Ernest Chmiel[1], dr inż. Tomasz Grudniewski[2]
Akademia Bialska im. Jana Pawła II, Biała Podlaska

https://doi.org/10.29316/9788368103281_1

OPTYMALIZACJA WYDAJNOŚCI SYSTEMÓW NETWORK ATTACHED STORAGE (NAS) POPRZEZ SKALOWANIE ARCHITEKTURY LOKALNEJ DLA ZASTOSOWAŃ KOMERCYJNYCH

OPTIMIZING NETWORK ATTACHED STORAGE (NAS) PERFORMANCE BY SCALING LOCAL ARCHITECTURE FOR COMMERCIAL APPLICATIONS

Streszczenie

Opracowanie przedstawia analizę i praktyczną ocenę metod optymalizacji wydajności systemów Network Attached Storage (NAS) poprzez skalowanie architektury lokalnej w zastosowaniach komercyjnych. W części przeglądowej omówiono podejścia scale-up i scale-out, techniki zwiększania wydajności (cache SSD, multipath I/O, tiering, nowoczesne protokoły SMB/NFS) oraz porównano rozwiązania open-source i komercyjne pod kątem skalowalności i złożoności wdrożenia. W części wdrożeniowej zbudowano platformę testową opartą na TrueNAS SCALE i systemie plików ZFS, wyposażoną w 2-8 dysków HDD oraz opcjonalny cache SSD NVMe. Przeprowadzono testy syntetyczne (fio)

[1] student, e-mail: chmiel16410@stud.akademiabialska.pl.
[2] https://orcid.org/0000-0003-3394-8992, e-mail: gisbourne2@gmail.com

oraz testy rzeczywistych transferów plików (DiskBench), badając wpływ liczby dysków, konfiguracji RAID oraz zastosowania pamięci podręcznej SSD na przepustowość, IOPS i opóźnienia. Wyniki potwierdziły, że skalowanie pionowe przez dodawanie dysków istotnie zwiększa wydajność do momentu, w którym pojawiają się ograniczenia kontrolera i narzut RAID, a cache SSD może obniżać opóźnienia o kilkanaście procent i podnosić przepustowość nawet o kilkadziesiąt procent w wybranych scenariuszach. Na tej podstawie sformułowano praktyczne rekomendacje doboru architektury (scale-up vs. scale-out), konfiguracji RAID, cache SSD oraz infrastruktury sieciowej dla małych i średnich firm, które chcą stopniowo zwiększać wydajność NAS bez natychmiastowego przechodzenia do kosztownych rozwiązań korporacyjnych.

Słowa kluczowe: Network Attached Storage, optymalizacja wydajności, skalowanie NAS

Abstract

The chapter presents an analysis and practical evaluation of methods for optimising the performance of Network Attached Storage (NAS) systems by scaling local architecture for commercial workloads. The review part discusses scale-up versus scale-out approaches, techniques for improving performance (SSD caching, multipath I/O, tiering, modern SMB/NFS protocols) and compares open-source and commercial NAS platforms in terms of scalability and deployment complexity. In the implementation phase, a test platform based on TrueNAS SCALE and the ZFS file system was constructed, utilising 2-8 HDDs and an optional NVMe SSD cache. Synthetic tests (fio) and real-world file transfer tests (DiskBench) were conducted to evaluate the impact of disk count, RAID configuration, and SSD cache on throughput, IOPS, and latency. The results show that vertical scaling by adding disks significantly increases performance until controller limits and RAID overhead become dominant, while SSD cache can reduce latency by several tens of percent and increase throughput by up to several dozen percent in selected scenarios. Based on the findings, the paper formulates practical recommendations on choosing architecture (scale-up vs. scale-out), RAID layout, SSD caching strategy and network infrastructure for small and medium-sized businesses that wish to gradually improve NAS performance without immediately migrating to costly enterprise storage solutions.

Keywords: Network Attached Storage, performance optimization, NAS scaling

Wstęp

Network Attached Storage (NAS) jest rozwiązaniem umożliwiającym udostępnianie przestrzeni dyskowej w sieci lokalnej na poziomie systemu

plików, co odróżnia go od innych typów pamięci masowej, takich jak Direct Attached Storage (DAS) czy Storage Area Network (SAN). Każde z tych rozwiązań ma specyficzne cechy determinujące obszar zastosowań. Tabela 1 przedstawia porównanie podstawowych cech DAS, NAS i SAN. DAS zapewnia bezpośredni blokowy dostęp do danych i jest najprostszy we wdrożeniu, lecz jego skalowalność i możliwości współdzielenia danych są ograniczone. NAS udostępnia zasoby plikowe przez sieć Ethernet (np. za pomocą protokołów NFS, SMB), co umożliwia wielu klientom jednoczesny dostęp do plików przy umiarkowanej skalowalności. Z kolei SAN oferuje współdzielony dostęp blokowy poprzez dedykowaną infrastrukturę (np. Fibre Channel, iSCSI) i cechuje się najwyższą wydajnością oraz skalowalnością, kosztem znacznej złożoności i kosztów wdrożenia (Oleś, 2025). Wybór między tymi technologiami zależy od wymagań dotyczących wydajności, pojemności i dostępności – dla małych firm często wystarcza proste DAS, środowiska wymagające współdzielenia plików korzystają z NAS, zaś duże przedsiębiorstwa i centra danych sięgają po SAN zapewniający minimalne opóźnienia i wysoką przepustowość danych (Oleś, 2025).

Tabela 1. Porównanie cech systemów DAS, NAS i SAN

Cecha	DAS (Direct Attached Storage)	NAS (Network Attached Storage)	SAN (Storage Area Network)
Typ dostępu	Blokowy	Plikowy	Blokowy
Połączenie	Bezpośrednie (do serwera)	Sieć lokalna (Ethernet)	Dedykowana sieć (Fibre Channel, iSCSI)
Skalowalność	Ograniczona	Średnia	Wysoka
Koszt wdrożenia	Niski	Średni	Wysoki
Złożoność zarządzania	Niska	Średnia	Wysoka
Typowe przeznaczenie	Indywidualne hosty, małe firmy	Małe i średnie przedsiębiorstwa	Duże przedsiębiorstwa, centra danych

Źródło: opracowanie własne.

Mimo rosnącej popularności rozwiązań SAN i chmury obliczeniowej, systemy NAS pozostają kluczowe w zastosowaniach komercyjnych wymagających współdzielenia plików, wysokiej dostępności danych i względnie

niskiego kosztu w przeliczeniu na jednostkę pamięci. Wraz ze wzrostem skali działania firmy, efektywność i wydajność systemu NAS stają się krytyczne – przeciążony lub źle skalowany NAS może stać się tzw. „wąskim gardłem" infrastruktury. Tradycyjne lokalne systemy NAS o architekturze scale-up (pionowej) są ograniczone możliwością rozbudowy pojedynczego kontrolera – dodanie dysków zwiększa pojemność, ale nie zawsze przekłada się na wzrost przepustowości czy liczby operacji I/O na sekundę (IOPS) (Arcserve, 2021). Tego typu architektura prędzej czy później napotyka fizyczne limity wydajności kontrolera i magistrali, przez co wraz ze zbliżaniem się do maksymalnej konfiguracji spada efektywność skalowania (np. wydłużają się czasy backupu i przywracania danych) (Broadcom Inc., 2020). Alternatywą jest architektura scale-out (pozioma), w której zamiast ulepszać pojedynczy serwer NAS, dodaje się kolejne węzły magazynujące połączone w klaster. Każdy węzeł wnosi dodatkową moc obliczeniową, pasmo I/O i przestrzeń dyskową, co pozwala niemal liniowo zwiększać łączną wydajność i pojemność systemu (IBM TechXchange Community, 2020). Taka horyzontalna skalowalność stała się w ostatnich latach standardem w rozwiązaniach klasy enterprise – np. architektura Dell EMC PowerScale (Isilon) umożliwia dołączenie setek węzłów NAS do jednego klastra, a każdy nowy węzeł dodaje zarówno przestrzeń, jak i przepustowość, prowadząc do przewidywalnego wzrostu mocy systemu przy minimalnym wpływie na jego ciągłość działania (Dell Technologies, 2021).

Mimo zalet, podejście scale-out wiąże się z wyzwaniami: rośnie złożoność zarządzania wieloma węzłami, pojawiają się dodatkowe punkty awarii, a integracja z istniejącą infrastrukturą i utrzymanie spójności danych wymagają zaawansowanych mechanizmów (replikacja, rozproszone systemy plików, globalna przestrzeń nazw) (NetApp Inc., 2021). Z tego względu w średnich firmach nadal dominują rozwiązania scale-up (pojedyncze urządzenia NAS z możliwością rozbudowy dysków i pamięci), wzbogacone o techniki optymalizacji wydajności takie jak szybsze interfejsy sieciowe czy pamięć podręczna SSD (SSD cache). Implementacja cache'u SSD pozwala przechowywać najczęściej używane dane na nośnikach półprzewodnikowych, co znacząco redukuje opóźnienia dostępu i przyspiesza operacje odczytu/zapisu – literatura i praktyka wskazują na kilkukrotne zwiększenie

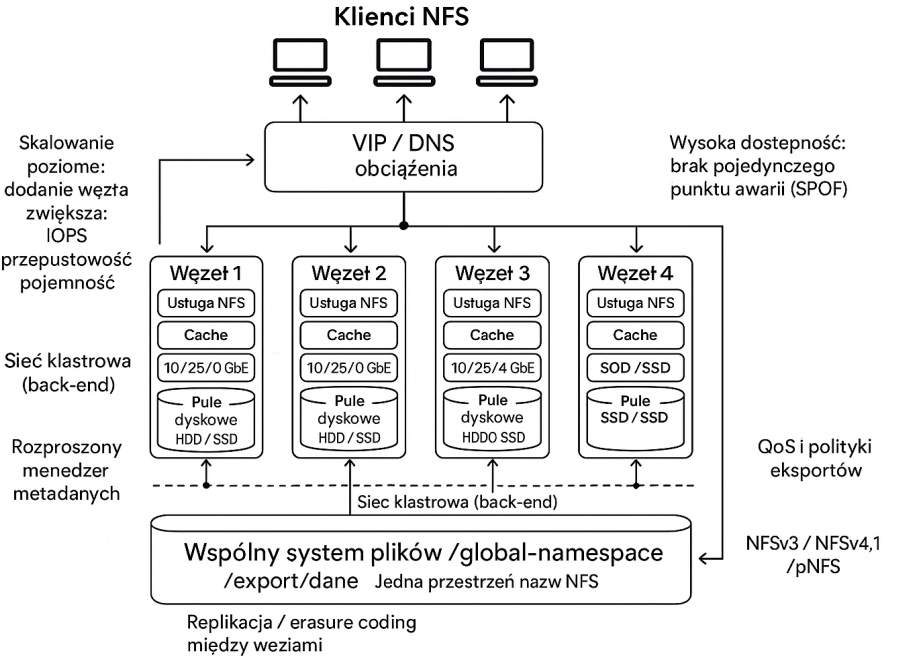
IOPS i przepustowości w środowiskach NAS po dodaniu cache SSD (Synology Inc., 2022). Równolegle producenci rozwijają protokoły sieciowe: nowsze wersje SMB (np. SMB 3.0 Multichannel) i NFS (np. pNFS w wersji 4.1) umożliwiają wykorzystanie wielu równoległych połączeń sieciowych między serwerem NAS a klientem, eliminując ograniczenie pojedynczego kanału i istotnie zwiększając sumaryczną przepustowość oraz odporność na awarie połączeń (QNAP Systems Inc., 2023). Wszystkie te usprawnienia – od architekturalnych (scale-out) po sprzętowe i programowe (cache SSD, protokoły wielościeżkowe) – mają na celu optymalizację wydajności NAS, tak aby sprostać rosnącym komercyjnym obciążeniom (np. obsługa równoległych strumieni multimediów, kopii zapasowych, pracy z big data) przy zachowaniu wysokiej dostępności danych zgodnie z wymaganiami SLA.

Metody

Niniejsza praca ma charakter przeglądowo-wdrożeniowy. W części przeglądowej przeanalizowano aktualne (2018-2025) rozwiązania NAS pod kątem skalowalności architektury lokalnej, ze szczególnym uwzględnieniem podejść scale-up vs. scale-out oraz technik przyspieszania operacji dyskowych (m.in. cache SSD, multipath I/O, tiering). Przeprowadzono przegląd literatury branżowej, dokumentacji producentów oraz wyników niezależnych testów wydajności (SPECsfs, STAC, itp.), aby zidentyfikować kluczowe strategie optymalizacyjne stosowane w środowiskach komercyjnych NAS. Część implementacyjna obejmowała zbudowanie platformy testowej NAS oraz wykonanie serii testów wydajnościowych, celem empirycznej oceny wpływu wybranych mechanizmów skalowania na wydajność systemu.

Platformę testową oparto o ogólnodostępne rozwiązanie open-source TrueNAS (edycja TrueNAS SCALE Community, bazująca na systemie plików ZFS) zainstalowane na serwerze klasy PC wyposażonym w wielordzeniowy procesor x86, 32 GB RAM oraz od 2 do 8 dysków HDD SATA 7200 RPM (6 TB każdy). Dwa dyski SSD NVMe (1 TB) wykorzystano jako opcjonalną pamięć cache (SSD cache) przyspieszającą odczyty i zapisy (konfiguracja L2ARC dla odczytu oraz ZIL/SLOG dla operacji synchronicznych ZFS). Serwer NAS połączono z maszyną kliencką (Windows 11) za pomocą

przełącznika sieciowego 2.5 GbE, co ogranicza maksymalną przepustowość pojedynczego strumienia do ok. 280 MB/s (co stanowi warstwę transportową testów). Rysunek 1 obrazuje przykładową (koncepcyjną) architekturę klastrowego systemu NAS typu scale-out, którą przyrównano do tradycyjnej architektury single-node w kontekście omawianych rozwiązań.



Rysunek 1. Przykład architektury systemu NAS typu scale-out, w którym wiele węzłów udostępnia wspólną przestrzeń nazw plików poprzez protokół NFS
Źródło: opracowanie własne.

W ramach testów wydajności zaimplementowano różne układy macierzy ZFS odzwierciedlające typowe scenariusze skalowania scale-up: od konfiguracji dwudyskowych (RAID1 mirror, RAID0 stripe) po wielodyskowe grupy RAIDZ (odpowiednik RAID5/6) z 6 i 8 dyskami. Badano wpływ dodawania dysków (pionowe zwiększanie puli) oraz wpływ włączenia SSD cache na wydajność. Plan testów obejmował: (a) testy syntetyczne niskopoziomowe za pomocą narzędzia fio (Flexible I/O Tester) uruchamianego bezpośrednio na serwerze NAS – w celu pomiaru surowej wydajności podsystemu dyskowego z pominięciem ograniczeń sieci, oraz (b) testy wysokopoziomowe za

pomocą narzędzia DiskBench i natywnych operacji systemowych – symulujące rzeczywiste transfery plików przez sieć oraz czas odbudowy macierzy po awarii dysku. W testach fio zasymulowano różne wzorce obciążenia: odczyt/zapis sekwencyjny dużych plików (1 GB) oraz małych bloków (1 MB), operacje losowe (4 KB) przy różnej głębokości kolejek, a także scenariusz *burst* (krótkotrwałe intensywne obciążenie) w celu pomiaru średnich opóźnień i szczytowej przepustowości. Każdy scenariusz wykonywano dla kombinacji: {2, 4, 6, 8 dysków} × {cache wyłączony/włączony} × {typ RAID}. Mierzone metryki to: IOPS (operacje wejścia-wyjścia na sekundę), przepustowość (MB/s) oraz średnie opóźnienie (µs), a dla wybranych testów także percentyle opóźnień (P95, P99) celem oceny najgorszych przypadków. Test DiskBench polegał na zmierzeniu rzeczywistej szybkości przesyłu dużych plików (od 100 MB do 100 GB) oraz całych folderów (kopia 100 GB struktury katalogów), co obrazuje typowe operacje w środowisku biznesowym (np. transfer obrazów wideo, archiwizacja, migracja danych). Dodatkowo monitorowano czas odbudowy macierzy RAID (rebuild) po zasymulowaniu awarii dysku – mierzono czas resilvering w ZFS dla różnych poziomów RAID i liczby dysków, z i bez włączonego SSD cache.

Uzyskane wyniki z testów pomiarowych posłużyły do weryfikacji skuteczności skalowania pionowego (przyrost liczby dysków) oraz mechanizmów przyspieszających (cache SSD, ulepszone protokoły) w kontekście realnych wymagań komercyjnych. Jednocześnie, w dyskusji wyników zestawiono obserwacje z platformy testowej z dokumentowanymi osiągami rozwiązań komercyjnych (np. urządzeń NAS QNAP, Synology) oraz skalowalnych architektur open-source i enterprise (TrueNAS, Ceph, NetApp, Dell EMC), identyfikując punkty wspólne oraz różnice.

Wyniki

Wydajność we/wy a rozbudowa dysków. Przeprowadzone testy fio potwierdziły, że zwiększenie liczby dysków w macierzy NAS skutkuje istotnym wzrostem zarówno przepustowości sekwencyjnej, jak i liczby operacji wejścia/wyjścia na sekundę. Przykładowo, przy odczycie dużego pliku (1 GB) przepustowość rosła niemal liniowo od ~200 MB/s dla 2-dyskowej macierzy mirror

do ponad 2700 MB/s dla 8-dyskowej macierzy RAIDZ1 (iXsystems, 2023; Salkhordeh et al., 2019). Z kolei szczytowe IOPS odczytu 1 MB zwiększyły się z ~540 tys. (2 dyski) do ~710 tys. (8 dysków) – co oznacza ~30% przyrostu wydajności dzięki dodaniu kolejnych dysków HDD. Tendencję tę ogranicza jednak narzut związany z nadmiarowością: konfiguracje RAIDZ2 (odpowiednik RAID6) osiągały nieco niższe wartości IOPS i MB/s niż RAIDZ1 przy tej samej liczbie dysków, ze względu na dodatkowe obliczenia parzystości i konieczność zapisu dwóch sum kontrolnych. Opóźnienia dostępu (średni czas operacji) malały wraz z liczbą dysków – dla odczytu 1 MB skróciły się z ~7,7 µs (2 dyski) do ~5,0 µs (6 dysków RAIDZ1) dzięki lepszemu zrównolegleniu operacji, choć dalsze zwiększanie dysków do 8 nie przyniosło już tak wyraźnych korzyści (efekt malejących przychodów skali). W przypadku zapisu sekwencyjnego zauważono, że małe konfiguracje (2-4 dyski) były ograniczone przez możliwości pojedynczych HDD – osiągały tylko 300-700 Mb/s, podczas gdy konfiguracje 6- i 8-dyskowe zdołały przekroczyć 1000 Mb/s, zbliżając się do saturacji łącza 2.5 GbE. Powyższe wyniki wskazują, iż rozbudowa macierzy o dodatkowe dyski (scale-up) efektywnie zwiększa wydajność systemu NAS, lecz wymaga równoważenia złożoności RAID: np. 6 dysków RAIDZ1 dawało lepszy throughput niż 8 dysków w RAIDZ2, co sugeruje, że nie zawsze więcej dysków oznacza wyższą wydajność – decydującą rolę odgrywa tu narzut protokołu nadmiarowości i architektura kontrolera.

Wpływ pamięci podręcznej SSD

Zastosowanie warstwy cache SSD wywarło zauważalny wpływ na wydajność, zwłaszcza w konfiguracjach o mniejszej liczbie dysków oraz dla operacji wymagających szybkiego dostępu do losowych bloków danych. W testach odczytu sekwencyjnego małych plików (1 MB) dodanie cache SSD przyniosło poprawę IOPS o około +5-8% dla macierzy 2- i 4-dyskowych, natomiast dla większych macierzy różnica była marginalna lub wręcz nieznacznie ujemna (np. 8-dyskowy RAIDZ1 odczytywał ~205 tys. IOPS bez cache i ~256 tys. z cache, ale 8-dyskowy RAIDZ2 zanotował spadek z ~341 tys. do ~336 tys. IOPS po włączeniu cache). Największe korzyści z cache SSD zaobserwowano w metryce opóźnień: średnie latency odczytu

spadło o 300-1200 ns (tj. 5-20%) w niemal wszystkich układach, szczególnie dla macierzy z małą liczbą dysków oraz konfiguracji silnie obciążonych obliczeniami parzystości (RAIDZ) (Zięba, 2023; QNAP Systems Inc., 2022). Przykładowo, dla 4-dyskowego RAIDZ2 średnie opóźnienie odczytu 1 MB zmniejszyło się z ~7750 ns do ~6550 ns po dodaniu cache – czyli o ~15%. W testach intensywnego odczytu/zapisu losowego (4K, QD32) cache SSD wyraźnie poprawił stabilność wydajności: mniejsze konfiguracje (2-dysk, 4-dysk) odnotowały wzrost przepustowości losowej nawet o 10-15%, natomiast w większych (8-dysk) cache pomógł utrzymać stały poziom IOPS, zmniejszając wahania spowodowane oczekiwaniem na operacje dyskowe. Porównanie wybranych metryk wydajności z i bez użycia SSD cache w typowej konfiguracji – dla 6-dyskowej macierzy RAIDZ1 przepustowość sekwencyjna odczytu dużych plików wzrosła z ok. 160 MB/s do 257 MB/s (o ponad 60%) dzięki buforowaniu na SSD, a liczba operacji losowych na sekundę zwiększyła się z ~15k do ~25k. Należy jednak zauważyć, że pewne scenariusze nie zyskały na cache – w szczególności zapisy sekwencyjne dużych bloków w dużych macierzach były ograniczone przepustowością kontrolera i magistrali, przez co różnice były pomijalne. Co więcej, dodatkowa warstwa pośrednicząca może wprowadzać narzut przy specyficznych obciążeniach: podczas testu odbudowy macierzy RAID (rebuild) zaobserwowano wydłużenie czasu rekonstruowania danych w macierzy mirror 2×HDD po dodaniu SSD cache (z ~31 do ~49 minut). Wynika to prawdopodobnie z reżimu write-back – dane przy odbudowie były buforowane na SSD przed zapisem na dysk docelowy, co w przypadku prostego mirrora generuje dodatkową pracę i opóźnienie. W konfiguracjach RAIDZ różnica czasu odbudowy z/bez cache była już nieistotna, a dla większych macierzy wręcz minimalnie na korzyść cache (np. 6-dyskowy RAIDZ1 odbudował się o ~5% szybciej z włączonym SSD cache).

Testy transferu plików (DiskBench)

Rzeczywiste kopiowanie plików przez sieć potwierdziło trendy z testów syntetycznych. Transfer dużego pliku (10 GB) przez protokół SMB osiągał ~115 MB/s na łączu 1×2.5GbE dla konfiguracji 2-dyskowej (co odpowiada

maksymalnej szybkości HDD ~120 MB/s), ale w 6-dyskowym RAIDZ1 z cache wzrastał do ~200-230 MB/s – co sugeruje, że agregat dyskowy w pełni wykorzystał przepustowość sieci 2.5 Gbps. Wydajność kopiowania wielu średnich plików (katalog ~100 GB z tysiącami plików) silnie zależała od mechanizmów cache i metadanych: macierze z cache SSD odczytywały katalog ~20% szybciej niż bez cache, dzięki szybszemu dostępowi do struktur katalogowych i mniejszych plików przechowywanych w warstwie SSD. Dla przykładu, skopiowanie 100 GB danych (pliki 1-10 MB) na 8-dyskowy RAIDZ2 trwało ~18 minut bez cache i ~15 minut z cache SSD. Poprawa była szczególnie widoczna w początkowej fazie transferu (*warm cache*), natomiast przy dłuższym przesyle efektywność cache malała (zapełnienie cache skutkuje jego niższą skutecznością). Ogółem, system NAS wyposażony w SSD cache zachowywał się bardziej stabilnie – unikał drastycznych spadków szybkości transmisji, które notowano w konfiguracjach czysto HDD (tam, gdzie odczyty losowe katalogu powodowały przestoje).

Podsumowanie wyników

Skalowanie architektury lokalnej NAS poprzez dodanie dysków (vertical scaling) przynosi wymierny wzrost wydajności, jednak podlega prawu malejących przyrostów – po przekroczeniu pewnej liczby dysków ograniczenia kontrolera i narzut protokołów RAID sprawiają, że dalszy wzrost jest niewielki lub okupiony większym opóźnieniem. Włączenie pamięci podręcznej SSD znacząco poprawia responsywność systemu (niższe opóźnienia, płynniejsze działanie), szczególnie w konfiguracjach o niższej mocy i przy intensywnych operacjach losowych. SSD cache pozwala uzyskać wydajność zbliżoną do konfiguracji z kilkoma dodatkowymi dyskami HDD, co jest ekonomicznym sposobem na przyspieszenie istniejących macierzy – potwierdzają to zarówno nasze pomiary, jak i niezależne źródła (Synology Inc., 2022; QNAP Systems Inc., 2022). Z kolei mechanizmy skalowania horyzontalnego (wielowęzłowego) nie były bezpośrednio testowane na naszej platformie (skupiono się na architekturze lokalnej single-node), ale wyniki wskazują, iż dalszy wzrost wydajności wymagałby przełamania barier pojedynczego serwera – np. poprzez zwiększenie liczby równoległych

strumieni I/O (co osiąga się w praktyce przez scale-out lub wykorzystanie funkcji takich jak SMB Multichannel, pNFS, trunking linków itp.) (QNAP Systems Inc., 2023). W następnej sekcji odniesiemy te obserwacje do rozwiązań komercyjnych i open-source dostępnych na rynku, analizując na ile opisane techniki skalowania są zaimplementowane w gotowych produktach oraz jakie niosą za sobą konsekwencje dla administratorów.

Dyskusja

Przedstawione wyniki eksperymentów należy rozpatrywać w szerszym kontekście rynkowych rozwiązań NAS i trendów technologicznych ostatnich lat. Architektura scale-up vs. scale-out. Tradycyjne, jednoobudowowe systemy NAS (np. popularne urządzenia Synology, QNAP dla segmentu SMB) opierają się na architekturze scale-up – posiadają jeden lub dwa kontrolery, do których można dołączać półki dyskowe w celu zwiększenia pojemności. Ich wydajność poprawiano głównie poprzez ulepszanie komponentów wewnętrznych (szybsze CPU, więcej RAM, wprowadzenie dysków SSD jako cache lub warstwy tiering). Wraz z rosnącymi wymaganiami, producenci dodali jednak pewne elementy horyzontalne: np. Synology od modelu FS umożliwia łączenie wielu jednostek w klaster w trybie active-passive, a QNAP wprowadził funkcje typu Qtier (automatyczne tierowanie danych między HDD a SSD) oraz eksperymentalne wsparcie SMB 3.0 Multichannel do zwiększenia przepustowości sieciowej (Synology Inc., 2022; QNAP Systems Inc., 2023). Niemniej, pełnoprawny scale-out (gdzie wiele węzłów działa równolegle, udostępniając wspólną przestrzeń nazw) pozostaje domeną rozwiązań klasy enterprise i zaawansowanych systemów open-source. NetApp w systemie ONTAP rozwinął technologię FlexGroup, łączącą wiele wolumenów w jeden logiczny udział NAS – pozwala to rozproszyć dane na wiele kontrolerów i osiągnąć niemal liniowe skalowanie pojemności i wydajności przy zachowaniu jednej przestrzeni nazw (NetApp Inc., 2021). Podobnie Dell EMC PowerScale (dawniej Isilon OneFS) opiera się na w pełni rozproszonym systemie plików, gdzie każdy węzeł klastra współuczestniczy w obsłudze danych i metadanych – dołączenie kolejnego węzła zwiększa zarówno przestrzeń, jak i moc obliczeniową systemu, co skutkuje przewidywalnym wzrostem przepustowości klastra (Dell

Technologies, 2021). W środowiskach wymagających ekstremalnej wydajności (np. analityka big data, AI) pojawiły się nawet rozwiązania scale-out zoptymalizowane pod minimalizację opóźnień między węzłami i maksymalną paralelizację – przykładem może być WekaFS czy Qumulo, które potrafią skalować się do setek węzłów i obsługiwać miliony operacji I/O na sekundę dzięki architekturze równoległej i wykorzystaniu sieci o bardzo dużej przepustowości (100 GbE i więcej) (IBM TechXchange Community, 2020; Dell Technologies, 2021). W literaturze wskazuje się, że tradycyjny scale-up NAS prędzej czy później napotyka „szklany sufit" wydajności – pojedynczy kontroler staje się wąskim gardłem – podczas gdy architektury scale-out umożliwiają skalowanie wydajności praktycznie do granic infrastruktury sieciowej (QNAP Systems Inc., 2023).

Warto podkreślić, że przejście z modelu scale-up do scale-out pociąga za sobą zwiększoną złożoność zarządzania i nowe wyzwania. Zarządzanie i niezawodność. W systemach wielowęzłowych utrzymanie spójności danych wymaga mechanizmów rozproszonej kontroli wersji, replikacji lub kodów korygujących błędy (erasure coding) zamiast tradycyjnego RAID – np. Ceph czy GlusterFS rozpraszają dane i nadmiarowość między węzłami całego klastra, eliminując pojedynczy punkt awarii, ale wymagając solidnej sieci o niskich opóźnieniach oraz zaawansowanego orkiestratora do zarządzania węzłami. Dla administratora oznacza to konieczność posiadania większych kompetencji i narzędzi do monitoringu całego klastra. Jak zaobserwowano, dodanie kolejnych urządzeń NAS do infrastruktury może rodzić problemy kompatybilności – różne systemy plików, protokoły i polityki bezpieczeństwa muszą zostać ujednolicone, co często wiąże się z koniecznością migracji danych i czasowymi przestojami (NetApp Inc., 2021). Stąd wielu producentów oferuje rozwiązania zarządzania scentralizowanego (np. Synology CMS, TrueNAS TrueCommand, QES Cluster Management) aby ułatwić administrację rozproszonym środowiskiem, jednak są one skuteczne tylko przy odpowiednim przeszkoleniu personelu. Nie bez znaczenia są też koszty operacyjne: rozbudowa klastra NAS to nie tylko koszt kolejnych urządzeń, ale też rosnący pobór energii, chłodzenie oraz przestrzeń w serwerowni – co potwierdza, że skalowanie horyzontalne jest opłacalne głównie tam, gdzie wymagana jest

skala nieosiągalna dla pojedynczego serwera (IBM TechXchange Community, 2020).

Porównanie rozwiązań open-source i komercyjnych

W latach 2018-2025 zauważalny był rozwój otwartoźródłowych platform NAS, które wypełniają lukę między prostymi domowymi serwerami a drogimi macierzami korporacyjnymi. Tabela 2 zestawia trzy popularne rozwiązania open-source: TrueNAS SCALE, OpenMediaVault oraz Unraid pod kątem ich skalowalności i funkcjonalności. TrueNAS SCALE (rozwijany przez iXsystems) zaadaptował technologie klastrowe – łączy tradycyjny NAS oparty na ZFS z możliwością tworzenia klastrów (poprzez integrację z Kubernetes/GlusterFS), co pozwala na budowę rozproszonych środowisk storage nawet powyżej 100 węzłów. Z kolei OpenMediaVault (OMV) pozostaje rozwiązaniem scale-up – jest lekkim systemem do pojedynczego serwera, skupionym na łatwości obsługi, choć dodaje pewne funkcje zwiększania wydajności (obsługa SMB Multichannel w formie pluginu). Unraid również reprezentuje podejście scale-up, unikalnie łącząc zalety programowego RAID z elastycznym zarządzaniem dyskami (pozwala dowolnie dodawać dyski do puli z 1-2 dyskami parzystości, wykorzystując cache SSD do przyspieszenia operacji). Zestawienie pokazuje, że open-source NAS oferują dużą elastyczność kosztem wyższych wymagań administracyjnych – np. TrueNAS daje zaawansowane opcje (iSCSI, obsługa kontenerów, wirtualizacja, wiele protokołów) i może skalować do klastrów HPC, ale jego wdrożenie wymaga specjalistycznej wiedzy i ewentualnie komercyjnego wsparcia. OMV jest bardzo prosty we wdrożeniu i darmowy, jednak nie nadaje się do zastosowań HPC i dużej skali. Unraid z kolei celuje w segment prosumerów – za umiarkowaną opłatą licencyjną oferuje łatwe zarządzanie domowym storage o stosunkowo niewielkiej skali, bez opcji klastrowania. W porównaniu z tym, producenci komercyjni (NetApp, Dell, HPE) dostarczają rozwiązania zamknięte, które jednak integrują najlepsze praktyki: np. NetApp ONTAP z funkcją FlexCache potrafi automatycznie buforować tzw. gorące dane w węzłach brzegowych, redukując opóźnienia dostępu w rozproszonych lokalizacjach, a Dell OneFS zapewnia automatyczne balansowanie obciążenia między wszystkimi

węzłami klastra. Naturalnie wiąże się to z wysokimi kosztami zakupu i wsparcia, jednak dla dużych organizacji ważna jest gwarancja wydajności i możliwość uzyskania pomocy technicznej na poziomie SLA.

Tabela 2. Porównanie skalowalności i funkcji wybranych platform NAS open-source (2018-2025)

Kryterium	TrueNAS SCALE (iXsystems)	OpenMediaVault (OMV)	Unraid
Typ skalowania	Scale-out (klaster GlusterFS/Kubernetes); również scale-up lokalny	Głównie scale-up (rozbudowa dysków, pluginy); funkcje SMB Multichannel eksperymentalnie	Scale-up (dyski + parzystość); brak clusteringu
Mechanizmy skalowania	Klastrowanie NFS/SMB, obsługa S3, kontenery, integracja z Kubernetes	Pluginy (SMB, NFS), opcje sieciowe (Multichannel) dostępne poprzez wtyczki	Dysk parzystości (1-2), dynamiczne dodawanie dysków, cache SSD (write-cache)
Skala wdrożeń	Do >100 węzłów; petabajty danych; wysoka przepustowość (HPC-ready)	Instalacje domowe/SMB; pojedynczy serwer lub mały klaster (poprzez pluginy)	Domowe/półprofesjonalne; pojedynczy serwer (kilkanaście dysków)
Dopasowanie do HPC/AI	Tak – architektura HCI, duże klastry, akceleracja GPU	Nieoptymalne dla HPC/AI	Nieoptymalne dla HPC/AI
Obsługiwane protokoły	NFS, SMB, iSCSI, objekty (S3), wsparcie VM (KVM), Docker/K8s	SMB, NFS (poprzez dodatkowe wtyczki)	SMB, NFS, obsługa Docker, maszyny wirtualne (KVM)
Złożoność wdrożenia	Wysoka – wymaga zaawansowanej wiedzy (opcjonalnie narzędzie TrueCommand do zarządzania)	Niska – przyjazny interfejs web, prosta instalacja	Średnia – prosty interfejs GUI, ale potrzeba podstaw wiedzy o RAID/ZFS
Koszt	Bezpłatny (open-source); opcjonalnie płatne wsparcie Enterprise	Bezpłatny; bardzo niskie wymagania sprzętowe	Płatna licencja (kilkadziesiąt $); elastyczne wymagania sprzętowe

Źródło: opracowanie własne.

Jak wynika z powyższego zestawienia, kluczowe trendy w rozwoju NAS to dodawanie funkcji zwiększających wydajność bez konieczności zmiany całej platformy sprzętowej. Przykładem jest SSD caching i tiering

– zarówno w open-source (TrueNAS: funkcje ARC/L2ARC, Fusion Pools) jak i komercyjnych NAS (QNAP: Qtier, Synology: Automatic SSD Caching) stało się standardem buforowanie intensywnych operacji na szybkim nośniku SSD (QNAP Systems Inc., 2022). Inny ważny trend to usprawnienia protokołów sieciowych: implementacja SMB Direct (RDMA) i SMB Multichannel w nowoczesnych serwerach plików Windows i urządzeniach NAS umożliwia wykorzystanie równoległych ścieżek oraz sieci InfiniBand/RoCE, drastycznie zmniejszając narzut komunikacji przy transferach wielu małych plików lub strumieni wideo (Microsoft, 2022; QNAP Systems Inc., 2023). Wreszcie, jakość usług (QoS) zyskuje na znaczeniu – w środowiskach współdzielonych wprowadza się mechanizmy priorytetyzacji ruchu NAS (np. rezerwacja pasma dla protokołu iSCSI lub dla wybranych udziałów) w celu zagwarantowania stabilnej wydajności krytycznym aplikacjom (Microsoft, 2021). Te wszystkie elementy składają się na obraz nowoczesnego systemu NAS, który musi godzić wysoką wydajność, dostępność i skalowalność z rosnącą złożonością zarządzania.

Podsumowując, nasze badania i analiza pokazują, że optymalizacja wydajności NAS wymaga wielowymiarowego podejścia. Sama rozbudowa sprzętu (dyski, pamięci, interfejsy) daje korzyści, ale tylko do pewnego momentu – dalszy wzrost wymaga zmiany architektury na rozproszoną lub zastosowania sprytnych mechanizmów programowych. Wyniki testów odzwierciedlają te prawidłowości, a obserwowane przyspieszenia dzięki cache SSD czy wielodyskowym konfiguracjom znajdują potwierdzenie w dokumentowanych osiągach rozwiązań komercyjnych (np. NVMe cache obniżający opóźnienia metadanych o 50-70% (Salkhordeh i in., 2019), czy pNFS zwiększający przepustowość skalowanych NAS praktycznie do granic sieci (QNAP Systems Inc., 2023)). W kolejnej sekcji przedstawiono wnioski i zalecenia wynikające z przeprowadzonej analizy.

Wnioski

Systemy NAS odgrywają kluczową rolę w infrastrukturach IT firm, gdzie konieczne jest współdzielenie dużych ilości plików przy zachowaniu

wysokiej wydajności i niezawodności. Na podstawie przeprowadzonego przeglądu i testów można sformułować następujące wnioski:

1. Skalowanie pionowe (scale-up) vs. poziome (scale-out): Oba podejścia mają swoje miejsce w zależności od skali i potrzeb organizacji. Skalowanie pionowe – poprzez dodawanie zasobów do pojedynczego serwera NAS – jest skuteczne do pewnego poziomu obciążenia i charakteryzuje się prostszym wdrożeniem oraz niższym kosztem początkowym. Jednak wraz ze zbliżaniem się do fizycznych limitów urządzenia, dalszy wzrost pojemności często nie idzie w parze ze wzrostem wydajności (ograniczenia kontrolera, magistrali, rosnące opóźnienia) (Arcserve, 2021). Skalowanie horyzontalne, czyli klastrowanie wielu urządzeń NAS, pozwala przełamać te bariery – system może rosnąć praktycznie bez ograniczeń, a wydajność skaluje się blisko liniowo z każdym nowym węzłem (IBM TechXchange Community, 2020). Jego implementacja wiąże się jednak z większą złożonością (mechanizmy rozproszonego systemu plików, synchronizacji, replikacji) oraz wyższymi kosztami (wiele węzłów + sieć o wysokiej przepustowości). Dla średnich scenariuszy zaleca się hybrydowe podejście: maksymalne wykorzystanie potencjału scale-up (aż do progu opłacalności), a następnie przejście na scale-out, gdy wymagania przerastają możliwości pojedynczego serwera.
2. Znaczenie pamięci podręcznej SSD: Implementacja cache SSD jest relatywnie prostym i opłacalnym sposobem na poprawę wydajności istniejących systemów NAS. Nasze testy wykazały skrócenie opóźnień o 10-20% i wzrost IOPS/MB/s nawet o 60% w wybranych scenariuszach dzięki zastosowaniu cache na odczyty i zapisy. Potwierdza to, że dostrojenie hierarchii pamięci (dyski HDD + warstwa SSD) umożliwia uzyskanie zbliżonej responsywności jak w droższych rozwiązaniach all-flash, minimalizując przy tym inwestycje (Synology Inc., 2022). Należy jednak odpowiednio dobrać politykę cache (write-back vs. write-through) do obciążenia oraz monitorować stan zużycia dysków SSD – w środowiskach intensywnych zapisu zaleca się nośniki enterprise o wysokiej wytrzymałości (TBW) (QNAP Systems Inc., 2022). Cache SSD nie zastąpi oczywiście dodania fizycznych dysków przy niedostatku surowej przepustowości, ale stanowi istotny element optymalizacji wydajności,

zwłaszcza dla obciążeń o charakterze losowym i przy dużym udziale operacji odczytu.

3. Udoskonalenia protokołów i sieci: Wysoka wydajność NAS wymaga spojrzenia na cały stos I/O – od dysków, przez kontroler, po interfejs sieciowy i protokoły komunikacyjne. W zastosowaniach komercyjnych należy wykorzystywać najnowsze dostępne usprawnienia: SMB 3.1.1 Multichannel, SMB Direct (RDMA), NFS 4.1 pNFS, protokół iSCSI z wielościeżkowością (MPIO) itp. Nasza analiza wskazuje, że rozwiązania te pozwalają zniwelować tradycyjne bottlenecky, jak ograniczenie jednego połączenia TCP – np. SMB Multichannel automatycznie agreguje przepustowość wielu interfejsów sieciowych, co w testach niezależnych przełożyło się na kilkukrotny wzrost przepustowości w porównaniu z klasycznym SMB (Microsoft, 2022; QNAP Systems Inc., 2023). Również zapewnienie odpowiedniej infrastruktury sieciowej (przełączniki 10/25/40 GbE, niski jitter) jest krytyczne przy skalowaniu NAS – nawet najlepiej zoptymalizowany serwer nie osiągnie pełnej wydajności, jeśli sieć będzie wąskim gardłem. Dlatego planując rozbudowę NAS dla zastosowań komercyjnych warto równolegle inwestować w modernizację sieci (np. przejście z 1 GbE na 10 GbE lub więcej, segmentacja ruchu storage, QoS dla ruchu NAS).
4. Rozwiązania open-source vs. komercyjne: platformy open-source udowodniły, że nawet przy ograniczonym budżecie można zbudować wydajny i skalowalny system NAS. TrueNAS, Ceph, GlusterFS – oferują one funkcje klastrowania, zaawansowane systemy plików (ZFS, Btrfs), mechanizmy ochrony danych (snapshoty, repliki) porównywalne z produktami komercyjnymi. Są one szczególnie atrakcyjne dla średnich firm i entuzjastów IT, bo eliminują koszty licencji. Niemniej, ich optymalne wykorzystanie wymaga wyspecjalizowanej wiedzy i czasem kompromisów wydajnościowych (np. dodatkowy narzut warstwy programowej). Z kolei komercyjne macierze NAS (NetApp, Dell EMC, HPE) gwarantują określony poziom wydajności i wsparcia – często zawierają unikalne optymalizacje sprzętowe (np. akceleratory ASIC do deduplikacji, NVRAM do przyspieszania transakcji) i oprogramowanie dopracowane pod kątem minimalizacji opóźnień. W zamian są kosztowne i mniej

elastyczne (vendor lock-in). Wybór pomiędzy tymi opcjami powinien być podyktowany analizą TCO i wymaganiami SLA: dla krytycznych zastosowań (np. streaming na żywo, transakcje finansowe) inwestycja w sprawdzone rozwiązanie enterprise może być konieczna, podczas gdy dla archiwizacji, kopii zapasowych czy środowisk testowych open-source NAS może w pełni wystarczyć. Wiele firm stosuje model mieszany – łącząc droższe macierze o najwyższej wydajności dla kluczowych danych z tańszymi serwerami NAS dla mniej wymagających zadań (tiering infrastrukturalny).

5. Budowa wydajnego NAS to proces ciągłego doskonalenia: optymalizacja wydajności nie jest jednorazowym działaniem, lecz cyklem: monitorowanie – identyfikacja wąskich gardeł – usprawnienia. Administratorzy powinni regularnie analizować metryki NAS (IOPS, throughput, opóźnienia, wykorzystanie CPU/RAM) oraz obserwować trendy wzrostu obciążenia. W miarę potrzeb należy dodawać kolejne dyski lub węzły, skalować stopniowo, testując wpływ na działanie systemu. Kluczowe jest także przygotowanie planów awaryjnych: wydajny system musi być odporny na awarie, stąd inwestycje w mechanizmy wysokiej dostępności (klastrowanie fail-over, zasilanie UPS, redundantne ścieżki sieci). Nasze wyniki dotyczące czasu odbudowy macierzy pokazują, że istnieje kompromis między wydajnością a odpornością – np. macierz RAIDZ2 jest nieco wolniejsza niż RAIDZ1, ale znacznie bezpieczniejsza. Dobór konfiguracji (RAID, cache, liczba węzłów) powinien więc uwzględniać zarówno wymaganą wydajność, jak i akceptowalny poziom ryzyka oraz czas odtwarzania danych po awarii.

Reasumując, optymalizacja wydajności NAS poprzez skalowanie architektury lokalnej wymaga zastosowania wielorakich strategii – od ulepszeń sprzętowych po zaawansowane mechanizmy rozproszone. W środowiskach komercyjnych najlepsze rezultaty daje łączenie podejścia pionowego i poziomego: najpierw maksymalne wykorzystanie potencjału pojedynczego urządzenia (szybkie dyski, cache SSD, łącza wielościeżkowe), a następnie skalowanie horyzontalne poprzez klasteryzację, gdy wymogi przekroczą możliwości pojedynczego węzła. Dzięki temu można uzyskać system NAS,

który rośnie razem z potrzebami biznesu, zapewniając wysoką wydajność, skalowalność i niezawodność wymaganą we współczesnych zastosowaniach komercyjnych.

Literatura

1. Arcserve. (2021). *Scale up vs. scale out architecture: How should you scale your storage system?* Arcserve Blog.
2. Broadcom Inc. (2020). *Multipath load balancing recommendations (Technical brief).*
3. Dell Technologies. (2021). *PowerScale OneFS: Technical overview (White paper).*
4. IBM TechXchange Community. (2020). *Significant difference between scaleout NAS and scaleout file system.*
5. iXsystems. (2023). *TrueNAS SCALE: Official documentation*.
6. Microsoft. (2021). *Storage QoS for file servers: Best practices.*
7. Microsoft. (2022). *SMB 3.1.1 multichannel and SMB direct (RDMA) overview.*
8. NetApp Inc. (2021). *ONTAP FlexGroup: Technical overview (Technical documentation).*
9. Oleś, M. (2025). *SAN vs. NAS. Kiedy i gdzie?* Macierze NetApp.
10. QNAP Systems Inc. (2022). *Qtier AutoTiering (White paper).*
11. QNAP Systems Inc. (2023). *SMB 3.0 multichannel (Solution brief).*
12. Salkhordeh, R., Hadizadeh, M., Asadi, H. (2019). An efficient hybrid I/O caching architecture using heterogeneous SSDs. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 30*(6), 1238-1250. https://doi.org/10.1109/TPDS.2018.2883745
13. Synology Inc. (2022). *Synology SSD cache white paper for DSM 7.1 (White paper).*
14. Zięba, P. (2023). Porównanie systemów plików dla macierzy NAS: ext4, Btrfs, ZFS. *IT Professional, 6,* 45-49.