



Научная статья
УДК 330.46
EDN CMYLVLP

Экономическая составляющая постулатов построения синтетических нервных систем

Дмитрий Анатольевич Жердин¹, Антон Геннадиевич Дмитриев²

^{1,2}Московский университет «Синергия», Москва, Россия

¹zherdin@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0003-4323-2979>

²admitriev@synergy.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2086-2364>

Аннотация

Введение. Цифровая экономика, курс на строительство которой взяла Российская Федерация, состоит из набора автоматизированных систем управления, от эффективности каждой из которых зависит эффективность всей цифровой экономики. Поэтому одной из главных задач, которые нужно решить на пути к ее построению, является создание принципиально новой, экономически эффективной архитектуры построения автоматизированных систем управления.

Настоящая научная работа преследует фундаментальную **цель** – систематизировать и четко сформулировать постулаты конструирования систем автоматизированного управления на базе синтетических нервных систем. Это логическое продолжение цикла публикаций авторов, посвященных всесторонней оценке экономической эффективности указанного подхода к разработке систем автоматизированного сбора данных и управления всевозможными процессами. Достижение заявленных экономических преимуществ, детально проанализированных в предшествующих исследованиях, становится возможным исключительно при строгом и неукоснительном соблюдении этих постулатов; их нарушение полностью нивелирует или существенно снижает положительный экономический эффект от внедрения концепции синтетических нервных систем.

Методы. Методологическая основа исследования включает систематический и всеобъемлющий анализ обширного массива технической и научной литературы, посвященной разработке и оптимизации автоматизированных систем управления, а также информационных источников по строению нервных систем живых организмов. На базе этого анализа авторы консолидировали выявленные принципы в унифицированную номенклатуру «постулаты построения синтетических нервных систем», обеспечивая детальное описание каждого постулата с примерной оценкой сопутствующего экономического воздействия. Подход опирается на простые, но универсальные инженерные практики, которые, несмотря на их очевидность для специалистов, ранее отсутствовали в четкой и консолидированной формулировке в доступных публикациях.

Результаты. В качестве ключевого результата сформулированы постулаты, позиционируемые как фундаментальные директивы и императивы проектирования. Тщательное усвоение и применение постулатов объявляется обязательным для каждого инженера-интегратора автоматизированных систем управления, гарантируя достижение экономической эффективности систем автоматизации. Сформулированные постулаты не вызовут удивления среди квалифицированных специалистов благодаря их очевидной логической простоте и практической обоснованности.

Выводы. Синтетические нервные системы являются новым направлением развития автоматизированных систем управления. РФ могла бы стать лидером в их производстве и родиной данной технологии. Очевидно, что экономика будущего – это не цифровая экономика и даже не экономика знаний, а прежде всего – экономика высоких, наукоемких технологий. Один из способов, как РФ может добиться успеха в мире экономического будущего – это находить новые, более эффективные методы использования доступных ей технологий, пусть даже иностранных. Развитие технологии синтетических нервных систем – один из таких путей.

Ключевые слова: экономическая эффективность, цифровая экономика, экономика знаний, экономика технологий, бионика, нейробионика, технобионика, бионические АСУ, нервные системы, синтетические нервные системы, нервные системы беспозвоночных, искусственные нервные системы, физические нейронные сети

Для цитирования: Жердин Д. А., Дмитриев А. Г. Экономическая составляющая постулатов построения синтетических нервных систем // Государственное и муниципальное управление. Ученые записки. 2026. № 1. С. 64–87. EDN CMYLV

Original article

The economic component of the principles of building synthetic nervous systems

Dmitry A. Zherdin¹, Anton G. Dmitriev²

^{1,2}Moscow University "Synergy", Moscow, Russia

¹zherdin@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0003-4323-2979>

²admitriev@synergy.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2086-2364>

Abstract

Introduction. The digital economy, which the Russian Federation has embarked on, consists of a set of automated control systems, the effectiveness of each of which determines the effectiveness of the entire digital economy. Therefore, one of the main tasks that needs to be solved on the way to its construction is the creation of a fundamentally new, cost-effective architecture for building automated control systems.

Purpose. This scientific study pursues the fundamental objective of systematizing and precisely formulating the postulates for constructing automated control systems (ACS) based on synthetic nervous systems (SNS). It represents a logical extension of the authors' publication series dedicated to a comprehensive assessment of the economic efficiency of this paradigm in developing data acquisition automation and process control systems. The proclaimed economic advantages, thoroughly analyzed in prior research, are attainable exclusively through strict and unwavering adherence to these postulates; their violation entirely nullifies or substantially diminishes the positive economic effect of SNS implementation.

Methods. The methodological foundation encompasses a systematic and comprehensive analysis of an extensive corpus of technical and scientific literature on ACS development and optimization. Building on this, the authors consolidated the identified principles under the unified designation "SNS construction postulates", providing detailed descriptions of each alongside quantitative evaluations of their economic impacts. The approach leverages simple yet universal engineering practices, which despite their evident nature to specialists have previously lacked clear and consolidated formulation in available publications.

Results. As the key result, postulates are formulated, positioned as fundamental directives and imperatives of design. Thorough assimilation and application of the postulates is declared mandatory for every automation system integration engineer, guaranteeing the achievement of economic efficiency in automation systems. The formulated postulates will not surprise qualified specialists due to their obvious logical simplicity and practical validity.

Conclusions. Synthetic nervous systems are a new direction in the development of automated control systems. Russia could become a leader in their production and the birthplace of this technology. It is obvious that the economy of the future is not a digital economy or even a knowledge economy, but, above all, an economy of high, knowledge-intensive technologies. One of the ways the Russian Federation can succeed in the world of the economic future is to find new, more effective methods of using the technologies available to it, even if they are foreign. The development of synthetic nervous system technology is one such way.

Keywords: economic efficiency, digital economy, knowledge economy, technology economy, bionics, neurobionics, technobionics, bionic automated control systems, nervous systems, synthetic nervous systems, invertebrate nervous systems, artificial nervous systems, physical neural networks.

For citation: Zherdin D. A., Dmitriev A. G. The economic component of the principles of building synthetic nervous systems. *State and Municipal Management. Scholar Notes*. 2026;(1):64–87. (In Russ.). EDN CMYLVF

Введение

Построение цифровой экономики, а тем более экономики знаний, невозможно без технологической независимости. Технологическая зависимость от других стран не позволит вырваться в лидеры экономического роста и готовит для такой экономики судьбу вечно догоняющего, бегущего вприпрыжку за форвардами, лишь иногда настигая их, ценой невероятных усилий. Всем известное высказывание «мы всё купим, нам ничего не нужно» (Гайдар Е.Т., 1993 г.) не отражает реальность. Купить можно только то, что продают, но ни одна страна не будет продавать другой технологии, которые делают ее лидером экономического роста.

Российская Федерация должна отказаться от политики копирования иностранных технологий, такая политика не позволит стать экономически самодостаточной страной. Иллюзия, что, работая по американским стандартам, можно достичь технологической независимости. Такая работа – это всегда работа по указке из-за океана, т.к. американские промышленные стандарты пишутся именно там.

В современном мире даже несложная технология – это прежде всего электронная составляющая. Изготовление высокотехнологичных изделий вообще не возможно без сложного цифрового управления. Однако электронная начинка – это еще и серьезная часть себестоимости изделия. Построение цифровой экономики (основной рабочей единицей которой является автоматизированная система [1]) на супер дорогих электронных компонентах – дело бесперспективное. Такая экономика не выдержит конкуренции со странами, в которых доступ к цифровым системам гораздо дешевле. Не секрет, что страны производят высокотехнологичную продукцию, прежде всего, для своего внутреннего рынка¹, на экспорт уходят неключевые, устаревшие технологии, которые уже не представляют внутреннего интереса².

В этой связи РФ необходимо искать пути удешевления технологий, на основе которых строится цифровая экономика. Так как своей современной электронной промышленности в РФ нет³, повысить конкурентоспособность электронных изделий, созданных на сборочных производствах из иностранных комплектующих, можно только за счет разработки уникальных компоновок этих электронных компонентов. Подобный положительный опыт у нашей страны существует. В пример можно привести вычислительные машины, создаваемые в СССР на базе

¹ Глобальный инновационный индекс 2025. Рейтинг 100 лучших инновационных кластеров [Электронный ресурс] : GII 2025 clusters top 100 ranking / Всемирная организация интеллектуальной собственности (ВОИС). – Женева : WIPO, 2025. – Режим доступа: <https://www.wipo.int/documents/d/global-innovation-index/docs-en-2025-gii-2025-clusters-top100-ranking.pdf> (дата обращения: 21.12.2025).

² В 2024 году рост экспорта высокотехнологичной продукции составил 9%, но на фоне торговой напряженности наступает неопределенность [Электронный ресурс] // Всемирная организация интеллектуальной собственности (ВОИС). – 2025. – 31 марта. – Режим доступа: <https://www.wipo.int/ru/web/global-innovation-index/w/blogs/2025/high-tech-exports> (дата обращения: 21.12.2025).

³ Стратегия развития электронной промышленности Российской Федерации на период до 2030 года : утв. распоряжением Правительства РФ от 17 января 2020 г. № 20-р [Электронный ресурс] // Правительство Российской Федерации. – 2020. – Режим доступа: <http://government.ru/docs/38795/> (дата обращения: 21.12.2025).

иностранных комплектующих, вычислительная мощность которых превышала все существующие на тот момент зарубежные ЭВМ [2]. Стоит упомянуть, что постановление ЦК КПСС и Совмина СССР от 30 декабря 1967 г. «О развитии производства средств вычислительной техники» [3], после которого был провозглашен отказ от разработки собственных архитектур ЭВМ и ориентация на закупку компьютеров IBM, не был отменен до распада СССР.

Как говорилось выше, цифровая экономика (ЦЭ), курс на строительство которой взяло наше государство¹, состоит из набора автоматизированных систем, от эффективности каждой АСУ, зависит эффективность всей цифровой экономики [4]. Поэтому одной из главных задач, которые нужно решить на пути к построению ЦЭ, является создание принципиально новой, экономически эффективной архитектуры построения автоматизированных систем управления. Традиционный подход построения АСУ на основе промышленных контроллеров на текущий момент является очень дорогим, сложным и экономически неэффективным решением [5; 6; 7].

Материалы и методы

В настоящей работе описан бионический принцип построения автоматизированных систем, рассмотренный у природы. Представленный способ управления используется живой природой в простых нервных системах беспозвоночных организмов. Причина, по которой в качестве бионического аналога АСУ были выбраны именно беспозвоночные виды организмов, заключается в том, что нервные системы этих существ относительно просты и по своей структуре очень похожи на автоматизированные системы управления, создаваемые человеком, но более совершенны. Так, например, нервная система широко известного подопытного червя нематоды *Caenorhabditis elegans*, содержит всего 302 нейрона и около пяти тысяч связей между ними [8]. В тоже время если взять достаточно крупное промышленное предприятие, то можно обнаружить те же несколько сотен промышленных контроллеров, на которых строится автоматизация процессов управления на данном предприятии. Нервную систему всем известной кишечнорастной гидры составляют около 5000 нейронов [9], что можно сравнить, например, с автоматизированной системой управления светофорами крупного города. Однако в базовых принципах построения и функционирования нервных систем и автоматизированных систем, создаваемых человеком, имеются существенные различия. Естественно, экономическая эффективность и функциональность нервных систем намного превышает таковую в АСУ. За 650 миллионов лет эволюции [10] нервная система стала идеальным инструментом для управления живым организмом. Почему до сих пор принципы, заложенные эволюцией в нервных системах, широко не используются человеком на практике, остается загадкой. Важно понимать, что речь здесь идет именно о «**нервных системах**», которые относятся к аппаратной составляющей АСУ (hard), но не о «**нейронных сетях**», являющихся программным обеспечением (soft). Нейронные сети давно и успешно используются человеком, но никакого отношения к реальным нервным системам это программное обеспечение не имеет [11; 12]. Нервные системы живых организмов обладают множеством преимуществ по сравнению с традиционными методами автоматизированного управления, применяемыми на практике человеком.

Результаты исследования

Опишем основные преимущества и сформулируем постулаты построения искусственных (синтетических) нервных систем (далее – СНС), опишем важность этих постулатов с экономической точки зрения для создания экономически эффективных бионических автоматизированных систем управления.

Начнем с системы связей компонентов нервной системы в единое целое. Нервная система имеет древовидную иерархическую структуру связей между нейронами, позволяющую уместить большой объем соединительных линий в небольшом объеме тела живого организма. Древовидная топология позволяет сделать минимально возможной длину каналов связей между нейронами, рецепторами, мышечными и секреторными клетками организма [13]. Традиционный подход

¹ Об утверждении программы «Цифровая экономика Российской Федерации»: постановление Правительства РФ от 7 января 2019 г. № 1 [Электронный ресурс] // Правительство Российской Федерации. – 2019. – Режим доступа: <http://government.ru/docs/35337/> (дата обращения: 21.12.2025).

при построении АСУ подразумевает использование топологии связей звезда, общая шина или, в редких случаях, снежинка. Длина линии связи в данных топологиях всегда больше, чем в древовидной иерархической структурированной кабельной системе. Проведем наглядный эксперимент. Соединим на рисунке ряд объектов, расположенных на одних и тех же местах в двумерном пространстве, используя три разные топологии связей: общая шина, звезда и дерево с трихотомическим ветвлением (рис. 1).

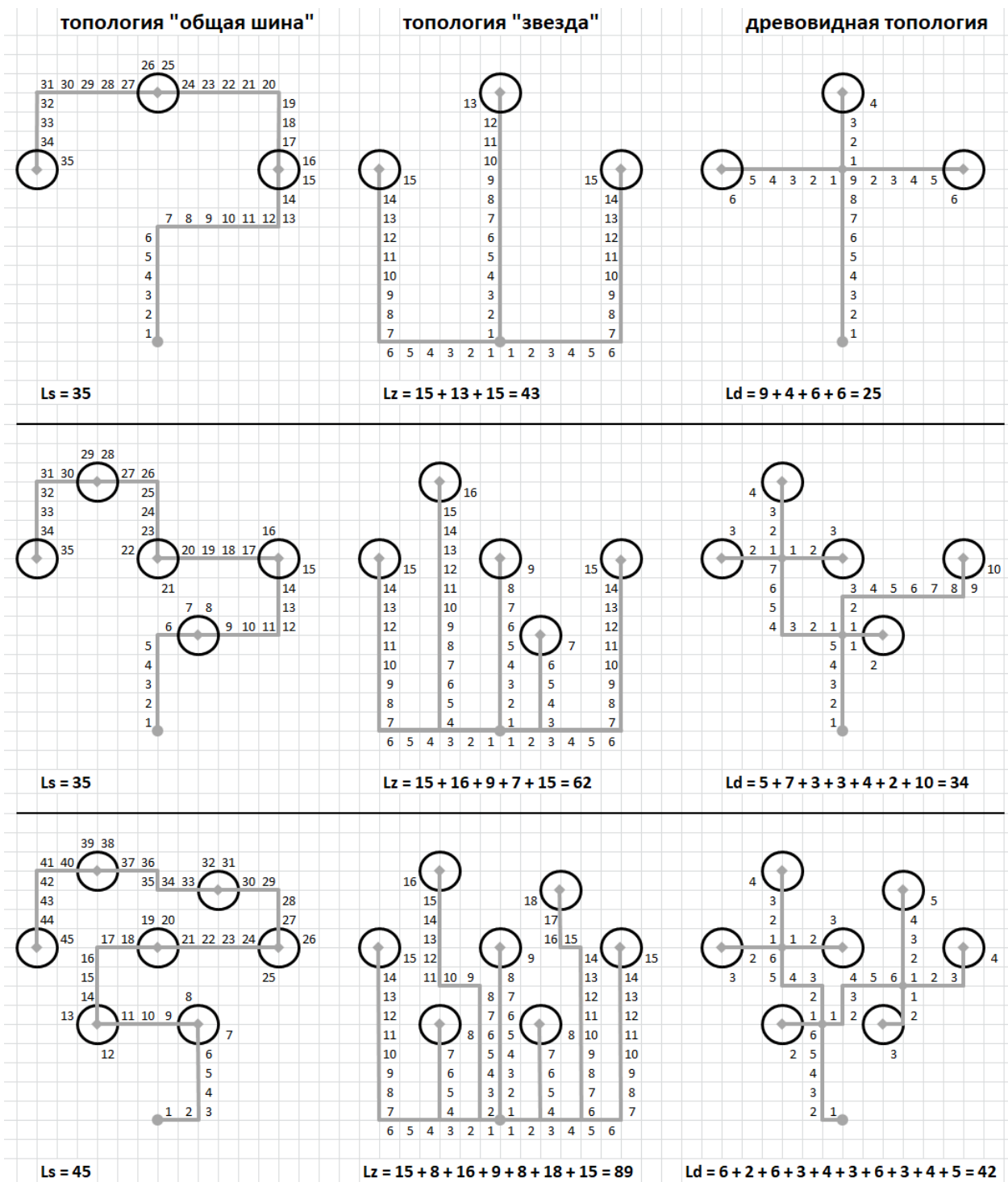


Рис. 1. Соединение объектов кабельными топологиями «общая шина», «звезда» и «дерево» (составлено авторами)

Fig. 1. Connection of objects using the "bus", "star", and "tree" cable topologies (compiled by the authors)

Посчитаем общие длины получившихся отрезков (L_s , L_z , L_d) от точки начала кабельной системы. Очевидно, что какую бы конфигурацию расположения объектов в топологиях «звезда» (L_z) и «общая шина» (L_s) мы не выбрали, в древовидной топологии найдется наименьшая общая длина отрезков (L_d), соединяющих объекты с точкой начала кабельной системы. Учитывая результаты, удивительным является тот факт, что топологии «звезда» и «общая шина» являются наиболее часто используемыми в АСУ. Реальные кабельные системы приходится проводить не на плоскости, а в трехмерном пространстве (по стенам, потолкам и полам), что приводит к еще большему удлинению и увеличению стоимости кабельной системы.

В настоящее время (на 2025 год) глобально производится около 27 млн тонн рафинированной меди в год, примерно 70 % которой перерабатывается в кабельную продукцию¹, порядка 50 % от всех произведенных проводов потенциально может быть использовано при создании АСУ². Естественно, переход на кабельную систему, потребляющую меньшее количество проводов, даст значительную финансовую экономию. Посчитать точную экономию кабельной продукции при создании АСУ на древовидной топологии достаточно сложно, так как она зависит от конфигурации расположения и насыщенности АСУ устройствами автоматизации. Некоторые эксперименты [14, с. 165] показывают экономию около 60 %. Исходя из этого, можно примерно посчитать общую экономию тонн меди в мировом масштабе:

$$Ec = Ct \times \frac{Wt \times Wa \times Ew}{100^3} = 27\,000\,000 \times \frac{70\% \times 50\% \times 60\%}{100^3} = 5\,670\,000 \text{ т} \quad (1)$$

где:

Ec – глобальная экономия меди от перехода на древовидные топологии в АСУ;

Ct – количество произведенной рафинированной меди глобально;

Wt – процент переработки рафинированной меди в кабельную продукцию;

Wa – процент кабельной продукции для построения АСУ;

Ew – процент экономии меди при использовании древовидной топологии в АСУ.

Наглядно ситуация продемонстрирована на рис. 2.

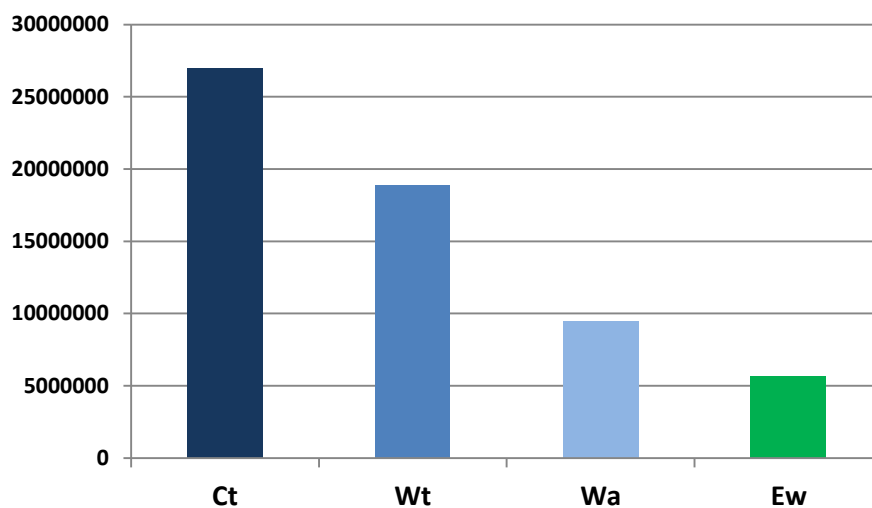


Рис. 2. Глобальная экономия меди от перехода на древовидную топологию в АСУ (тонн)

Fig. 2. Global copper savings from the transition to a tree topology in automated control systems (tons)

¹ Кому не хватит меди? URL: https://metallplace.ru/news201024_1/ (дата обращения: 20.12.2025).

² Кабельная промышленность поглощается металлургами? // MetalTorg.Ru. URL: <https://www.metalorg.ru/analytics/color/?id=186> (дата обращения: 20.12.2025)

В денежном эквиваленте, исходя из текущей стоимости меди на Лондонской бирже металлов 11620,5\$ за тонну (цена на 08.12.25), получаем экономию:

$$Ed = Ec \times Pc = 5\,670\,000 \times 11\,620,5 = 65\,888\,235\,000\$ \quad (2)$$

где:

Ed – годовая экономия в долларах США;

Ec – глобальная экономия меди от перехода на древовидные топологии в АСУ;

Pc – цена меди на Лондонской бирже металлов.

Цифра экономии превышает ВВП за 2024 год более, чем 100 стран и сопоставима с ВВП таких стран, как Сирия, Мьянма, Конго (по данным Международного валютного фонда¹). Следует уточнить, что стоимость кабельной системы составляет не только цена на провод, но и затраты на его защиту, а также на работы по прокладке кабеля, которые мы не учли в расчете экономии, и которые уменьшаются пропорционально уменьшению длины кабельной системы. Кроме того, компактная кабельная система экономит не только кабельный материал, но и электроэнергию при передаче питания и данных (см. закон Ома [15]), потеря энергии сокращается пропорционально сокращению длины провода.

Таким образом, сформулируем первый постулат СНС – *кабельная система должна быть древовидной, иерархической*. Чтобы еще раз подчеркнуть важность древовидной топологии уточним, что в природе древовидное ветвление каналов используется не только в нервных, но и в лимфатических, кровеносных, бронхиальных, корневых и других системах.

Второй постулат логическим образом вытекает из первого. Построить древовидную кабельную систему можно только воспользовавшись сетевой технологией, которая дает такую возможность. На текущий момент создать древовидную кабельную систему с практически бесконечным количеством подключаемых устройств позволяет только одна технология, описываемая стандартом IEEE 802.3² и именуемая Ethernet. Для функционирования СНС достаточно варианта технологии, обозначаемого – 10BASE-T. Технология передает данные со скоростью 10 мегабит по проводу типа «витая пара» на расстояние до 100 метров. Ethernet является самой распространенной сетевой технологией на планете, что делает ее наиболее дешевой. Для передачи данных потребуется двухжильный (для полудуплексного режима) или четырехжильный (для полнодуплексного режима) кабель категории 5. Питание устройств АСУ удобно подавать по тому же кабелю, по которому передаются данные, но по специально выделенным для питания жилам. Такой принцип питания описан стандартом IEEE 802.3af³ (PoE) и позволяет питать устройства с потреблением не более 15 Вт. Для устройств с большим потреблением потребуется отдельная линия питания. Уточним, что 15 Вт достаточно для питания большого количества устройств автоматизации, не только датчиков, но и некоторых исполнительных механизмов, что дает значительную финансовую экономию, избавляя от необходимости прокладки дополнительных линий питания.

Сформулируем второй постулат – *в качестве сетевой технологии используется Ethernet 10BASE-T, питание устройств при возможности осуществляется по технологии PoE*. Положительный экономический эффект данного постулата основан на дешевизне сетевой технологии и отсутствии затрат на прокладку линий питания устройств АСУ.

Около 99 % из 100 миллиардов нейронов в нервной системе человека являются интернейронами (вставочными, ассоциативными нейронами), т.е. нейронами которые передают данные от одного нейрона к другому [16]. Интернейроны формируют хорошо разветвленную сеть связей между нейронами. Природа добивается минимально возможной длины линий связи

¹ List of countries by government budget [Электронный ресурс]. Wikipedia, the free encyclopedia. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_countries_by_government_budget (дата обращения: 20.12.2025)

² IEEE. IEEE Std 802.3™-2022. IEEE Standard for Ethernet. – Piscataway, NJ : IEEE, 2022. – 6522 с. – URL: <https://standards.ieee.org/ieee/802.3/7276/> (дата обращения: 20.12.2025)

³ IEEE 802.3af : стандарт передачи питания по Ethernet (Power over Ethernet) / Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). – IEEE Std 802.3af™-2005. – 2005 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://standards.ieee.org/ieee/802.3af/5766/> (дата обращения: 20.12.2025)

между взаимодействующими нейронами. В нервной системе важность нейронов, передающих сигналы, преобладает над двигательными (их примерно один миллион) и чувствительными (их около трех миллионов) нейронами.

Выше упоминалось, что в качестве примера построения искусственных (синтетических) нервных систем целесообразно брать не нервную систему человека, а простую нервную систему беспозвоночных. Это обусловлено тем, что в нервной системе человека наблюдается четкое разграничение нейронов по функционалу на чувствительные, моторные и вставочные [17]. С технической точки зрения такое разграничение нецелесообразно и экономически неэффективно, так как электронная промышленность выпускает микроконтроллеры, обладающие возможностями как принимать, так и отправлять данные. В простых нервных системах беспозвоночных нейроны не имеют четкой специализации, т.е. могут совмещать любые функции [18], поэтому более подходят для их прототипирования на основе микроконтроллеров. Итак, сформулируем третий постулат – *кабельная система СНС должна быть как можно более разветвленной, линии связи между нейронами должны быть наименьшей длины*. Для разветвления следует использовать специализированные сетевые устройства технологии Ethernet – концентраторы, коммутаторы или маршрутизаторы с небольшим количеством (не более 4х) портов, что обеспечит их невысокую стоимость и, в тоже время, возможность разветвления сети в нужном направлении. Пример ветвления показан на рис. 1 (справа). Здесь же обозначим четвертый постулат – *нейроны синтетической нервной системы, имитируя функции биологических нейронов нервных систем беспозвоночных, выполняют функции чувствительных, моторных и интернейронов*.

В процессе программирования АСУ выполняется три вида работ: программирование портов контроллеров на подключенные к ним устройства; программирование логики работы АСУ; разработка графического интерфейса пользователя. Работы второго и третьего вида будут присутствовать всегда т.к. зависят от конфигурации конкретной АСУ и объекта автоматизации. Однако от первого вида работ по настройке портов контроллера можно избавиться, и тем самым, ликвидировать затраты на данный вид деятельности.

Каждый из трех описанных видов работ требует участия квалифицированных специалистов, услуги которых не бесплатные. Настройка портов контроллеров, в зависимости от количества подключаемых к контроллерам АСУ устройств, может занимать многие месяцы. Данная ситуация связана с тем, что в мире АСУ не существует системы автоматического определения подключенных к контроллеру измерительных и исполнительных устройств, аналогичной системе Plug&Play [19], которая с 1995 г. присутствует в персональных компьютерах. В мире биологических нервных систем ситуация противоположная. Каждый биологический нейрон с момента своего зарождения знает, чем он управляет, где он находится и что ему необходимо делать, это детерминировано генетически [20]. Поэтому в природе отсутствует необходимость как-то настраивать нейрон на подключенные к нему биологические «устройства» (рецепторы, мышцы, железы). Учитывая данный факт, сформулируем пятый постулат – *нейроны СНС и подключаемые к ним устройства должны иметь систему автоматического определения подключенных к нейрону устройств*. Посчитать экономию средств от пятого постулата можно воспользовавшись федеральными единичными расценками (ФЕРп 81-05-02-2001¹). Например, по формуле (3) рассчитаем полную стоимость пусконаладочных работ для АСУ состоящей из 160 устройств, I категории сложности, со средним уровнем развитости информационных функций и базовым уровнем информационных функций.

$$Р_{тек} = Р_{бI} \times C \times \Phi_{и} \times \Phi_{у} \times И_{п} \quad (3)$$

где:

Р_{тек} – общая стоимость работ с перерасчетом в текущие цены по индексу 37,85;

Р_{бI} – Базовая расценка на выполнение работ;

С – Коэффициент сложности для I категории;

Φ_и – Коэффициент развитости информационных функций;

¹ Федеральные единичные расценки на пусконаладочные работы ФЕРп 81-05-02-2001. URL: <https://meganorm.ru/Data2/1/4293747/4293747246.pdf> (дата обращения: 13.12.2025).

Фу – Коэффициент развитости управляющих функций;

Ип – Индекс перерасчета в текущие цены (на 4 кв. 2025 года).

Получаем Ртек = $13641,17 \times 1,0 \times 1,2 \times 1,0 \times 37,85 = 619581,79$ руб.

Так как убрана одна из трех пусконаладочных работ, рассчитаем экономию (Er) на 33 %.

$$Er = \frac{619\,581,79 \times 33}{100} = 204\,461,99 \text{ руб.} \quad (4)$$

Базовый принцип работы классических АСУ заключается в том, что контроллер АСУ в вечном цикле опрашивает измерительные устройства (сенсоры, датчики, переключатели); после получения информации заложенная в контроллер программа анализирует данные и вырабатывает управляющее воздействие для исполнительных механизмов. Алгоритм работы нервной системы живого организма основан на другом принципе. Здесь инициатором события выступают рецепторы, формирующие потенциал действия, который поступает на нейрон и формирует цепную реакцию всех необходимых клеток нервной системы [21]. Таким образом контроллер АСУ через определенные интервалы времени будет опрашивать устройство, даже если его состояние не изменилось, тем самым нагружая сеть связи АСУ бесполезной информацией. Сеть биологической нервной системы начинает передавать информацию только при явной необходимости после получения сигнала возбуждения.

Очень важным в нервной системе является механизм торможения сигнала, который оберегает нервную систему от перегрузок и бесполезной работы. Так, например, боль от порезанного пальца постепенно снижается, хотя рана никуда не делась. Нервная система тормозит бесполезный сигнал боли, делая его слабее [22]. Основываясь на этом, запишем шестой постулат – *нейроны СНС должны выступать инициаторами отправки данных (потенциала действия) в сеть и делать это только по действительной необходимости. Команды, поступающие на нейрон из сети, должны выполняться только, если в этом есть резон, таким образом, нейрон должен выполнять функцию торможения бесполезных сигналов.* Прямой экономической выгоды от шестого постулата нет, однако он позволит разгрузить сеть СНС от передачи ненужных данных, тем самым увеличивая скорость функционирования системы, что позволит использовать более дешевые сетевые устройства в качестве интернейронов.

На рис. 1 слева и в центре показаны наиболее распространенные топологии (звезда и общая шина) кабельных систем в АСУ. Каждая из этих технологий подразумевает, что контроллер находится на значительном расстоянии от управляемых устройств. Это вызывает высокие расходы на интеграцию кабельной системы и проблемы с передачей данных на большие расстояния. Принцип расположения нейронов в биологических нервных системах диаметрально противоположный. Живая природа выносит нейрон в то место организма, где требуется нейронное управление, т.е. ставит нейрон как можно ближе к биологическому «устройству» (рецептору, мышце, железе), которым должен управлять нейрон [23]. Если в АСУ контроллер старается управлять как можно большим количеством устройств, что требует от него высокой вычислительной способности (и как следствие дороговизны), то биологический нейрон управляет небольшим количеством закрепленных за ним объектов организма. Однако общая «вычислительная» мощность нервной системы достаточно высока, из-за большого количества нейронов, распределенных по организму, каждый из которых работает параллельно и независимо от других нейронов [24]. Первичная обработка полученных нейроном данных выполняется непосредственно на месте и лишь при необходимости нейрон передает информацию в другие части нервной системы [25–26].

Седьмой постулат – *нейрон в СНС должен располагаться как можно ближе к устройствам, которыми он управляет, примерно в центре так называемого «куста устройств».* Количество подключаемых к нейрону устройств должно быть небольшим (5-7), что позволит использовать для создания искусственных нейронов микроконтроллеры с небольшой вычислительной мощностью и с низкой стоимостью. Низкая стоимость нейронов, но большое их количество позволит дешево и легко масштабировать сеть СНС. С увеличением количества нейронов общая вычислительная мощь СНС будет расти в отличие от классических принципов создания АСУ, в которых с увеличением количества устройств растет нагрузка на немногочисленные центральные контроллеры и как следствие происходит общее замедление работы АСУ.

Посчитаем стоимость создания АСУ, состоящей из тех же 160 простых устройств (100 реле и 60 аналоговых датчиков), на едином мощном контроллере и стоимость этой же АСУ на множестве контроллеров с небольшой производительностью. Недорогим и одним из самых массовых микроконтроллеров, с возможностью подключения нескольких устройств (достаточно 5-7) для создания СНС, является ATmega328¹ (от Microchip Technologies), стоимостью около 1\$. Также требуется сетевой модуль ENC28J60 (цена около 2\$) для подключения к Ethernet.

Для классической АСУ воспользуемся наиболее популярным контроллером от фирмы Siemens – SIMATIC S7-1200 и дополнительными модулями т.к. АСУ только на контроллере не построить. Стоимость, типы и количество необходимых устройств показаны в табл. 1 (источник данных²).

Таблица 1 – Стоимость, типы и количество необходимых устройств для АСУ

Table 1 – Cost, types and quantity of necessary devices for automated control systems

Компонент	Кол-во	Цена за ед. (USD)	Итого (USD)
S7-1200 (CPU 1217C)	1	650	650
SM 1223 (дискретная)	4	180	720
SM 1234 AI	6	320	1 920
SM 1232 AO	3	280	840
SB 1223 (встроенная)	1	50	50
Общая стоимость			4180

Для создания СНС предположим, что к одному микроконтроллеру подключается 5 устройств, т.е. понадобится $160 / 5 = 32$ микроконтроллера и модуля Ethernet, а также 11 четырехпортовых коммутаторов для соединения искусственных нейронов СНС в сеть. Стоимость, типы и количество необходимых устройств для СНС собраны в табл. 2 (источник – сайт aliexpress.ru).

Таблица 2. Стоимость, типы и количество устройств для построения СНС

Table 2. Cost, types, and number of devices for building synthetic nervous systems

Компонент	Кол-во	Цена за ед. (USD)	Итого (USD)
Микроконтроллер ATmega328	32	1	32
Сетевой модуль ENC28J60	32	2	64
Коммутатор Ethernet (4 порта)	11	10	110
Общая стоимость			206

Питающую аппаратуру и кабельную продукцию не учитываем, т.к. из рис. 1 очевидно, что в СНС проводов будет меньше, а стоимость блоков питания будет примерно равна потому, что в АСУ одинаковое количество питаемых управляемых устройств (но всё-таки немного ниже в СНС из-за меньшей длины кабельной системы). Расчет показывает экономию при использовании СНС более чем в 20 раз ($4180 / 206 = 20,3$), по сравнению с традиционными АСУ. Может показаться, что более дорогой контроллер будет быстрее работать, однако это не совсем верно, т.к. СНС не будет уступать за счет распараллеливания вычислений и имеющихся механизмов возбуждения потенциала действия и торможения сигнала. Программное обеспечение для построения СНС также является бесплатным (см. далее) в отличие от ПО для контроллеров Siemens,

¹ Atmel ATmega328: Микроконтроллер нового поколения для инновационных устройств, URL: <https://olnisa.ru/blog/atmel-atmega328-mikrokontroler-novogo-pokoleniya-dlya-innovacionnyh-ustrojstv/> (дата обращения: 13.12.2025); Microcontroller (MCU) Market Size & Share Analysis - Growth Trends And Forecast (2025 - 2030). URL: <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/microcontroller-mcu-market> (дата обращения: 13.12.2025); The 10 Most Popular MCUs by Manufacturers in 2025, URL: <https://www.printedcircuit-board.org/2025/09/the-10-most-popular-mcus-by.html> (дата обращения: 13.12.2025).

² SIMATIC S7-1200 – новое семейство микроконтроллеров [Электронный ресурс] : информация по продуктам 2013 / ООО «Сименс». – 2013. – Режим доступа: <https://chastotnik.by/upload/iblock/f73/f738dbd115b7c4a3948deed09b8e3151.pdf> (дата обращения: 21.12.2025).

а из пусконаладочных работ по СНС нужно убрать расходы по настройке портов на подключенные устройства т.к. в СНС это выполняется автоматически. Отношение количества устройств к их цене в классической АСУ и в СНС показано на рис. 3.

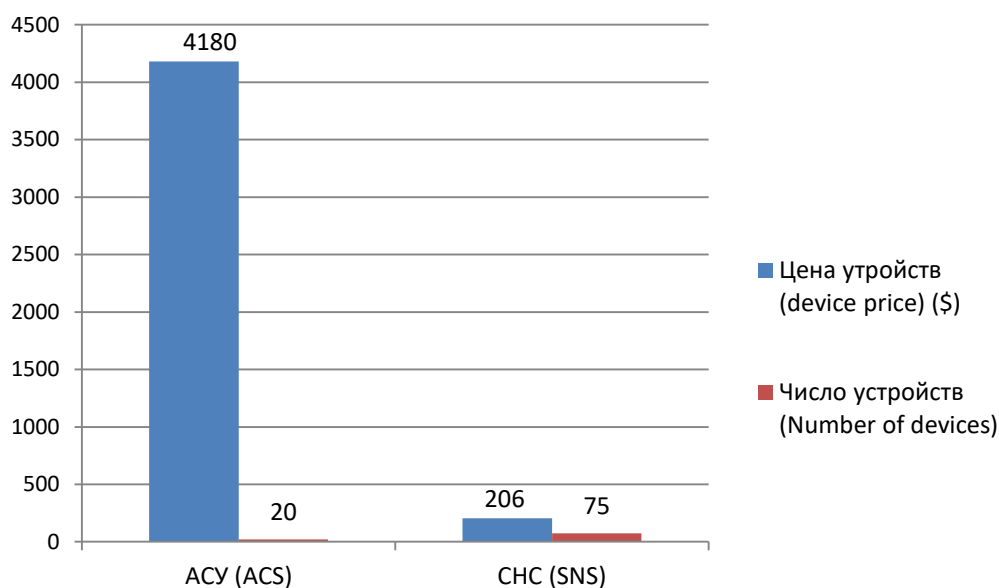


Рис. 3. Отношение количества устройств к их цене в классической АСУ и в СНС

Fig. 3. The ratio of the number of devices to their price in a classical automated control system and in a synthetic nervous system

Несмотря на то, что в терминологии нейробиологии существует понятие «автономная нервная система», в действительности все нейроны нервной системы так или иначе связаны между собой через цепочки нейронов. Нервная система организма является целостной совокупностью взаимосвязанных структур [27; 28; 29]. Подобный принцип управления кажется естественным, однако в реальности при автоматизации объектов внедряется несколько независимых АСУ, каждая из которых выполняет свою часть работы и может быть никак не связана с другими системами. Т.е. система управления вентиляцией может не знать о количестве человек на объекте, т.к. не связана с системой контроля доступа и системой охраны, хотя такие знания для эффективной работы вентиляции были бы полезны. Отсюда естественным образом вытекает восьмой постулат – *автоматизация объекта должна строиться на основе СНС как единая универсальная система, управляющая всеми процессами на объекте автоматизации*. С экономической точки зрения подобный подход даст более эффективное управление объектом. Система сможет спрогнозировать чрезвычайные ситуации, которые были бы неочевидны при классическом подходе к созданию АСУ. Единая система позволит экономно расходовать ресурсы (тепло, вода, электричество, газ и т.п.) и убережет от материальных потерь.

Из восьмого постулата логическим образом выводим девятый постулат – *для построения универсальных глобальных (широкомасштабных) сетей автоматизации СНС должна работать на протоколе TCP/IP, работающем поверх протокола Ethernet*. Таким образом, СНС является глобальной сетью, но не для передачи данных как Internet, а для автоматизации и управления. Подобный подход даст экономию на приобретении специализированного оборудования для построения АСУ, т.к. можно использовать уже имеющееся на объекте автоматизации оборудование для сетей Ethernet и Internet.

Нервная система беспозвоночных организмов использует химический и электрический принцип передачи сигналов. За счет отсутствия миелиновой оболочки у аксонов передача данных осуществляется достаточно медленно от 10 до 100 м/с [30]. Как следует из девятого постулата, СНС строится на основе стека протоколов Интернет TCP/IP, который тоже является достаточно медленным протоколом и плохо подходит для объектов, требующих управления

в реальном времени. Следовательно, можно сформулировать не столько постулат, сколько рекомендацию – СНС нельзя использовать на объектах, требующих управления в реальном времени и тем более на объектах, недопустимая задержка в управлении которыми может привести к серьезным материальным потерям, катастрофам и гибели людей или животных.

Десятым важным (можно сказать главным) постулатом построения СНС является *принцип «минимальной необходимости»* или *принцип «достаточного минимализма»*. Структура синтетической нервной системы должна использовать минимальное количество ресурсов для достижения требуемой функциональности, при этом обеспечивая устойчивость и масштабируемость. Принцип достаточного минимализма можно описать следующими пунктами:

- следует избегать дублирования технологий в пользу одной, но наиболее эффективной с технической точки зрения, при этом во главу угла параметр скорости не ставится;
- добиваться минимально возможной длины кабельных линий связи, интенсивно используя интернейроны (сетевые разветвители, концентраторы, коммутаторы, маршрутизаторы);
- использовать минимально необходимое количество нейронов и интернейронов;
- использовать микроконтроллер с минимально необходимыми вычислительными ресурсами и внутренними компонентами для создания нейронов;
- использовать минимально необходимое количество сетевых протоколов передачи и приема данных;
- использовать минимально необходимое, бесплатное программное обеспечение от крупных производителей с многолетним опытом в сфере разработки ПО;
- использовать широко распространённые языки программирования без библиотек и фреймворков от малоизвестных команд разработчиков;
- задействовать максимально возможное количество портов каждого нейрона;
- создавать минимально возможное количество кустов управляемых устройств;
- располагать управляемые устройства на минимально возможном пространстве, в максимальной близости друг к другу;
- использовать кабели с минимально необходимыми характеристиками и стоимостью, учитывая последующее масштабирование системы;
- использовать минимально возможное количество источников питания нейронов и управляемых устройств с минимально возможной (с учетом резерва, амортизации оборудования и последующего масштабирования) мощностью и стоимостью.

Очевидно, некоторые из пунктов принципов достаточного минимализма противоречат друг другу, поэтому введем еще один принцип - все возникающие противоречия должны решаться в пользу экономической эффективности, т.е. меньшей стоимости.

Выше упоминалось о том, что в живой нервной системе каждый нейрон знает, что ему делать с самого рождения и все время своего существования выполняет одну функцию. В нервных системах беспозвоночных, которые взяты за основу для СНС, нет строгой сегрегации на моторные и чувствительные нейроны. Нейрон может, как принимать сигналы от рецепторов, так и управлять мышцами, т.е. рефлекторная дуга беспозвоночных может состоять всего из одного нейрона [7; 31]. Интересным фактом является то, что в жизни простых беспозвоночных (гидры, нематоды) нет процесса обучения, животное рождается с полным набором знаний (рефлексов) необходимых для жизни [32]. Отсюда получаем специфичный одиннадцатый постулат – *искусственный нейрон не программируется во время настройки АСУ, все необходимое ПО записывается в нейрон при его изготовлении и не меняется на протяжении всего жизненного цикла нейрона*. Таким образом, все нейроны СНС имеют одинаковое ПО, которое выполняет функции идентификации подключенных к нейрону устройств и регистрирует момент отключения устройства от нейрона (т.е. сеть СНС гомогенна). Программное обеспечение нейрона принимает команды управления подключенными устройствами, выполняет функции рассылки состояний устройств (сенсоров, выключателей) всем заинтересованным (подписанным на рассылку) сетевым устройствам, реализует механизм торможения и возбуждения сигналов. Данный подход дает сильный экономический эффект, так как не требует от инженеров-интеграторов изучения

различных архитектур контроллеров, на которых построена АСУ (как в классических системах), достаточно знать только принцип работы ПО нейрона. Масштабирование АСУ становится максимально простым путем добавления нового нейрона (стоимостью 3\$, см. табл. 2) и, при необходимости, интернейрона (стоимостью 10\$, см. табл. 2). На производстве нейронов отпадает необходимость выпускать разные нейроны под разные задачи и под разные ценовые категории, как это происходит на производствах классических контроллеров АСУ.

Двенадцатый постулат звучит так - *логика управления работой АСУ, построенной на базе СНС, выносится на другие устройства сети: нейроцентры (серверы приложений), устройства управления и визуализации и т.п.* Нейрон не является программируемым логическим контроллером (ПЛК) в традиционном понимании. Это позволяет использовать для программирования логики работы АСУ любой универсальный или проприетарный язык программирования, способный работать с сетью по протоколу TCP/IP. Таким образом, управление СНС может выполняться не из единого центра, а с любого устройства, допущенного системой безопасности в локальную сеть нервной системы. В качестве такого устройства управления может выступать практически любое вычислительное оборудование: ЭВМ, смартфон, планшет и т.п. Естественно, устройство управления требуется только тогда, когда АСУ имеет исполнительные механизмы, если СНС предназначена только для сбора данных (например, для информационной системы или базы данных) в сложной логике управления она не нуждается. С экономической точки зрения двенадцатый постулат сокращает расходы на приобретение специального вычислительного оборудования, так как позволяет использовать любое, ставшее не нужным, устаревшее или просто имеющееся в наличии вычислительное устройство. В СНС может быть сколько угодно управляющих ЭВМ, дублирующих функции управления, тем самым повышая надежность системы.

Нейропластичность в биологической нервной системе является очень важным механизмом. Она позволяет формировать новые контакты нейрона и усиливать уже существующие, обеспечивая адаптивное поведение без формирования (пролиферации) новых клеток нервной системы. Нейропластичность лежит в основе памяти и восстановления моторных и чувствительных функций при регенерации [33]. Оставить без внимания данный механизм нервной системы было бы неправильно из рациональных соображений. Поэтому тринадцатый постулат СНС может быть следующим - *нейроны СНС должны иметь механизм переопределения типа подключенного к порту нейрона устройства и возможность подключения к порту устройств, не имеющих механизма (электронного модуля) для их автоматического определения нейроном.* Здесь имеется в виду механизм автоматического определения устройств, описанный в пятом постулате. Следуя этому постулату, тип подключаемого устройства должен передаваться на нейрон перед или вместе с командой управления этим устройством. Нейрон получает информацию о подключенном к нему устройстве извне и тут же получает приказ на управление этим устройством (чтение или воздействие). Полученная нейроном информация об устройстве позволит нейрону выбрать правильный алгоритм (драйвер) взаимодействия с устройством. С экономической стороны такой функционал даст возможность подключать к нейрону большее количество устройств, т.е. устройств, не имеющих модуля автоматической идентификации, но потребует от инженера точного знания типа подключенного устройства, принципов управления им и месте (порте) его подключения к нейрону. Следует отметить, что нечто похожее на нейропластичность уже используется в электронной технике, в том числе в приборах построения автоматизированных систем управления.

На настоящий момент тринадцатый постулат является последним постулатом, который должен учитываться при создании СНС. Однако в нервных системах живых организмов есть еще много функций, практическая реализация которых была бы очень полезной при создании автоматизированных систем, как с технической, так и с экономической точки зрения, некоторые из них описаны ниже.

Очень интересными для реализации в технических функциях являются свойства зеркальных нейронов – специализированных клеток нервной системы, активирующихся как при выполнении действия, так и при наблюдении действия у других нейронов [34]. Применение данного свойства в контроллерах АСУ очевидно. Добавление зеркального режима работы

в контроллеры избавит от необходимости программирования каждого контроллера из группы контроллеров, выполняющих одинаковые управляющие функции (имеются в виду контроллеры классических АСУ). Одинаково запрограммированные контроллеры можно найти на объектах с повторяющимися структурами: этажи многоэтажных зданий, агрономические комплексы, рыбные фермы, резервуары хранения и т.п. Управление объектами таких структур требует одинаковой настройки каждого контроллера и, соответственно, перенастройки каждого контроллера при изменении логики управления объектами. Наличие зеркального режима работы у контроллеров позволило бы делать перепрограммирование только одного контроллера, на который могли бы ориентироваться остальные контроллеры системы, работающие в зеркальном режиме. Данный функционал особенно актуален, когда в АСУ используются контроллеры разных производителей. Экономическая выгода от зеркального режима очевидна – меньше затрат на оплату работы программиста при пусконаладочных работах и при последующих работах по модернизации.

Построение бионических АСУ на основе СНС в соответствии с восьмым постулатом подразумевает их большой масштаб. Это порождает проблему поддержки и обслуживания СНС. Очевидно, что одна организация может не справиться с обслуживанием нейронной сети размером даже со среднее промышленное предприятие, не говоря уже о сетях масштабом с город, так как одна организация не может обладать компетенциями во всех областях автоматизации. СНС такого размера придется условно делить на части, при общей единой неразрывной структуре. Проблема обостряется, если участки СНС, подконтрольные разным обслуживающим компаниям, будут построены на разных номерах подсетей протокола TCP/IP. Для передачи данных из СНС с одним номером в СНС с другим номером потребуется расстановка и настройка маршрутизаторов в точках соприкосновения частей СНС. В живой нервной системе существует похожая проблема. Известно, что сердце, легкие и ЖКТ управляются одновременно двумя подсистемами нервной системы – спинным мозгом и блуждающим нервом [35]. При этом обе подсистемы могут подавать на один и тот же орган противоположные по смыслу сигналы. Таким образом, передача информации между спинным мозгом и блуждающим нервом осуществляется через управляемый ими орган. Этот природный механизм реально применить для обмена информацией между участками СНС. Наладить передачу сигнала из одного участка СНС в другой можно через совместно управляемые устройства, например, через реле, когда одна часть СНС замыкает реле, а вторая часть СНС регистрирует это замыкание. Другой способ взаимодействия нейронов может быть реализован через протокол связи, когда один нейрон выступает источником сигнала, а другой его приемником. Это позволяет обмениваться информацией не через вычислительную сеть (Ethernet, Internet) и рефлекторную дугу, включающую интернейрон, а через управляемые нейронами устройства – передатчики и приемники. С экономической точки зрения такой подход иногда более предпочтителен, чем обмен данными через интернейроны (рефлекторные дуги) и дает большую экономию при проектировании и настройке АСУ. В реальности подобный способ передачи данных из одной АСУ в другую используется достаточно часто и не является чем-то новым, поэтому нет ничего предосудительного в том, чтобы использовать его в синтетических нервных системах для взаимодействия с классическими АСУ или другими участками СНС.

Обсуждение

Проанализируем экономический эффект от сформулированных постулатов и от еще не реализованных в технике интересных свойств нервной системы. Оценим пользу от каждого постулата по десятибалльной шкале для того, чтобы наглядно их оценить. Выше указывалось, что нарушение некоторых постулатов будет нивелировать эффект от применения СНС по сравнению с традиционными АСУ. Балльная система хорошо покажет цену нарушения того или иного постулата.

Первый постулат предписывает построение древовидной, иерархической, сильно ветвящейся кабельной системы. Из рисунка 1 можно сделать вывод, что данный постулат экономит значительную часть средств по сравнению с топологией «звезда», но лишь немного по сравнению с топологией «общая шина». Эффект от данного постулата, судя из расчетов в формулах (1) и (2), будет ощущаться на больших масштабах, при глобальном, общепланетарном отказе от других топологий. Поэтому оценим первый постулат в 5 баллов.

Применение технологии «офисного» Ethernet 10BASE-T для создания сети обмена данными в нервной системе, описанное во втором постулате, на первый взгляд больших преимуществ не дает – какая разница, какая технология передачи данных используется? Однако это заблуждение. Только Ethernet позволяет строить глобальные вычислительные сети по минимально возможной стоимости. Ни один из промышленных стандартов (RS-485, CAN, Profibus, EtherCAT, EtherNet/IP, Profinet и др.) не может конкурировать с Ethernet по критерию – количество устройств в сети, масштаб, стоимость. Недостатком Ethernet 10BASE-T является небольшая длина участка между устройствами приема-передачи – 100 метров. Оценим второй постулат на 7 баллов.

Третий постулат рекомендует делать кабельную систему СНС как можно более разветвленной, добиваясь минимальной длины проводов между устройствами. Эта рекомендация основана на том факте, что в современном мире стоимость медных проводов стремится к бесконечности¹, а стоимость электронного сетевого разветвителя стремится к нулю². Стоимость электроэнергии также увеличивается, а минимальная длина линии позволит сократить расход электричества (см. закон Ома [15]). Оценим рекомендацию в 4 балла, т.к. активный разветвитель требует питания, а пассивный делит мощность передаваемого сигнала, сокращая расстояние передачи данных.

Четвертый постулат говорит о том, что искусственный нейрон должен использовать весь функционал микроконтроллера, на котором он построен, т.е. обладать возможностями как принимать сигналы, так и передавать управляющее воздействие на управляемые им устройства – это будет роднить его функции с функциями нейронов нервной системы беспозвоночных. Оценим постулат на 3 балла, так как очевидно, что игнорировать возможности, встроенные в каждый микроконтроллер с экономической точки зрения нецелесообразно.

Основываясь на факте, что каждый нейрон биологической нервной системы изначально знает свой функционал, знает с какими биологическими органами он взаимодействует, пятый постулат требует того же от искусственного нейрона. Т.е. искусственный нейрон должен иметь систему автоматического определения подключаемых к нему устройств. Из расчетов по формулам (3) и (4) видно, что наличие данного механизма у нейрона экономит значительное время и финансы на этапе пусконаладочных работ. Несмотря на то, что внедрение данной технологии потребует интеграции в управляемые устройства электронного модуля идентификации, оценим данный постулат в 10 баллов, так как он дает самую существенную экономию даже при создании конкретной АСУ, а тем более в глобальном, общепланетарном масштабе.

Шестой постулат описывает свойство живой нервной системы тормозить бесполезные сигналы и возбуждать потенциал действия только при необходимости. Этот механизм отличает нервную систему от механизма работы классических АСУ на контроллерах, в которых выполняется опрос датчиков через определенные промежутки времени, а не при необходимости. Таким образом принцип функционирования нервной системы как бы «вывернут наизнанку». С экономической стороны данный постулат дает немного, но все же позволяет разгрузить сеть передачи данных и, возможно, сэкономить на сетевых устройствах. Оценим постулат в 3 балла.

Концепция СНС вводит новое понятие – «куст устройств». Это связано с тем, что управляемые устройства в системе автоматизации часто расположены небольшими группами, рядом с автоматизируемыми объектами. В центре таких групп удобно размещать искусственный нейрон, который свяжет устройства воедино и включит их в общую нервную систему. Именно такой способ расположения нейронов описан в седьмом постулате. Постулат предписывает использование дешевых микроконтроллеров для создания нейронов и получения выигрыша за счет большого их количества в СНС. С технической и экономической точек зрения такой

¹ Объем рынка проводов и кабелей — по продукту, по напряжению, по применению. Анализ и прогноз, 2025–2034 гг.: идентификатор отчета GMI4859 / Global Market Insights Inc. – Электрон. дан. – Селинск, 2025. – Режим доступа: <https://www.gminsights.com/ru/industry-analysis/wire-and-cable-market> (дата обращения: 20.12.2025).

² Worldwide Ethernet Switch Market Grew 42.1% in the Second Quarter of 2025, according to IDC's Quarterly Ethernet Switch Tracker [Электронный ресурс] // International Data Corporation (IDC). – 2025. – 11 сентября. – Режим доступа: <https://my.idc.com/getdoc.jsp?containerId=prUS53799125> (дата обращения: 20.12.2025).

подход дает значительное превосходство над классическими системами АСУ (на базе единого контроллера). Это хорошо видно из табл. 1 и 2. Постулат заслуживает оценки в 8 баллов.

Немалое количество чрезвычайных ситуаций в мире происходит из-за недостаточной автоматизации объектов. Даже хорошо автоматизированные объекты, но с плохим взаимодействием между разными автоматизированными подсистемами становятся фигурантами чрезвычайных ситуаций с большим количеством человеческих жертв и значительными материальными и финансовыми потерями¹ [36; 37]. Восьмой постулат призван сохранить жизни людей, финансы и имущество путем большей автоматизации и более тесной интеграции систем автоматизированного управления. Соблюдение постулата обязывает создавать полносвязные АСУ управления объектом, каждая подсистема автоматизации которой должна иметь возможность получать информацию от всех остальных подсистем. Только на первый взгляд кажется, что подсистема управления вентиляцией не должна знать, что происходит в системе контроля доступа. В действительности, если система контроля доступа открыла запасные выходы, то с большой долей вероятности на объекте начался пожар и система вентиляции (и все остальные системы) тоже должна соответствующим образом отреагировать на ситуацию. Вполне заслужено оценим рекомендации восьмого постулата в 9 баллов. Балл уберем из-за наличия случаев, когда полносвязностью АСУ пользуются злоумышленники в коростных целях.

Разработанная в 1969 г. сеть ARPANet, как известно, была призвана служить министерству обороны США [38]. В дальнейшем уникальные свойства сети ARPANet были оценены во всем мире, что вылилось в появление выдающегося изобретения человечества – глобальной сети передачи данных Internet. Однако свойства сети можно использовать не только для передачи информации, но и для передачи сигналов управления в АСУ, что и подразумевается в девятом постулате. Передача команд управления и данных между нейронами по протоколу TCP/IP позволяет создавать СНС масштабом с планету, позволяет легко управлять любым устройством в АСУ из любого места, где есть доступ к сети Internet. Оценим девятый постулат на 8 баллов из-за необходимости защиты СНС от злоумышленников и кибератак.

Анализируя набор микросхем системной логики современных компьютеров, можно обнаружить функции, которые большинству пользователей не понадобятся². Возникает резонный вопрос – зачем нужен функционал, которым мало кто пользуется, но который увеличивает стоимость компьютера? Ответ очевиден: именно для увеличения цены компьютера он и нужен. Однако философия построения СНС исповедует другой принцип – принцип «достаточного минимализма». Принцип подразумевает отказ от лишнего и дублирующего функционала в пользу чего-то одного, но наиболее предпочтительного. Десятый постулат освещает некоторые из таких предпочтений. Соблюдение перечисленных в постулате правил является очень важным при создании СНС и дает значительный экономический эффект, поэтому постулат заслуживает 10 баллов.

Уже упоминалось о том, что нейроны нервной системы живого организма получают закрепленные за ними функции через генетическую детерминацию. Моторный нейрон остается моторным всю свою жизнь, а чувствительный нейрон остается чувствительным даже после повреждения и регенерации, при этом связи нейрона с другими нейронами могут изменяться [20]. Таким образом, заложенная природой в нейрон программа остается неизменной до конца жизненного цикла нейрона. Следуя этой концепции, одиннадцатый постулат требует, чтобы искусственные нейроны также программировались только при их изготовлении и не меняли свое основное ПО во время жизненного цикла. Поэтому нейрон в СНС уже не является программируемым логическим контроллером, а становится непрограммируемым. Программное обеспечение

¹ Бюро анализа рисков и загрязнений промышленности (BARPI). Accidentologie industrielle sur les périodes de fortes chaleurs. Министерство экологии, устойчивого развития и энергетики Франции, 2014. URL: https://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/wp-content/files_mf/SY_canicule_juin_2014.pdf (дата обращения: 19.12.2025).

² Обзор материнской платы Gigabyte B860 Gaming X WiFi6E, [Электронный ресурс] // iXBT.com. – 2025. – 17 марта. – Режим доступа: <https://www.ixbt.com/platform/gigabyte-b860-gaming-x-wifi6e-review.html> (дата обращения: 20.12.2025).

нейрона (*программа-геном*) должно содержать все функции необходимые для работы, т.е. функции управления подключаемыми к нейрону устройствами и протоколы связи. Этот подход кардинальным образом отличает СНС от классических АСУ и избавляет от необходимости перезаписывать программу в каждый нейрон при перенастройке АСУ. Учитывая глобальный принцип построения СНС замена ПО в каждом нейроне была бы невозможной. Оценим данный постулат на 7 баллов, так как он дает ощутимую экономию трудозатрат при пусконаладочных работах, но все же не избавляет от программирования логики работы АСУ (если логика необходима).

Из одиннадцатого постулата следует, что СНС может не иметь программ, отвечающих за логику работы АСУ. В этом случае программное обеспечение нейронов выполняет только действия, запрограммированные по умолчанию для каждого подключенного управляемого устройства. Для подключенных сенсоров такими действиями является рассылка генерируемых сенсором данных по всем подписанным на рассылку сетевым устройствам. Эти данные могут поступать, например, в различные информационные системы, базы данных, в другие АСУ. Если все же АСУ требует логики управления (что чаще всего и бывает), то управляющие программы должны располагаться на других вычислительных устройствах сети: нейроцентрах (серверах приложений), устройствах визуализации и т.п. Именно эта особенность СНС описывается в двенадцатом постулате. Дадим оценку этой особенности в 7 баллов. Программирование логики на других сетевых устройствах избавляет от непосредственного взаимодействия с каждым нейроном (контроллером) во время пусконаладочных работ, дает возможность легко распространять единожды написанную программу управления на множество управляющих устройств, работающих на разных операционных системах и на разных аппаратных платформах. В конечном итоге двенадцатый постулат наилучшим образом отражается на стоимости АСУ, ее масштабировании, обслуживании, ремонте и модернизации. Сняты баллы из-за того, что требуется отслеживание (синхронизация) поведения управляющих программ, работающих на разных устройствах, во избежание конфликтных ситуаций, когда программы могут подавать противоположные по смыслу команды.

Пятый постулат создания СНС требует снабжать подключаемые к нейрону устройства модулем идентификации, но что же делать, если устройство, которое нужно подключить, не оснащено таким модулем? В этом случае огромное количество выпускаемых промышленностью устройств (например, предназначенных для классических систем автоматизации) было бы невозможно использовать, что стало бы огромным минусом технологии СНС с экономической и технической точки зрения. По этой причине тринадцатый постулат говорит о том, что тип подключенного к нейрону устройства может задаваться извне с помощью информационной посылки нейрону. Таким образом, нейрон не получает информацию о подключенном устройстве от самого устройства, но получает ее вместе с командой управления устройством. Оценим данный постулат в 8 баллов, так как экономическая выгода от его использования относительно высокая. У инженеров появляется возможность сильно расширить номенклатуру используемых в АСУ устройств. Два балла сняты, так как в данном случае появляются издержки, инженер должен точно знать, какое устройство и на какой порт нейрона подключено, что требует дополнительных трудозатрат и ведения журналов подключенных устройств.

В наглядном виде значения каждого постулата построения синтетических нервных систем по десятибалльной шкале представлены на рис. 4.

Дать точную процентную или денежную оценку полезности каждого постулата конечно невозможно, все зависит от конфигурации конкретной АСУ, которая строится на основе СНС. Кроме того, балльная оценка каждого постулата является субъективной оценкой автора и не претендует на истинность. И все же внедрение технологии СНС в цифровую экономику РФ без сомнений даст положительный результат. Современный мир устроен так, что уровень жизни людей в каждой отдельной стране зависит от уровня развития технологий в этой стране, т.е. от количества работы, переложенной на машины.

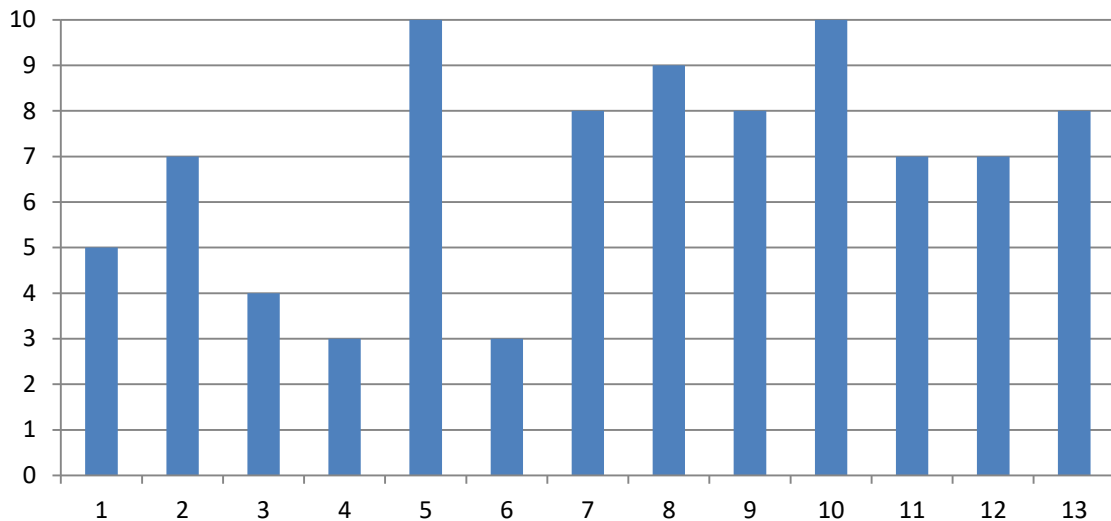


Рис. 4. Значение постулатов построения СНС по десятибалльной шкале

Fig. 4. The value of the postulates for building synthetic neural systems on a 10-point scale

Уровень жизни в странах, измеряемый такими показателями, как ВВП на душу населения, индекс человеческого развития и продолжительность жизни (ИЧР), демонстрирует положительную корреляцию с уровнем технологического развития, включая глобальный индекс инноваций (ГИИ), расходы на НИОКР и патенты. Исследование «GLOBAL INNOVATION INDEX 2025» анализирует связь ГИИ с ВВП на душу населения, продолжительностью жизни и ИЧР в 139 странах, показывая коэффициент корреляции выше 0,7 и лидирующие позиции Европы и Северной Америки¹. Подтверждается устойчивая взаимосвязь между ГИИ и ВВП на душу населения, подчеркивая роль инноваций в экономическом развитии². Факты хорошо иллюстрирует диаграмма на рис. 5, созданная на основе исследований³.

Кроме влияния на уровень жизни автоматизация позволяет снизить количество чрезвычайных происшествий (ЧП) и как следствие сохранить жизни и здоровье граждан. Проанализируем несколько научных работ, которые подсчитывают зависимость количества ЧП от уровня автоматизации. Так исследование BARPI⁴, проведенное во Франции, показывает, что из 100 % случаев промышленных аварий 32% случаев произошли из-за недостаточной автоматизации производства. Расследование одной из крупнейших техногенных катастроф в Бхопале 1984 г., унесшей жизни более 3400 человек в результате утечки газа, показало, что трагедия случилась из-за отсутствия автоматизированной системы рефрижерации и мониторинга [37]. Список происшествий и их причины, произошедших на производствах в Китае с 2004 по 2018 год, показан в табл. 3. Таблица сформирована по данным исследования [36]. Данные этого же исследования показывают, что автоматизация снизила бы количество человеческих ошибок на 60–80 %, а отсутствие автоматизации (ручное управление) усугубило 70 % случаев через сбой навыков и нарушения.

¹ The GII unveils the world's innovation leaders and measures the performance of 139 economies. <https://www.wipo.int/web-publications/global-innovation-index-2025/en/gii-2025-results.html>.

² Adrian Stancu, Crina Raluca Bucur. The Correlation between Innovative Capabilities and Economic Development. http://upg-bulletin-se.ro/old_site/archive/2017-4/1.Stancu_Bucur.pdf (дата обращения: 19.12.2025).

³ Власова В. В. (2025) Глобальный инновационный индекс – 2025. М. – ИСИЭЗ НИУ ВШЭ. Режим доступа: <https://issek.hse.ru/news/1085304545.html>. (дата обращения: 21.12.2025); The GII unveils the world's innovation leaders and measures the performance of 139 economies. <https://www.wipo.int/web-publications/global-innovation-index-2025/en/gii-2025-results.html>.

⁴ Бюро анализа рисков и загрязнений промышленности (BARPI). Accidentologie industrielle sur les périodes de fortes chaleurs. Министерство экологии, устойчивого развития и энергетики Франции, 2014. URL: https://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/wp-content/files_mf/SY_canicule_juin_2014.pdf (дата обращения: 19.12.2025).

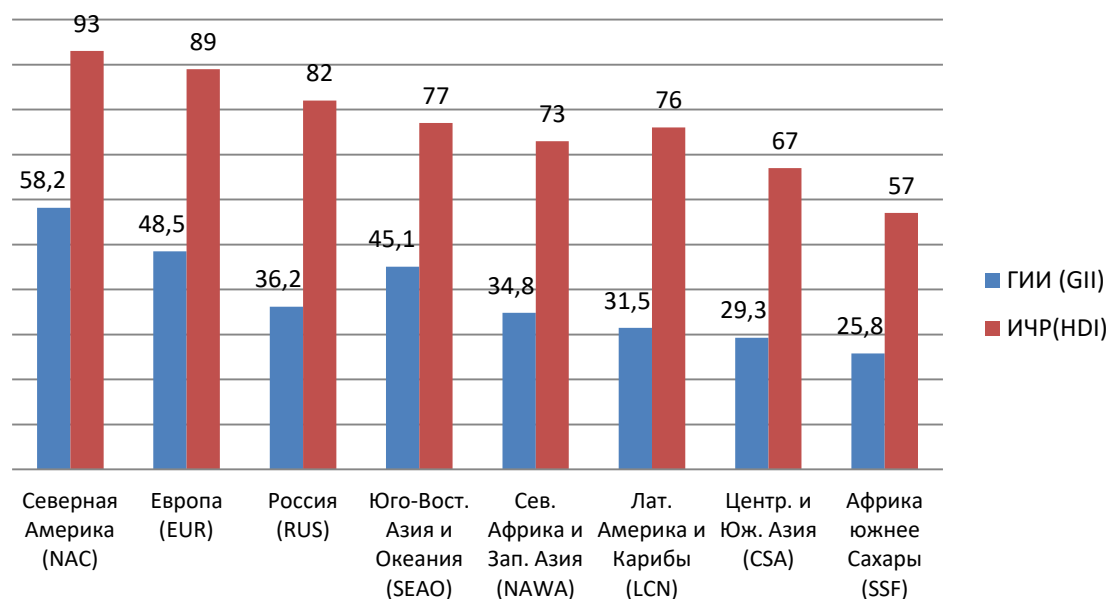


Рис. 5. Диаграмм корреляции уровня жизни и глобального индекса инноваций по регионам

Fig. 5. Correlation chart of living standards and the Global Innovation Index by region

Таблица 3 – Промышленные ЧП и их причины в Китае с 2004 по 2018 год

Table 3 – Industrial emergencies and their causes in China from 2004 to 2018

Катастрофа/Инцидент	Год	Жертвы (погибшие/раненые)	Причины (роль отсутствия автоматизации)
Взрыв аммиака в Ляонин	2009	12 погибших	Интеллектуальные ошибки; ручной контроль без резервных систем
Утечка газа в Хэбэй	2012	19 погибших, 21 ранен	Сбой навыков (ручной мониторинг); нет систем автоматического отключения
Пожар на нефтехимическом заводе Шаньдун	2015	85 погибших	Нарушение процедур; отсутствие датчиков утечек и аварийной остановки
Взрыв на заводе в Цзянсу	2018	47 погибших, 90 ранены	Ошибка оператора (неправильная дозировка); нет автоматизированного контроля реакции
Общий анализ 212 аварий	2004–2018	Более 1400 погибших (суммарно)	42 % – нарушения без автоматики, 28 % – сбои навыков из-за отсутствия мониторинга

Выводы

Каждая технология должна обладать определенным набором ключевых признаков: самолеты должны быть легкими, корабли – герметичными, автомобили – комфортными, компьютеры – быстрыми, танки – неуязвимыми. Автоматизированные системы управления должны быть дешевыми, простыми в построении, легко программируемыми и хорошо масштабируемыми. На текущий момент АСУ, построенные по традиционным канонам, не отвечают этим требованиям, однако, синтетические нервные системы, созданные с соблюдением описанных постулатов, вполне удовлетворяют указанным характеристикам. Синтетические нервные системы являются новым направлением развития автоматизированных систем управления. РФ могла бы стать лидером в их производстве и родиной данной технологии. Очевидно, что экономика будущего – это не цифровая экономика и даже не экономика знаний, а прежде всего – экономика высоких, наукоемких технологий. Страна, обладающая такими технологиями, станет лидером по уровню роста благосостояния своего населения. Однако ни одна из стран, обладая такими

технологиями, не будет делиться ими, тем самым создавая себе конкурентов. Судя по индексам научного цитирования, РФ находится в аутсайдерах мировой науки [39], и прогресса в этой области ближайшие несколько десятилетий ожидать не стоит. Один из способов, как РФ может добиться успеха в мире экономического будущего – это находить новые, более эффективные методы использования доступных ей технологий, пусть даже иностранных. Развитие технологии СНС – один из таких путей. Левша, как известно, не смог починить блоху, но смог ее подковать.

Список источников

1. Абашкин В. Л. [и др.]. Индикаторы цифровой экономики: 2025: статистический сборник [Электронный ресурс] / В. Л. Абашкин, Г. И. Абдрахманова, К. О. Вишневский, Л. М. Гохберг и др.; Нац. исслед. ун-т "Высшая школа экономики", Ин-т статистических исследований и экономики знаний. – М.: ИСИЭЗ ВШЭ, 2025. – 296 с. – Режим доступа: <https://issek.hse.ru/mirror/pubs/share/1026726402.pdf> (дата обращения: 21.12.2025). <https://doi.org/10.17323/978-5-7598-3029-0>. ISBN: 978-5-7598-3029-0
2. Бодрова Е. В., Калинов В. В., Красивская В. Н. О развитии советской вычислительной техники в 1960-е гг. (на основе рассекреченных архивных документов) // Локус: люди, общество, культуры, смыслы. 2024. Т. 15. № 3. С. 68–81. <https://doi.org/10.31862/2500-2988-2024-15-3-68-81>. EDN: CDRHLQ
3. Лугачев М. И. Еще раз по поводу научно-технического прогресса и преимуществах социализма // Вестник Московского университета. Серия 6: Экономика. 2021. № 6. С. 247–263. EDN: UKALAJ
4. Пузанова И. А. Ключевые элементы цифровой трансформации бизнеса // Russian Journal of Management. 2023. Т. 11. № 2. С. 160–174. <https://doi.org/10.29039/2409-6024-2023-11-2-160-174>. EDN: KXRCJL
5. Жердин Д. А., Дмитриев А. Г. Основы автоматизации на базе синтетических нервных систем // Инновации и инвестиции. 2024. № 11. С. 388–393. <https://doi.org/10.24412/2307-180X-2024-11-388-393>. EDN: QWFLLD
6. Жердин Д. А., Дмитриев А. Г. Экономика автоматизации на основе синтетических нервных систем // Государственное и муниципальное управление. Ученые записки. 2025. № 1. С. 280–289. EDN: QXPBMV
7. Жердин Д. А., Дмитриев А. Г. Стоимостное преимущество физических нейронных сетей // Modern Economy Success. 2024. № 4. С. 44–54. <https://doi.org/10.58224/2500-3747-2024-4-44-54>. EDN: FZWHZM
8. Ripoll-Sánchez L, Watteyne J, Sun H, Fernandez R, Taylor SR, Weinreb A, Bentley BL, Hammarlund M, Miller DM 3rd, Hobert O, Beets I, Vértés PE, Schafer WR. The neuropeptidergic connectome of *C. elegans*. *Neuron*. 2023 Nov 15;111(22):3570-3589.e5. Epub 2023 Nov 6. PMID: 37935195; PMCID: PMC7615469. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2023.09.043>
9. Dupré C., Yuste R. Non-overlapping neural networks in *Hydra vulgaris* // *Current Biology*. 2017. Vol. 27. № 8. P. 1085–1097. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2017.02.049>
10. Goulty M., Botton-Amiot G., Rosato E. et al. The monoaminergic system is a bilaterian innovation. *Nature communications*. 2023. 14(1):3284. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-39030-2>. EDN: UZNQWJ
11. Davies M. Benchmarks for progress in neuromorphic computing. *Nat Mach Intell* 1, 386–388 (2019). <https://doi.org/10.1038/s42256-019-0097-1>. EDN: LFGFMH
12. Liu X., Lu Y., Iseri E., Shi Y., Kuzum D., A compact closed-loop optogenetics system based on artifact-free transparent graphene electrodes / X. Liu, Y. Lu, E. Iseri [et al.] // *Frontiers in Neuroscience*. 2018. Vol. 12. No. MAR. P. 132. <https://doi.org/10.3389/fnins.2018.00132>. EDN: YFWJJI
13. Ерохин И. С., Скобеева В. А., Чернов Т. А. Введение в функциональную морфологию нервной системы: Методические материалы по биологии. – Долгопрудный: МФТИ, 2018. 46 с.
14. Жердин Д. А. Синтетические нервные системы. Введение в основы: монография / Д. А. Жердин. – Текстовое (символьное) электронное издание. – Новокузнецк: Издательство «Знание-М», 2025. – 204 с. – ISBN 987-5-00255-415-7. <https://doi.org/10.38006/00255-415-7.2025.1.204>. ISBN: 978-5-00255-415-7. EDN: JHMPLR

15. Азизов Б. Ё. Повышение энергоэффективности за счет снижения потерь энергии в высоковольтных сетях передачи и устройствах, работающих в течение длительного времени // Экономика и социум. 2025. № 5-1 (132). С. 997–1001. EDN: QJSAOJ
16. Перевозникова Т. В., Шляхтин Г. В. Функциональная организация нервной системы: гистология, анатомия, эмбриогенез, эволюция (межпредметные аспекты). I часть. Строение, функционирование и эмбриональное развитие нервной ткани. Учебно-методическое пособие для студентов биологических факультетов. Саратов: ООО Амирит, 2021. 96 с. ISBN 978-5-00140-928-1
17. Диндяев С. В., Виноградов С. Ю. Иллюстрированный практикум по частной гистологии нервной системы и органов чувств: электронное обучающе-контролирующее учебное пособие / С.В. Диндяев, С.Ю. Виноградов; Гос. образоват. учреждение высш. проф. образования "Иванов. гос. мед. акад. Федер. агентства по здравоохранению и социал. развитию", Каф. гистологии, эмбриологии и цитологии. Иваново: ИвГМА Росздрава, 2010.
18. Ortega, A. Neurons and Glia Cells in Marine Invertebrates: An Update / A. Ortega, T. N. Olivares-Bañuelos // *Frontiers in Neuroscience*. 2020. Vol. 14. No. APR. P. 121. <https://doi.org/10.3389/fnins.2020.00121>. EDN: DLVFTM
19. Шульман Э. Неофициальная Windows 95 Руководство разработчика, посвящ. исслед. основ Windows™95 "Chicago", [Пер.]. Киев, М.: Кн. ред. фирмы "Диалектика", Информейшн Компьютер Энтерпрайз, 1995. 455 с.
20. Дьяконова В. Е., Сахаров Д. А. Пострефлекторная нейробиология поведения. М.: Издательский Дом ЯСК, 2019. 588 с. ISBN 978-5-907117-52-5
21. Галанов Е. К. Собственный потенциал действия нейрона с модельной мембраной // *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. 2018. № 5-2. С. 312–317. EDN: XUEIVV
22. Карелов А.Е. Современные представления о механизмах боли. Анестезиология и реаниматология. 2020;(6):88-95. <https://doi.org/10.17116/anaesthesiology202006188>. EDN: IGJGPW
23. Honeycutt SE, N'Guetta PY, O'Brien LL. Innervation in organogenesis. *Curr Top Dev Biol*. 2022;148:195-235. Epub 2022 Mar 12. PMID: 35461566; PMCID: PMC10636594. <https://doi.org/10.1016/bs.ctdb.2022.02.004>. EDN: CHBOQE
24. Gebicke-Haerter PJ. The computational power of the human brain. *Frontiers in Cellular Neuroscience*. 2023 Aug 7;17:1220030. 10.3389/fncel.2023.1220030. PMID: 37608987; PMCID: PMC10441807. <https://doi.org/10.3389/fncel.2023.1220030>. EDN: XQHMBB
25. Krotov V, Agashkov K, Romanenko S, Halaidych O, Andrianov Y, Safronov BV, Belan P, Voitenko N. Elucidating afferent-driven presynaptic inhibition of primary afferent input to spinal laminae I and X. *Frontiers in Cellular Neuroscience*. 2023 Jan 11;16:1029799. PMID: 36713779; PMCID: PMC9874151. <https://doi.org/10.3389/fncel.2022.1029799>. EDN: CXONER
26. Lidieth M. Local and diffuse mechanisms of primary afferent depolarization and presynaptic inhibition in the rat spinal cord. *The Journal of Physiology*. 2006 Oct 1;576(Pt 1):309-327. Epub 2006 Jul 27. PMID: 16873417; PMCID: PMC1995647. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.2006.110577>. EDN: XSRBMF
27. Делягин В. М. Вегетативная нервная система и ее нарушения // Эффективная фармакотерапия. 2024. Т. 20. № 17. С. 22–29. <https://doi.org/10.33978/2307-3586-2024-20-17-22-28>. EDN: ZHBKTI
28. Goldstein D., Robertson D., Essler M., et al. Dysautonomias: clinical disorders of the autonomic nervous system. *Ann.Int. Med*. 2002;137(9):753–763. <https://doi.org/10.7326/0003-4819-137-9-200211050-00011>
29. Chelimsky Th., Chelimsky G. Disorders of the autonomic nervous system. In: Jancovic J., Mazziotta J., Pommeroy S., et al. (Eds.) *Newman Bradley and Daroff's neurology in clinical practice*. Elsevier, 2021; 1930-1957.
30. Сидоров А. В. Функциональная активность нервных центров беспозвоночных. Минск: БГУ, 2011. 247 с. ISBN: 978-985-518-304-5. EDN: FTDQVT
31. Shimizu H. Feeding and wounding responses in Hydra suggest functional and structural polarization of the tentacle nervous system. *Comp Biochem Physiol A Mol Integr Physiol*. 2002 Mar;131(3):669-74. PMID: 11867292. [https://doi.org/10.1016/s1095-6433\(01\)00516-5](https://doi.org/10.1016/s1095-6433(01)00516-5)

32. Калинин Т. Б., Тимошенко А. Х., Колсанова Р. Р., Захаров С. В., Гайнутдинов М. Х., Шаги-дуллин Р. Р. Действие ацетальдегида на организмы свободноживущих почвенных нематод *Caenorhabditis Elegans* линий №2 и IPE1 // Токсикологический вестник. 2012. № 4 (115). С. 45–48.
33. Амамчян А. Э., Гафиятуллина Г. Ш. Нейропластичность как основа двигательной реабилитации // Медицинский вестник Юга России. 2023. № 14(4). С. 122–128. <https://doi.org/10.21886/2219-8075-2023-14-4-122-128>. EDN: HSHVUJ
34. Бушов Ю. В., Ушаков В. Л., Светлик М. В., Карташов С. И., Орлов В. А. Роль зеркальных нейронов в интерпретации действий и намерений // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2021. № 56. С. 86–107. <https://doi.org/10.17223/19988591/56/4>. EDN: FCQOHZ
35. Goggins E, Mitani S, Tanaka S. Clinical perspectives on vagus nerve stimulation: present and future. *Clinical Science*. 2022 May 13;136(9):695-709. PMID: 35536161; PMCID: PMC9093220. <https://doi.org/10.1042/CS20210507>. EDN: SYIPWY
36. Jung S, Pak S, Lee K, Kang C. Classification of Human Failure in Chemical Plants: Case Study of Various Types of Chemical Accidents in South Korea from 2010 to 2017. *Int J Environ Res Public Health*. 2021 Oct 26;18(21):11216. PMID: 34769734; PMCID: PMC8583617. <https://doi.org/10.3390/ijerph182111216>. EDN: TEEZBQ
37. E. Palazzi, F. Currò, B. Fabiano, A critical approach to safety equipment and emergency time evaluation based on actual information from the Bhopal gas tragedy. *Process Safety and Environmental Protection*. Volume 97. 2015. P. 37-48. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2015.06.009>
38. Медведев Д. Л. Создание сети ARPANET // Электросвязь. 2008. № S1. С. 23–28. EDN: IUMOWD
39. Гохберг Л. М. Индикаторы науки: 2025: статистический сборник / Л. М. Гохберг, К. А. Дитковский, Е. И. Евневич [и др.]; Нац. исслед. ун-т "Высшая школа экономики". М.: ИСИЭЗ ВШЭ, 2025. 396 с. – Режим доступа: <https://issek.hse.ru/mirror/pubs/share/1013106714.pdf> (дата обращения: 21.12.2025). ISBN: 978-5-7598-3032-0

References

1. Abashkin V.L., Abdrahmanova G.I., Vishnevsky K.O., Gokhberg L.M., et al. *Indicators of the digital economy: 2025* [Electronic resource]. National Research University Higher School of Economics, Institute for Statistical Studies and Economics of Knowledge. Moscow: HSE ISIEZ; 2025.296 p. ISBN 978-5-7598-3029-0. <https://issek.hse.ru/mirror/pubs/share/1026726402.pdf> (Accessed December 21, 2025). (In Russ.). <https://doi.org/10.17323/978-5-7598-3029-0>
2. Bodrova E.V., Kalinov V.V., & Krasivskaya V.N. Development of Soviet computing technology in the 1960s (based on declassified archival documents). *Locus: People, Society, Cultures, Meanings*. 2024;15(3):68–81. (In Russ.). <https://doi.org/10.31862/2500-2988-2024-15-3-68-81>. EDN: CDRHLQ
3. Lugachev M.I. Once again on scientific and technological progress and the advantages of socialism. *Vestnik of Moscow University. Series 6: Economics*. 2021;(6):247–263. (In Russ.). EDN: UKALAJ.
4. Puzanova I.A. Key elements of business digital transformation. *Russian Journal of Management*. 2023;11(2):160–178. (In Russ.). <https://doi.org/10.29039/2409-6024-2023-11-2-160-174>. EDN: KXRCJL
5. Zherdin D. A., Dmitriev A. G. Basics of automation based on synthetic nervous systems. *Innovations and Investments*. 2024;(11). (In Russ.). <https://doi.org/10.24412/2307-180X-2024-11-388-393>. EDN: QWFLLD
6. Zherdin D. A., Dmitriev A. G. Economics of automation based on synthetic nervous systems. *State and Municipal Management. Scholarly Notes*. 2025;(1):280–289. (In Russ.). EDN: QXPBMV.
7. Zherdin D. A., Dmitriev A. G. Cost advantages of physical neural networks. *Modern Economy Success*. 2024;(4):44–54. (In Russ.). <https://doi.org/10.58224/2500-3747-2024-4-44-54>. EDN: FZWHZM
8. Ripoll-Sánchez, L., Watteyne, J., Sun, H., et al. The neuropeptidergic connectome of *C. elegans*. *Neuron*. 2023;111(22):3570-3589.e5. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2023.09.043>
9. Dupré C., & Yuste R. Non-overlapping neural networks in *Hydra vulgaris*. *Current Biology*. 2017;27(8):1085-1097. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2017.02.049>
10. Goult M., Botton-Amiot G., Rosato E., et al. The monoaminergic system is a bilaterian innovation. *Nature Communications*. 2023;(14):3284. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-39030-2>. EDN: UZNQWJ
11. Davies M. Benchmarks for progress in neuromorphic computing. *Nature Machine Intelligence*. 2019;(1):386–388. <https://doi.org/10.1038/s42256-019-0097-1>. EDN: LFGFMH
12. Liu, X., Lu, Y., Iseri, E., Shi, Y., Kuzum, D., et al. A compact closed-loop optogenetics system based on artifact-free transparent graphene electrodes. *Frontiers in Neuroscience*. 2018;12(MAR):132. <https://doi.org/10.3389/fnins.2018.00132>. EDN: YFWJJI

13. Erohin I.S., Skobeeva V.A., Chernov T.A. *Introduction to functional morphology of the nervous system: Methodical materials in biology*. Dolgoprudny: MIPT; 2018. 46 p. (In Russ.)
14. Zherdin D.A. *Synthetic nervous systems. Introduction to basics* [Electronic resource]: Monograph. Novokuznetsk: Znanije-M Publishing; 2025. 204 p. – ISBN 987-5-00255-415-7. (In Russ.). <https://doi.org/10.38006/00255-415-7.2025.1.204>. EDN: JHMPLR.
15. Azizov B.E. Improving energy efficiency by reducing energy losses in high-voltage transmission networks and long-term operating devices. *Economy and Society*. 2025;5-1:132. (In Russ.). EDN: QJSAOJ.
16. Perevoznikova T.V., Shlyakhtin G.V. *Functional organization of the nervous system: Histology, anatomy, embryogenesis, evolution (interdisciplinary aspects)*. Part I. Structure, functioning, and embryonic development of nervous tissue: Teaching and methodological manual for biology faculty students. Saratov: Amirit LLC; 2021. 97 p. (In Russ.). ISBN 978-5-00140-928-1
17. Dindyaev S.V., Vinogradov S.Yu. *Illustrated practicum on private histology of the nervous system and sensory organs* [Electronic resource]: Electronic teaching and control manual. Ivanovo State Medical Academy, Department of Histology, Embryology and Cytology. Ivanovo: IvGMA Roszdrav. 2010. (In Russ.).
18. Ortega A., Olivares-Bañuelos T.N. Neurons and glia cells in marine invertebrates: An update. *Frontiers in Neuroscience*. 2020;14:121. <https://doi.org/10.3389/fnins.2020.00121>. EDN: DLVFTM
19. Shulman E. *Unofficial Windows 95: Developer's guide dedicated to researching the basics of Windows™95 "Chicago"* [Trans.]. Kyiv, Moscow: Dialectika Publishing, Information Computer Enterprise. 1995. 455 p. (In Russ.).
20. Dyakonova V.E., Sakharov D.A. *Post-reflex neurobiology of behavior*. Moscow: YASK Publishing House; 2019. 592 p. (In Russ.). ISBN 978-5-907117-52-5
21. Galanov E.K. Action potential of a neuron with a model membrane. *International Journal of Applied and Fundamental Research*. 2018;5-2:312–317. (In Russ.). EDN: XUEIVV
22. Karelov A.E. Modern concepts of pain mechanisms. *Russian Journal of Anesthesiology and Reanimatology*. 2020;(6):88-95. (In Russ.) DOI: 10.17116/anaesthesiology202006188 EDN: IGJGPW
23. Honeycutt S.E., N'Guetta P.Y., O'Brien L.L. Innervation in organogenesis. *Current Topics in Developmental Biology*. 2022;(148):195–235. <https://doi.org/10.1016/bs.ctdb.2022.02.004>. EDN: CHBOQE
24. Gebicke-Haerter P.J. The computational power of the human brain. *Frontiers in Cellular Neuroscience*. 2023;(17):Article 1220030. <https://doi.org/10.3389/fncel.2023.1220030>. EDN: XQHMBB
25. Krotov V., Agashkov K., Romanenko S., et al. Elucidating afferent-driven presynaptic inhibition of primary afferent input to spinal laminae I and X. *Frontiers in Cellular Neuroscience*. 2023;(16):Article 1029799. <https://doi.org/10.3389/fncel.2022.1029799>. EDN: CXONER
26. Lidieth M. Local and diffuse mechanisms of primary afferent depolarization and presynaptic inhibition in the rat spinal cord. *Journal of Physiology*. 2006. 576(Pt 1):309-327. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.2006.110577>. EDN: XSRBMF
27. Delyagin V.M. Autonomic nervous system and its disorders. *Effective Pharmacotherapy*. 2024;20(17):22–29. (In Russ.). <https://doi.org/10.33978/2307-3586-2024-20-17-22-28>. EDN: ZHBKTI
28. Goldstein D., Robertson D., Essler M., et al. Dysautonomias: Clinical disorders of the autonomic nervous system. *Annals of Internal Medicine*. 2002;137(9):753–763. <https://doi.org/10.7326/0003-4819-137-9-200211050-00011>
29. Chelimsky Th., Chelimsky G. Disorders of the autonomic nervous system. In: J. Jancovic, J. Mazziotta, S. Pomeroy, et al. (Eds.). *Newman Bradley and Daroff's neurology in clinical practice*. Elsevier, 2021; 1930-1957.
30. Sidorov A.V. *Functional activity of invertebrate nerve centers*. Minsk: BSU; 2011. 247 p. (In Russ.). ISBN: 978-985-518-304-5. EDN: FTDQVT
31. Shimizu H. Feeding and wounding responses in *Hydra* suggest functional and structural polarization of the tentacle nervous system. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology*. 2002;131(3):669–674. [https://doi.org/10.1016/s1095-6433\(01\)00516-5](https://doi.org/10.1016/s1095-6433(01)00516-5)
32. Kalnikova T.B., Timoshenko A.Kh., Kolsanova R.R., Zakharov S.V., Gainutdinov M.Kh., Shagidullin R.R. Effect of acetaldehyde on free-living soil nematodes *Caenorhabditis elegans* strains N2 and IPE1. *Toxicological Herald*. 2012;4(115):45–48. (In Russ.).
33. Amamchyan A.E., Gafiyatullina G.Sh. Neuroplasticity as the basis of motor rehabilitation. *Medical Herald of the South of Russia*. 2023;14(4):122–128. (In Russ.). <https://doi.org/10.21886/2219-8075-2023-14-4-122-128>. EDN: HSHVUJ

34. Bushov Yu.V., Ushakov V.L., Svetlik M.V., Kartashov S.I., Orlov V.A. The role of mirror neurons in interpreting actions and intentions. *Tomsk State University Journal of Biology*. 2021;56:86–107. (In Russ.). <https://doi.org/10.17223/19988591/56/4>. EDN: FCQOHZ
35. Goggins E., Mitani S., Tanaka S. Clinical perspectives on vagus nerve stimulation: Present and future. *Clinical Science*. 2022;136(9):695–709. <https://doi.org/10.1042/CS20210507>. EDN: SYIPWY
36. Jung S., Pak S., Lee K., Kang C. Classification of human failure in chemical plants: Case study of various types of chemical accidents in South Korea from 2010 to 2017. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2021;18(21):11216. <https://doi.org/10.3390/ijerph182111216>. EDN: TEEZBQ
37. Palazzi E., Currò F., Fabiano B. A critical approach to safety equipment and emergency time evaluation based on actual information from the Bhopal gas tragedy. *Process Safety and Environmental Protection*. 2015;(97):37–48. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2015.06.009>
38. Medvedev D. L. Creation of the ARPANET network. *Electrosvyaz Magazine*. 2008;(S1):23–28. (In Russ.). EDN: IUMOWD
39. Gokhberg L. M., Ditkovsky, K. A., Evnevich, E. I., et al. *Indicators of science: 2025*: Statistical collection. National Research University Higher School of Economics. Moscow: HSE ISIEZ; 2025. 396 p. ISBN 978-5-7598-3032-0. <https://issek.hse.ru/mirror/pubs/share/1013106714.pdf> (Accessed December 21, 2025). (In Russ.).

Информация об авторах

Д. А. Жердин – аспирант, кафедра организационного менеджмента, Московский университет «Синергия».

А. Г. Дмитриев – кандидат экономических наук, доцент, кафедра организационного менеджмента, Московский университет «Синергия».

Information about the authors

D. A. Zherdin – Postgraduate student, Department of Organizational Management, Moscow University "Synergy".

A. G. Dmitriev – Cand. Sci. (Econ.), Associate Professor, Department of Organizational Management, Moscow University "Synergy".

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 23.12.2025; одобрена после рецензирования 29.01.2026; принята к публикации 05.02.2026.

The article was submitted 23.12.2025; approved after reviewing 29.01.2026; accepted for publication 05.02.2026.