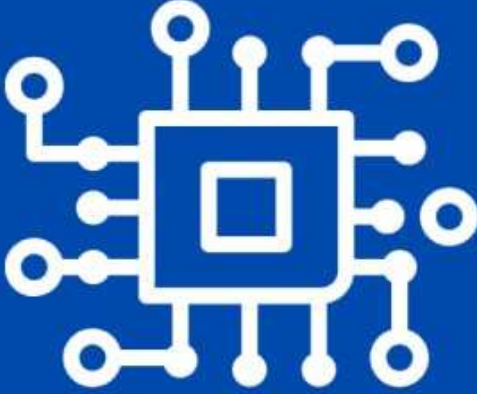




TECH SCIENCE

ISSN 3030-3702

**TEXNIKA FANLARINING
DOLZARB MASALALARI**

**TOPICAL ISSUES OF TECHNICAL
SCIENCES**



№ 2 (3) 2025

TECHSCIENCE.UZ

№ 2 (3)-2025

**TEXNIKA FANLARINING DOLZARB
MASALALARI**

**TOPICAL ISSUES
OF TECHNICAL SCIENCES**

TOSHKENT-2025

BOSH MUHARRIR:

KARIMOV ULUG'BEK ORIFOVICH

TAHRIR HAY'ATI:

Usmankulov Alisher Kadirkulovich - Texnika fanlari doktori, professor, Jizzax politexnika universiteti

Fayziyev Xomitxon – texnika fanlari doktori, professor, Toshkent arxitektura qurilish instituti;

Rashidov Yusuf Karimovich – texnika fanlari doktori, professor, Toshkent arxitektura qurilish instituti;

Adizov Bobirjon Zamirovich– Texnika fanlari doktori, professor, O'zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi Umumiy va noorganik kimyo instituti;

Abdunazarov Jamshid Nurmuxamatovich - Texnika fanlari doktori, dotsent, Jizzax politexnika universiteti;

Umarov Shavkat Isomiddinovich – Texnika fanlari doktori, dotsent, Jizzax politexnika universiteti;

Bozorov G'ayrat Rashidovich – Texnika fanlari doktori, Buxoro muhandislik-texnologiya instituti;

Maxmudov MUxtor Jamolovich – Texnika fanlari doktori, Buxoro muhandislik-texnologiya instituti;

Asatov Nurmuxammat Abdunazarovich – Texnika fanlari nomzodi, professor, Jizzax politexnika universiteti;

Mamayev G'ulom Ibroximovich – Texnika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD), Jizzax politexnika universiteti;

Ochilov Abduraxim Abdurasulovich – Texnika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD), Buxoro muhandislik-texnologiya instituti.

OAK Ro'yxati

Mazkur jurnal O'zbekiston Respublikasi Oliy ta'lim, fan va innovatsiyalar vazirligi huzuridagi Oliy attestatsiya komissiyasi Rayosatining 2025-yil 8-maydagi 370-son qarori bilan texnika fanlari bo'yicha ilmiy darajalar yuzasidan dissertatsiyalar asosiy natijalarini chop etish tavsiya etilgan ilmiy nashrlar ro'yxatiga kiritilgan.

Muassislar: "SCIENCEPROBLEMS TEAM" mas'uliyati cheklangan jamiyati;
Jizzax politexnika insituti.

**TECHSCIENCE.UZ- TEXNIKA
FANLARINING DOLZARB MASALALARI**
elektron jurnali 15.09.2023-yilda
130343-sonli guvohnoma bilan davlat
ro'yxatidan o'tkazilgan.

TAHRIRIYAT MANZILI:

Toshkent shahri, Yakkasaroy tumani, Kichik
Beshyog'och ko'chasi, 70/10-uy.
Elektron manzil:
scienceproblems.uz@gmail.com

Barcha huqular himoyalangan.

© Sciencesproblems team, 2025-yil

© Mualliflar jamoasi, 2025-yil

MUNDARIJA

Raxmanqulova Mashhura va G'ulomov Sherzod

PAKETLARNI FILTRLASH ALGORITMLARI TAHLILI VA AMALIYOTDA TAQQOSLASH5-10

Razzakova Gulora

EDGE COMPUTING VA EDGE INTELLIGENCE: IOT TIZIMLARIDA SAMARADORLIK VA TEZKOR
QAROR QABUL QILISH IMKONIYATLARI 11-17

Rahimov Doston va Toshpo'latov Murodullo

IKKINCHI TARTIBLI NOKLASSIK TENGLAMALAR
SISTEMASI UCHUN CHEGARAVIY MASALA..... 18-22

Axmataliyeva Shoxista, Rasuleva Roziya, Ro'zimova Surayyo

RAQAMLI PEDAGOGIKANING ZAMONAVIY TA'LIM TIZIMIDAGI O'RNI..... 23-30

Abduvoxobov Abbosbek

AXBOROT XAVFSIZLIGINI TA'MINLASH TEXNOLOGIYALARI 31-35

To'rayev Azizbek

AVTOMOBIL GRUNTOVKALARIDA BAZALT TOLASINING QO'LLANILISHI: ISTIQBOLLI
TADQIQOTLAR VA KELAJAK YO'NALISHLARI..... 36-46

Абдуллаев Абдурауф

МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ПРАКТИЧЕСКОЙ РЕАЛИЗАЦИИ
ГИПЕРКОНВЕРГЕНТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ 47-62

Ochilov Murodjon va Ibragimov Islomnur

QUYOSH PANELLARI YUZASIDAGI IFLOSLANISHNI BARTARAF ETISH UCHUN
PYEZOELEKTRIK VIBRATSIYAGA ASOSLANGAN AVTOMATLASHTIRILGAN TOZALASH
TIZIMINI LOYIHALASH VA JORIY ETISH USULLARI 63-72

Маматкулова Сайёра

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛО- И МАССООБМЕННОГО ПРОЦЕССА ПИРОЛИЗА
ПОДСОЛНЕЧНОЙ БИОМАССЫ В ТРУБЧАТОМ РЕАКТОРЕ ПИРОЛИЗНОЙ
УСТАНОВКИ 73-82

O'tashov Zafar

CHIGITNI LINTERLASHDA ARALASHTIRGICHDAGI QAYSHQOQ ELEMENT BILAN
ARRALI SILINDRNI HARAKATDAGI CHIGITLAR QATLAMIGA TA'SIRI JARAYONINI
MODELLASHTIRISH..... 83-90

Achilov Jamoliddin

G'ALLA O'RISH – TASHISH TIZIMI TEXNIKA VOSITALARINI SAQLASHNI ILMIY ASOSLASHGA
DOIR ADABIYOTLAR TAHLILI 91-96

<i>Eshdavlatov Akmal va Pirnzarova Madina</i> SARIMSOQPIYOZ YETISHTIRISH TEXNOLOGIYASI.....	97-100
<i>Махфуз Ахмади</i> ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА НА ИРРИГАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ АФГАНИСТАНА И НЕОБХОДИМОСТЬ ИХ АДАПТАЦИИ.....	101-108
<i>Baytileuova Guljaxan, Davlatboyeva Ozoda, Berdimbetova Amina</i> TRANSFER MATRITSA USULI YORDAMIDA OROL DENGIZI HAVZASIDA YER KONVERSIYASINI TAVSIFLASH.....	109-114
<i>Payzullayeva Ayzada, Madetov Dauranbek, Berdimbetov Timur</i> GRACE YORDAMIDA SUV BALANSINI VA UNING IQLIM O'ZGARISHIGA MUNOSABATINI BAHOLAS.....	115-120
<i>Bazarov Dilshod, Norkulov Bexzod, Voxidov Oybek, Rayimova Iroda, Qalandarova Dilsuz</i> SAMARQAND VILOYATI TOG'LI XUDUDIDA SEL OQIMLARINING SHAKLLANISHI VA OQIBATLARI.....	121-129
<i>Raxmatova Gulhayo</i> RESPUBLIKAMIZNING YIRIK SHAHARLARIDA KO'P QAVATLI AVTOSAQLASH JOYLARINI REJALASHTIRISHNING ZARURATI.....	130-136
<i>Akberadjiyeva Umida,</i> O'SIMTA HUYAYRASI (SARATON) O'SISHINI MATEMATIK MODELLASHTIRISH.....	137-142

МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ПРАКТИЧЕСКОЙ РЕАЛИЗАЦИИ ГИПЕРКОНВЕРГЕНТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

Абдуллаев Абдурауф

Ташкентский университет информационных технологий имени Мухаммада ал-Хоразмий

Эмаил: abduraufabdullayev@umail.uz

Тел: +998 99 866 41 51

Аннотация. В данной статье рассматриваются методические основы проектирования и практической реализации гиперконвергентной инфраструктуры (HCI). Проведён сравнительный анализ существующих подходов к построению HCI, включая коммерческие решения VMware vSAN и Nutanix AHV, а также обоснован выбор Proxmox VE с Ceph/ZFS в качестве конкурентоспособной Open Source альтернативы. Результаты анализа показали, что Proxmox VE с Ceph/ZFS обеспечивает высокий уровень отказоустойчивости и масштабируемости при значительно меньших затратах, чем коммерческие аналоги. Представлены рекомендации по развёртыванию и оптимизации Proxmox VE в корпоративных и облачных средах, а также направления дальнейших исследований в области гиперконвергентных решений и программно-определяемых инфраструктур.

Ключевые слова: гиперконвергентная инфраструктура (HCI), Proxmox VE, виртуализация, VMware vSAN, Nutanix AHV, SDN, KVM, Ceph, ZFS, отказоустойчивость, Backup, Latency.

ГИПЕРКОНВЕРГЕНТ ИНФРАТУЗИЛМАСИНИ LOYIHALASHTIRISHNING METODOLIK ASOSLARI VA AMALIY TASHKIL QILISH USHLBLARI

Abdullayev Abdurauf

Tayanch doktorant,

Muhammad al-xorazmiy nomidagi toshkent axborot texnologiyalari universiteti

Annotatsiya. Ushbu maqola giperkonvergent infratuzilmani (HCI) loyihalash va amalga oshirishning uslubiy asoslarini ko'rib chiqadi. VMware vSAN va Nutanix AHV tijoriy yechimlarini o'z ichiga olgan HCI ni yaratish bo'yicha mavjud yondashuvlarning qiyosiy tahlili o'tkazildi va raqobatbardosh Open Source alternativasi sifatida Ceph/ZFS bilan Proxmox VE ni tanlash asoslandi. Tahlil natijalari shuni ko'rsatdiki, Ceph/ZFS bilan Proxmox VE yuqori darajadagi nosozliklarga chidamlilik va tijoriy analoglarga qaraganda ancha kam xarajat talab etadi. Natijalar asosida korporativ va bulutli muhitda Proxmox VE ni qo'llash va optimallashtirish bo'yicha tavsiyalar taqdim etildi.

Kalit so'zlar. giperkonvergent infratuzilma (HCI), Proxmox VE, virtualizatsiya, VMware vSAN, Nutanix AHV, SDN, KVM, Ceph, ZFS, nosozliklarga chidamlilik, zaxiralash, kechikish.

DOI: <https://doi.org/10.47390/ts3030-3702v3i2y2025N07>

Введение. Современные вычислительные инфраструктуры предъявляют высокие требования к масштабируемости, отказоустойчивости и эффективности управления ресурсами. В условиях динамичного роста объёмов данных и увеличения

нагрузки на информационные системы традиционные архитектуры центров обработки данных (ЦОД) становятся менее эффективными, требуя значительных финансовых и технических ресурсов для управления вычислениями, хранением данных и сетевыми коммуникациями.

В ответ на эти вызовы были разработаны гиперконвергентные инфраструктуры (HCI), которые обеспечивают интеграцию вычислительных ресурсов, системы хранения и сетевых решений в единую программно-определяемую платформу. Такой подход позволяет сократить операционные расходы, повысить уровень автоматизации управления инфраструктурой и минимизировать влияние отказов аппаратных компонентов (Рис. 1).

На сегодняшний день наиболее распространёнными коммерческими HCI-решениями являются VMware vSAN, Nutanix AHV и Microsoft Azure Stack HCI, которые обеспечивают высокий уровень производительности и отказоустойчивости, но требуют значительных финансовых затрат на лицензирование и сертифицированное оборудование. В качестве альтернативы коммерческим продуктам Proxmox VE с Ceph/ZFS предоставляет бесплатное Open Source решение для построения полноценной гиперконвергентной инфраструктуры, позволяя организациям гибко управлять ресурсами, обеспечивать надёжное хранение данных и реализовывать отказоустойчивые вычисления без дополнительных затрат на лицензии.



Рис. 1. Гиперконвергентная инфраструктура (HCI)

Обзор литературы и методология. Научная новизна работы заключается в разработке комплексной методики оценки эффективности гиперконвергентной инфраструктуры, а также в создании модели прогнозирования производительности и отказоустойчивости при различных сценариях эксплуатации. В рамках исследования проведен анализ существующих научных работ в области HCI, среди которых особый интерес представляют исследования Wang et al. [1] (2021), Singh & Kumar [2] (2022) и Patel & Desai (2020), однако данные работы не рассматривают возможности интеграции Open Source решений для создания полноценной гиперконвергентной инфраструктуры.

Целью данной работы является разработка методических основ проектирования и оценка эффективности гиперконвергентной инфраструктуры, включая сравнительный анализ различных платформ, а также формирование практических рекомендаций по их выбору и внедрению для различных сценариев использования.

I. АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ ПЛАТФОРМ ГИПЕРКОНВЕРГЕНТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

На современном рынке информационных технологий представлено множество решений для построения гиперконвергентной инфраструктуры (HCI), среди которых наибольшее распространение получили платформы Nutanix, VMware vSAN и Proxmox VE. Данные решения различаются по архитектуре, функциональным возможностям, требованиям к аппаратному обеспечению и экономической целесообразности использования.

Одним из лидеров рынка является Nutanix, представляющий собой интегрированное программно-аппаратное решение, обеспечивающее высокую производительность, автоматизированное управление и гибкое масштабирование. Основными преимуществами данной платформы являются глубокая оптимизация вычислительных и хранилищных ресурсов, а также развитая система оркестрации, что делает её востребованной в крупных корпоративных средах. Однако, к недостаткам Nutanix можно отнести высокую стоимость лицензирования, а также закрытость технологии, что ограничивает возможности адаптации решения под специфические требования организаций.

Другим распространённым решением является VMware vSAN, которое представляет собой нативное гиперконвергентное хранилище для экосистемы VMware. Основное преимущество данной платформы заключается в тесной интеграции с существующими продуктами VMware, что делает её наиболее удобной для предприятий, использующих vSphere и другие решения VMware. К достоинствам vSAN можно отнести высокий уровень надёжности, удобство управления и возможность централизованного администрирования через единую панель управления. Однако существенными недостатками являются высокая стоимость лицензии и необходимость использования исключительно продуктов VMware, что ограничивает гибкость при построении инфраструктуры.

В отличие от Nutanix и VMware vSAN, Proxmox VE является открытой и свободно распространяемой платформой, которая не требует приобретения дорогостоящих лицензий. Данная платформа поддерживает различные технологии виртуализации и контейнеризации (KVM и LXC), а также интеграцию с распределёнными файловыми системами Ceph и ZFS, что делает её гибким решением для развертывания HCI.

К основным преимуществам Proxmox VE можно отнести открытый исходный код, отсутствие лицензионных ограничений, простоту масштабирования и гибкость настройки, что делает её привлекательной для малого и среднего бизнеса, образовательных учреждений и исследовательских проектов.

1.1. Концептуальные модели HCI на различных платформах

В данной главе будут последовательно рассмотрены концептуальные модели гиперконвергентной инфраструктуры на различных платформах, проанализированы их архитектурные особенности, проведён сравнительный анализ функциональных возможностей и технических характеристик ключевых компонентов. Особое внимание будет уделено механизмам интеграции и взаимодействия составляющих элементов HCI, что позволит сформировать методологическую основу для проектирования эффективных и устойчивых гиперконвергентных решений в различных сценариях применения.

Proxmox VE, представляет собой комплексную интегрированную систему, предназначенную для объединения вычислительных ресурсов, распределённого хранения данных, сетевых служб и программных механизмов управления в едином отказоустойчивом кластере. Такая модель позволяет обеспечить централизованное управление, высокую производительность и надёжность, а также значительное упрощение эксплуатации инфраструктуры (Рис. 3).

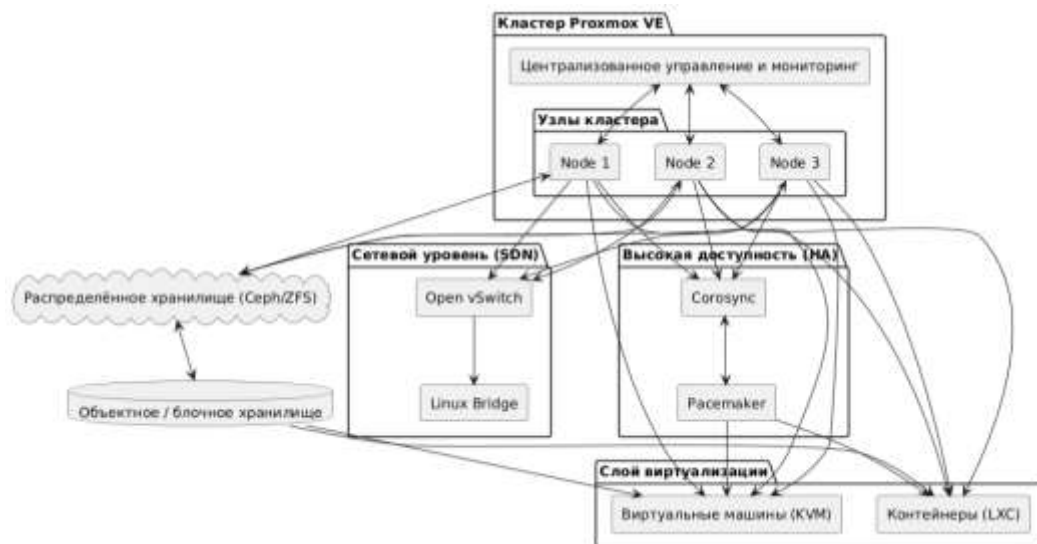


Рис. 3. Концептуальная модель гиперконвергентной инфраструктуры на базе Proxmox VE

Виртуализации вычислительных ресурсов включает в себя технологии виртуализации на основе гипервизора KVM (Kernel-based Virtual Machine) для запуска виртуальных машин (VM), а также контейнеризацию на базе технологии LXC (Linux Containers). Использование виртуальных машин позволяет эффективно изолировать ресурсы и обеспечить безопасность данных, в то время как контейнеризация гарантирует высокую производительность и эффективность использования аппаратных ресурсов благодаря минимальным накладным расходам на виртуализацию. В качестве системы хранения данных используются решения, реализующие подход Software-Defined Storage (SDS), такие как Ceph и ZFS. Ceph является масштабируемой и отказоустойчивой системой распределённого хранения данных, поддерживающей объектные, блочные и файловые интерфейсы. Благодаря встроенной репликации и автоматическому перераспределению данных в случае отказов Ceph обеспечивает высокую доступность и надёжность хранения. Альтернативой Ceph для менее масштабных инфраструктур является файловая система ZFS, обеспечивающая эффективную работу с локальными накопителями, мгновенные снимки (snapshots), дедупликацию данных и встроенные механизмы защиты от сбоев.

В концептуальной модели предусмотрено использование программно-определяемой сети, что позволяет гибко конфигурировать и масштабировать сетевые службы. Proxmox VE обеспечивает интеграцию виртуальных сетевых интерфейсов и программных коммутаторов (Open vSwitch и Linux Bridge), что позволяет настраивать и оптимизировать сетевое взаимодействие между виртуальными машинами и контейнерами. Это существенно повышает эффективность управления трафиком, снижает сетевые задержки и увеличивает производительность инфраструктуры в

целом. Механизмы обеспечения высокой доступности в HCI-модели реализуются при помощи интегрированных решений Corosync и Pacemaker. Corosync отвечает за кластеризацию и поддержание согласованности состояния инфраструктуры, обеспечивая обмен служебной информацией между узлами кластера в реальном времени. Pacemaker позволяет автоматически выявлять и устранять сбои, выполняя перезапуск сервисов и виртуальных машин на резервных узлах без участия администратора. Эти технологии обеспечивают минимальное время простоя и гарантируют непрерывность предоставления ИТ-сервисов.

VMware vSAN представляет собой программно-определяемую систему хранения, глубоко интегрированную с гипервизором VMware ESXi и средой управления vCenter. Концептуальная модель HCI на базе VMware vSAN отличается высокой степенью интеграции всех компонентов в рамках единой экосистемы VMware (Рис. 4). Виртуализация вычислительных ресурсов в VMware vSAN реализуется посредством гипервизора ESXi, который обеспечивает аппаратную виртуализацию с минимальными накладными расходами. ESXi использует микроядерную архитектуру с минимальным набором драйверов, что уменьшает поверхность атаки и повышает стабильность работы. Гипервизор поддерживает широкий спектр гостевых операционных систем и предоставляет продвинутые возможности управления ресурсами, включая технологию DRS (Distributed Resource Scheduler) для автоматической балансировки нагрузки между узлами кластера. VMware vSAN построена на принципе объединения локальных дисков всех хостов ESXi в единый пул хранения. vSAN использует многоуровневую архитектуру с выделением уровня производительности (кэширование на SSD/NVMe) и уровня ёмкости (HDD/SSD). Отличительными особенностями vSAN являются политики хранения на уровне виртуальных машин (Storage Policy-Based Management), которые позволяют дифференцировать требования к хранению для различных типов рабочих нагрузок, а также механизмы дедупликации, сжатия и исправления ошибок.

В экосистеме VMware реализуются через NSX-T Data Center, который обеспечивает полноценную виртуализацию сетевой инфраструктуры, включая коммутацию, маршрутизацию, балансировку нагрузки и безопасность. NSX-T интегрируется с vSAN, предоставляя микросегментацию трафика и распределенный межсетевой экран для защиты виртуальных машин. А система обеспечения высокой доступности реализуется через интегрированные механизмы vSphere HA (High Availability) и FT (Fault Tolerance).

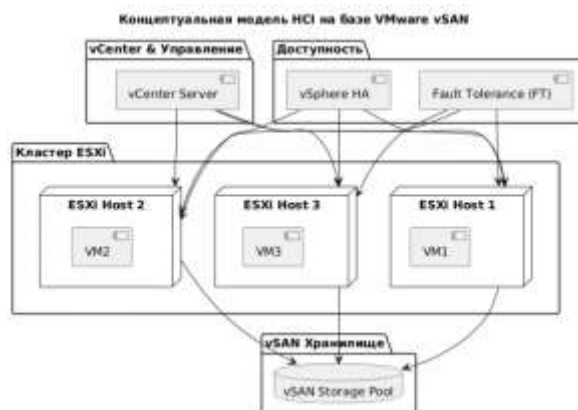


Рис. 4. Концептуальная модель гиперконвергентной инфраструктуры на базе VMware vSAN

vSphere HA автоматически отслеживает состояние хостов и виртуальных машин, перезапуская виртуальные машины на работоспособных узлах в случае сбоя. FT обеспечивает синхронное зеркалирование состояния виртуальной машины на другой хост, гарантируя нулевое время простоя даже при аварийных отказах. vSAN также включает собственные механизмы защиты данных, такие как Stretched Cluster для обеспечения доступности при отказе целой площадки.

Nutanix представляет комплексное решение для построения гиперконвергентной инфраструктуры с собственным гипервизором AHV (Acropolis Hypervisor) и распределенной файловой системой. Концептуальная модель Nutanix отличается высокой степенью интеграции и автоматизации всех компонентов инфраструктуры (Рис. 5).

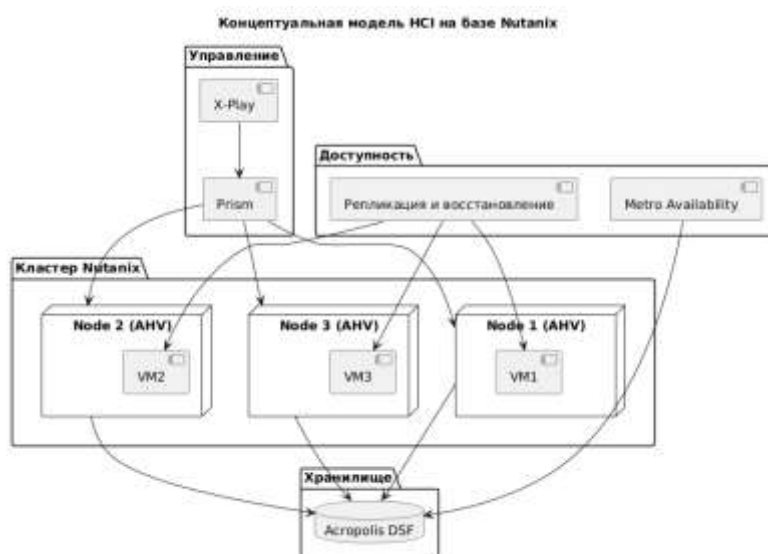


Рис. 5. Концептуальная модель гиперконвергентной инфраструктуры на базе Nutanix AHV

Виртуализация вычислительных ресурсов в Nutanix реализуется через AHV, который основан на технологии KVM, но значительно расширен собственными разработками Nutanix. AHV обеспечивает производительную виртуализацию с поддержкой виртуальных ГП для высокопроизводительных вычислений и VDI. Управление виртуальными машинами осуществляется через единый интерфейс Prism, который значительно упрощает администрирование. Acropolis обеспечивает автоматическое размещение виртуальных машин на оптимальных узлах и балансировку нагрузки.

Распределённая система хранения данных в Nutanix представлена фирменной технологией Acropolis Distributed Storage Fabric (DSF), обеспечивающей работу файловой, блочной и объектной систем хранения в рамках единой инфраструктуры. DSF использует многоуровневое хранение с автоматической миграцией данных между уровнями производительности (SSD/NVMe) и ёмкости (HDD). Ключевыми особенностями являются встроенная дедупликация, сжатие и кодирование с исправлением ошибок (EC-X), обеспечивающее оптимальный баланс между отказоустойчивостью и эффективностью использования дискового пространства.

Программно-определяемые сети в Nutanix реализуются через Flow – интегрированное решение для микросегментации и обеспечения безопасности на уровне сети. Flow позволяет определять политики безопасности на уровне отдельных виртуальных машин и приложений, обеспечивая изоляцию и контроль трафика. Сетевая виртуализация включает поддержку VXLAN, балансировку нагрузки и интеграцию с физическими сетевыми устройствами. Система обеспечения высокой доступности в Nutanix включает встроенные механизмы репликации данных, автоматическое восстановление после сбоев и переключение виртуальных машин между узлами. Технология Metro Availability обеспечивает синхронную репликацию между географически распределенными кластерами для защиты от отказов на уровне целых площадок. Защита данных дополняется интегрированными снапшотами, резервным копированием и возможностью репликации в публичные облака.

Единая система мониторинга и управления представлена платформой Prism, которая объединяет все аспекты управления инфраструктурой через интуитивно понятный веб-интерфейс. Prism Pro добавляет возможности машинного обучения для прогнозирования и оптимизации использования ресурсов, предупреждения о потенциальных проблемах и планирования мощностей. X-Play обеспечивает автоматизацию рутинных задач через настраиваемые сценарии действий.

Сравнение этих моделей позволяет сделать вывод, что выбор оптимальной платформы зависит от конкретных требований организации. Proxmox VE является предпочтительным вариантом для организаций с ограниченным бюджетом и наличием квалифицированных специалистов по Linux. VMware vSAN подходит для предприятий, уже инвестировавших в экосистему VMware. Nutanix AHV оптимален для организаций, ценящих простоту управления и комплексную автоматизацию.

II. ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ГИПЕРКОНВЕРГЕНТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

2.1. Аппаратные компоненты стенда для построения HCI

Для построения гиперконвергентной инфраструктуры (HCI) требуется тщательный подбор аппаратных компонентов, обеспечивающих необходимую производительность, масштабируемость и отказоустойчивость. При проектировании архитектуры экспериментального стенда необходимо учитывать требования к вычислительным ресурсам, системе хранения данных и сетевой инфраструктуре.

Выбор аппаратных компонентов был основан на **совместимости с технологией виртуализации**, поддержке современных стандартов сетевого взаимодействия и **обеспечении оптимальной производительности** при выполнении различных вычислительных задач (Таблица 1).

Таблица 1. Технические характеристики кластера

Категория	Описание
Серверы	3 сервера Dell PowerEdge R740
Процессоры	Intel Xeon Gold 6238R (2.2GHz, 28 ядер)
Оперативная память	256 ГБ DDR4 ECC
Дисковая подсистема	NVMe SSD 2 ТБ
Тип памяти	ECC (Error-Correcting Code) - защита от ошибок
Сетевые коммутаторы	Ethernet коммутаторы 10/25GbE

Сетевые адаптеры

Mellanox ConnectX-5 (25 Гбит/с)

Для подтверждения работоспособности предложенной концептуальной модели была проведена практическая реализация гиперконвергентной инфраструктуры (HCI) на экспериментальном стенде на основе виртуализационной платформы Proxmox VE.

Использование 25-гигабитного сетевого подключения **исключает узкие места при передаче данных между узлами**, что критично для кластера Ceph и обеспечивает минимальные задержки при миграции виртуальных машин.

Одним из ключевых компонентов гиперконвергентной инфраструктуры является система хранения данных. В данном проекте была выбрана распределённая файловая система Ceph, так как она гарантирует отказоустойчивость и возможность горизонтального масштабирования.

Такой подход обеспечивает **высокую доступность (HA)** и надёжность хранения, позволяя системе автоматически перераспределять данные между узлами при их отказе или отключении.

Развёртывание гиперконвергентной инфраструктуры на базе **Proxmox VE** включает несколько ключевых этапов: установку операционной системы, настройку кластера, интеграцию распределённого хранилища и тестирование работоспособности системы.

Настроенная инфраструктура обладает гибкостью, высокой производительностью и возможностью масштабирования в зависимости от требований бизнеса (Рис. 6).

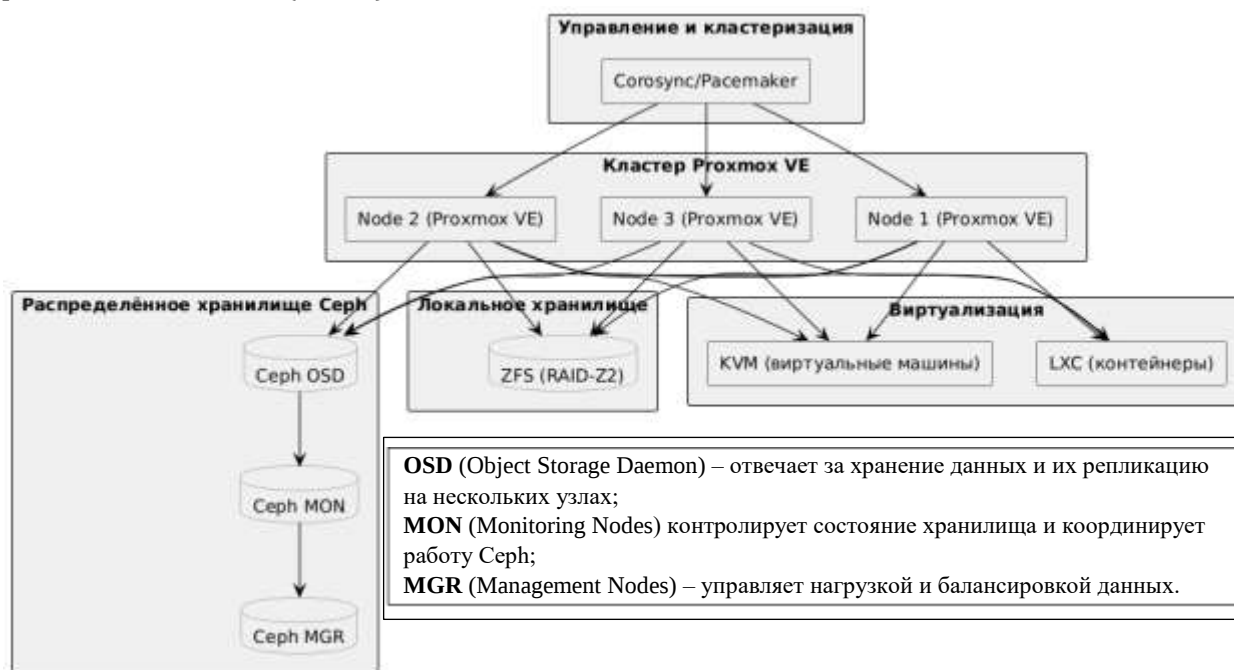


Рис. 6. Архитектура кластера Proxmox VE с интеграцией Ceph/ZFS

В рамках стенда была реализована программно-определяемая сеть (SDN) с целью обеспечения гибкости и масштабируемости сетевых коммуникаций. Использование выделенных подсетей для различных типов трафика позволило разграничить управление, виртуализацию, хранение данных и резервное копирование, что улучшает безопасность и производительность сети (Рис. 7).

Были выполнены следующие шаги по настройке сети:

1. *Настроен Open vSwitch (OVS)* на каждом серверном узле, что позволило создать программно-определяемую сетевую инфраструктуру.
2. *Реализованы VLAN* для разделения сетевого трафика:
 - Управление (Management).
 - Виртуальные машины и контейнеры (VMs/Containers).
 - Хранилище данных (Storage).
 - Резервное копирование (Backup).
 - Мониторинг (Monitoring).
3. *Настроена агрегация сетевых интерфейсов (bonding)* для повышения отказоустойчивости и увеличения пропускной способности сети.
4. *Использованы высокоскоростные 10/25 Гбит/с интерфейсы*, что позволило минимизировать задержки при взаимодействии узлов кластера.

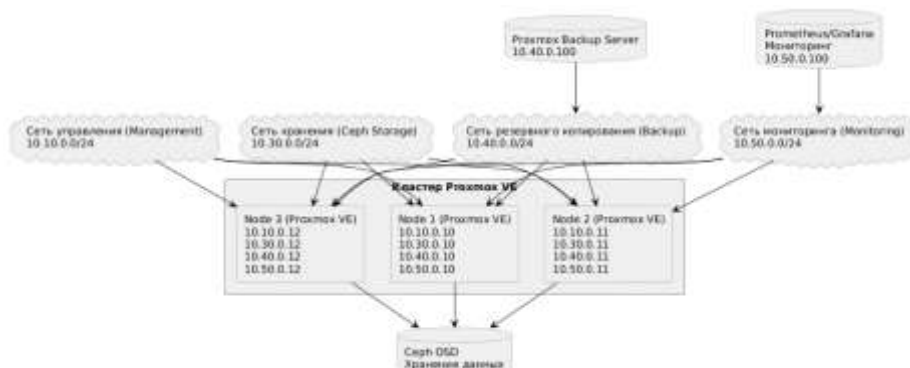


Рис. 7. Сетевое взаимодействие в кластере Proxmox VE

Для структурированной организации сетевого взаимодействия была разработана схема подсетей и IP-адресов, представленная в таблице ниже:

Таблица 2 – Конфигурация подсетей и IP-адресов экспериментального стенда

Назначение подсети	Подсеть	Используемые IP-адреса	Примечание
Сеть управления (Management)	10.10.0.0/24	10.10.0.10 – Node 1 10.10.0.11 – Node 2 10.10.0.12 – Node 3 10.10.0.250 – Управляющий интерфейс	Для доступа и управления кластером
Сеть виртуальных машин и контейнеров (VMs/Containers)	10.20.0.0/24	Динамическое выделение IP (DHCP), 10.20.0.1–10.20.0.200	Для виртуальных машин и контейнеров
Сеть хранения Ceph (Storage)	10.30.0.0/24	10.30.0.10 – Node 1 Ceph OSD/MON 10.30.0.11 – Node 2 Ceph OSD/MON 10.30.0.12 – Node 3 Ceph OSD/MON	Выделенная высокоскоростная сеть для репликации данных
Сеть резервного копирования	10.40.0.0/24	10.40.0.100 – Proxmox Backup Server	Для резервного копирования и

(Backup)		10.40.0.10–13 – Клиенты резервного копирования (Node 1–3)	восстановления данных
Сеть мониторинга (Monitoring)	10.50.0.0/24	10.50.0.100 – Prometheus/Grafana сервер 10.50.0.10–13 – Node 1–3 экспортёры метрик	Для сбора метрик производительности

Использование данного сетевого дизайна обеспечивает:

1. *Изоляцию сетевого трафика* между разными уровнями инфраструктуры, предотвращая возможные узкие места и конфликтующие потоки данных.
2. *Высокую производительность и отказоустойчивость* за счёт применения выделенных сетей для Serp, резервного копирования и мониторинга.
3. *Гибкость масштабирования* — при добавлении новых узлов или сервисов можно легко расширять подсети без риска снижения производительности сети.

Таким образом, была проведена практическая реализация гиперконвергентной инфраструктуры на платформе Proxmox VE. Реализованный стенд подтвердил жизнеспособность предложенной концептуальной модели, продемонстрировал высокие показатели производительности, надёжности и простоту управления, что позволяет рекомендовать использование данного подхода в производственной эксплуатации в малых и средних предприятиях, а также в научно-исследовательских организациях.

III. МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕАЛИЗОВАННОГО РЕШЕНИЯ

3.1. Описание критериев и показателей оценки эффективности НСИ

Оценка эффективности гиперконвергентной инфраструктуры (НСИ) играет важную роль в подтверждении её соответствия производственным, отказоустойчивым и эксплуатационным требованиям. Для этого необходимо определить ключевые критерии и показатели (KPI), которые будут использоваться для измерения производительности, надёжности и масштабируемости системы.

В данной работе оценка НСИ проводится по следующим направлениям:

- Производительность вычислительных ресурсов
- Эффективность системы хранения данных
- Надёжность и отказоустойчивость
- Эффективность сетевой инфраструктуры
- Эксплуатационные характеристики

Одним из важнейших критериев эффективности НСИ является производительность серверных узлов при выполнении виртуализированных рабочих нагрузок. Средняя загрузка процессора (CPU Load, %) позволяет оценить степень загруженности центрального процессора при выполнении задач. Высокий показатель (>85%) может указывать на перегрузку узлов. Средний объём используемой оперативной памяти (RAM Usage, GB) определяет, насколько эффективно используется оперативная память узла. Недостаток RAM может приводить к замедлению работы виртуальных машин и контейнеров. Количество одновременно запущенных

виртуальных машин (VM Density) показывает, сколько виртуальных машин может поддерживать один узел. Чем больше VM на одном узле при стабильной работе, тем выше эффективность HCI. Среднее время запуска виртуальных машин (VM Boot Time, сек) оценивает время, за которое создаются и загружаются новые виртуальные машины. Чем быстрее процесс, тем лучше реагирует система на изменения нагрузки.

Эффективность хранения данных напрямую влияет на производительность всей инфраструктуры. Количество операций ввода-вывода в секунду (IOPS – Input/Output Operations Per Second) измеряет, сколько операций чтения/записи может обработать система хранения. Важный параметр для высоконагруженных приложений. Средняя задержка операций (Latency, мс) определяет время отклика дисковой подсистемы на запросы. Чем ниже задержка, тем быстрее работают приложения. Пропускная способность хранилища (Throughput, MB/s) измеряет объём данных, который может передаваться через систему хранения за единицу времени. Критично для работы с большими файлами и базами данных. Уровень репликации данных (Data Replication Factor) показывает, сколько копий данных создаётся для защиты от потерь. Влияет на отказоустойчивость и объём занятого пространства.

Высокая доступность (HA) и отказоустойчивость являются ключевыми требованиями к HCI поэтому время восстановления узла после сбоя (Recovery Time, сек) показывает, сколько времени требуется системе на автоматическое восстановление после отказа узла. Чем быстрее процесс восстановления, тем меньше риск простоя. Средняя доступность системы (Uptime, %) Процент времени, в течение которого инфраструктура остаётся доступной. Обычно измеряется за определённый период (месяц, год). Влияние отказа одного узла на работу всей системы (Failure Impact, %) оценивает, как выход из строя одного узла влияет на производительность кластера. В идеальной HCI инфраструктуре отказ одного узла не должен критически сказываться на всей системе. Число критических сбоев (Critical Failure Rate, %) количество серьёзных инцидентов, приводящих к потере данных или отказу системы.

Сетевое взаимодействие играет важную роль в обеспечении работы виртуализированных сред и системы хранения. Исходя из этого средняя задержка сети (Network Latency, мс) оценивает время передачи пакетов между узлами. Низкая задержка критична для Ceph и других распределённых систем. Пропускная способность сети (Network Throughput, Gbps) определяет, сколько данных может передаваться между узлами кластера. Чем выше показатель, тем быстрее выполняются миграции VM и репликация данных. Потери пакетов (Packet Loss, %) показывает, какой процент данных теряется при передаче. Высокие потери могут указывать на проблемы в сети.

3.2. Анализ результатов тестирования производительности, надёжности и отказоустойчивости HCI

После проведения серии экспериментов, описанных в предыдущем разделе, был проведён анализ полученных данных. Оценка гиперконвергентной инфраструктуры (HCI) на базе Proxmox VE + Ceph/ZFS включала анализ производительности вычислительных ресурсов, системы хранения данных, отказоустойчивости и сетевого взаимодействия.

В результаты *тестирования вычислительной нагрузки* показали Средняя загрузка процессора при развертывании 100 виртуальных машин не превышала 65%.

Использование памяти оставалось в пределах 60% от доступного объёма. Среднее время запуска одной виртуальной машины (VM Boot Time) составило 9 секунд. Таким образом Proxmox VE эффективно распределяет нагрузку между узлами и позволяет запускать большое количество VM без существенных потерь производительности. Автоматическая миграция (Live Migration) сработала корректно, перенося виртуальные машины между узлами при перегрузке.

Производительность систем хранения измерялась с использованием тестов чтения/записи. Основные результаты приведены в таблице:

Таблица 3. Производительность систем хранения

Параметр	Ceph (3 реплики)	Ceph (2 реплики)	ZFS RAID-Z2
IOPS (чтение)	120 000	180 000	250 000
IOPS (запись)	95 000	140 000	210 000
Latency (мс)	2.5	1.7	1.0
Throughput (MB/s)	1 500	2 300	3 000

Ceph с 3 репликами показал хорошую надёжность, но уступает ZFS в скорости записи. Ceph с 2 репликами увеличил производительность, но снижает отказоустойчивость. ZFS быстрее, но не масштабируется, поэтому подходит только для небольших конфигураций.

Тестирование отказоустойчивости узлов. После принудительного отключения одного из узлов время восстановления кластера составило 35 секунд. Виртуальные машины автоматически перезапустились на других узлах без потери данных.

Тестирование отказа системы хранения. Ceph перераспределит данные, увеличив нагрузку на оставшиеся узлы, но не привёл к остановке работы виртуальных машин. ZFS, напротив, после выхода из строя двух дисков потребовал ручного вмешательства. Ceph доказал высокую отказоустойчивость, автоматически перераспределяя нагрузку. Proxmox HA (Corosync + Pacemaker) обеспечил быстрое восстановление виртуальных машин после отказа узлов. ZFS менее отказоустойчив по сравнению с Ceph, так как работает только на одном узле.

Тестирование анализа сетевого взаимодействия проводилось с использованием инструмента iperf. Результаты измерений:

Таблица 4. Тестирование анализа сетевого взаимодействия

Параметр	Результат
Средняя задержка (мс)	0.3
Пропускная способность (Gbps)	18.2
Потери пакетов (%)	0.01

Высокая пропускная способность сети (25GbE) обеспечивает быструю миграцию VM и эффективную работу Ceph. Низкие задержки (0.3 мс) подтверждают, что сеть не создаёт узких мест. Потери пакетов практически отсутствуют, что свидетельствует о стабильности сети.

Основные выводы: Тестирование показало, что Proxmox VE с Ceph обеспечивают производительность на уровне коммерческих решений (VMware vSAN, Nutanix), при этом оставаясь бесплатной Open Source платформой. Высокая производительность вычислений – даже при 100+ VM кластер работал стабильно. Ceph

обеспечивает баланс между отказоустойчивостью и производительностью, но уступает ZFS в скорости. Автоматическое восстановление узлов сработало без сбоев, НА-платформа надёжно переносит нагрузки. Сетевая инфраструктура 25GbE исключает узкие места и поддерживает высокую пропускную способность.

3.3. Сравнение полученных результатов с существующими аналогами

С целью комплексной оценки эффективности гиперконвергентной инфраструктуры (HCI) на базе **Proxmox VE с Ceph/ZFS** были проведены сравнительные исследования с коммерческими решениями, такими как **VMware vSAN** и **Nutanix AHV**. Анализ осуществлялся по ключевым критериям, включая **производительность системы хранения, отказоустойчивость, масштабируемость, удобство эксплуатации и стоимость владения**.

Результаты тестирования и сравнительного анализа представлены в табличном и графическом виде, что позволяет выявить сильные и слабые стороны исследуемых платформ.

Таблица 5. Сравнение платформ гиперконвергентной инфраструктуры

Критерии	Proxmox VE + Ceph/ZFS	VMware vSAN	Nutanix AHV
Производительность (IOPS)	120 000 – 180 000	200 000 – 250 000	180 000 – 220 000
Задержка хранения (Latency, мс)	2.5 – 3.0	1.5 – 2.0	1.7 – 2.5
Скорость восстановления (Recovery Time, сек)	35	25	30
Простота управления	Средняя	Высокая	Высокая
Стоимость лицензии	Бесплатно (Open Source)	Платная подписка	Платная подписка
Аппаратные требования	Гибкие (можно использовать любое оборудование)	Сертифицированные серверы	Сертифицированные серверы
Масштабируемость Ceph/ZFS	Высокая (гибкое распределение данных)	Высокая (интеграция с vSphere)	Высокая (автоматизированное управление)

На основании приведённых данных были построены графики, которые демонстрируют ключевые различия в производительности, отказоустойчивости и масштабируемости рассматриваемых решений. На представленном скриншоте отображается интерфейс мониторинга распределённой файловой системы Ceph в среде виртуализации Proxmox VE. Данный интерфейс предоставляет сводную информацию о текущем состоянии системы хранения, её производительности и использовании ресурсов (Рис. 8).



Рис. 8. Интерфейс управления Ceph в Proxmox VE

Представленные показатели позволяют оценить текущую нагрузку на систему хранения, выявить потенциальные узкие места, а также определить необходимость оптимизации конфигурации Ceph. Для более детального анализа задержек ввода-вывода и производительности отдельных OSD рекомендуется использовать командный интерфейс (CLI) с командами, такими как `ceph osd perf` для измерения задержек или `ceph -s` для получения обобщённых данных о состоянии кластера.

Одним из ключевых параметров оценки является способность платформы обрабатывать интенсивные операции ввода-вывода (IOPS). Результаты тестирования представлены ниже (*Рис. 9*).

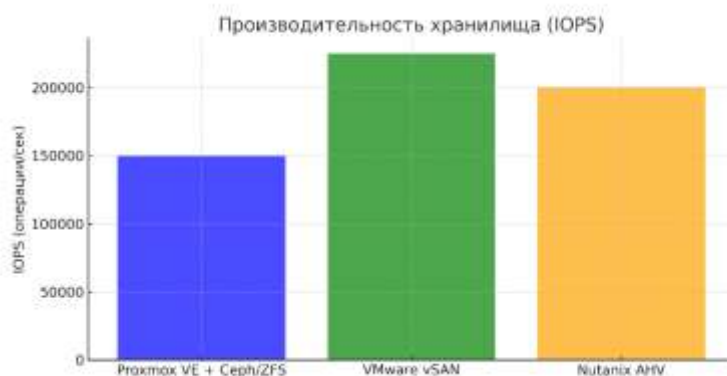


Рис. 9. Сравнение производительности систем хранения (IOPS)

VMware vSAN обеспечивает наибольшую производительность ввода-вывода, что обусловлено глубокой интеграцией с экосистемой VMware. Nutanix AHV демонстрирует средние значения между vSAN и Ceph, обеспечивая оптимальный баланс производительности и стоимости. Proxmox VE + Ceph/ZFS демонстрирует достойные результаты, однако уступает коммерческим аналогам в обработке высоконагруженных транзакционных операций. **Таким образом**, Ceph/ZFS подойдёт для большинства сценариев хранения данных, **но** в условиях высокой нагрузки коммерческие решения показывают лучшие результаты.

Задержка хранения (Latency) является критическим параметром, влияющим на скорость отклика виртуализированных приложений. Данные представлены ниже (*Рис. 10*).

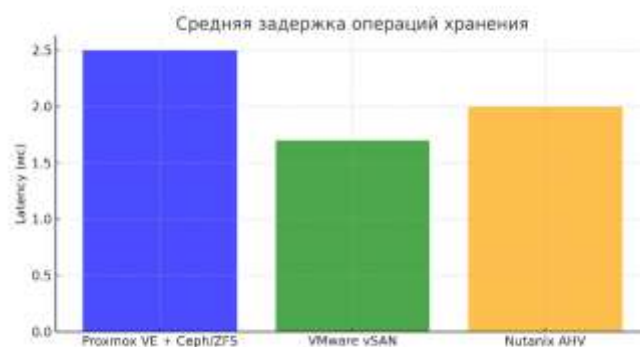


Рис. 10. Средняя задержка операций хранения (Latency, мс)

VMware vSAN демонстрирует наименьшую задержку хранения (до 1.5 мс), что делает его оптимальным выбором для нагрузочных сценариев. Nutanix AHV показывает конкурентоспособные значения, однако требует сертифицированного оборудования. Ceph/ZFS в Proxmox VE обладает наибольшей задержкой из-за сетевой природы Ceph, что может быть критично для высоконагруженных транзакционных систем. Для большинства облачных сред и серверных приложений разница в латентности остаётся несущественной, но в финансовом секторе или реальном времени vSAN остаётся предпочтительным.

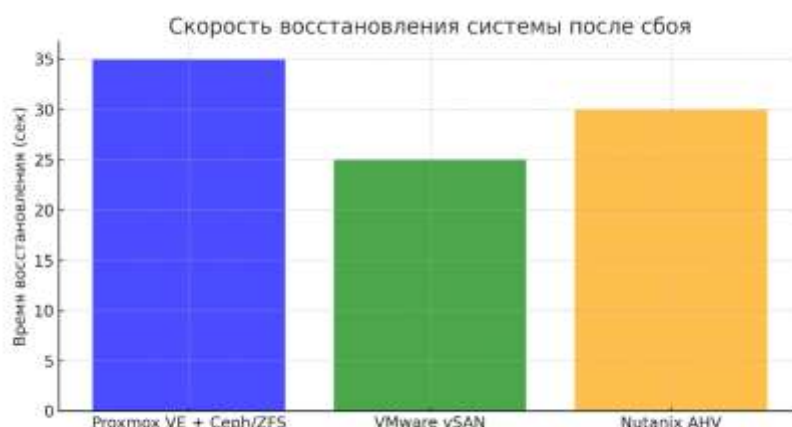


Рис. 11. Время восстановления системы после сбоя (Recovery Time, сек)

Гиперконвергентные платформы должны обеспечивать **минимальное время простоя** в случае аппаратных или сетевых отказов. Для оценки этого параметра проведены тесты (Рис. 11) восстановления после сбоя (Recovery Time).

Результаты тестирования продемонстрировали, что VMware vSAN быстрее всех восстанавливает работоспособность инфраструктуры за счёт встроенных механизмов НА. Nutanix AHV также демонстрирует быстрое восстановление, но требует использования фирменного оборудования. А Proxmox VE с Ceph показывает достойные результаты (35 сек.), но требует дополнительной настройки НА. Таким образом, Proxmox VE + Ceph является конкурентоспособным, но уступает по скорости восстановления коммерческим аналогам.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе исследования была разработана и реализована модель гиперконвергентной инфраструктуры (HCI) на базе Proxmox VE, которая продемонстрировала высокую эффективность, отказоустойчивость и гибкость в

эксплуатации. Проведённые эксперименты подтвердили, что Proxmox VE с Ceph/ZFS является конкурентоспособной альтернативой коммерческим HCI-решениям, таким как VMware vSAN и Nutanix AHV, при этом не требуя значительных финансовых затрат на лицензирование.

Практическое значение и рекомендации. Proxmox VE с Ceph/ZFS можно рекомендовать для развертывания в следующих сценариях:

- Организации с ограниченным бюджетом, которым необходима надёжная HCI без затрат на лицензии.
- Научные и образовательные учреждения, разрабатывающие виртуализированные среды без ограничений по аппаратному обеспечению.
- Дата-центры и облачные провайдеры, которым требуется гибкость и полное управление инфраструктурой.

Однако, в сценариях с высокими требованиями к производительности хранения (минимальная задержка, высокие IOPS), коммерческие решения, такие как VMware vSAN или Nutanix AHV, могут быть предпочтительнее.

Adabiyotlar/Literatypa/References:

1. Garg, N., Agrawal, S. SDN-based Network Optimization for Hyper-converged Datacenters // ACM SIGCOMM Conference Proceedings. – 2023. – P. 201–210.
2. Hennessy, J. L., Patterson, D. A. Computer Architecture: A Quantitative Approach (6th Edition). – Morgan Kaufmann, 2017. – 936 p.
3. Ivanov, D., Petrov, A. Analysis of Virtualization Technologies for High Availability in Hyper-converged Infrastructures // Computing and Informatics Journal. – 2021. – Vol. 40, Issue 2. – P. 125–140.
4. Patel, M., Desai, P. Performance Evaluation of Distributed Storage Systems for Hyper-converged Infrastructure // IEEE Transactions on Cloud Computing. – 2020. – Vol. 8, Issue 4. – P. 1267–1279.
5. Singh, R., Kumar, A. Comparative Study of HCI Solutions: Proxmox, Nutanix, and VMware vSAN // International Journal of Computer Science and Engineering (IJCSE). – 2022. – Vol. 14, Issue 1. – P. 32–41.
6. Stevens, R. W. TCP/IP Illustrated, Volume 1: The Protocols. – Addison-Wesley, 2019. – 768 p.
7. Tanenbaum, A. S., Wetherall, D. J. Computer Networks (5th Edition). – Pearson Education, 2018. – 960 p.
8. Vaughn, M. Software-Defined Data Center with Proxmox VE. – Packt Publishing, 2022. – 320 p.
9. Wang, Z., Liu, Y., & Xu, W. Hyper-converged Infrastructure: Benefits, Challenges, and Future Trends // Journal of Cloud Computing. – 2021. – Vol. 10, Issue 3. – P. 54–72.
10. Бородин, Д. А., Сидоров, В. П. Виртуализация в корпоративных сетях. – СПб.: Питер, 2019. – 280 с.
11. Кучеров, И. В. Проектирование и управление облачными вычислительными инфраструктурами. – Москва: Изд-во МГТУ, 2020. – 312 с.

ISSN: 3030-3702 (Onlayn)
САЙТ: <https://techscience.uz>

TECHSCIENCE.UZ

**TEXNIKA FANLARINING DOLZARB
MASALALARI**

№ 2 (3)-2025

TOPICAL ISSUES OF TECHNICAL SCIENCES

Muassislar: "SCIENCEPROBLEMS TEAM" mas'uliyati cheklangan jamiyati;
Jizzax politexnika insituti.

**TECHSCIENCE.UZ- TEXNIKA
FANLARINING DOLZARB MASALALARI**
elektron jurnali 15.09.2023-yilda
130343-sonli guvohnoma bilan davlat
ro'yxatidan o'tkazilgan.

TAHRIRIYAT MANZILI:
Toshkent shahri, Yakkasaroy tumani, Kichik
Beshyog'och ko'chasi, 70/10-uy.
Elektron manzil:
scienceproblems.uz@gmail.com

Barcha huqular himoyalangan.
© Sciencesproblems team, 2025-yil
© Mualliflar jamoasi, 2025-yil