Section: Information Systems and Technologies

DOI 10.70286/SV-13.11.2026.005

Архітектура високодоступної системи дистанційного навчання закладу вищої освіти на базі LMS Moodle із використанням контейнеризації, багаторівневого кешування та централізованої автентифікації

Жураківський Владислав Олександрович, здобувач бакалаврського рівня вищої освіти, спеціальність «Інформаційні системи і технології»
Кафедра Інформаційних систем та технологій
Факультет інформаційних систем
Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут
ORCID: 0009-0006-7939-9668

Вступ

Функціонування цифрового освітнього середовища сучасного закладу вищої освіти (ЗВО) нерозривно пов'язане з інтенсивною експлуатацією автоматизованих систем управління навчанням (LMS – Learning Management System), серед яких провідні позиції займає платформа з відкритим кодом Moodle [1]. Специфіка академічного процесу в університетах характеризується нерівномірністю навантаження на обчислювальну інфраструктуру: у періоди модульного контролю, заліково-екзаменаційних сесій та підсумкового комп'ютерного тестування здобувачів освіти кількість паралельних активних з'єднань зростає на порядок порівняно зі штатним режимом роботи.

Традиційна монолітна архітектура розгортання LMS Moodle [2], за якої веб-сервер, інтерпретатор PHP [3], реляційна система управління базами даних (СУБД) та файлове сховище (moodledata) функціонують у межах єдиної віртуальної машини або виділеного сервера, є критично вразливою до пікових навантажень. Основними вузькими місцями (bottlenecks) монолітної схеми є вичерпання пулу процесів PHP-FPM, взаємні блокування таблиць БД під час запису результатів тестування (Quiz engine), а також дискові затримки вводу-виводу (I/O Wait) при зберіганні сесій у локальній файловій системі [4]. Крім того, автономне ведення бази користувачів у LMS призводить до дублювання облікових записів і розсинхронізації контингенту студентів між деканатами та електронною системою.

Метою дослідження є розробка та обґрунтування універсальної архітектури високодоступної (High Availability) та горизонтально масштабованої системи дистанційного навчання ЗВО на базі LMS Moodle з використанням

контейнеризації Docker [3], in-memory сховища Redis [5], служби каталогів LDAP / Active Directory та системи моніторингу Zabbix [6].

Основна частина

Для усунення обмежень монолітної побудови та забезпечення безперервності освітнього процесу запропоновано перехід до багатошарової кластерної архітектури [2], розгорнутої у середовищі корпоративної віртуалізації (Proxmox VE або VMware vSphere). Модель передбачає декомпозицію вузлів системи на п’ять ізольованих рівнів.

1. Рівень балансування навантаження та захищеного периметра (Load Balancing & Reverse Proxy Tier). Вхідний HTTPS-трафік від клієнтських пристроїв приймається зворотним проксі-сервером та балансувальником (Nginx або HAProxy) [7]. На цьому вузлі здійснюється термінація протоколу TLS 1.3 (SSL Offloading), кешування статичного контенту, стиснення Brotli/Gzip та обмеження частоти запитів (Rate Limiting). Розподіл динамічних запитів між вузлами додатків виконується за алгоритмом найменшої кількості активних з’єднань (Least Connections) із перевіркою працездатності бекендів (Health Checks).

2. Рівень контейнеризованих прикладних вузлів (Stateless Application Tier). Обробка бізнес-логіки LMS Moodle виконується кластером ідентичних безстанових (stateless) контейнерів Docker [3] під керуванням оркестратора Docker Compose або Docker Swarm. Кожен вузол містить середовище PHP 8.x у режимі FastCGI Process Manager (PHP-FPM) із скомпільованим байт-кодом у спільній пам’яті (Zend OPcache). Оскільки контейнери не зберігають локальних станів сесій чи файлів, масштабування на період сесії зводиться до оперативного збільшення кількості реплік контейнерів (Horizontal Scaling) без зупинки порталу.

3. Рівень високошвидкісного кешування та керування сесіями (In-Memory Caching Tier). Найбільш ресурсоємним процесом у LMS Moodle є перевірка прав доступу користувача в ієрархії контекстів (Університет – Факультет – Кафедра – Курс – Модуль) та обробка сесій під час тестування [1]. Для зменшення кількості звернень до СУБД інтегровано резидентне сховище типу «ключ-значення» Redis [5], яке обслуговує сесії PHP та підсистему Moodle Universal Cache (MUC) на рівнях Application Cache і Session Cache. Для запобігання стану гонитви (Race Condition) при збереженні відповідей застосовується механізм атомарних блокувань Redis Session Locking [5].

4. Рівень збереження даних та відмовостійких сховищ (Data & Storage Persistence Tier). Реляційне сховище побудоване на базі СУБД PostgreSQL (або MariaDB) із потоковою реплікацією (Primary-Replica) та пулером з’єднань PgBouncer, що нівелює витрати на часте відкриття TCP-сесій від PHP-воркерів. Для спільного доступу контейнерів до каталогу матеріалів (moodledata) використовується мережеве сховище TrueNAS із файловою системою ZFS [8], підключене через протокол NFSv4 у виділеному сегменті Storage VLAN. Підкаталоги локального кешу (localcachedir та temp) винесені у віртуальну файлову систему в оперативній пам’яті (tmpfs) кожного вузла, що усуває

паразитний мережевий трафік [8]. Структурно-функціональну організацію кластера систематизовано в таблиці 1.

Таблиця 1. Структурно-функціональна організація кластерної інфраструктури LMS Moodle ЗВО

Архітектурний рівень	Технологічний стек	Ключові параметри	Відмовостійкість та продуктивність
Периметр і балансування	Nginx / HAProxy, Keepalived [7]	TLS 1.3, алгоритм Least Connections	Усунення єдиної точки відмови через VIP
Прикладний рівень (Web)	Docker, PHP 8.x-FPM [3], OPcache	Пул воркерів, OPcache 512 МБ, stateless	Горизонтальне масштабування під час сесій
Кешування та сесії	Redis [5], підсистема MUC [1]	Окремі БД Session/App Cache, allkeys-lru	Розвантаження СУБД до 80%, Session Lock
Реляційні дані	PostgreSQL / MariaDB, PgBouncer	Оптимізація буферів, пулінг транзакцій	Реплікація Primary-Replica, дампи БД
Файлове сховище	TrueNAS (ZFS) [8], NFSv4, tmpfs	Каталог filedir на ZFS RAID-Z2, temp у RAM	Миттєві ZFS-знімки (Snapshots), CoW
Ідентифікація і моніторинг	Active Directory, Zabbix [6], Veeam	Протокол LDAPS, синхронізація Cohorts	Єдиний вхід (SSO), бекап за правилом 3-2-1

5. Централізоване управління ідентифікацією та синхронізація контингенту. Для автоматизації управління обліковими записами студентів і викладачів [1] виключено створення локальних паролів на користь інтеграції зі службою каталогів ЗВО (Microsoft Active Directory або OpenLDAP) за протоколом LDAPS (порт 636) та протоколами єдиного входу (OAuth 2.0 / OpenID Connect). Штатний модуль LDAP спільно з планувальником Moodle Cron [1] періодично зчитує підрозділи (OU) і групи безпеки з каталогу університету, трансформуючи їх у глобальні групи LMS Moodle (Cohorts). Механізм автоматичного зарахування (Cohort Sync Enrollment) надає користувачам відповідні ролі у дисциплінах навчального плану, а при випуску чи відрахуванні деактивація профілю в каталозі автоматично припиняє доступ до ресурсів СДН.

6. Забезпечення спостережуваності та ешелонованого резервного копіювання. Моніторинг усіх рівнів інфраструктури здійснюється системою Zabbix [6], яка контролює активні процеси в пулі PHP-FPM [3], відсоток влучань у кеш OPcache та Redis [5], повільні SQL-запити, затримки ZFS ARC [8] та чергу фонових задач Moodle Scheduled Tasks [1]. Катастрофостійкість реалізована за правилом «3-2-1» за допомогою ZFS та комплексу Veeam Backup & Replication: на рівні TrueNAS щочотири години створюються незмінні знімки стану (ZFS Snapshots) каталогу moodledata за механізмом Copy-on-Write [8], а транзакційні дампи БД копіюються в ізольований репозиторій (RPO 15–60 хв, RTO до 20 хв). Результати порівняльного навантажувального тестування під час екзаменаційної сесії (модуль Quiz) [4] на ідентичних апаратних ресурсах наведено в таблиці 2.