

# СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ЭВОЛЮЦИИ АРХИТЕКТУР СЕТЕЙ СВЯЗИ: МОДЕЛИ УПРАВЛЕНИЯ И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

## SYSTEM ANALYSIS OF THE EVOLUTION OF COMMUNICATION NETWORK ARCHITECTURES: DATA MANAGEMENT AND PROCESSING MODELS

*E. Bogdanova  
E. Gerasimova*

*Summary.* The article examines the evolution of communication network architectures from the standpoint of system analysis, cybernetics and the theory of complex adaptive systems. It is shown that the development of communication networks follows a trajectory from rigidly deterministic hierarchical systems to programmable centralized architectures and further to distributed intelligent systems with elements of self-organization. The main attention is paid to the transformation of control models, data processing mechanisms and feedback loops, as well as the analysis of system constraints and new classes of risks.

*Keywords:* communication networks, system analysis, SDN, NFV, 5G/6G, complex adaptive systems, autonomous networks, and digital twins.

**Богданова Елена Александровна**

Кандидат технических наук, доцент,  
Поволжский государственный университет  
телекоммуникаций и информатики, г. Самара  
helen.bogdan@mail.ru

**Герасимова Екатерина Олеговна**

Аспирант, Поволжский государственный университет  
телекоммуникаций и информатики, Самара  
e.o.gerasimova@mail.ru

*Аннотация.* В статье рассматривается эволюция архитектур сетей связи с позиций системного анализа, кибернетики и теории сложных адаптивных систем. Показано, что развитие сетей связи следует траектории от жестко детерминированных иерархических систем к программируемым централизованным архитектурам и далее — к распределённым интеллектуальным системам с элементами самоорганизации. Основное внимание уделяется трансформации моделей управления, механизмов обработки данных и контуров обратной связи, а также анализу системных ограничений и новых классов рисков.

*Ключевые слова:* сети связи, системный анализ, SDN, NFV, 5G/6G, сложные адаптивные системы, автономные сети, цифровые двойники.

### Введение

Современные сети связи представляют собой крупномасштабные распределённые информационно-управляющие системы, обеспечивающие передачу, обработку и управление потоками данных в условиях высокой динамики и неопределённости [1]. Эволюция сетевых архитектур сопровождается не только ростом пропускной способности и вычислительных возможностей, но и качественными изменениями парадигм управления и обработки информации [2].

Целью данной работы является системный анализ эволюции архитектур сетей связи через призму изменения моделей управления, характера обратной связи и роли данных в принятии решений. Общая траектория эволюции архитектур сетей связи как информационно-управляющих систем представлена на рис. 1. Анализ проводится с позиций теории систем, кибернетического подхода и теории сложных адаптивных систем (Complex Adaptive Systems, CAS) [3].

### 1. Классические сети связи как детерминированные иерархические системы

#### 1.1. Модель управления

Классические сети связи, включая телефонные сети общего пользования (ТФОП) и IP/MPLS-сети, могут быть

охарактеризованы как иерархические детерминированные системы с локализованным управлением. Управляющие функции распределены по сетевым узлам (АТС, маршрутизаторы), которые принимают решения на основе заранее заданных алгоритмов и статических или квазистатических таблиц коммутации и маршрутизации [4].

Управление носит преимущественно реактивный характер: система реагирует на входные события (поступление вызова или пакета) в соответствии с предопределёнными правилами. Централизованный контур управления отсутствует, а прогнозирование и проактивная оптимизация параметров сети практически не реализуются.

#### 1.2. Обработка информации и ограничения

Обработка информации в таких сетях сводится к коммутации каналов или пересылке пакетов на основе заголовочной информации без учёта семантики и контекста трафика [5]. Каждое сетевое устройство располагает лишь локальной информацией о состоянии собственных интерфейсов и соседних узлов.

Системный анализ и оптимизация выполняются постфактум на основе агрегированной статистики, собираемой средствами мониторинга. Это приводит к низ-



Рис. 1. Эволюция архитектур сетей связи как информационно-управляющих систем

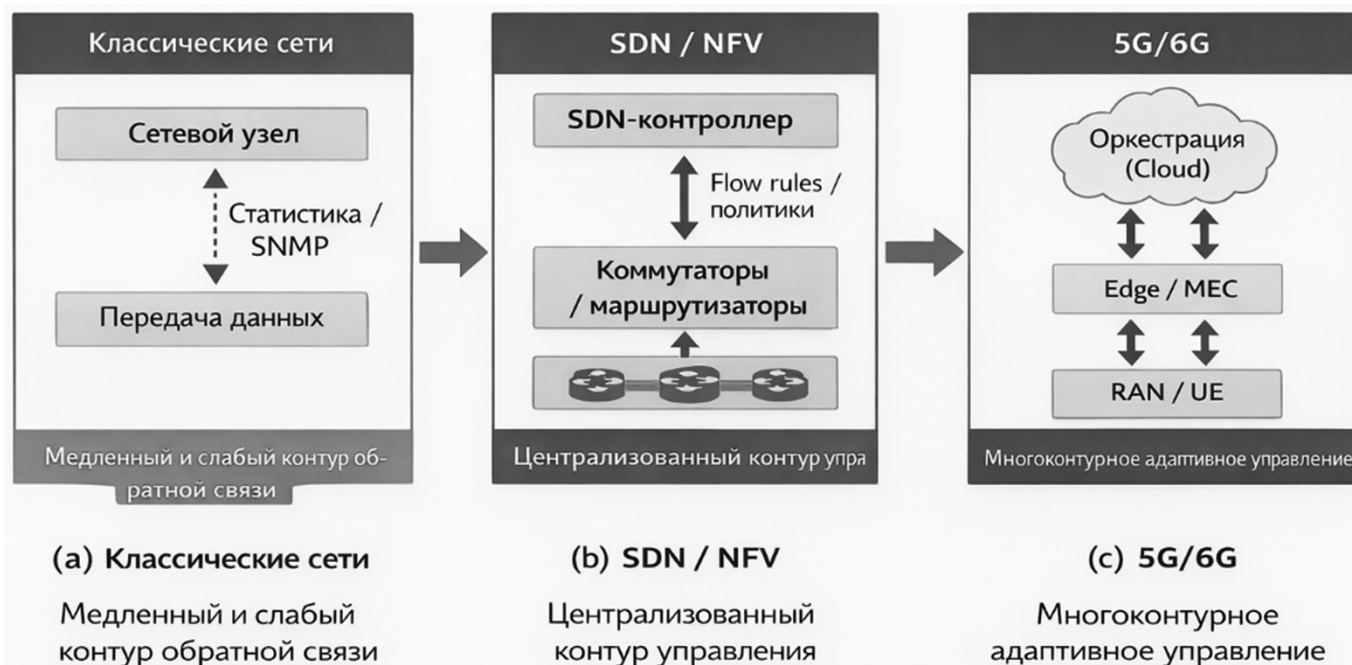


Рис. 2. Трансформация контуров управления и обратной связи

кой адаптивности, сложности обеспечения сквозного качества обслуживания (QoS) и повышенному риску каскадных отказов при локальных сбоях [6]. Эволюция контуров управления и обратной связи в сетях связи на различных этапах их развития показана на рис. 2.

## 2. Программно-определяемые сети и виртуализация функций

### 2.1. Централизация и программируемость управления

Появление программно-определяемых сетей (Software-Defined Networking, SDN) и виртуализации сетевых функций (Network Functions Virtualization, NFV) ознаменовало переход к кибернетической модели управления с чётко выраженными контурами прямой

и обратной связи [7]. Принципиальным отличием SDN является разделение плоскости управления и плоскости передачи данных.

Централизованный SDN-контроллер формирует глобальное представление о топологии и состоянии сети и вычисляет управляющие воздействия в виде правил обработки потоков. Виртуализация сетевых функций и появление уровня оркестрации (MANO) позволяют решать задачи размещения, масштабирования и обеспечения отказоустойчивости сетевых сервисов как задачи системного планирования.

### 2.2. Системные преимущества и вызовы

Централизация управления существенно повышает управляемость и гибкость сети, сокращает время

внедрения новых политик и сервисов [8]. Вместе с тем формируется новая критическая точка — контроллер и оркестратор, отказ или компрометация которых может привести к деградации всей системы. Кроме того, масштабирование централизованной обработки телеметрии становится нетривиальной задачей для сетей операторского масштаба.

### 3. Облачно-ориентированные и интеллектуальные архитектуры как сложные адаптивные системы

#### 3.1. Распределённый интеллект и сервис-ориентированное управление

Архитектуры сетей пятого и перспективного шестого поколений (5G/6G) характеризуются переходом от централизованного управления к распределённому интеллекту. Service-Based Architecture (SBA) 5G реализует управление в виде набора взаимодействующих сервисов, а вычисления смещаются ближе к границе сети (Multi-access Edge Computing, MEC).

Управление приобретает целеориентированный характер: оператор задаёт целевые показатели (KPI), а система автоматически адаптирует параметры сети. Гибридная модель распределённого управления в сетях 5G/6G, сочетающая централизованную оркестрацию и локальное принятие решений, представлена на рис. 3. Для этого используются методы машинного обучения, включая обучение с подкреплением, а также концепция автономных сетей (Autonomous Networks).



Рис. 3. Гибридная модель управления в сетях 5G/6G

#### 3.2 Роль данных и цифровых двойников

Ключевым элементом современных сетей становится обработка больших объёмов данных в реальном времени и переход от описательной телеметрии к предиктивной аналитике. Создание цифровых двойников сетей позволяет проводить моделирование, прогнозирование

и безопасную апробацию управляющих воздействий без риска для реальной инфраструктуры [9].

Интеллектуальные алгоритмы применяются для классификации трафика, выявления аномалий, оптимизации радиодоступа (например, RAN Intelligent Controller в O-RAN) и автоматизированного анализа первопричин отказов.

### Обсуждение и системные риски

Переход к распределённому интеллекту приводит к возникновению эмерджентных свойств, таких как повышенная устойчивость и способность к самоорганизации. Вместе с тем усложняется задача верификации корректности работы системы, возрастает зависимость от качества данных и появляются новые векторы атак, ориентированные на алгоритмы машинного обучения.

Сравнительный системный анализ архитектур  
Таблица 1.  
Сравнение архитектур сетей связи с позиций системного анализа

Характеристика	Классические сети (ТФОП, IP/MPLS)	SDN / NFV	5G/6G, интеллектуальные сети
Тип системы	Детерминированная иерархическая	Кибернетическая	Сложная адаптивная (CAS)
Модель управления	Локальная, распределённая	Централизованная	Гибридная, распределённая
Контур обратной связи	Слабый, медленный	Явный, централизованный	Многоконтурный, адаптивный
Уровень автоматизации	Низкий	Средний-высокий	Высокий (автономный)
Использование данных	Статистика постфактум	Телеметрия в реальном времени	Предиктивная аналитика, AI/ML
Масштабируемость управления	Ограниченная	Проблемная при росте	Высокая за счёт распределения
Основные риски	Каскадные отказы	Центральная точка отказа	Сложность верификации, data bias

Составлено автором на основании [10]

### Заключение

Системный анализ эволюции архитектур сетей связи показывает закономерный переход от управления детерминированными иерархическими системами к управлению сложными адаптивными системами. Ключевым элементом современных сетей становится обработка больших объёмов данных в реальном времени и переход от описательной телеметрии к предиктивной аналитике.

чевыми факторами этого перехода являются централизация и последующая децентрализация управления, рост роли данных и внедрение интеллектуальных меха-

низмов принятия решений. Полученные выводы могут быть использованы при проектировании и анализе перспективных автономных сетей связи.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Антонов А.В. Системный анализ: Уч. / А.В. Антонов. — М.: Инфра-М, 2016. — 158 с.
2. Иго Т. Arduino, датчики и сети для связи устройств / Т. Иго. — СПб.: BHV, 2019. — 544 с.
3. Нетес В.А. Стандартизация в области надёжности сетей связи / В.А. Нетес // Инновации для построения цифрового будущего: Материалы XXIX Международного форума МАС' 2025, Москва, 25 апреля 2025 года. — Москва: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Государственный университет просвещения», 2025. — С. 65–69. — EDN PUDYHK.
4. Ильин Н.С. Искусственный интеллект в сетях связи: перспективы и вызовы / Н.С. Ильин, С.Б. Андреев // Современные и информационные технологии в социальной сфере: Сборник научных трудов в 2 томах, Чебоксары, 25 апреля 2025 года. — Чебоксары: Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), 2025. — С. 160–162. — EDN PDBLLR.
5. Еркаев А.А. Исследование применения искусственного интеллекта в сетях связи / А.А. Еркаев // Современные проблемы телекоммуникаций: материалы Всероссийской научно-технической конференции, Новосибирск, 22–25 апреля 2024 года. — Новосибирск: Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, 2024. — С. 241–245. — DOI 10.55648/SPT-2024-1-241. — EDN ATMAXQ.
6. Салманов Р.М. Будущее информатизации в различных сферах деятельности / Р.М. Салманов // Наука, общество, инновации: актуальные вопросы современных исследований: сборник статей Международной научно-практической конференции, Пенза, 25 мая 2023 года. — Пенза: Наука и Просвещение (ИП Гуляев Г.Ю.), 2023. — С. 60–62. — EDN FHHLJH.
7. Ким П.В. Сетевые оверлейные технологии: OTV, LISP / П.В. Ким, В.В. Герасимов // Студенческий вестник. — 2019. — № 21–7(71). — С. 89–91. — EDN IIBVGA.
8. Transition technologies towards 6G networks / T.R. Raddo, S. Rommel, B. Cimini [et al.] // Eurasip Journal on Wireless Communications and Networking. — 2021. — Vol. 2021, No. 1. — P. 1–22. — DOI 10.1186/s13638-021-01973-9. — EDN CISAZN.
9. Towards a Scalable 5G Fronthaul: Analog Radio-over-Fiber and Space Division Multiplexing / S. Rommel, B. Cimini, A. Morales [et al.] // Journal of Lightwave Technology. — 2020. — Vol. 38, No. 19. — P. 5412–5422. — DOI 10.1109/JLT.2020.3004416. — EDN FAKFPN.
10. Khorsandi B.M. Centralized vs. distributed algorithms for resilient 5G access networks / B.M. Khorsandi, F. Tonini, C. Raffaelli // Photonic Network Communications. — 2019. — Vol. 37, No. 3. — P. 376–387. — DOI 10.1007/s11107-018-00819-7. — EDN WKKLHE.

© Богданова Елена Александровна (helen.bogdan@mail.ru); Герасимова Екатерина Олеговна (e.o.gerasimova@mail.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»