 1), поддерживающие диагностические модели (гипотеза 2), применяемые для мониторинга и прогнозирования состояния работоспособности оборудования и систем. Предотвращение возникновения неисправностей и предвидение будущих сбоев может стать обычной практикой.

*Гипотеза 9: Стандартизация и сотрудничество*

Совместная разработка стандартов может естественным образом возникнуть для удовлетворения возникающих потребностей в интеграции и взаимосвязанности предприятий. Растущая зависимость от данных (гипотеза 1), совместное использование ресурсов (гипотеза 7) и потребность в вертикальной делимости (гипотеза 4) и горизонтальной связности и интероперабельности (гипотеза 6) будут стимулировать потребность в стандартизации и сотрудничестве. Сложность решаемых задач, вероятно, повысит эффективность сотрудничества. Было бы полезно иметь параметрические стандарты, отражающие готовность предприятия к горизонтальным и вертикальным связям и интероперабельности.



Основываясь на этих показателях, предприятию может быть присвоен класс, например, предприятие класса 4 (из пяти классов) может легко вести бизнес с любыми другими предприятиями класса 4 или ниже. Такой стандарт ускорил бы реконфигурируемость и интеграцию предприятия.

#### *Гипотеза 10: Кибербезопасность и сохранность*

Вопросы кибербезопасности останутся проблемой, требующей постоянного отслеживания и быстрых решений. Растущие объемы и зависимость от данных (гипотеза 1) делают кибербезопасность первостепенной для прогресса в области интеллектуального производства и конкурентоспособности бизнеса. Это особенно важно, поскольку информационные активы станут растущим показателем рыночной стоимости компании. Растущая степень автоматизации и автономности систем повысит важность безопасности людей и машин. Решения для мониторинга состояния и системы оповещения (гипотеза 8) приобретут все большее значение. Фактически, можно изучить общность между решениями, разработанными для диагностики оборудования и обеспечения кибербезопасности.

#### **Ускорение трансформации интеллектуального производства**

Жизнеспособный подход к повышению эффективности преобразования производства заключается в широкомасштабном сотрудничестве по ключевым вопросам, относящимся к отраслям, оказывающим наибольшее влияние на общество. Создание открытой платформы разработки с участием ключевых отраслей промышленности могло бы обеспечить такое сотрудничество, включая разработку моделей, управляемых данными. Как и в любом совместном предприятии, необходимо преодолеть доверие и разглашение информации. Получение более глубокого представления о доверии на платформах меньшего масштаба стало бы первым шагом к решению проблемы обмена информацией и знаниями. Моделирование в различных масштабах необходимо для привлечения промышленности, малой и крупной, к общему предмету сотрудничества. Крайне важно обеспечить, чтобы малые и средние предприятия присоединились к крупным корпорациям. Степень вовлеченности малого и среднего бизнеса в проектирование предприятия будущего неодинакова по всему миру. В то время как предпринимательские инициативы малого бизнеса в целом преобладают в Соединенных Штатах. Азия и Европа проявляют больше интереса к вопросам, влияющим на функционирование малого бизнеса. Для достижения прогресса необходимы разнообразие идей, культур, потребностей и открытость [23].

#### **Заключение**

Концепция автоматизированных фабрик была представлена десятилетия назад. В целом, отрасль продолжает стремиться к тотальной автоматизации, но этому препятствует множество факторов. Нет никаких сомнений в том, что некоторые «умные» фабрики будут высоко автоматизированы. Однако интеллектуальное производство – это не только степень автоматизации производственного цеха, речь идет об автономии, эволюции, моделировании и оптимизации производственного предприятия. Объем и временные рамки будут зависеть от доступности данных и инструментов. Уровень «умности» производственного предприятия будет определяться степенью отражения физического предприятия в киберпространстве. В статье проанализированы основные аспекты умного производства, а также описаны предположения относительно дальнейших направлений развития индустрии будущего.

## Литература

1. Chun Y., Bidanda B. Sustainable Manufacturing and the Role of the International Journal of Production Research // *International Journal of Production Research* 51 (23-24), 2013. – P. 7448-7455.
2. Cotrell J., Stehly T., Johnson J., Roberts J.O., Parker Z. Analysis of Transportation and Logistics Challenges Affecting the Deployment of Larger Wind Turbines: Summary of Results, US Department of Energy, Technical Report NREL/TP-5000-61063, 2014.
3. Groumpos P.P. The Challenge of Intelligent Manufacturing Systems (IMS): The European IMS Information Event // *Journal of Intelligent Manufacturing*, 1995. – № 6 (1). – P. 67-77.
4. Helu M., Libes D., Lunell J., Lyons K. and Moris K.C. Enabling Smart Manufacturing Technologies for Decision-Making Support // *Proceedings of the ASME 2016 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference IDETC/CIE*, Charlotte, NC. 1-10. August 21-24, 2016.
5. Ivanov D., Dolgui A., Sokolov B., Werner F. and Ivanova M.A Dynamic Model and an Algorithm for Short-term Supply Chain Scheduling in the Smart Factory Industry 4.0 // *International Journal of Production Research*, 2016. – № 54 (2). – P. 386-402.
6. Kan H. S., Lee J.Y., Choi S.S., Kim H., Park J.H. and Son J.Y. Smart Manufacturing: Past Research, Present Findings, and Future Directions // *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 2016. – № 3 (1). – P. 111-128.
7. Kim Y.-H., H.-B. Chang. The Industrial Security Management Model for SMBs in Smart Work // *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2014. – № 25 (2). – P. 319-327.
8. Macke N., Rulhoff S. and Stjepandic J. Advances in Smart Manufacturing Change Management // *In Transdisciplinary Engineering: Crossing Boundaries*, 2014. – P. 318-328, 2014 IOS Press, (open access publication). DOI: 10.3233/978-1-61499-703-0-318.
9. Moon J.-Y., Park J. Smart Production Scheduling with Time-dependent and Machine-dependent Electricity Cost by Considering Distributed Energy Resources and Energy Storage // *International Journal of Production Research*, 2014. – № 52 (13). – P. 3922-3939.
10. Zhang L., Luo Y.-L., Ta F., Li B.-H., Ren L. and Zhang X. Cloud Manufacturing: A New Manufacturing Paradigm // *Enterprise Information Systems*, 2014. – № 8 (2). – P. 167-187.
11. Thoben K.-D., Wiesner S. and Wuest T. «Industrie 4.0» and Smart Manufacturing – A Review of Research Issues and Application Examples // *International Journal of Automation Technology*, 2017. – № 11 (1). – P. 4-16.
12. Wei W, Zhou F, Liang P.F. Product platform architecture for cloud manufacturing. *Adv Manuf*, 2020. – № 8. – P. 331-343.
13. Baumann F., Kopp O., Roller D. Abstract API for 3D printing hardware and software resources. *Int J Adv Manuf Tech* 92, 2017.
14. Xu X. From cloud computing to cloud manufacturing. *Robot Comput Integr Manuf*, 2017. – № 28 (1). – P. 75-86.
15. Battleson D.A., West B.C., Kim J., Ramesh B., Robinson P.S. Achieving dynamic capabilities with cloud computing: An empirical investigation. *Eur J Inf Syst*, 2016. – № 25 (3). – P. 209-230.
16. Brant A., Sundaram M.M. A novel system for cloud-based micro additive manufacturing of metal structures. *J Manuf Process*, 2015. – № 20. – P. 478-484.
17. Rudolph J.P., Emmelmann C. A cloud-based platform for automated order processing in additive manufacturing. *Procedia Cirp*, 2017. – № 63. – P. 412-417.

18. Bai T., Liu S., Zhang L. A manufacturing task scheduling method based on public goods game on cloud manufacturing model. In 2018 4th Int Conf Unv Vlg 23 (UV), 2018. – pp. 1-6.
19. Tao F., Zhang L., Nee AYC, Pickl S.W. Editorial for the special issue on big data and cloud technology for manufacturing, 2016.
20. Yigit M., Gungor V.C., Baktir S. Cloud computing for smart grid applications. *Comput Netw*, 2014. – № 70. – P. 312-329.
21. Loeser F., Recker J., Brocke J.V., Molla A., Zarnekow R. How IT executives create organizational benefits by translating environmental strategies into Green IS initiatives. *Inf Syst J*, 2017. – № 27 (4). – P. 503-553.
22. Fiert E., Bohmann T., Korthaus A., Conger S., Gable G. Service management and engineering in information systems research. *J Strateg Inf Syst*, 2013. – № 22 (1). – P. 46-50.
23. Giessmann A., Legner C. Designing business models for cloud platforms // *Inf Syst J*, 2016. – № 26 (5). – P. 551-579.