

УДК 004
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-3-7-16>



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Среда исследований операционно-вычислительной архитектуры информационного обеспечения цифровой валюты центрального банка

А.С. Албычев^{1, 2, @},
С.А. Кудж²

¹ Федеральное казначейство Министерства финансов Российской Федерации, Москва, 101000 Россия

² МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

@ Автор для переписки, e-mail: albychev@mirea.ru

Резюме

Цели. Внедрение и разработка информационно-вычислительной архитектуры и информационного обеспечения цифровой валюты центрального банка (ЦВЦБ) страны основываются на выборе программно-аппаратной платформы, включая технологии и способы взаимодействия элементов вычислительного комплекса. Внедрение технологий ЦВЦБ существенно зависит как от операционно-вычислительной архитектуры, так и от технологических характеристик конкретной реализации информационного обеспечения цифровой валюты, что определяет необходимость разработки соответствующей среды исследований. Цель статьи – разработка инфраструктуры среды экспериментальных исследований операционно-вычислительной архитектуры информационного обеспечения ЦВЦБ.

Методы. Развитие цифровых технологий не сформировало стек реализации ЦВЦБ, а комплекс технологических реализаций находится в разработке во многих странах мира. Основой для формирования программно-аппаратного комплекса информационного обеспечения являются теоретические и экспериментальные исследования современных инструментов цифрового управления транзакциями.

Результаты. Рассмотрены архитектурные и технологические компоненты, составляющие операционно-вычислительную среду цифровой валюты центрального банка: операционно-вычислительные архитектуры, блокчейн-технологии, алгоритмы консенсуса, формы представления цифровых валют. Представлено 5 вариантов операционно-вычислительных архитектур ЦВЦБ. Проведено исследование информационных моделей взаимодействия участников транзакций ЦВЦБ, направленных на установление степени влияния архитектурного решения на характеристики вычислительного комплекса информационного обеспечения. Проанализированы особенности цифровых валют в форме аккаунтов и токенов.

Выводы. Разработана инфраструктура среды исследований операционно-вычислительной архитектуры информационного обеспечения ЦВЦБ. Созданы предпосылки для комплексного анализа технологических характеристик операционно-вычислительной среды ЦВЦБ. Проведен анализ вариантов операционно-вычислительных архитектур. В результате анализа сформирован сводный перечень характеристик приведенных архитектур. В зависимости от требований, предъявляемых к ЦВЦБ, на основе этого перечня может быть выбрана наиболее адекватная операционно-вычислительная архитектура.

Ключевые слова: цифровая валюта, цифровая валюта центрального банка, блокчейн, алгоритм консенсуса, архитектура цифровой валюты

• Поступила: 20.03.2023 • Доработана: 14.04.2023 • Принята к опубликованию: 20.04.2023

Для цитирования: Албычев А.С., Кудж С.А. Среда исследований операционно-вычислительной архитектуры информационного обеспечения цифровой валюты центрального банка. *Russ. Technol. J.* 2023;11(3):7–16. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-3-7-16>

Прозрачность финансовой деятельности: Авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Development of a research environment for the operational and computational architecture of central bank digital currency software

Alexander S. Albychev ^{1, 2, @},
Stanislav A. Kudzh ²

¹ The Federal Treasury of the Ministry of Finance of the Russian Federation, Moscow, 101000 Russia

² MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

@ Corresponding author, e-mail: albychev@mirea.ru

Abstract

Objectives. The development and implementation of information and computing architecture and information support for a state central bank digital currency (CBDC) is based on the selection of a software and hardware platform, including technologies and methods for supporting interaction between the elements of the computing complex. The implementation of CBDC technologies significantly depends both on the operational and computing architecture, as well as on the technological characteristics of the means for implementing digital currency information support, which determines the need to develop an appropriate research environment. Thus, the present study sets out to develop an infrastructure for the experimental research environment of the operational and computing architecture used to provide information support for the CBDC.

Methods. Digital technologies required for forming an CBDC implementation stack are under development in many countries of the world. The basis for the formation of a software and hardware complex for providing CBDC information support is comprised of theoretical and experimental studies into contemporary digital transaction management tools.

Results. The main architectural and technological components that make up the CBDC operational and computing environment comprise operational and computing architectures, blockchain technologies, consensus algorithms, and various forms of digital currencies. Five CBDC operational and computing architecture options are presented. Information models of interaction between the participants in transactions of the central bank digital currency were studied with the aim of establishing the effects of an architectural solution to the characteristics of the computing complex used to provide information support. Features of various digital currencies in the form of accounts and tokens were analyzed.

Conclusions. A research environment infrastructure for the CBDC operational and computing information support architecture has been developed. The prerequisites for a comprehensive analysis of the technological characteristics of the CBDC operational and computing environment are set out along with a comparison of operational and computing architecture variants. As a result of the analysis, a summary list of the characteristics of the studied architectures is drawn up. This provides for selecting the optimal operational and computing architecture depending on the requirements imposed on the CBDC.

Keywords: digital currency, central bank digital currency, blockchain, consensus algorithm, digital currency architecture

• Submitted: 20.03.2023 • Revised: 14.04.2023 • Accepted: 20.04.2023

For citation: Albychev A.S., Kudzh S.A. Development of a research environment for the operational and computational architecture of central bank digital currency software. *Russ. Technol. J.* 2023; 11(3):7–16. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-3-7-16>

Financial disclosure: The authors have no a financial or property interest in any material or method mentioned.

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие технологий в области финансов, электронных платежей, цифровых валют и блокчейн-систем [1] привело к рассмотрению возможности выпуска суверенных государственных цифровых валют. Цифровые валюты центрального банка (ЦВЦБ) активно рассматриваются различными государствами как новая форма представления денежных средств наряду с существующими [2, 3]. ЦВЦБ находится под управлением центрального банка (ЦБ) страны и имеет соотношение 1:1 с национальной валютой.

При исследовании ЦВЦБ акцентируют внимание на различных характеристиках цифровой валюты [3, 4]. В некоторых работах на первый план выносятся вопросы производительности технологического обеспечения цифровых валют [5–7], т.е. возможности обработки определенного числа финансовых операций за отрезок времени. В других работах рассматривается обеспечение надежности хранения данных [3, 7, 8], защищенности от совершения несанкционированных операций с цифровой валютой [4, 7, 9], также исследователи рассматривают приватность [7, 9, 10] как один из аспектов ЦВЦБ.

Блокчейн-технологии [5, 11] применяются в цифровых валютах для обеспечения неподдельности истории транзакций. В свою очередь, алгоритмы обеспечения консенсуса [7, 12, 13] нужны для защиты от недобросовестного поведения одного из участников в блокчейн-сети. Иными словами, в ситуации отсутствия единого источника достоверной информации появляется потребность в алгоритме консенсуса, который бы позволил этого избежать.

Как правило, в работах исследуются два способа хранения данных цифровых валют: аккаунты и токены [8, 9, 14–16]. Первая форма хранения данных подразумевает, что у владельца аккаунта есть некоторое число, отражающее текущий баланс счета, а финансовые операции заключаются в изменении соответствующего числа у участников транзакции. Токены описаны менее детально, но в целом

их можно представить как связку из уникального идентификатора токена и номинала. Каждому токенту устанавливается текущий владелец, например, с помощью уникального идентификатора владельца. Финансовые операции в этом случае заключаются в изменении уникального идентификатора владельца для одного или нескольких токенов.

В ряде работ [7, 14, 17] отмечено, что одним из основных вопросов при разработке ЦВЦБ является выбор операционно-вычислительной архитектуры. Операционно-вычислительная архитектура описывает участников системы, обеспечивающей функционирование цифровой валюты, и связи между ними. В некоторых работах используется другой, более широкий термин – дизайн ЦВЦБ [5, 18], включающий, в т.ч. и детали реализации цифровой валюты. При выборе операционно-вычислительной архитектуры важно учитывать как организационные требования, такие как соблюдение принципа «знай своего клиента» (KYC, Know Your Customer) [6, 14, 19], так и технические аспекты.

Цель статьи – разработка инфраструктуры среды исследований операционно-вычислительной архитектуры информационного обеспечения цифровой валюты центрального банка.

1. ВАРИАНТЫ РЕАЛИЗАЦИИ ОПЕРАЦИОННО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ АРХИТЕКТУР ЦВЦБ

Рассмотрим варианты операционно-вычислительных архитектур для обеспечения функционирования ЦВЦБ, их достоинства и недостатки.

1.1. Централизованная двухуровневая архитектура

В качестве наиболее простого варианта с точки зрения архитектуры может рассматриваться централизованная двухуровневая архитектура, где единственной организацией, обеспечивающей функционирование ЦВЦБ, будет ЦБ (схема представлена на рис. 1).

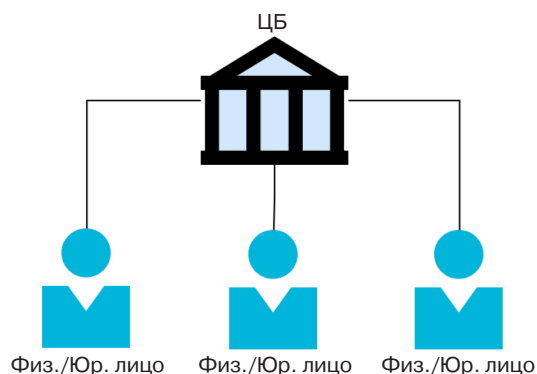


Рис. 1. Схема централизованной двухуровневой архитектуры ЦВЦБ

В таком варианте реализации ЦВЦБ единственным источником достоверной информации о движении и принадлежности средств является ЦБ, который при этом также осуществляет все технологическое обеспечение. ЦБ реализует как выпуск цифровой валюты, так и обработку транзакций. К достоинствам этого варианта можно отнести:

- 1) простоту в реализации, т.к. отсутствует необходимость в координировании работы нескольких организаций;
- 2) минимизацию задержек при выполнении транзакций ввиду отсутствия посредников;
- 3) ЦБ имеет доступ ко всем данным в реальном времени.

Однако такая операционно-вычислительная архитектура имеет значимые недостатки:

- 1) все техническое обеспечение ЦВЦБ должно предоставляться единым поставщиком – ЦБ;
- 2) организационное обеспечение ЦВЦБ также полностью возлагается на ЦБ (например, соответствие принципу КУС).

При такой операционно-вычислительной архитектуре, в зависимости от реализации технологического обеспечения ЦВЦБ, надежность хранения данных и защищенность может обеспечиваться с разным уровнем качества.

1.2. Централизованная трехуровневая архитектура

Дополнение двухуровневой архитектуры промежуточным звеном в виде частных банков формирует трехуровневую архитектуру. С помощью банков возможно снижение организационной нагрузки на ЦБ, т.к. они могут обеспечивать соблюдение принципа КУС. Схема трехуровневой архитектуры представлена на рис. 2.

Преимущества такой архитектуры заключаются в следующем:

- 1) простота в реализации, т.к. хранение данных и исполнение транзакций обеспечивается ЦБ;

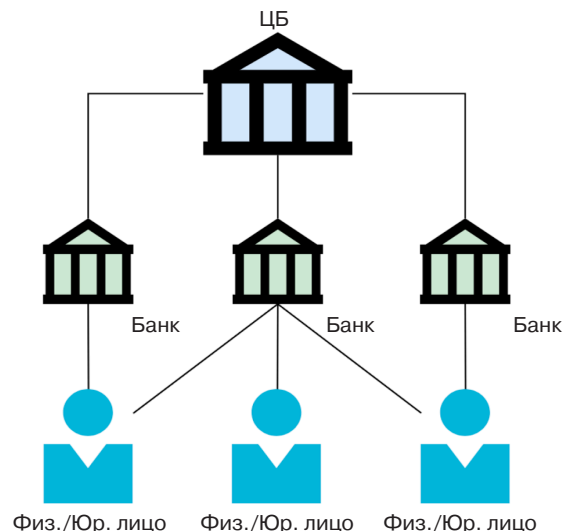


Рис. 2. Схема централизованной трехуровневой архитектуры ЦВЦБ

- 2) организационное обеспечение (соблюдение принципа КУС) распределяется между частными банками;
- 3) ЦБ имеет доступ ко всем данным в реальном времени;
- 4) ЦБ предоставляет банкам единый инструмент для осуществления транзакций.

Архитектура имеет недостаток: все техническое обеспечение ЦВЦБ должно предоставляться единым поставщиком – ЦБ.

Надежность хранения данных и защищенность в этом случае также сильно зависят от ЦБ, как и при двухуровневой архитектуре.

1.3. Четырехуровневая архитектура с единым оператором ЦВЦБ

В работе [7] предлагается несколько операционно-вычислительных архитектур, одна из которых состоит в передаче технологического обеспечения функционирования ЦВЦБ отдельной организации – оператору ЦВЦБ. Представленная на рис. 3 схема показывает связь между элементами архитектуры.

Во многом эта операционно-вычислительная архитектура схожа с трехуровневой централизованной архитектурой. Разделение ответственности между оператором ЦВЦБ, ЦБ и частными банками обладает следующими преимуществами:

- 1) ресурсоемкая задача исполнения транзакций обеспечивается оператором ЦВЦБ;
- 2) организационное обеспечение (соблюдение принципа КУС) распределяется между частными банками;
- 3) оператор ЦВЦБ предоставляет банкам единый инструмент для осуществления транзакций.

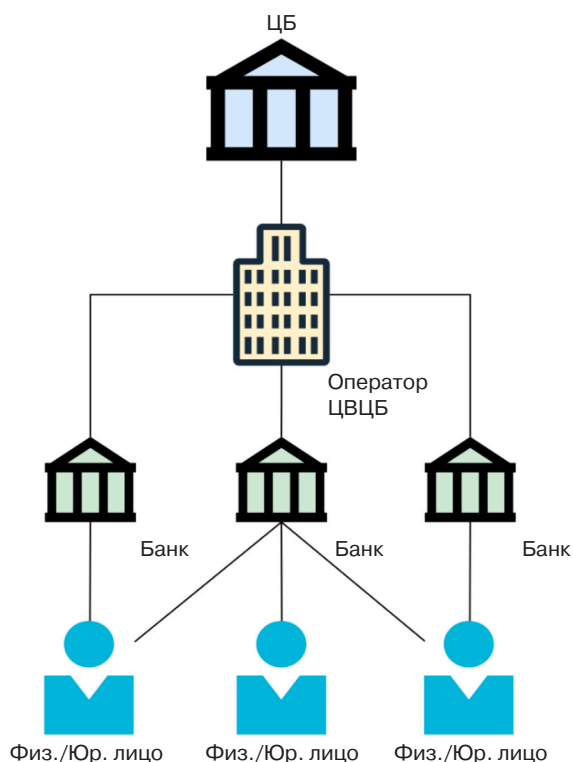


Рис. 3. Схема четырехуровневой архитектуры с единым оператором ЦВЦБ

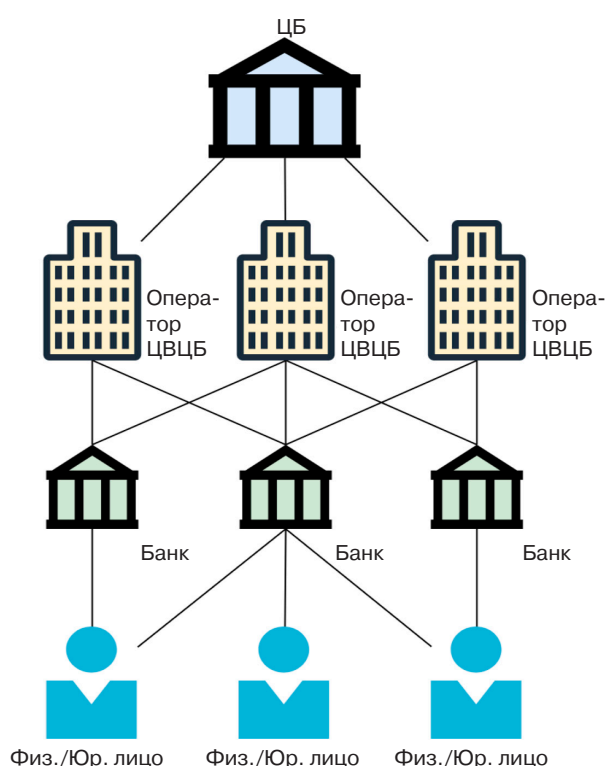


Рис. 4. Схема четырехуровневой архитектуры с сегментированием между несколькими операторами ЦВЦБ

Однако недостатки архитектуры значимы:

- 1) ЦБ не имеет доступа ко всем данным в реальном времени, требуется отдельный API для доступа к истории транзакций;
- 2) все данные транзакций находятся под контролем одной организации;
- 3) все техническое обеспечение ЦВЦБ должно предоставляться единым поставщиком — оператором ЦВЦБ.

Перечисленные недостатки позволяют предположить, что монополия на оперирование транзакциями может привести к недобросовестному использованию системы ЦВЦБ. Кроме того, как и в случае с описанными централизованными архитектурами, вопрос масштабирования системы процессинга транзакций становится задачей одной организации.

1.4. Четырехуровневая архитектура с сегментированием между несколькими операторами ЦВЦБ

Четырехуровневая архитектура с несколькими операторами ЦВЦБ (рис. 4), также предложенная в работе [7], решает ряд проблем, связанных с монополией на данные: устраняется единая точка отказа системы, повышается ее масштабируемость. Это достигается путем сегментирования данных ЦВЦБ.

Перечислим достоинства этой архитектуры:

- 1) организационное обеспечение (соблюдение принципа KYC) распределяется между частными банками;
- 2) вычислительная нагрузка по процессингу транзакций распределяется между несколькими операторами ЦВЦБ.

К недостаткам следует отнести:

- 1) усложнение доступа к истории транзакций для ЦБ ввиду ее сегментированности;
- 2) усложнение процессинга транзакций, связанных с вовлечением двух и более операторов;
- 3) более сложную логику взаимодействия банков с операторами из-за использования связи «многие ко многим».

Несмотря на отсутствие единой точки отказа, каждый сегмент при такой архитектуре является зоной ответственности только одной организации, и в случае сбоев данные о транзакциях могут быть утеряны. Также возможно недобросовестное использование системы ЦВЦБ со стороны оператора, хотя рамки ограничены одним сегментом.

1.5. Четырехуровневая архитектура с сегментированием и репликацией между несколькими операторами ЦВЦБ

С целью устранения недостатков операционно-вычислительной архитектуры с сегментированием

предлагается уточнение, включающее репликацию данных между операторами ЦВЦБ. Как показано на рис. 5, каждый сегмент должен быть реплицирован между несколькими операторами. Выполнение транзакции потребует достижения консенсуса между операторами ЦВЦБ, владеющими сегментом. В таком случае можно гибко подбирать алгоритм консенсуса, соответствующий предпочтениям по защищенности и производительности.

Чем больше операторов ЦВЦБ вовлечено в функционирование одного сегмента, тем выше надежность системы, но тем выше избыточность хранимых данных. Чем больше операторов ЦВЦБ участвует в обработке транзакции для обеспечения консенсуса, тем более устойчива система к недобросовестным действиям со стороны операторов. Однако при этом снижается производительность.

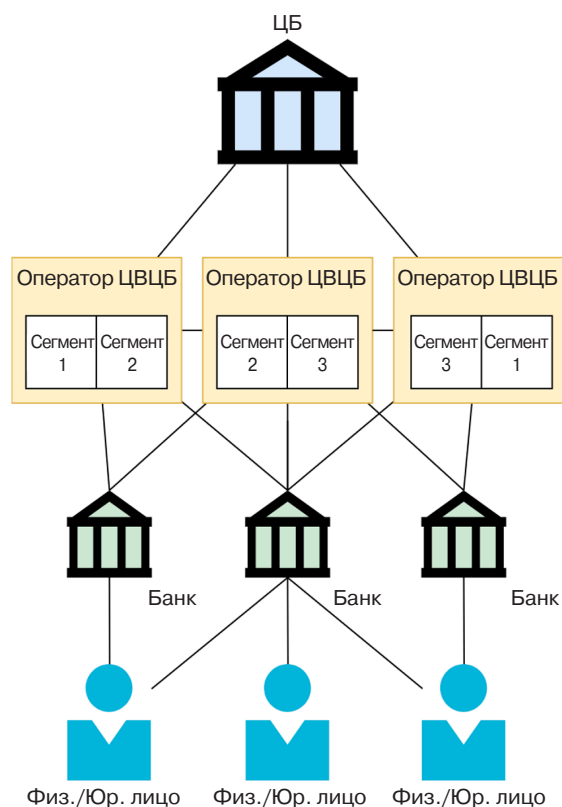


Рис. 5. Схема четырехуровневой архитектуры с сегментированием и репликацией между несколькими операторами ЦВЦБ

Рассматриваемая операционно-вычислительная архитектура имеет следующие достоинства:

- 1) организационное обеспечение (соблюдение принципа KYC), распределяется между частными банками;
- 2) вычислительная нагрузка по процессингу транзакций распределяется между несколькими операторами ЦВЦБ;
- 3) отключение оператора не приводит к потерям данных и доступности сервиса ЦВЦБ;

- 4) наличие алгоритма консенсуса при выполнении транзакций позволяет операторам взаимно проверять результаты для избежания недобросовестных действий.

Операционно-вычислительная архитектура имеет ряд недостатков:

- 1) усложнение доступа к истории транзакций для ЦБ по причине ее сегментированности;
- 2) усложнение процессинга транзакций, связанных с вовлечением двух и более операторов;
- 3) более сложную логику взаимодействия банков с операторами из-за использования связи «многие ко многим»;
- 4) повышенную ресурсоемкость процессинга транзакции и увеличения суммарного объема хранимых данных ввиду избыточности.

2. ИНФРАСТРУКТУРА СРЕДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для решения поставленной задачи разработаем инфраструктуру среды исследований с применением технологий виртуализации [20].

В состав блокчейн-сети при этом будут входить несколько организаций, а каждая организация может иметь один и более узлов [21]. Тогда суммарный объем необходимых ресурсов центрального процессора, оперативной памяти и дискового пространства, необходимых для проведения эксперимента, можно рассчитать по формуле:

$$R_{\text{total}} = \sum_{i=1}^O \sum_{j=1}^{N_i} (R_{ij} R_h + R_c),$$

где O – число организаций; N_i – число узлов в i -й организации; R_{ij} – объем ресурса, необходимый j -му узлу в i -й организации для функционирования; R_h – накладные расходы ресурса на работу гипервизора, пропорциональные выделяемому ресурсу; R_c – накладные расходы ресурса на работу гипервизора, необходимые для поддержания работы узла независимо от выделенного для него объема ресурса.

Так, для поддержания работы модели ЦВЦБ, содержащей 4 организации (в одной из которых 4 узла, а в трех других – по 2 узла), при условии, что требуемый узлам объем оперативной памяти инвариантен и равен 2, $R_h = 0$, а $R_c = 0.2$, потребуется 22 Гб оперативной памяти.

В случае реализации цифровой валюты в форме аккаунтов сами транзакции (без учета вычислительной сложности алгоритма консенсуса) имеют вычислительную сложность $O(1)$, т.к. изменения одного или двух скалярных значений являются тривиальными операциями. Однако при реализации цифровых

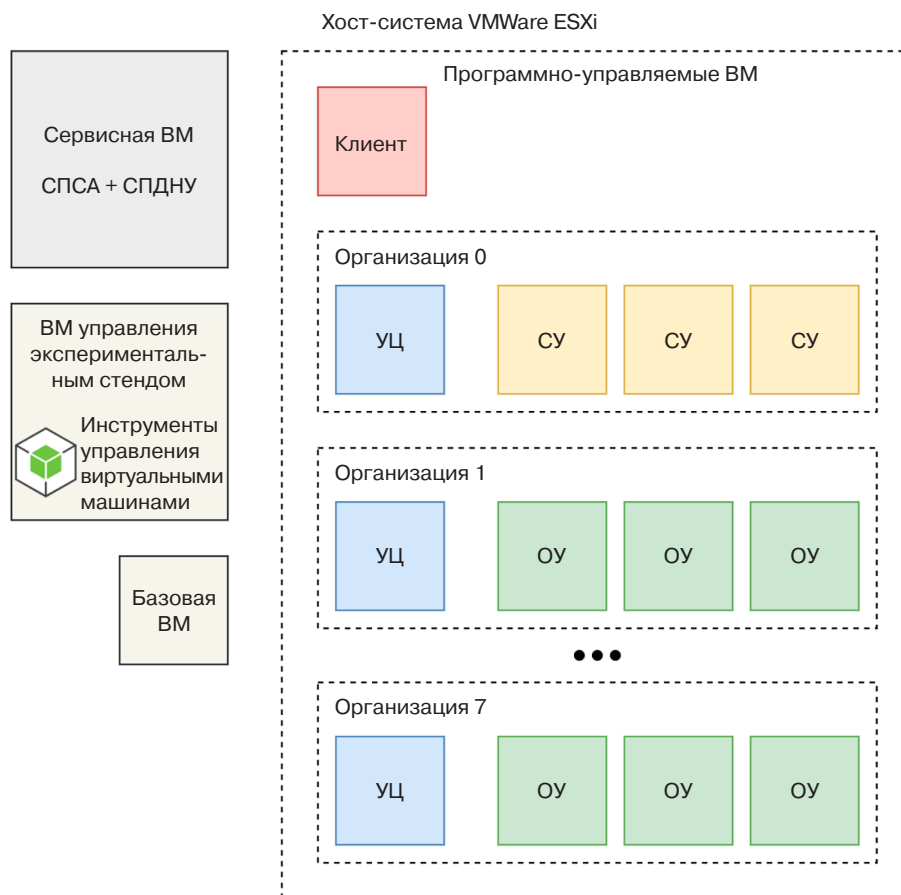


Рис. 6. Схема инфраструктуры исследовательской среды

(СПСА – служба преобразования сетевых адресов; СПДНУ – сервер протокола динамической настройки узла; УЦ – удостоверяющий центр; СУ – служба упорядочения; ОУ – одноранговый узел)

валют в форме токенов транзакции могут иметь большую вычислительную сложность.

Обе формы представления цифровой валюты можно рассмотреть с точки зрения прозрачности финансовых операций для контролирующих органов. Если хранить историю транзакций, то в случае аккаунтов с числовым представлением баланса крайне затруднительно отследить пути передачи некоторой суммы денег. Достоверно разграничить факт расходования целевых средств от других проблематично, если они проходили через единый аккаунт. Напротив, при использовании токенов, когда каждая денежная единица имеет свой уникальный идентификатор, история транзакций отражает передачу конкретной денежной единицы от одного владельца к другому. Таким образом, возможна реализация механизма для выявления нецелевого расходования денежных средств.

Для проведения исследований технологических параметров информационного обеспечения ЦВЦБ разработана инфраструктура среды исследований с использованием *VMWare ESXi*¹.

В качестве инструментов использованы:

- модифицированная версия *Repexlab*² для работы с *VMWare ESXi*;
- плагин *vagrant-vmware-esxi*³;
- утилита *ovftool*⁴;
- система *Ansible*⁵;
- монитор *atop*⁶.

Общая схема конфигурации приведена на рис. 6.

Инструментарий управления экспериментом был размещен на выделенной виртуальной машине (VM). Сервисная VM использовалась для настройки сети NAT и сервиса DHCP с назначением IP-адресов в соответствии с MAC-адресами программно-управляемых VM. Использовалась заранее сконфигурированная VM (на рис. 6 – «Базовая VM»),

² <https://github.com/rnd-student-lab/repexlab>. Дата обращения 17.03.2023. / Accessed March 17, 2023.

³ <https://github.com/josenk/vagrant-vmware-esxi>. Дата обращения 17.03.2023. / Accessed March 17, 2023.

⁴ <https://developer.vmware.com/web/tool/4.4.0/ovf>. Дата обращения 17.03.2023. / Accessed March 17, 2023.

⁵ <https://www.ansible.com/>. Дата обращения 17.03.2023. / Accessed March 17, 2023.

⁶ <https://www.atoptool.nl/>. Дата обращения 17.03.2023. / Accessed March 17, 2023.

¹ <https://www.vmware.com/products/esxi-and-esx.html>. Дата обращения 17.03.2023. / Accessed March 17, 2023.

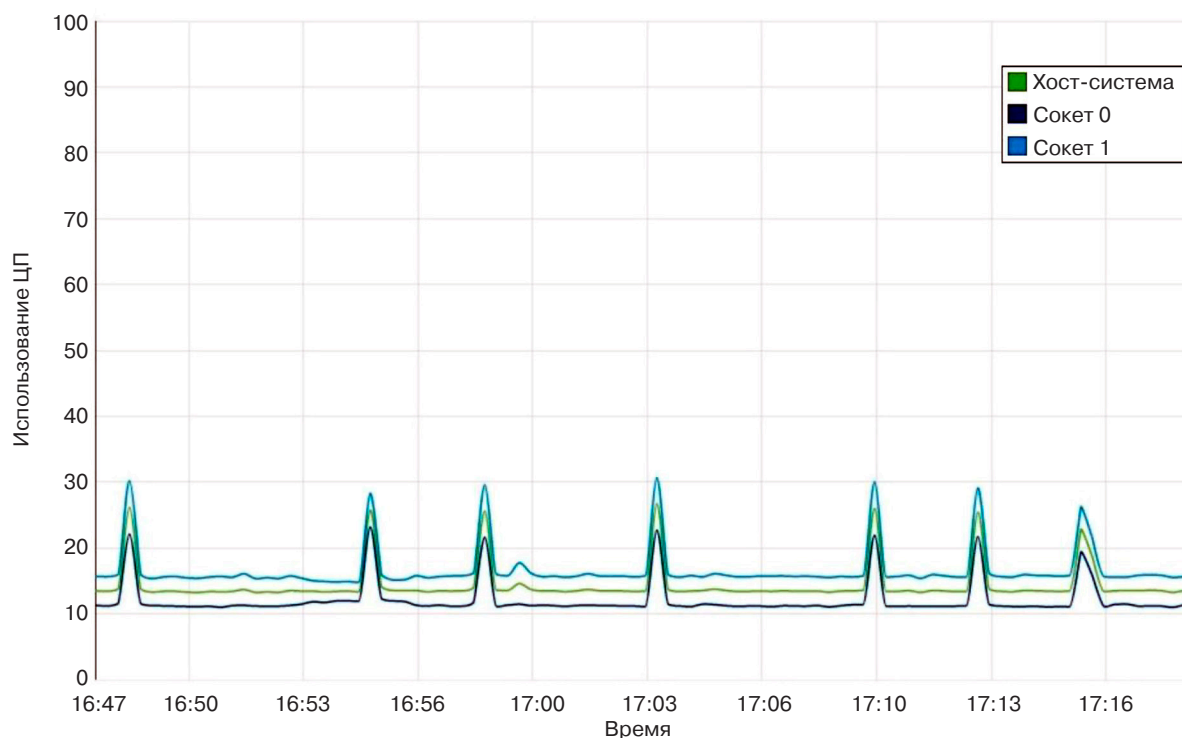


Рис. 7. Использование ресурсов ЦП после провизии VM под управлением гипервизора *VMWare ESXi*

которая впоследствии клонировалась для создания и настройки программно-управляемых ВМ. При запуске и провизии всех 33 программно-управляемых ВМ нагрузка на центральный процессор (ЦП) от установленной системы мониторинга оказалась приемлемой, как показано на рис. 7.

3. АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК ОПЕРАЦИОННО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ АРХИТЕКТУР

Выделен ряд свойств, приведенных в таблице, которые характеризуют рассмотренные операционно-вычислительные архитектуры. На их основе может быть осуществлен выбор архитектуры, наиболее адекватной требованиям, предъявляемым к ЦВЦБ.

Применение алгоритмов консенсуса становится целесообразным при размещении сегмента у нескольких операторов ЦВЦБ. Независимо от формы представления ЦВЦБ, при проектировании следует определить приемлемое число операторов на один сегмент, что требует проведения экспериментальных исследований. Для этого требуется разработать экспериментально-исследовательскую среду, обеспечивающую функционирование модели ЦВЦБ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе были рассмотрены архитектурные и технологические компоненты, составляющие ЦВЦБ. Проанализированы варианты операционно-вычислительных архитектур ЦВЦБ,

Таблица. Таблица характеристик операционно-вычислительных архитектур

Характеристика	A1	A2	A3	A4	A5
Техническое обеспечение для хранения всего объема данных предоставляет ЦБ	+	+	–	–	–
Техническое обеспечение для обработки всего объема транзакций предоставляет ЦБ	+	+	–	–	–
Техническое обеспечение для хранения всего объема данных предоставляет оператор	–	–	+	+	+
Техническое обеспечение для обработки всего объема транзакций предоставляет оператор	–	–	+	+	+
Техническое обеспечение распределяется и масштабируется горизонтально между несколькими операторами	–	–	–	+	+
Принцип КУС осуществляется ЦБ	+	–	–	–	–
Принцип КУС осуществляется частными банками	–	+	+	+	+

Окончание таблицы

Характеристика	A1	A2	A3	A4	A5
Система сохранит частичную работоспособность при отключении сервисов одного оператора	–	–	–	+	+
Система сохранит полную работоспособность при отключении сервисов одного оператора	–	–	–	–	+
Система сохранит частичную работоспособность при отключении сервисов ЦБ	–	–	+	+	+
Система сохранит полную работоспособность при отключении сервисов ЦБ	–	–	+	–	–
ЦБ имеет доступ ко всем данным в реальном времени	+	+	–	–	–
Операторы верифицируют результаты обработки транзакций	–	–	–	–	+
Резервирование данных у независимых операторов	–	–	–	–	+
Отсутствие кросс-сегментарных транзакций	+	+	+	–	–
ЦБ предоставляет платформу для физических / юридических лиц	+	–	–	–	–
ЦБ предоставляет платформу для банков	+	+	–	–	–
ЦБ предоставляет платформу для оператора(ов)	–	–	+	+	+
Оператор(ы) предоставляет(ют) платформу для банков	–	–	+	+	+
Частные банки предоставляют платформу для физических / юридических лиц	–	+	+	+	+

Примечание: A1 – централизованная двухуровневая архитектура,

A2 – централизованная трехуровневая архитектура,

A3 – четырехуровневая архитектура с единым оператором ЦВЦБ,

A4 – четырехуровневая архитектура с сегментированием между несколькими операторами ЦВЦБ,

A5 – четырехуровневая архитектура с сегментированием и репликацией между несколькими операторами ЦВЦБ.

отличающихся по своим характеристикам. В результате анализа сформирован сводный перечень характеристик приведенных операционно-вычислительных архитектур. В зависимости от требований, предъявляемых к ЦВЦБ, на его основе может быть выбрана наиболее адекватная операционно-вычислительная архитектура. Акцентируется внимание на формах представления ЦВЦБ и их влиянии на свойства ЦВЦБ. Хранение цифровых валют в форме аккаунтов может быть менее ресурсоемким, чем в форме токенов. В то же время история транзакций в цифровой валюте в форме токенов предоставляет более удобный инструмент для аудита.

Разработана инфраструктура среды исследований операционно-вычислительной архитектуры

информационного обеспечения ЦВЦБ. Таким образом, созданы предпосылки для комплексного анализа технологических характеристик операционно-вычислительной среды ЦВЦБ. Дальнейшие исследования могут быть направлены на выбор технологического обеспечения для разработки экспериментально-исследовательской среды, экспериментальную и аналитическую оценку зависимости характеристик ЦВЦБ от используемого алгоритма консенсуса, формы представления цифровой валюты и других параметров.

Вклад авторов. Все авторы в равной степени внесли свой вклад в исследовательскую работу.

Authors' contribution. All authors equally contributed to the research work.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

- Allen F., Gu X., Jagtiani J. Fintech, cryptocurrencies, and CBDC: Financial structural transformation in China. *J. Int. Money Finance*. 2022;124(3–4):102625. <https://doi.org/10.1016/j.jimonfin.2022.102625>
- Wang Y.-R., Ma C.-Q., Ren Y.-S. A model for CBDC audits based on blockchain technology: Learning from the DCEP. *Res. Int. Bus. Financ.* 2022;63(3):101781. <https://doi.org/10.1016/j.ribaf.2022.101781>
- Choi K.J., Henry R., Lehar A., Reardon J., Safavi-Naini R. A proposal for a Canadian CBDC. *SSRN Electron. J.* 2021. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3786426>
- Chu Y., Lee J., Kim S., Kim H., Yoon Y., Chung H. Review of offline payment function of CBDC considering security requirements. *Appl. Sci.* 2022;12(9):4488. <https://doi.org/10.3390/app12094488>
- Zhang T., Huang Z. Blockchain and central bank digital currency. *ICT Express*. 2022;8(2):264–270. <https://doi.org/10.1016/j.ict.2021.09.014>
- Tsai W.-T., Zhao Z., Zhang C., Yu L., Deng E. A multi-chain model for CBDC. In: *2018 5th International Conference on Dependable Systems and Their Applications (DSA)*. Dalian, China: IEEE; 2018. P. 25–34. <https://doi.org/10.1109/DSA.2018.00016>

7. Jin S.Y., Xia Y. CEV Framework: A central bank digital currency evaluation and verification framework with a focus on consensus algorithms and operating architectures. *IEEE Access*. 2022;10:63698–63714. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3183092>
8. Opare E.A., Kim K. A compendium of practices for central bank digital currencies for multinational financial infrastructures. *IEEE Access*. 2020;8:110810–110847. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3001970>
9. Lee Y., Son B., Park S., Lee J., Jang H. A survey on security and privacy in blockchain-based central bank digital currencies. *J. Internet Serv. Inform. Secur.* 2021;11(3): 16–29. <https://doi.org/10.22667/JISIS.2021.08.31.016>
10. Ballaschk D., Paulick J. The public, the private and the secret: Thoughts on privacy in central bank digital currencies. *Journal of Payments Strategy & Systems*. 2021;15(3):277–286. Available from URL: <https://www.bundesbank.de/resource/blob/880792/7f4b5efd53026f51a9f53b176859e715/mL/digital-currencies-ballaschk-paulick-data.pdf>
11. Monrat A.A., Schelén O., Andersson K. A survey of blockchain from the perspectives of applications, challenges, and opportunities. *IEEE Access*. 2019;7: 117134–117151. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2936094>
12. Hang L., Kim D.-H. Optimal blockchain network construction methodology based on analysis of configurable components for enhancing Hyperledger Fabric performance. *Blockchain: Res. Appl.* 2021;2(1):100009. <https://doi.org/10.1016/j.bcr.2021.100009>
13. Lashkari B., Musilek P. A comprehensive review of blockchain consensus mechanisms. *IEEE Access*. 2021;9:43620–43652. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3065880>
14. Auer R., Böhme R. The technology of retail central bank digital currency. *BIS Quarterly Review*. 2020. Available from URL: https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=3561198
15. Ozili P.K. Central bank digital currency research around the world: a review of literature. *J. Money Launder. Control*. 2022;26(2):215–226. <https://doi.org/10.1108/JMLC-11-2021-0126>
16. Bordo M.D., Levin A.T. Central bank digital currency and the future of monetary policy. *NBER Working Paper Series*. 2017; Working Paper 23711. <https://doi.org/10.3386/w23711>
17. Zhang J., Tian R., Cao Y., Yuan X., Yu Z., Yan X., et al. A hybrid model for central bank digital currency based on blockchain. *IEEE Access*. 2021;9:53589–53601. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3071033>
18. Allen S., Čapkun S., Eyal I., Fanti G., Ford B.A., Grimmelmann J., et al. Design choices for central bank digital currency: Policy and technical considerations. *NBER Working Paper Series*. 2020; Working Paper 27634. <https://doi.org/10.3386/w27634>
19. Chaum D., Grothoff C., Moser T. How to issue a central bank digital currency. *SNB Working Papers*. 2021;3. 38 p. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3965032>
20. Netto M.A.S., Menon S., Vieira H.V., Costa L.T., de Oliveira F.M., Saad R., et al. Evaluating load generation in virtualized environments for software performance testing. In: *2011 IEEE International Symposium on Parallel and Distributed Processing Workshops and Phd Forum*. 2011. P. 993–1000. <https://doi.org/10.1109/IPDPS.2011.244>
21. Албычев А.С., Ильин Д.Ю., Никульчев Е.В., Магомедов Ш.Г. Разработка методики экспериментального исследования технологического обеспечения цифровой валюты центрального банка. *Вестник РГПТУ*. 2022;82:136–146. <https://doi.org/10.21667/1995-4565-2022-82-136-146>
[Albychev A.S., Ilin D.Y., Nikulchev E.V., Magomedov S.G. Development of a methodology for experimental studies of technologies for central bank digital currencies. *Vestnik of RSREU*. 2022;82:136–146 (in Russ.). <https://doi.org/10.21667/1995-4565-2022-82-136-146>]

Об авторах

Албычев Александр Сергеевич, заместитель руководителя, Федеральное казначейство Министерства финансов Российской Федерации (101000, Россия, Москва, Большой Златоустинский пер., д. 6, стр. 1); заведующий кафедрой «Государственные финансовые технологии» Института кибербезопасности и цифровых технологий ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: albychev@mirea.ru. <https://orcid.org/0000-0001-9632-7806>

Кудж Станислав Алексеевич, д.т.н., профессор, ректор ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: rector@mirea.ru. Scopus Author ID 56521711400. <https://orcid.org/0000-0003-1407-2788>

About the authors

Alexander S. Albychev, Deputy Head of the Federal Treasury, The Ministry of Finance of the Russian Federation (6/1, Bol'shoi Zlatoustinskii per., Moscow, 101000 Russia); Head of the State Financial Technologies Department, Institute for Cybersecurity and Digital Technologies, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: albychev@mirea.ru. <https://orcid.org/0000-0001-9632-7806>

Stanislav A. Kudzh, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Rector, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: rector@mirea.ru. Scopus Author ID 56521711400. <https://orcid.org/0000-0003-1407-2788>