

Univerzita Hradec Králové
Fakulta informatiky a managementu
Katedra informačních technologií

Virtualizace pro testování výkonnosti operačních systémů
Diplomová práce

Autor: Bc. Milan Pechánek
Studijní obor: Informační management IM2-P

Vedoucí práce: Mgr. Josef Horálek, Ph.D.

Hradec Králové

Duben 2021

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracoval samostatně a s použitím uvedené literatury.

V Hradci Králové dne 26.4.2021

Bc. Milan Pechánek

Poděkování:

Děkuji vedoucímu diplomové práce Mgr. Josefu Horálkovi, Ph.D. za metodické vedení práce, poskytnuté konzultace a cenné rady, které vedly k vypracování této práce.

Anotace

Tato diplomová práce se zabývá virtualizací desktopových operačních systémů. Cílem je navrhnout sady testů a tyto testy aplikovat na jednotlivé virtualizační platformy, pomocí kterých je ověřena výkonnost operačních systémů Windows a CentOS. Úvodní část práce pojednává o principech virtualizace, jejích výhodách, nevýhodách a aktuálních trendech v této oblasti. Dále jsou popsány druhy virtualizace dle oblasti využití, virtualizační architektury a typy virtualizace. Následně jsou představeny virtualizační platformy, jejichž nejnovější verze slouží k virtualizaci operačních systémů v praktické části diplomové práce. V další části je stanoven a detailně představen testovací software, který je použit pro testování výkonnosti operačních systémů virtualizovaných pomocí jednotlivých virtualizačních platforem. Praktickou částí diplomové práce byla realizace sady testů zaměřených na výkon jednotlivých počítačových komponent, konkrétně procesoru, pevného disku, síťové karty, grafické karty a operační paměti. Výsledky testů byly poté analyzovány pomocí popisné statistiky a interpretovány s využitím grafů. Závěrem diplomové práce bylo shrnutí výsledků získaných z provedených testů.

Klíčová slova

virtualizace, virtualizační platformy, virtuální stroj, výkonnostní testování, CentOS, Windows

Annotation

Title: Virtualization for testing performance of operating system

This diploma thesis deals with virtualization of desktop operating systems. The aim is to propose a set of tests and apply these tests on particular virtualization platforms. The performance of the operating systems, such as Windows and CentOS, is proved by these tests. The first part of the thesis focuses on virtualization principles, its advantages and disadvantages and current trends in this field. After this, several kinds of virtualization areas, virtualization architectures and other types of virtualization are described. Afterwards,

virtualization platforms are introduced with the latest version that is used for virtualization of operating systems in the practical part. In the next part, the software for tests is defined and introduced in detail which is used for performance testing for operating systems which are virtualized by particular virtualization platforms. The practical part of the diploma thesis was dealing with implementation of the sets of tests focusing on performance of individual computer components, specifically on processor, hard disk drive, network card, graphics card and RAM. The results of the tests were analyzed using descriptive statistics and interpreted with graphs. The last part of the diploma thesis was a summary of the results obtained from the tests performed.

Keywords

virtualization, virtualization platforms, virtual machine, performance testing, CentOS, Windows

Obsah

1	Úvod.....	1
2	Virtualizace.....	2
2.1	Historie virtualizace.....	2
2.2	Základní východiska a trendy virtualizace.....	2
2.3	Druhy virtualizace dle oblasti využití.....	5
2.3.1	Virtualizace serverů.....	5
2.3.2	Virtualizace desktopů.....	6
2.3.3	Virtualizace aplikací.....	6
2.4	Virtualizační architektury.....	7
2.4.1	Architektura typu 1.....	8
2.4.2	Architektura typu 2.....	9
2.4.3	Hybridní architektura.....	10
2.5	Typy virtualizace.....	11
2.5.1	Plná virtualizace a binární překlad.....	12
2.5.2	Paravirtualizace.....	14
2.5.3	Hardwarově podporovaná virtualizace.....	15
2.5.4	Částečná virtualizace.....	17
2.5.5	Virtualizace na úrovni jádra operačního systému.....	17
2.5.6	Kontejnerizace.....	18
3	Virtualizační platformy.....	21
3.1	VMware Workstation Player 16.1.0.....	21
3.2	VMware Workstation Pro 16.1.0.....	23
3.3	Oracle VM VirtualBox 6.1.16.....	24
3.4	Microsoft Hyper-V.....	27
3.5	QEMU/KVM.....	30

3.6	LXD.....	33
4	Teoretická východiska pro testování výkonnosti operačních systémů	35
4.1	Testované parametry a hardware fyzického stroje	35
4.2	Teorie testování.....	36
4.3	Hardwarová konfigurace virtuálních strojů	36
4.4	Instalace a konfigurace testovaných virtualizačních platforem	37
4.4.1	VMware Workstation Player 16.1.0	37
4.4.2	VMware Workstation Pro 16.1.0	38
4.4.3	Oracle VM VirtualBox 6.1.16	38
4.4.4	Microsoft Hyper-V.....	39
4.4.5	QEMU/KVM.....	39
4.4.6	LXD	39
4.5	Testovací software.....	40
4.5.1	GeekBench – CPU.....	40
4.5.2	Novabench – CPU, RAM, HDD	41
4.5.3	PerformanceTest – CPU.....	41
4.5.4	Y-cruncher – HDD.....	42
4.5.5	Fping/ping – odezva NIC	43
4.5.6	iPerf – datová propustnost NIC.....	43
4.5.7	GpuTest – GPU	44
4.5.8	RAMspeed – RAM	45
5	Výkonnostní testování virtualizačních platforem	46
5.1	Testování CPU.....	47
5.1.1	GeekBench jedno jádro CPU	47
5.1.2	GeekBench všechna jádra CPU	49
5.1.3	Novabench CPU	51

5.1.4	PerformanceTest CPU	53
5.2	Testování HDD.....	55
5.2.1	Y-cruncher rychlost zápisu HDD	55
5.2.2	Y-cruncher rychlost čtení HDD.....	57
5.2.3	Y-cruncher poměr rychlosti disku k výpočetnímu výkonu CPU	59
5.2.4	Novabench HDD	62
5.3	Testování NIC.....	63
5.3.1	Fping/ping odezva síťového připojení v lokální síti.....	63
5.3.2	Fping/ping odezva síťového připojení ve veřejné síti	65
5.3.3	iPerf datová propustnost NIC	67
5.4	Testování GPU.....	69
5.4.1	GpuTest vykreslování trojúhelníku	70
5.4.2	GpuTest vykreslování 3D grafu.....	72
5.5	Testování RAM	74
5.5.1	RAMspeed výkon operační paměti při práci s celými čísly	74
5.5.2	RAMspeed výkon operační paměti při práci s desetinnými čísly	76
5.5.3	Novabench výkon RAM	78
6	Shrnutí výsledků výkonnostního testování	80
6.1	Výpočetní výkon procesoru	80
6.2	Rychlost zápisu a čtení pevného disku	81
6.2.1	Rychlost zápisu HDD	81
6.2.2	Rychlost čtení HDD	81
6.2.3	Relativní poměr rychlosti pevného disku k výkonu procesoru.....	82
6.2.4	Celkové bodové ohodnocení nástrojem Novabench.....	82
6.3	Výkon síťové karty.....	82
6.4	Výkon grafické karty	83

6.5	Přenosový výkon operační paměti.....	83
7	Závěry a doporučení	85
8	Seznam použité literatury.....	87

Seznam obrázků

Obr. 1 Princip konsolidace formou virtualizace s konsolidačním poměrem 5:1.....	4
Obr. 2 Ilustrace virtualizační architektury typu 1.....	8
Obr. 3 Ilustrace virtualizační architektury typu 2.....	9
Obr. 4 Znárodnění hybridní virtualizační architektury.....	11
Obr. 5 Princip plné virtualizace a binárního překladač.....	13
Obr. 6 Princip paravirtualizace.....	15
Obr. 7 Princip hardwarově podporované virtualizace.....	16
Obr. 8 Princip virtualizace na úrovni jádra operačního systému.....	18
Obr. 9 Princip kontejnerizace.....	19
Obr. 10 Architektura nástroje VMware Workstation Pro.....	24
Obr. 11 Architektura nástroje Oracle VM VirtualBox.....	26
Obr. 12 Architektura nástroje Microsoft Hyper-V.....	29
Obr. 13 Architektura nástroje QEMU/KVM.....	32
Obr. 14 Architektura Linux Containers (LXC).....	34
Obr. 15 Přehled výsledků provedených testů pomocí software GeekBench zaměřeného na výkon jednoho jádra CPU.....	49
Obr. 16 Přehled výsledků provedených testů pomocí software GeekBench zaměřeného na výkon všech jader CPU.....	51
Obr. 17 Přehled výsledků provedených testů pomocí nástroje Novabench zaměřeného na výkon CPU.....	52
Obr. 18 Přehled výsledků provedených testů pomocí software PerformanceTest zaměřeného na celkový výkon CPU.....	55
Obr. 19 Přehled výsledků provedených testů pomocí software Y-cruncher zaměřeného na rychlost zápisu HDD.....	57
Obr. 20 Přehled výsledků provedených testů pomocí software Y-cruncher zaměřeného na rychlost čtení HDD.....	59
Obr. 21 Přehled výsledků provedených testů pomocí software Y-cruncher zaměřeného na poměr rychlosti HDD k výkonu CPU.....	61
Obr. 22 Přehled výsledků provedených testů pomocí software Novabench zaměřeného na výkon HDD.....	63

Obr. 23 Přehled výsledků provedených testů pomocí software Fping a ping zaměřených na rychlost odezvy v lokální síti.....	65
Obr. 24 Přehled výsledků provedených testů pomocí software Fping a ping zaměřených na rychlost odezvy ve veřejné síti.....	67
Obr. 25 Přehled výsledků provedených testů pomocí software iPerf zaměřeného na datovou propustnost NIC.....	69
Obr. 26 Přehled výsledků provedených testů pomocí software GpuTest zaměřeného na výkon GPU při vykreslování trojúhelníku.....	72
Obr. 27 Přehled výsledků provedených testů pomocí software GpuTest zaměřeného na výkon GPU při vykreslování 3D grafu.....	74
Obr. 28 Přehled výsledků provedených testů pomocí software RAMspeed zaměřeného na rychlost RAM při práci s celými čísly.....	76
Obr. 29 Přehled výsledků provedených testů pomocí software RAMspeed zaměřeného na rychlost RAM při práci s desetinnými čísly.....	78
Obr. 30 Přehled výsledků provedených testů pomocí software Novabench zaměřeného na výkon RAM.....	79

Seznam tabulek

Tabulka 1 Porovnání jednotlivých typů virtualizace.....	19
Tabulka 2 Výsledky výkonnostního testování s využitím nástroje GeekBench pro výkon CPU při použití jednoho jádra.....	47
Tabulka 3 Výsledky výkonnostního testování s využitím nástroje GeekBench pro výkon CPU při použití všech jader CPU.....	49
Tabulka 4 Výsledky výkonnostního testování CPU pomocí nástroje Novabench.	52
Tabulka 5 Výsledky testování výkonu CPU pomocí software PerformanceTest.	53
Tabulka 6 Výsledky testování rychlosti zápisu na pevný disk pomocí nástroje Y-cruncher.....	56
Tabulka 7 Výsledky testování rychlosti čtení z pevného disku pomocí nástroje Y-cruncher.....	58
Tabulka 8 Výsledky měření relativního poměru rychlosti disku k výpočetnímu výkonu CPU pomocí nástroje Y-cruncher.....	60

Tabulka 9 Výsledky výkonostního testování pevného disku pomocí nástroje Novabench.....	62
Tabulka 10 Výsledky testování odezvy v lokální síti pomocí Fping/ping.	64
Tabulka 11 Výsledky testování odezvy ve veřejné síti pomocí Fping/ping.....	66
Tabulka 12 Výsledky testování datové propustnosti síťové karty.....	68
Tabulka 13 Výsledky testování výkonu grafické karty při vykreslování trojúhelníku.	71
Tabulka 14 Výsledky testování výkonu grafické karty při vykreslování 3D grafu. .	73
Tabulka 15 Výsledky výkonostního testování rychlosti čtení a zápisu operační paměti při operacích s celými čísly.....	75
Tabulka 16 Výsledky výkonostního testování rychlosti čtení a zápisu operační paměti při operacích s desetinnými čísly.....	77
Tabulka 17 Výsledky výkonostního testování RAM pomocí software Novabench.	79

1 Úvod

Pojem virtualizace je dnes již neodmyslitelně úzce spjatý s prostředím informačních technologií. S rostoucími nároky na flexibilitu počtu počítačových stanic a pracovních prostředí uvnitř firem a organizací je toto softwarové řešení hojně využívanou technologií. Díky možnosti spustit více virtuálních operačních systémů prostřednictvím jednoho fyzického hardware klesá nutnost disponovat velkým prostorem pro fyzická zařízení a s tím spojenými i náklady na elektrickou energii. Zároveň je tímto zajištěno i plné využití hardwarových zdrojů a minimalizace nevyužitého výkonu. V neposlední řadě je pomocí virtualizační technologie dosaženo větší bezpečnosti, což se týká potenciálních útoků v podobě dnes již všudypřítomného malware. Například Blokdijs a Menken ([1], s. 9-10) uvádí, že pokud by totiž došlo k infikování jednoho virtuálního stroje počítačovým virem, lze vyřadit pouze danou entitu a zbylé virtuální stanice zůstávají v bezpečí. To samé platí i v případě výpadku nebo pochybení lidského faktoru v podobě neodborného zásahu do konfigurace v rámci jednotlivého stroje.

Podrobněji je virtualizace a její problematika společně s dílčími druhy virtualizačních řešení popsána v následujících kapitolách teoretické části této diplomové práce, což je také cílem této části spolu se zmapováním nových pohledů a aktuálních trendů v této oblasti. Dále jsou navrženy testy pro virtualizační platformy, které jsou využitelné pro testování výkonnosti virtualizovaných operačních systémů.

Následně cílem praktické části diplomové práce je realizace již zmiňovaných testů dle metodiky, která bude navržena, a získané výsledky budou interpretovány za využití metod popisné statistiky. Testování bude probíhat v režimech CentOS – CentOS, CentOS – Windows, Windows – CentOS, Windows – Windows, na aktuálně nejnovějších dostupných distribucích CentOS a Microsoft Windows.

2 Virtualizace

Tato kapitola představuje úvod do problematiky virtualizace a vysvětlení jejích principů. Dále jsou zde představeny dílčí druhy virtualizačních řešení.

2.1 Historie virtualizace

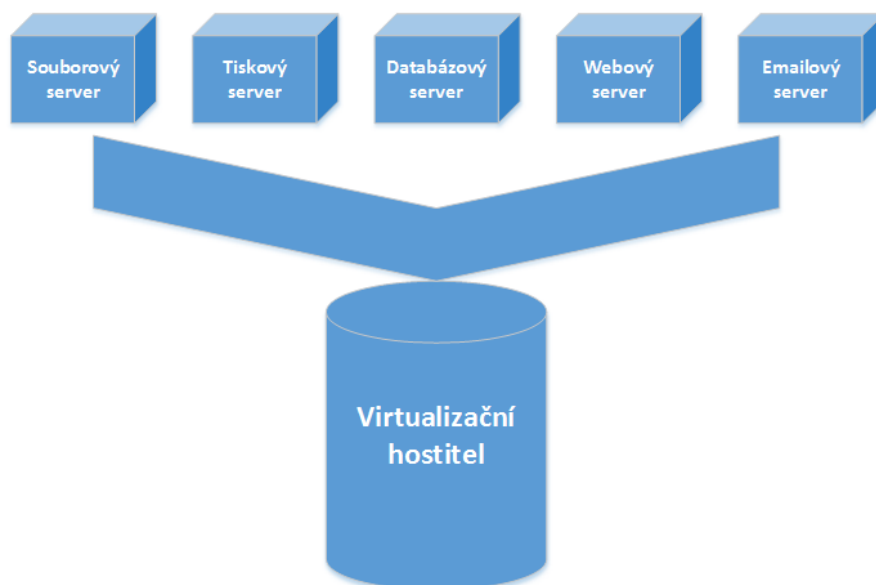
Vznik virtualizace můžeme dle Blokdijska a Menken ([1], s. 10-12) přisuzovat společnosti IBM, u níž byla vyvíjena snaha o maximalizaci využití výkonu velkých sálových počítačů. Díky virtualizaci bylo v 60. letech docíleno toho, že mohl sálový počítač zpracovávat několik procesů současně za pomoci rozdělení jednoho fyzického stroje na několik virtuálních. S nástupem architektury klient-server, kde je možné propojit koncové stanice a server komunikující spolu pomocí počítačové sítě, docházelo k ústupu virtualizace. Ovšem distribuce výpočetních zdrojů serveru mezi jednotlivé počítače nesla několik nevýhod, mezi které patřily například rostoucí náklady na údržbu velkého množství fyzických stanic. Na základě toho přišla v roce 1999 společnost VMware s řešením pomocí aplikace podporující hardwarovou virtualizaci.

2.2 Základní východiska a trendy virtualizace

Virtualizaci popisuje William von Hagen ve své literatuře ([2], s. 2) jako pojem z oblasti informačních technologií, který je v současné době v tomto odvětví velice často skloňován a znamená logickou abstrakci systémového prostředí a požadavků na určitou službu od fyzických prostředků, které tuto službu poskytují. Jednoduše řečeno jedná se o spuštění software v logicky odděleném systémovém prostředí, které není závislé na konkrétní fyzické počítačové stanici a jejím hardware. Tímto je umožněno jednomu počítači vykonávat roli několika nezávislých počítačů neboli virtuálních strojů (VM – virtual machine). V dnešní době lze virtualizovat všechny hardwarové prostředky počínaje procesorem, RAM, diskovým prostorem, přes síťové připojení, až po celý počítač. Prostředí, ve kterém pracuje VM, nazýváme hypervizor nebo jinými slovy Virtual Machine Monitor (VMM).

Například Popek a Goldberg (Popek a Goldberg, cit. podle [3], s. 3) tvrdí, že hypervizor musí splňovat několik definic. První vlastností, kterou autoři deklarují, je přesnost, což znamená nutnost identického prostředí pro virtuální počítač vytvářeného hypervizorem s původním fyzickým strojem. Druhým požadavkem na hypervizor je jeho absolutní kontrola nad systémovými prostředky, čímž je zajištěna bezpečnost a izolace. Tyto dva zmiňované požadavky drtivá většina VMM splňuje, proto je stanoveno třetí kritérium založené na shodě výkonů fyzického stroje a virtuálního počítače, podle kterého označujeme hypervizor jako tzv. efektivní. Rozdíl ve výkonu VM a fyzického stroje by u efektivního VMM neměl být žádný, případně pouze minimální.

S výše zmiňovanými pojmy se můžeme setkat dle Matthewa Portnoye ([3], s. 9-13) v dnešní době například v souvislosti s konsolidací, která je reakcí na stále rostoucí rozměry datových center a s tím související růst počtu serverů. Tento problém si žádá kromě nároků na využitelný prostor také obrovské množství elektrické energie, která musí být vynaložena k provozu a chlazení těchto serverů, přitom jejich výkon není zpravidla využíván v plném rozsahu, neboť je vždy nutné server při jeho nákupu určitým způsobem naddimenzovat pro případné výkonnostní špičky a růst nároků na výkon v průběhu jeho životnosti, která bývá i několik let. Řešením je právě konsolidace využívající virtualizaci pro sjednocení několika serverů do skupiny virtuálních strojů běžících na jednom fyzickém stroji. Konsolidaci lze měřit pomocí poměru vyjadřující počet virtuálních strojů na jeden server. Jako příklad můžeme brát v úvahu server, na kterém je spuštěno 5 virtuálních strojů, a dostaneme tedy poměr 5:1. Tuto veličinu nazýváme konsolidační poměr. Přínos konsolidace je podpořen výrokem Matthewa Portnoye, že „i mírný konsolidační poměr 4:1 by mohl odstranit tři čtvrtiny serverů v datovém centru“. ([3], s. 10) Samotný přechod serverů z fyzické podoby na virtuální provedení pomocí konsolidace nazýváme v rámci společnosti containment. Na obrázku níže je znázorněn příklad konsolidace s konsolidačním poměrem 5:1.



Obr. 1 Princip konsolidace formou virtualizace s konsolidačním poměrem 5:1.

Zdroj: Vlastní zpracování v nástroji Visio Professional dle Virtualization Essentials [3].

Aktuálně se některé společnosti velice často, jak uvádí Matthew Portnoy ([3], s. 12-15), snaží ušetřit na nákupu a provozu tiskových, souborových a doménových serverů. Tyto servery vybavují daleko levnějším a méně spolehlivějším hardware, nebo neinvestují do jejich obnovy a nákupu nových technologií. Přitom infrastrukturní servery jsou neméně významné pro fungování společnosti než servery, na kterých běží hlavní aplikace. Zde lze perfektním způsobem využít virtualizaci, pomocí které lze v tomto případě ušetřit finanční prostředky, a přitom výše zmiňované servery utvořit dostupnější, škálovatelnější a lépe spravovatelné. Dále lze také díky virtualizaci snížit riziko výpadku fyzických strojů, z hlediska narušení chodu například v případě živelní události, které nelze oproti virtuálním uložit ve stávajícím stavu a přesunout do jiné oblasti.

Virtualizace úzce souvisí i s pojmem cloud computing, jak uvádí ve své publikaci Menken a Blokdijk ([4], s. 160-161), kde zmiňují značný podíl virtualizace na úspěchu cloud computingu. Například model STaaS (Storage as a Service), který je dnes využíván jak jednotlivci, tak i firmami, jež využívají úložiště jako službu od jiné společnosti a platí stanovený poplatek za objem úložiště využívaný v určitém

časovém období. Principem služby je poskytnutí logického prostoru pro ukládání dat. Virtualizační systém potom tento logický prostor pomocí přemapování adresního prostoru mapuje na fyzické místo daného úložiště providera. Poté při zobrazení dat uživatelem virtualizační software s využitím mapovací tabulky zajišťuje konzistentnost všech přidělených mapovacích informací. V případě žádosti od uživatele na zobrazení dat, které má uloženy na virtuálním disku, virtualizační software přesměrovává jeho žádost na konkrétní umístění v rámci fyzického úložiště. Lze tedy říci, že uživatel cloudové služby vidí díky virtualizaci jedno logické úložiště, které je ve skutečnosti složeno z několika fyzických bloků na různých discích.

2.3 Druhy virtualizace dle oblasti využití

Existuje několik oblastí počítačových technologií, dle kterých můžeme virtualizaci dělit v závislosti na jejím využití. Všechny druhy virtualizace ovšem obsahují základní myšlenku této technologie a tou je využití fyzického hardware a výpočetních zdrojů prostřednictvím logického přístupu k nim.

2.3.1 Virtualizace serverů

Tato koncepce, jak již bylo nastíněno výše, se skládá z hardware, jehož prostředky jsou využívány virtuálními stroji, které jsou zaváděny nebo instanciovány prostřednictvím hypervizoru, abstrahujícího fyzickou vrstvu stroje a vytvářejícího rozhraní mezi ní a virtuálním strojem. Stejně tak jako standardní fyzické stroje, které všichni běžně používáme, dokáží virtuální stroje zajistit běh operačního systému, aplikací, přístup k úložišti a podobně. Autor Matthew Portnoy ([3], s. 16) zmiňuje, že virtuální stroje utváří balík datových souborů, do kterého jsou uloženy a díky čemuž jsou oproti fyzickým strojům mnohem snadněji spravovatelné i více flexibilnější. Virtuální stroj lze bez problému přesouvat mezi zařízeními, klonovat a upgradovat. Na rozvoj této technologie reagovali také prodejci hardware a zařadili do svého sortimentu i servery, které jsou stavěny jako optimální prostředí pro fungování hypervizorů. „Zařízení, obsahující již připojené a předkonfigurované výpočetní, síťové i úložné prostředky a které by bylo možné spravovat jako jednu

jednotku.“ ([3], s. 10) označujeme jako konvergovaná infrastruktura. Spuštění, konfigurace nebo rozšíření virtuálního prostředí takovéto infrastruktury je daleko snazší než u klasického serveru. Tento sortiment je samozřejmostí u všech zavedených prodejců jako například Cisco, Oracle, IBM a dalších.

2.3.2 Virtualizace desktopů

Virtualizace desktopů je stejným přínosem pro společnosti jako virtualizace serverů. Podle toho, jak popisuje virtualizaci desktopů Matthew Portnoy ve své publikaci *Virtualization Essentials* ([3], s. 17-18), lze usuzovat, že díky tomuto řešení společnosti usnadní svým zaměstnancům správu software a aktualizací, tím také dokážou zvýšit efektivitu technické podpory. Co se týče výhod spojených s hardwarovou stránkou virtualizace desktopů, můžeme vyzdvihnout vysoký výkon a spolehlivost serverů, na kterých běží pracovní plochy virtualizovaných desktopů v porovnání s tradičním stolním počítačem. Aplikační servery a servery sloužící k virtualizaci jsou navíc umístěny zpravidla v datovém centru společnosti blízko sebe, tím pádem dochází ke snižování síťového provozu a vytížení sítě při cestě dat z aplikace běžící na stolním počítači do aplikačního serveru a zpět. V případě selhání hardware na straně uživatele, kterým je v tomto případě virtualizace tenký klient, nejsou narušena data, protože ta neopouští datové centrum. Může se jednat také o ztrátu zařízení nebo jeho odcizení. I v tomto případě není nutná práce IT specialisty a uživatel zvládne tenkého klienta nahradit sám. Tenký klient navíc spotřebovává méně elektrické energie a jeho životnost je mnohdy dokonce až deset let. Správa zabezpečení dat a informací je navíc prováděna centrálně na virtuálním hostiteli, čímž se stává efektivnější mimo jiné i z hlediska nižšího rizika selhání lidského faktoru.

2.3.3 Virtualizace aplikací

Jako virtualizaci aplikací definuje William von Hagen ve své literatuře ([2], s. 2-3) softwarový proces, pomocí kterého jsou aplikace kompilovány do strojově nezávislého bajtkódu, který lze spustit v jakémkoliv systému běžícím na virtuálním stroji. Mezi velice známý případ kompilace do bajtkódu patří UCSD Pascal pro

jazyk Java a dále například CIL (Common Intermediate Language) od společnosti Microsoft používaný aplikacemi vyvíjenými v .NET. Virtualizované aplikace, které jsou kompilované do bajtkódu, se mění v logické entity a lze je spouštět na fyzických hardwarech s různými architekturami procesorů, odlišnými operačními systémy i dalšími charakteristikami. Z tohoto důvodu je termín virtualizace na místě. Hlavním přínosem tohoto virtualizačního řešení je dle Matthewa Portnoye ([3], s. 18-19) například snadné nasazení aplikací ve společnosti s velkým množstvím zařízení, kde lze při aktualizaci nějaké aplikace pohodlně roz distribuovat její nejnovější verzi. Některé typy virtualizace aplikací dokonce pomocí principu zapouzdření dokáží eliminovat narušení funkčnosti aplikací vlivem aktualizace jiné aplikace.

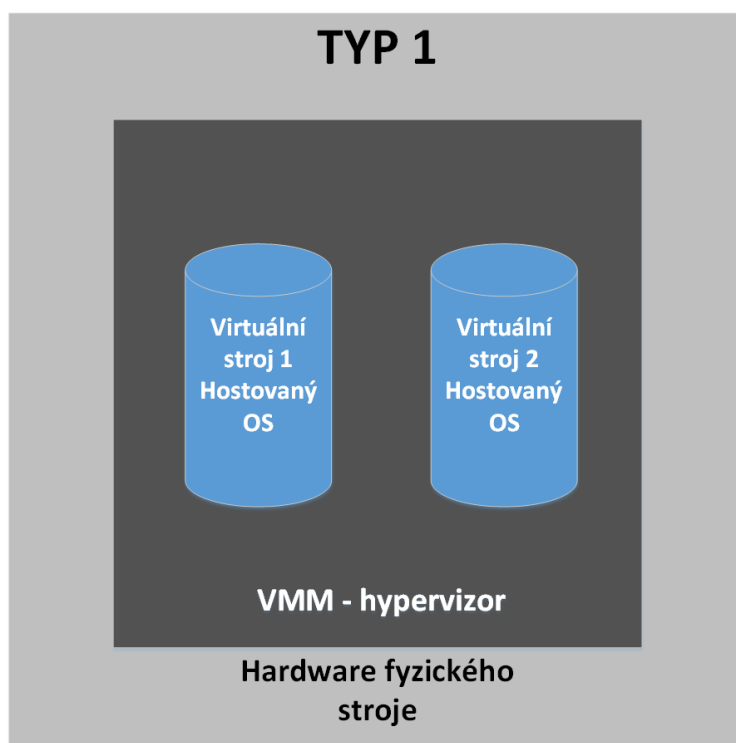
2.4 Virtualizační architektury

V této diplomové práci je výzkum zaměřen na virtualizaci desktopů. Zde rozlišujeme dvě základní architektury a jednu hybridní. Tyto architektury se liší přístupem virtuálního stroje k fyzickému hardware. Software, který slouží jako komunikační prostředí mezi virtuálním strojem a hardware, nazýváme hypervizor nebo také VMM (Virtual Machine Monitor), jak již bylo uvedeno v části práce projednávající základní východiska virtualizace. Dle umístění VMM můžeme virtualizační architektury řadit do následujících kategorií. Zde je pro správné porozumění problematice nutné zavést následující pojmy, které definují Menken a Blokdijs ([4], s. 29-30):

- Host OS – operační systém nainstalovaný na fyzickém počítači, který je hostitelem jednoho nebo více virtuálních strojů. Nazýváme ho hostitelský operační systém.
- Guest OS – operační systém nainstalovaný ve virtuálním stroji. Tento operační systém nazýváme hostovaný a může být naprosto odlišný od hostitelského operačního systému.

2.4.1 Architektura typu 1

Jedná se o architekturu, kde je VMM implementován přímo na hardware fyzického stroje bez nutnosti hostitelského operačního systému. Proto dle Le, Kumara, Nguyena a Chatterjee ([5], s. 23-24) můžeme tuto koncepci nazývat hardwarovou virtualizací a autoři ji označují jako velice efektivní z hlediska nízké míry rušení při komunikaci mezi virtuálním strojem a hardwarem, na němž tento stroj běží. Tato architektura poskytuje vysokou výkonnost právě díky přímému přístupu k hardwarovým prostředkům. Nejčastěji se s tímto typem můžeme setkat v případě virtualizace serverů. Na nadcházejícím obrázku je možné pozorovat architekturu hypervizoru typu 1.



Obr. 2 Ilustrace virtualizační architektury typu 1.

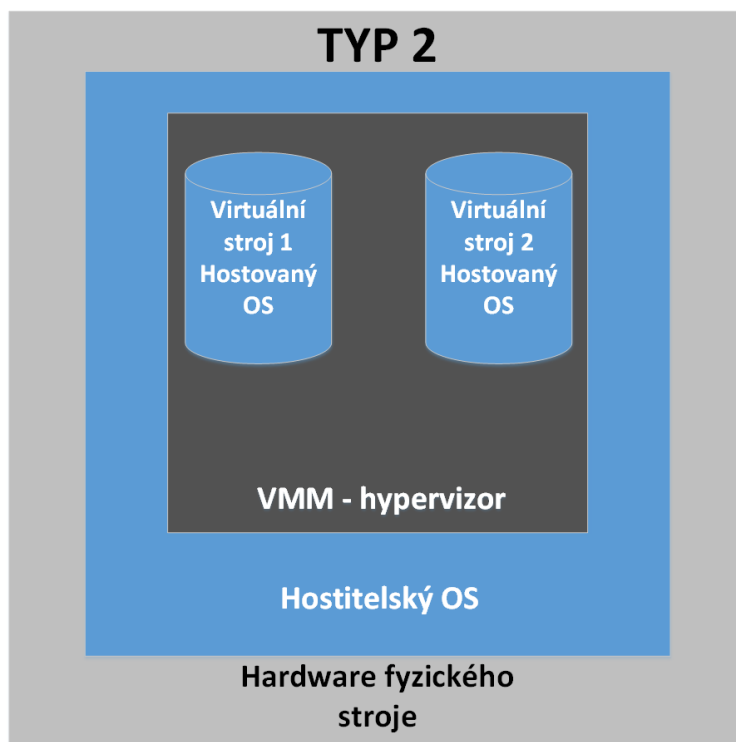
Zdroj: Vlastní zpracování v nástroji Visio Professional dle Cloud Computing and Virtualization [5].

Ve své literatuře Matthew Portnoy ([3], s. 23-24) nazývá hardwarovou virtualizaci jako bare-metal, což můžeme volně přeložit jako implementaci na holý kov. Autor považuje typ 1 jako nejbezpečnější z důvodu, že operace hostovaného operačního systému nemohou poškodit VMM, na kterém virtuální systém běží. Samozřejmě

samotný virtuální stroj může být poškozen, avšak v případě běhu několika virtuálních strojů a hostovaných operačních systémů dojde k poškození pouze jedné instance, ostatní virtuální stroje mohou běžet bez narušení. Jako příklady VMM architektury typu 1 lze uvést Xen, Hyper-V od společnosti Microsoft a VMware ESX.

2.4.2 Architektura typu 2

Tento typ architektury popisuje William von Hagen ([2], s. 12) jako koncepci virtualizace, kde virtuální stroj je spuštěn pomocí VMM běžícím v hostitelském operačním systému, který je nainstalován na hardware fyzického stroje. Takto lze spouštět virtuální stroje s operačním systémem a knihovny, které byly zkompileovány pro stejný typ procesoru a instrukcí, jakými disponuje hardware fyzického stroje. Ovšem v případě VMM, který je schopný překladač nebo emulace sady instrukcí lze spouštět i virtuální stroje, které byly kompileovány pro jiný typ procesoru, než obsahuje fyzický stroj. Na obrázku 3 je zachycen princip hypervizoru založeného na architektuře typu 2.



Obr. 3 Ilustrace virtualizační architektury typu 2.

Zdroj: Vlastní zpracování v nástroji Visio Professional dle Cloud Computing and Virtualization [5].

Mezi největší výhody, které můžeme architektuře typu 2 přisoudit, jak uvádí autor Matthew Portnoy ([3], s. 25-26), patří zajisté její snadné zavedení a nasazení, protože hostitelský operační systém pokrývá velkou část konfigurace hardware fyzického stroje. Jedná se například o konfiguraci počítačové sítě nebo úložiště.

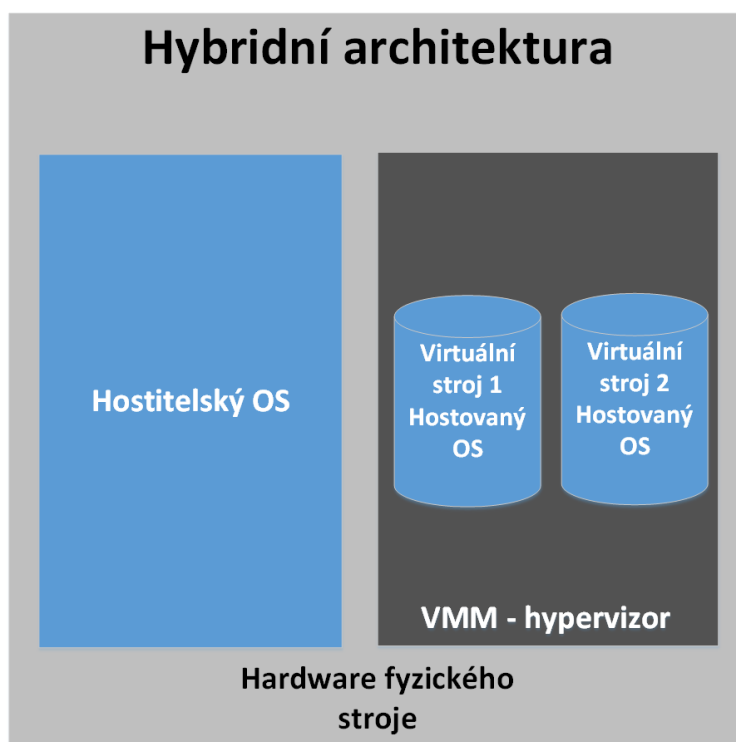
Na druhou stranu z hlediska spolehlivosti zde lze nalézt více slabých míst než v architektuře bare-metal. Každý výpadek hostitelského operačního systému bohužel znamená jak výpadek VMM, tak s ním souvisejících virtuálních strojů, které v této aplikaci běží. To samé nastává v případě restartu hostitelského operačního systému například v důsledku jeho aktualizace. I zde by bylo nutné restartovat všechny virtuální stroje běžící v prostředí VMM. Další zápornou vlastností této architektury je přidání mezičlánku v podobě hostitelského operačního systému v komunikační linii mezi VMM a hardwarem fyzického počítače. Tento fakt zvyšuje náročnost při obsluhování požadavků virtuálního stroje. S tím souvisí i spotřeba a zatěžování systémových zdrojů hostitelským operačním systémem.

Tato architektura se perfektně hodí například pro programátory při vývoji desktopových aplikací. V případě, že je k vývoji aplikace potřeba vlastností virtuálního stroje, lze využít VMM například pro přepínání pracovních prostředí k testování vyvíjené aplikace. Jako zástupce VMM používajících architekturu typu 2 lze uvést VirtualBox, VMware Workstation Pro a Player.

2.4.3 Hybridní architektura

V případě této architektury běží VMM na stejné úrovni vedle hostitelského operačního systému. Jak uvádí Tim Cerling ([6], s. 8-9), tato architektura spojuje vlastnosti obou výše zmiňovaných architektur a nese výhody architektury typu 1 v kombinaci s architekturou typu 2. Hypervizor je jako aplikace nainstalován v hostitelském operačním systému a celé fyzické prostředí emuluje. Toto řešení umožňuje virtualizaci celého operačního systému ve virtuálním stroji. Následující

obrázek je znázorněním hybridní architektury, která je kombinací architektur typu 1 a typu 2.



Obr. 4 Znázornění hybridní virtualizační architektury.

Zdroj: Vlastní zpracování v nástroji Visio Professional dle Mastering Microsoft Virtualization [6].

2.5 Typy virtualizace

Tato kapitola diplomové práce projednává dílčí typy virtualizace. Jsou zde popsány aktuální možnosti dle jednotlivých typů virtualizačních řešení, se kterými se lze v dnešní době setkat v oblasti virtualizace. Pro tuto kapitolu je nezbytné zavést následující pojmy, aby byly správně pochopeny principy jednotlivých typů virtualizace. Autoři Menken a Blokdijsk ([4], s. 29) vysvětlují význam emulace a simulace následovně:

- Emulace a simulace – koncepce, která za použití software umožňuje napodobení chování či fungování prostředí jednoho zařízení, jako by se jednalo o zařízení jiné. Pokyny operačního systému nebo aplikací jsou

pomocí software interpretovány do pokynů, jaké umí realizovat fyzický stroj, jehož hardware na daný operační systém nebo aplikaci nebyl koncipován.

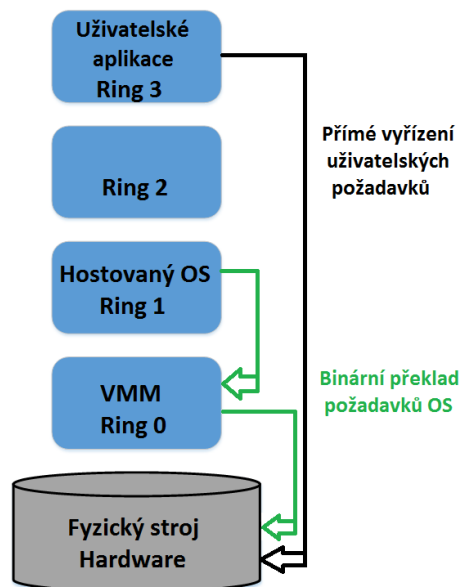
V případě virtualizace potom Buyya, Vecchiola a Selvi ([7], s. 76) popisují výhody emulace jako možnost spouštění virtuálních strojů a hostovaných operačních systémů vyžadující specifické vlastnosti, které nejsou v rámci fyzického stroje obsaženy. Dále je možné pomocí emulace spustit i poněkud zastaralý software, který by bez této technologie na současných systémech nefungoval.

Jak uvádějí Suresh a Kannan ([8], s. 135), v rámci virtualizace je emulace typicky využívána v souvislosti s fyzickými stroji postavenými na architektuře x86, kdy je jejich hardware emulován tak, aby i na nich bylo možné spustit virtuální stroje. V souvislosti s emulací dochází ke snižování výkonu a je zde nárůst pravděpodobnosti výskytu chyb. Jako příklad emulátoru lze uvést Bochs, Plex86 či Crusoe.

2.5.1 Plná virtualizace a binární překlad

Plnou virtualizaci vymezují Blokdijsk a Menken ([1], s. 28) jako proces, kdy je umožněna instalace operačního systému do virtuálního prostředí, čímž vzniká virtuální stroj. Dochází zde k emulaci všech hardwarových prostředků na straně virtuálního stroje a fyzické prostředky jsou využívány buď jedním virtuálním strojem, anebo sdíleny pro několik virtuálních strojů.

Jak uvádí Suresh a Kannan ([8], s. 27), vzhledem k tomu, že v případě tohoto typu virtualizace dochází k naprosto celkové simulaci hardware fyzického stroje, lze na virtuálním stroji spustit všechn software, který je možné spustit na fyzickém stroji. Hostovaný operační systém se chová, jako by byl jediným systémem ve všech vrstvách běžících na fyzickém hardware. Virtuální stroj tak v podstatě netuší, že je virtualizován a jeho privilegie instrukcí musí být sníženy z kruhu Ring 0 na Ring 1, čímž dochází k tzv. „kruhovému kompresi“. (J. S. Robin a C. E. Irvine, 2000, cit. podle [8], s. 135). Obrázek 5 představuje princip fungování plné virtualizace s využitím binárního překladu.



Obr. 5 Princip plné virtualizace a binárního překladu.

Zdroj: Vlastní zpracování v nástroji Visio Professional dle Cloud Computing and Virtualization [5].

William von Hagen ([2], s. 5) uvádí, že v případě plné virtualizace je využito VMM neboli hypervizoru, který je obohacen o kód, pomocí kterého lze emulovat hardwarové prostředky. Tímto způsobem lze spouštět prostřednictvím VMM i operační systémy nemodifikované pro virtualizaci. Tento typ virtualizace je využíván například v případě VMware ESX.

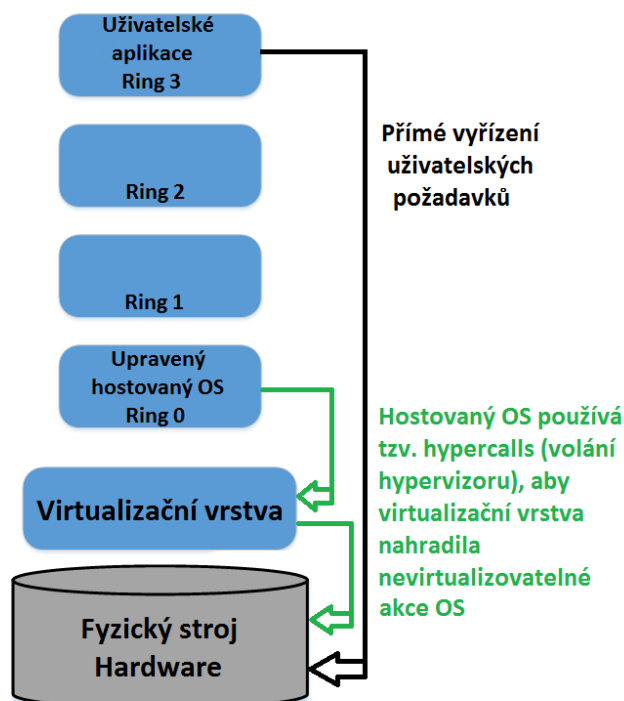
Právě společnost VMware je dle Buyya, Vecchiola a Selvi ([7], s. 98) populární mimo jiné i pro využívání techniky binárního překladu, jež je nezbytná pro schopnost plné virtualizace architektury x86. Tohoto řešení se ve velké míře využívalo před zavedením paravirtualizace a hardwarově podporované virtualizace, které jsou popsány v následujících podkapitolách této diplomové práce. Architektura x86 neumožňuje standardní virtualizaci, protože sada tzv. citlivých instrukcí nespadá pod instrukce privilegované. To znamená, že takové instrukce se neprovádějí v Ringu 0, jako je tomu v běžných případech virtualizace, kde je hostovaný operační systém spuštěn v rámci Ring 1. V případě binárního

překlady jsou tedy instrukce, které není možné virtualizovat, zachyceny a přeloženy do ekvivalentní sady instrukcí. Tyto instrukce již bez způsobení výjimek dosáhnou požadovaného cíle. Pro zamezení ztráty výkonu se ekvivalentní sada instrukcí ukládá do cache paměti a tím pádem není nutný opakovaný překlad při opětovném výskytu identických instrukcí.

2.5.2 Paravirtualizace

Dle Menken a Blokdijska ([4], s. 47-48) je tento typ virtualizace jedním řešením ze dvou variant, které jsou přípustné pro problematiku emulace procesorů architektury x86. Běžné operační systémy dříve nebyly navrhovány pro virtualizační řešení. Jejich běh byl ve virtuálním prostředí velmi nákladný a neefektivní. Vzhledem k tomu, že pro správné vyřízení instrukcí potřebuje jádro hostitelského operačního systému přímý přístup k hardware a v případě virtuálního stroje nemá jádro hostovaného operačního systému tuto možnost, je nutné některé instrukce nahradit nebo upravit, aby docházelo ke správné kooperaci mezi hostovaným operačním systémem a procesorem na fyzickém stroji. Menken a Blokdijsk ([4], s. 60-61) dodávají, že procesory architektury x86 zpracovávají instrukce odlišně v závislosti na privilegovaném či neprivilegovaném režimu. Virtualizovaný procesor tak nemůže běžet v privilegovaném režimu z důvodu hrozby rizika přidělení větší priority než fyzickému procesoru. VVM by v tomto případě musel vynaložit kapacitu na překlad instrukcí od virtuálního stroje pro správné čtení strojem fyzickým. Tento fakt by vedl ke zpomalení a neplynulosti běhu operačního systému virtuálního stroje.

S řešením přichází právě paravirtualizace v podobě úpravy operačního systému na úrovni jádra tak, aby byl hostovaný operační systém více kompatibilní s hardware fyzického stroje. Paravirtualizace je velice efektivním řešením virtualizace, avšak v případě tohoto typu virtualizace lze použít pouze určité operační systémy, což je také její hlavní nevýhodou. V tomto směru je univerzálnějším řešením hardwarově podporovaná virtualizace, která je popsána v následující podkapitole. Obrázek níže ilustruje princip paravirtualizace.



Obr. 6 Princip paravirtualizace.

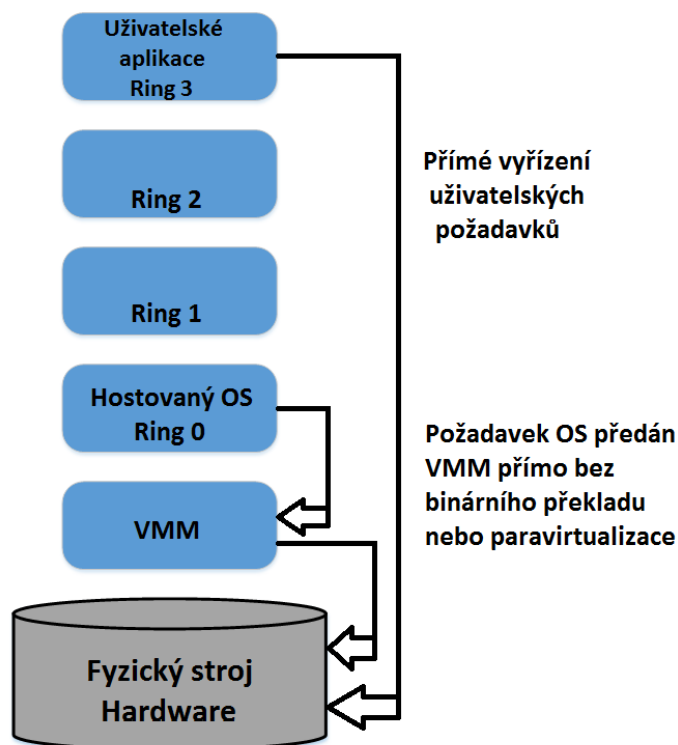
Zdroj: Vlastní zpracování v nástroji Visio Professional dle Cloud Computing and Virtualization [5].

Typickým příkladem hypervizoru, který poskytuje rozhraní pro virtualizaci formou paravirtualizace je dle Williama von Hagen ([2], s. 5) Xen, který pracuje s jádrem Linuxu přizpůsobeného pro své administrativní prostředí pomocí Domény 0.

2.5.3 Hardwarově podporovaná virtualizace

V případě tohoto typu virtualizace je dle Menken a Blokdijka ([4], s. 48) zapotřebí na fyzickém stroji procesor s technologií Intel VT nebo AMD-V. Pomocí nich lze zpracovávat instrukce od virtuálního procesoru na straně procesoru fyzického. Díky této technologii není nutné překládat instrukce procesoru anebo využívat modifikované operační systémy, jako tomu je v případě paravirtualizace. Autor William von Hagen ([2], s. 6) detailně popisuje fungování hardwarově podporované virtualizace jako možnost virtuálních strojů prostřednictvím VMM zpracovávat chráněné, privilegované operace a požadavky na přístup k fyzickému

hardware. Jako příklady hypervizorů pracujících s hardwarově podporovanou virtualizací lze uvést Xen 3.x a Linux KVM (Kernel-Virtual Machine). Tento typ můžeme dle architektury virtualizace zařadit do kategorie hybridní a je zachycen na obrázku 7.



Obr. 7 Princip hardwarově podporované virtualizace.

Zdroj: Vlastní zpracování v nástroji Visio Professional dle Cloud Computing and Virtualization [5].

Konceptem, který využívá vlastností paravirtualizace i hardwarově podporované virtualizace označují Blokdijsk a Menken ([1], s. 61-62) kooperativní virtualizaci zvanou Coopvirt. Jedná se o hybridní virtualizační řešení fungující pomocí hardwarové podpory formou procesoru podporujícího virtualizaci v kombinaci s upraveným operačním systémem pro virtualizaci. Toto řešení je zatím stále vyvíjeno, nicméně mohlo by být průlomovým objevem z hlediska efektivity virtualizace.

2.5.4 Částečná virtualizace

V tomto případě se jedná dle Buyya, Vecchiola a Selvi ([7], s. 86) o koncept založený na částečné emulaci fyzického hardware, což neumožňuje absolutní izolaci hostovaného operačního systému. Tímto způsobem nelze podporovat všechny funkce operačního systému jako tomu je například u plné virtualizace. S takzvanou parciální virtualizací se můžeme setkat v souvislosti s multitaskingovým operačním systémem, který využívá virtualizaci adresního prostoru. Pomocí této technologie je možné spouštět více aplikací a požadavků souběžně ve virtuálně odděleném paměťovém prostoru, přičemž ve skutečnosti je využíváno stejných hardwarových prostředků. Částečná virtualizace se podílela na objevení virtualizace plné a je neodmyslitelnou součástí dnešních operačních systémů.

2.5.5 Virtualizace na úrovni jádra operačního systému

Typ virtualizace, který autoři Buyya, Vecchiola a Selvi ([7], s. 86-87) popisují jako souběžnou správu samostatných virtuálních prostředí, pomocí kterých lze spouštět aplikace, avšak samotné fungování těchto prostředí nemá v tomto případě na starosti VMM. Virtualizace se provádí v rámci jádra jednoho operačního systému. Jádro sdílí systémové prostředky mezi několika instancemi uživatelského prostoru a musí korigovat vzájemné kolize jednotlivých instancí. Je tedy zodpovědné za logické oddělení dílčích instancí tvořících virtuální stroje. Každý uživatelský prostor má odlišný kořenový adresář souborového systému. Ve srovnání se standardními virtuálními stroji je režie tohoto typu jednodušší, protože není třeba emulace jádra operačního systému ani hardwarových prostředků. Princip virtualizace v rámci jádra jednoho operačního systému je znázorněn na následujícím obrázku.



Obr. 8 Princip virtualizace na úrovni jádra operačního systému.

Zdroj: Vlastní zpracování v nástroji Visio Professional dle Professional Xen Virtualization [2].

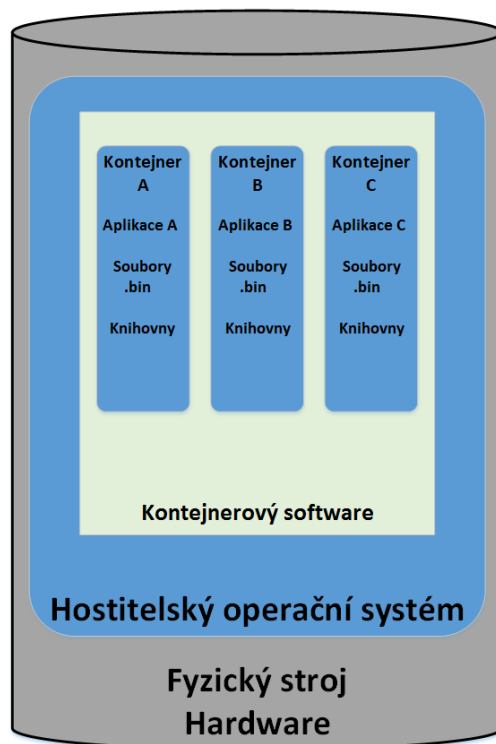
Do jednotlivých instancí lze v některých případech instalovat dokonce různé distribuce operačních systémů založených na stejné platformě. Menken a Blokdijk ([4], s. 61-62) uvádí konkrétní využití tohoto typu v oblasti webhostingu. Pomocí této virtualizace lze poskytovat hosting více než jednoho názvu domény na jednom fyzickém stroji.

Příkladem nástroje, kterým lze provádět virtualizaci v rámci jádra operačního systému, může být IBM Logical Partition (LPAR), Parallels Virtuozzo Containers či iCore Virtual Accounts.

2.5.6 Kontejnerizace

Autoři Potdar, DG, Kengond a Mulla ([9], s. 1419-1420) ve svém odborném článku uvádějí, že v poslední době poptávka po tomto typu virtualizace díky snadnému zavedení, správě a rychlému spouštění roste. Jedná se o řešení využívající hostitelský operační systém, který sdílí v rámci virtualizace své knihovny a

prostředky v rámci jednotlivých kontejnerů, proto je označováno jako kontejnerizace nebo také odlehčená virtualizace. Kontejnerizace a její architektura jsou ilustrovány obrázkem níže.



Obr. 9 Princip kontejnerizace.

Zdroj: Vlastní zpracování v nástroji Visio Professional dle Performance Evaluation of Docker Container and Virtual Machine [9].

V současné době je velmi často skloňovaným a používaným nástrojem k tomuto typu virtualizace software s názvem Docker.

V následující tabulce jsou porovnány jednotlivé typy virtualizace operačních systému. Tato tabulka zachycuje hlavní výhody a nevýhody daných typů virtualizace.

Tabulka 1 Porovnání jednotlivých typů virtualizace.

Typ virtualizace	Výhody	Nevýhody
------------------	--------	----------

Typ virtualizace	Výhody	Nevýhody
Plná virtualizace	Absolutní izolace jednotlivých virt. strojů a VMM. OS bez úprav, lepší přenositelnost a spolehlivost. Relativně malá ztráta výkonu CPU a RAM. Celková emulace fyzického hardware.	Nutná správná kombinace hardware a software. V případě architektury x86 je nutný binární překlad a tím může být ovlivněn výkon.
Paravirtualizace	Snadnější nasazení oproti plné virtualizaci. Poměrně dobrá izolace jednotlivých virt. strojů. Spolehlivost závisí na VMM.	OS nelze v případě paravirtualizace spustit bez podstatných úprav. Horší zpětná kompatibilita a přenositelnost.
Hardwarově podporovaná virtualizace	Využívá techniky trap-and-emulate v případě nutnosti překladu instrukcí. Není nutná modifikace OS, podporuje 64bitové rozšíření architektury x86. Nejvyšší výkon CPU, RAM a I/O.	Vyžaduje speciální druh CPU podporující tento typ virtualizace. Zůstává nutnost malé míry úpravy OS pro virtualizaci – zanedbatelné v porovnání s paravirtualizací.
Částečná virtualizace	Snadnější nasazení oproti plné virtualizaci. Ideální pro sdílení systémových zdrojů mezi více uživateli.	Pouze částečná emulace fyzického hardware – nelze dosáhnout plné izolace virt. strojů (riziko narušení jejich běhu).
Virtualizace na úrovni jádra OS	Bez nutnosti použití VMM. Jednodušší režie, protože není třeba emulace jádra operačního systému ani hardwarových prostředků. Téměř nativní výkon dle fyzického stroje.	Jádro OS musí korigovat kolize mezi kontejnery. Do jednotlivých kontejnerů lze instalovat výhradně stejné operační systémy (lišit se mohou pouze verzí). Spolehlivost závisí na hostitelském OS. Špatná přenositelnost.

Zdroj: Vlastní zpracování dle International Journal of Advanced Research in Computer Science and Technology: A Study on System Virtualization Techniques [8].

3 Virtualizační platformy

V této kapitole jsou představeny a popsány jednotlivé platformy pro virtualizaci, které figurují v rámci praktické části diplomové práce jako předmět testování výkonnosti virtualizovaných operačních systémů.

3.1 VMware Workstation Player 16.1.0

VMware Workstation Player je jedním z řady produktů americké společnosti VMware zabývající se již od roku 1998 informačními technologiemi, konkrétně cloud computingem, počítačovými sítěmi a v neposlední řadě také virtualizací informační infrastruktury a software. Řada Workstation spadá do kategorie desktopových virtualizačních řešení, což je virtualizace pracovních stanic v podnicích, IT společnostech nebo v rámci osobních počítačů. [10]

Virtualizační nástroj Workstation Player ve verzi 16 je bezplatným produktem pro soukromé použití. Podporuje virtualizaci operačních systémů v nejnovějších distribucích Windows 10, Red Hat, Fedora, CentOS, Debian a mnoho dalších. Nechybí zde ani kompatibilita pro Hyper-V včetně WSL (Windows Subsystem for Linux). S touto verzí je dostupný nový příkazový řádek pro vytváření a spouštění OCI kontejnerů a Kubernetes clusterů. [11]

Nově VMware poskytuje v této verzi virtualizační platformy vylepšené grafické jádro pro operační systémy Windows a Linux. V rámci hostovaného operačního systému Windows je nyní k dispozici grafické rozhraní DirectX 11 a OpenGL 4.1. V případě Linux je zde vykreslovací modul Vulkan kompatibilní s rozhraním DirectX 10.1 a OpenGL 3.3. VMware Workstation Player 16 je schopný spolupráce s nástrojem vSphere 7, který je dostupný v portfoliu produktů společnosti VMware a slouží pro virtualizační řešení serverů i cloud úložišť. [11]

VMware Workstation Player představuje virtualizaci desktopových operačních systémů, ať už v rámci virtuálních strojů, kontejnerů případně clusterů. Jedná se o hypervizor druhého typu s plnou virtualizací, který je instalován na již existující instanci operačního systému běžící přímo na fyzickém hardware hostitelského

stroje, jak bylo blíže popsáno v kapitole zabývající se virtualizačními architekturami. [12]

Pomocí tohoto nástroje lze spouštět v jednu chvíli pouze jeden virtuální stroj s využitím grafického rozhraní nebo příkazu *vmrun* v příkazovém řádku. Takto je například možný provoz jiného operačního systému na osobním počítači nebo testování či zkoumání informačních technologií a operačních systémů v rámci vzdělávání. Tento nástroj poskytuje plně zabezpečené a izolované virtuální stroje, každý operační systém s aplikacemi je takzvaně zapouzďřený, takže zde není riziko případných kolizí. [12]

V průběhu virtualizace jsou mapovány hardwarové zdroje fyzického stroje na virtuální prostředky virtuálního stroje, takže každý hostovaný operační systém má k dispozici vlastní procesor, pevný disk, vstupní a výstupní zařízení, síťový adaptér nebo třeba grafický procesor. Z toho plyne, že v podstatě kterýkoliv software spustitelný na fyzickém stroji lze rovněž spustit v rámci prostředí virtuálního stroje, pokud je podporován hostovaným operačním systémem. VMware Workstation používá souborový systém hostitelského operačního systému a vytváří soubory, které se mapují na virtuální disky hostovaných operačních systémů. Zjednodušeně řečeno jsou virtuální disky uloženy jako soubory v hostitelském operačním systému. Je zde tedy absence nutnosti vytvářet diskový oddíl pro jednotlivé operační systémy. Tato skutečnost zajišťuje možnost plynulého přepínání mezi operačními systémy či jejich případné sdílení složek a souborů v nich obsažených. Virtuální stroj může v rámci internetové sítě využívat buď IP adresu fyzického stroje pomocí NAT nebo svou vlastní IP adresu získanou z DHCP serveru. [12]

Požadavky virtualizační platformy VMware Workstation Player 16.1.0 jsou hardware standardu x86 s 64bitovým procesorem Intel či AMD vyvinutým od roku 2011 a hostitelský 64bitový operační systém distribuce Windows nebo Linux. Minimální rychlost procesoru je podmíněna 3 GHz. Paměť RAM je vyžadována minimálně 2 GB, ovšem doporučená velikost je 4 GB. [12]

Požadavky 3D akcelerace jsou v rámci Windows grafický procesor podporující DirectX 11.1 a v případě Linux distribuce nejnovější ovladače NVIDIA podporující OpenGL 4.5. V rámci distribuce pro systémy Linux zároveň nejsou podporována zařízení AMD. Pro 3D akceleraci je nutné nainstalovat balíček VMware Tools, který obsahuje ovladače a aplikace pro virtuální stroj. Díky tomuto rozšíření lze plně využívat všech dalších výhod VMware Workstation Player jako například již zmiňované sdílené složky souborů, automatické integrace kurzoru myši, synchronizace času hostovaného operačního systému s hostitelským operačním systémem, případně sdílení tzv. schránky pro kopírování nebo přesouvání textu a podobně. [13]

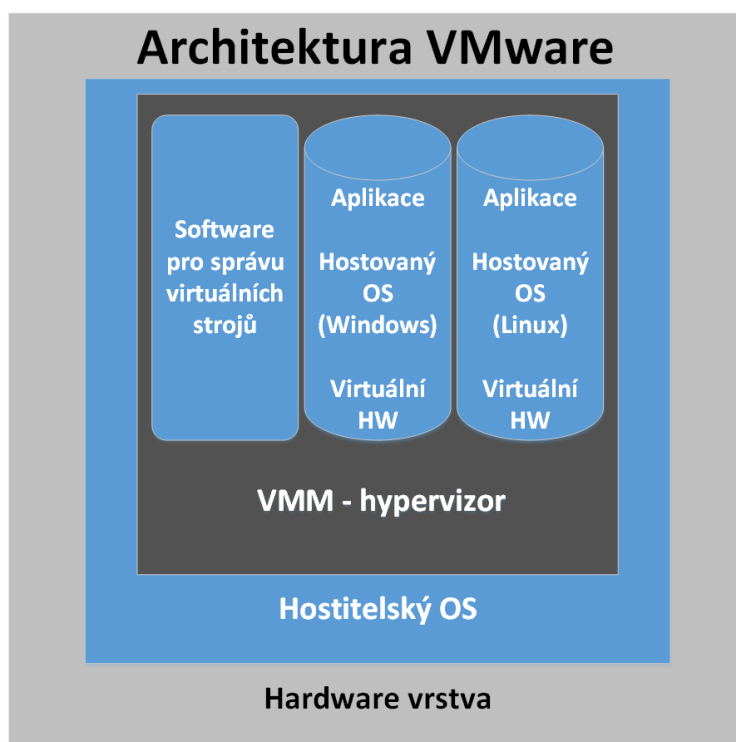
3.2 VMware Workstation Pro 16.1.0

Virtualizační platforma VMware Workstation Pro 16.1.0 úzce souvisí s výše popisovaným nástrojem Workstation Player, jelikož patří do stejné řady desktopových virtualizačních produktů Workstation od společnosti VMware. V tomto případě se jedná o zcela komerční produkt, který je určen zejména pro profesionály v oboru IT a softwarové vývojáře. Využívá stejný princip hypervizoru typu dva, běžícího v hostitelském operačním systému nainstalovaném na fyzickém hardware. [14]

Uživatelské rozhraní VMware Workstation Pro je odlišné od platformy Player. Umožňuje spouštění několika izolovaných virtuálních strojů současně pomocí záložek uvnitř takzvaného tabbed interface. V tomto produktu lze spravovat a konfigurovat virtuální sítě, vytvářet tzv. snapshoty (sloužící k uložení stavu virtuálního stroje), klonovat virtuální stroje a připojovat se k vSphere. VMware Workstation Pro nabízí šifrování virtuálních strojů a poskytuje tak jejich větší zabezpečení. Co se týče požadavků na hostitelský operační systém a hardware fyzického stroje, tak zde jsou stejné nároky jako v případě bezplatné verze hypervizoru VMware Workstation Player. [14]

Na následujícím obrázku je představena architektura virtualizačního nástroje VMware Workstation Pro. Zde lze pozorovat, že pomocí hypervizoru běží najednou několik operačních systémů, z nichž každý může být zástupce jiné platformy. To je

hlavní odlišností od VMware Workstation Player, u kterého by byl na obrázku zachycen pouze jeden běžící hostovaný operační systém.



Obr. 10 Architektura nástroje VMware Workstation Pro.

Zdroj: Vlastní zpracování v nástroji Visio Professional dle Latency Analysis and Reduction in a 4G Network [15].

3.3 Oracle VM VirtualBox 6.1.16

Virtualizační nástroj VirtualBox je open source produkt od společnosti Oracle Corporation. Jedná se o multiplatformní software pro počítače s architekturou x86 a procesorem AMD64 nebo Intel 64. Původně byl vyvinut společností Innotek GmbH v Německu s prvotním názvem Sun VirtualBox jako volně dostupný software dle podmínek GNU GPL (General Public License). [16]

Pro virtualizaci operačních systémů využívá VirtualBox architektury hypervizoru typu 2 s plnou virtualizací. Díky své multiplatformní dostupnosti může běžet na v podstatě jakémkoliv moderním desktopovém operačním systému, ať už se jedná o Windows, Linux, macOS či Solaris. Autor Dash ([16], s. 8) ve své knize označuje VirtualBox jako působivý díky jeho efektivnosti, robustnosti, vysokému výkonu a

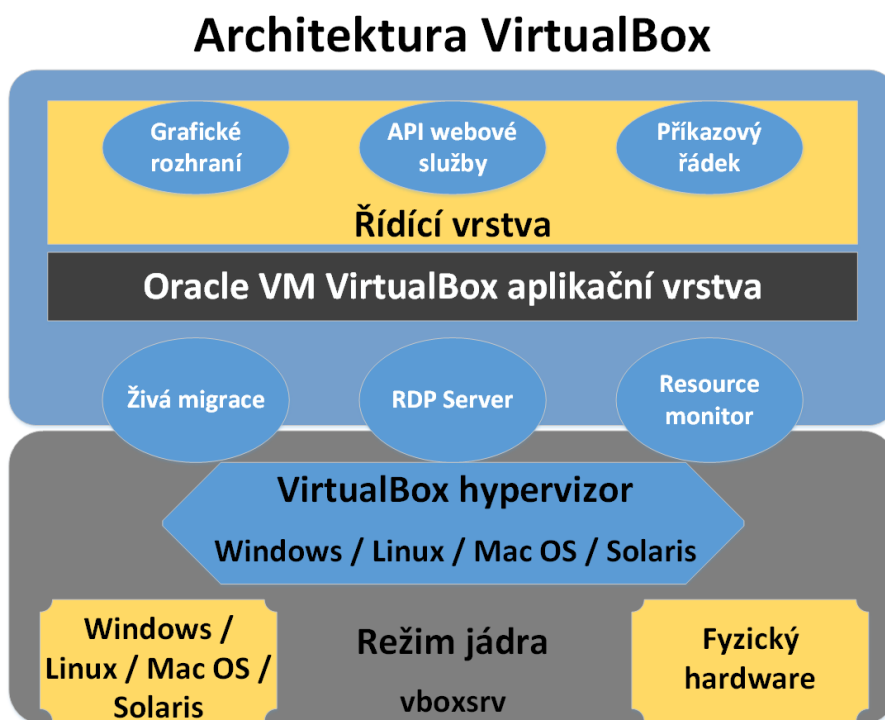
možnosti bezplatného používání. Na rozdíl od VMware Workstation Player a Pro může VirtualBox běžet na 64bitové i 32bitové verzi operačního systému. Vytvořené virtuální stroje lze exportovat či importovat a tím pádem přenášet mezi několika hostitelskými stroji. Tuto funkcionalitu zajišťuje tzv. OVF (Open Virtualization Format). V případě VirtualBoxu není nutná virtualizace hardware, a tak lze tento nástroj použít i na starších strojích, kde není dostupná funkce Intel VT-X nebo AMD-V. Virtuální stroje lze spravovat buď jednotlivě, nebo skupinově a uživatel tak může provést hromadné zapnutí, vypnutí, reset, uložení stavu nebo tvrdé vypnutí více strojů najednou. Pomocí tzv. snapshotů lze uložit aktuální stav virtuálního stroje a vrátit se tak při jakýchkoliv případných problémech k tomuto uloženému bodu, což znamená vrátit všechny změny v hostovaném operačním systému. S využitím doplňku VRDE (VirtualBox Remote Desktop) je možné spouštět virtuální stroje vzdáleně. Stejně tak jako v případě VMware Workstation je pro plné využití potenciálu VirtualBoxu nutné nainstalovat do hostovaného operačního systému tzv. doplňky hosta (Guest additions), které zajistí lepší výkon, snadnější integraci kurzoru myši, sdílenou schránku a složky se soubory či grafickou akceleraci s 3D vykreslováním. S těmito doplňky získá uživatel možnost používat virtuální USB 2.0 i 3.0, webkameru, šifrování virtuálního disku a další. VirtualBox umožňuje běh několika virtuálních strojů současně. [16]

Co se týče hostitelských požadavků, tak společnost Oracle stanovuje v oficiálním manuálu pro VirtualBox výčet hostitelských operačních systémů, mezi které patří distribuce Windows počínaje 8.1, dále všechny distribuce Windows 10 od verze sestavení 10240 až po 18363, Windows Server 2012 až 2019, Mac OS X 10.13 až 10.15 a distribuce Linux, které zahrnují například Ubuntu, Debian, Red Hat, Fedora či SUSE. V případě Linux by se mělo v rámci přípustných distribucí jednat o systémy založené na jádře 2.6, 3.x, 4.x nebo 5.x. CPU hostitelského stroje musí podporovat SSE2 (Streaming SIMD Extensions 2), což je sada doplňkových instrukcí procesoru. [17]

Výčet hostovaných operačních systémů je opravdu široký a sahá až do dávné historie Windows, vzhledem k tomu, že je možné v omezeném režimu virtualizovat

například MS-DOS, Windows 3.x, Windows 95 až Windows ME. Dále je samozřejmostí podpora Windows NT 4.0, Windows XP, Windows Server 2003, Windows 7, Windows 8 a mnoho dalších. Mezi podporované distribuce Linux zde patří opět verze pracující na jádrech 2.4, 3.x a novějších, dále také omezeně 2.6. Virtualizace operačních systémů platformy Mac OS X je pouze experimentální a není tak plně podporována. Toto je dáno hlavně tím, že Mac OS X je komerčním software a obsahuje licenční a technologická omezení. Apple v podstatě zakazuje instalaci většiny verzí tohoto operačního systému na jiných zařízeních než vlastní výroby. Zjednodušeně lze říci, že používaný procesor nesmí být novější, než verze sestavení virtualizovaného Mac OS X. [17]

Následující obrázek zachycuje architekturu VM VirtualBox na vysoké úrovni (high-level).



Obr. 11 Architektura nástroje Oracle VM VirtualBox.

Zdroj: Vlastní zpracování v nástroji Visio Professional dle Getting Started with Oracle VM VirtualBox [16].

Hypervizor nástroje VirtualBox je implementován v rámci Ring 0 jako služba jádra. Zde zároveň nalezneme ovladač nazývaný *vboxesrv*, který má na starosti přidělování

fyzické paměti virtuálnímu stroji a načítání modulů hypervizoru pro uložení obsahu v případě, že dojde k výpadku hostitelského systému. Hostovaný operační systém běží jako jeden proces a stará se o plánování vlastních procesů. Po spuštění hostovaného operačního systému se automaticky spustí klientský proces VBoxSVC, který má na starosti obsluhu stavu virtuálního stroje. [16]

3.4 Microsoft Hyper-V

Společnost Microsoft se začala zabývat virtualizací již v roce 2005, když vytvořila svůj první program tohoto druhu, a to Microsoft Virtual Server. Tento koncept koupil Microsoft od společnosti Connectix. Jednalo se o hypervizor typu 2, jehož fungování podporoval Microsoft až do roku 2008, kdy přišel s prvním konceptem produktu Microsoft Hyper-V, který se stal instalovatelnou součástí systému Windows. Poprvé bylo tedy možné Hyper-V využít v operačním systému Microsoft Windows Server 2008. [3]

Microsoft Hyper-V je hypervizorem typu 1 vzhledem k tomu, že kód hypervizoru běží přímo na fyzickém hardware hostitelského stroje. Zařazení Hyper-V je však v různých publikacích trochu odlišné. Dle Portnoye ([3], s. 33) by místo virtuálních hostovaných strojů, jimiž jsou virtuální stroje vytvořené v Hyper-V označovány, bylo vhodnější použít označení virtualizované oddíly. Koncepte tohoto produktu je podobná software Xen, kdy je vyžadován speciální nadřazený oddíl, jenž má přímý přístup k fyzickému hardware. Nadřazený neboli rodičovský oddíl vytváří i spravuje podřízené oddíly a pracuje s ovladači a funkcemi správy systému. I přes poněkud pozdní vstup společnosti Microsoft do odvětví virtualizace zaujímá její produkt přibližně dvacet procent tohoto trhu. Pomohla k tomu poněkud agresivní strategie licencování a zabalení produktu přímo do základního operačního systému. [3]

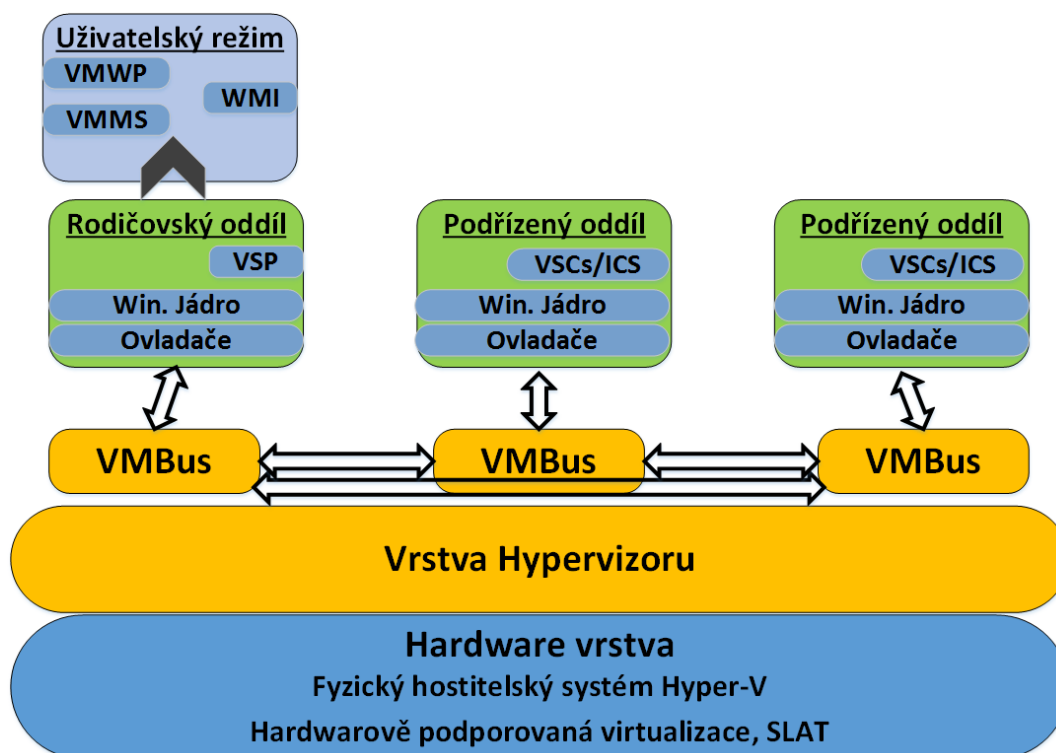
Hyper-V poskytuje hardwarově podporovanou virtualizaci, to znamená, že každý virtuální stroj běží na jemu přiděleném virtuálním hardware a každý stroj je plně zapouzdřen. Lze tak vytvářet virtuální pevné disky, sběrnice, grafické a zvukové karty, switche a další. Virtuální stroje vytvořené pomocí Hyper-V lze přenášet neboli migrovat a spustit je na jiném fyzickém hardware nebo například

prostřednictvím Microsoft Azure. Další funkcí tohoto virtualizačního nástroje je schopnost replikace virtuálních strojů. Požadavkem pro fungování tohoto software je operační paměť o minimální velikosti 4 GB. [18]

Produkt Hyper-V lze využít v případě 64bitového operačního systému Windows 10 ve verzích Pro, Enterprise a Education. Pro serverová řešení je Hyper-V dostupný v distribucích Windows Server 2008, 2012, 2016 a 2019. Tyto zmiňované systémy jsou jedinými dostupnými hostitelskými operačními systémy, protože se jedná o závislý virtualizační software. Výčet hostovaných operačních systémů je již delší a patří mezi ně i zástupci platformy Linux či FreeBSD. Z platformy Windows lze využít jako hostovaný operační systém Windows Vista SP2, Windows 7, Windows 8, Windows 8.1 a Windows 10. V případě serverových operačních systémů lze použít v podstatě všechny distribuce Windows Server. [19]

Ze zástupců hostitelských operačních systémů v rámci platformy Linux lze jmenovat CentOS 8.x, 7.x, 6.x či 5.x. Dále potom distribuce systémů Debian, Ubuntu, SUSE a Oracle Linux. [20]

Na následujícím obrázku je znázorněna architektura virtualizačního nástroje Microsoft Hyper-V.



Obr. 12 Architektura nástroje Microsoft Hyper-V.

Zdroj: Vlastní zpracování v nástroji Visio Professional dle Pro Microsoft Hyper-V 2019 [21].

Základem architektury Microsoft Hyper-V je dle Syrewicze a Siddawaye ([21], s. 10-12) hardware vrstva, která zastupuje fyzický stroj. Na této vrstvě je nainstalován hostitelský operační systém a Hyper-V. Požadavkem tohoto hypervizoru je hardwarová podpora virtualizace Intel-VT případně AMD-V. Dále je nutná funkcionální SAT (second-level address translation) v rámci procesoru. Vrstva hypervizoru má potom na starosti přístup k CPU a RAM, které přiděluje jako zdroje. VMbus zde vystupuje jako virtuální sběrnice umožňující komunikaci mezi hostitelským systémem a virtuálními stroji. Rodičovský oddíl je v podstatě skrytý virtuální počítač, který funguje jako správa operačních systémů a hypervizoru. Tento oddíl poskytuje ovladače, úložiště, síťové prostředky a další. VSP (Virtualization Service Provider) poskytuje podporu virtualizovaných strojů a přístup do podřízených oddílů prostřednictvím VMbus. VMWP je pracovní proces virtuálního stroje a běží v uživatelském režimu unikátně pro každý virtuální stroj zvlášť. VMMS zajišťuje systém pro správu virtuálních strojů a podřízených oddílů,

které představují virtuální stroje. ICs (Integration Components) umožňují podřízeným oddílům komunikovat s vrstvou hypervizoru, poskytují řadu dalších funkcí a výhod.

3.5 QEMU/KVM

V případě této virtualizační platformy se dle autorů Dakice, Chirammla, Mukhedkara a Vettathu ([22], s. 13) jedná o nejnovější generaci open source virtualizace. Projekt QEMU/KVM je založen na zkušenostech z předchozích generací virtualizace a využívá moderní hardware, který je v současné době k dispozici, konkrétně jde o technologii VT-x, AMD-V a další. Při instalaci KVM dojde zjednodušeně ke změně jádra Linuxu v hypervizoru. V systémech založených na jádru 4.20 a novějších je oproti předchozím k dispozici podpora paměti, plánovač, šifrovaná virtualizace, Intel iGPU a další. Pro emulaci I/O pracuje KVM se softwarem QEMU, který emuluje procesor, disky, síťové prostředky, VGA, PCI, USB a další periferní zařízení. Tím je zajištěno vytvoření kompletního virtuálního stroje, na který lze nainstalovat hostovaný operační systém. Jako hypervizor typu 1 řídí tuto emulaci právě KVM.

KVM neboli Kernel-based Virtual Machine je dle společnosti Red Hat [23] tzv. bare-metal hypervizor neboli typ 1 s historií, která sahá až do roku 2006. Je součástí každé distribuce Linux s jádrem 2.6.20 a novějším a poskytuje plnou virtualizaci architektury x86. Jelikož je KVM zabudováno přímo v linuxovém kódu, tak jakákoliv aktualizace, nová funkce nebo oprava je automaticky instalována s aktualizacemi operačního systému a nejsou nutné zvláštní instalace nebo zásahy uživatele. KVM obsahuje některé komponenty na úrovni operačního systému, jako jsou například správce paměti, plánovač procesů, zásobník vstupů a výstupů (I/O), ovladače zařízení, správce zabezpečení a další. Každý virtuální stroj je spuštěn jako běžný proces operačního systému Linux naplánovaný standardním plánovačem procesů a s vyhrazeným virtuálním hardwarem. KVM je dodáváno ve dvou verzích – první v případě Red Hat Enterprise Linux, která nabízí všechny funkce hypervizoru se základními možnostmi správy a provoz až čtyř izolovaných

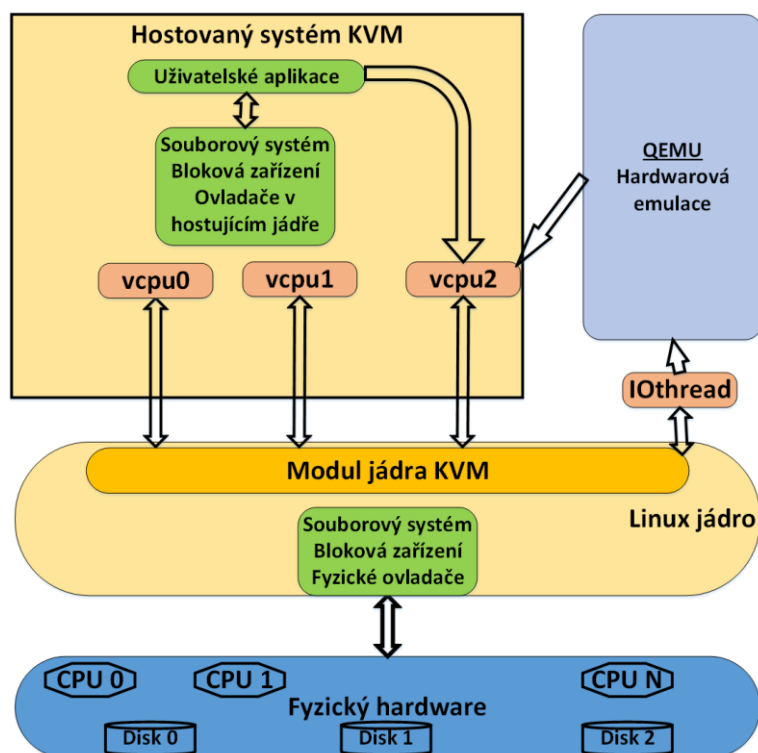
virtuálních strojů. Druhou verzí je Red Hat Virtualization, která umožňuje správu neomezeného počtu virtuálních strojů a hodí se tak například do datových center.

Hardwarové požadavky definují Dakic, Chirammal, Mukhedkar a Vettathu ([22], s. 22-23) alespoň 4 GB RAM, dále SLA, RVI (Rapid Virtualization Indexing), EPT (Extended Page Tables), což jsou technologie, kterými musí disponovat CPU. Dalším požadavkem jsou Intel VT nebo AMD-V dle použitého procesoru hostitelského stroje. Tento procesor musí podporovat 64bitovou architekturu. KVM se neobejde ani bez Input/Output Memory Management Unit (IOMMU), která umožňuje přístup virtuálních strojů přímo k perifériím fyzického stroje.

Autoři Dakic, Chirammal, Mukhedkar a Vettathu ([22], s. 30) uvádějí, že hlavním aplikačním rozhraním KVM je *libvirt*. Jedná se o nástroj pro správu virtuálních strojů. Nejčastěji se používá v kombinaci s rozhraním *virt-manager*, které je grafickým nástrojem založeným na Gnome prostředí. Pomocí funkce *-connect* v rámci *libvirt* lze spravovat i vzdálené hypervizory.

Nedílnou součástí hypervizoru KVM je dle Dakice, Chirammal, Mukhedkara a Vettathu ([22], s. 38-40) QEMU. Jedná se o bezplatný software napsaný Fabrice Bellardem fungující na principu licence GNU. Tento nástroj lze použít buď jako emulátor nebo jako virtualizér. V případě emulátoru lze spouštět operační systémy a programy na jiném počítači, než pro který je daný software kompatibilní (např. ARM). Při této emulaci využívá QEMU binárního překladu, konkrétně za pomoci binárního překladače TCG (Tiny Code Generator), což je tzv. just-in-time (v reálném čase) kompilátor. QEMU v případě KVM můžeme nazvat jako hostovaný hypervizor, který zastupuje hardwarovou virtualizaci. Díky KVM a jeho hardwarové akceleraci provádí QEMU kód přímo na hostitelském CPU pomocí vlákna *POSIX* a vyhýbá se tak binárnímu překladu. Tím je dosaženo v podstatě nativního výkonu.

Následující obrázek ilustruje architekturu nástroje QEMU/KVM a vzájemnou spolupráci těchto dvou software.



Obr. 13 Architektura nástroje QEMU/KVM.

Zdroj: Vlastní zpracování v nástroji Visio Professional dle Mastering KVM Virtualization [22].

Autoři Dakic, Chiramal, Mukhedkar a Vettathu ([22], s. 49-50) zmiňují, že v operačním systému Linux s využitím KVM je k dispozici společný modul jádra *kvm.ko* a také hardwarové moduly jádra v závislosti na výrobci CPU. Jedná se o moduly *kvm-intel.ko* (Intel s příznakem *vmx*) a *kvm-amd.ko* (AMD s příznakem *svm*). Zavedením těchto modulů se jádro Linuxu stává hypervizorem a KVM vytvoří složku zařízení */dev/kvm*, kterou využívají aplikace prostřednictvím *ioctl()* volání.

Jak již bylo zmíněno výše, hostitelským operačním systémem může být jakákoliv distribuce Linux s jádrem 2.6.20. Co se týče hostovaných operačních systémů, tak zde je možnost použití velké spousty distribucí různých platforem. Pomocí KVM lze nainstalovat například hostovaný Windows Server 2003–2011, Windows NT 4.0, Windows 7-10, Windows XP, Windows 98 a další. Z rodiny Linux potom například CentOS 5.4-6.5, RedHat Enterprise Linux 7-9, Fedora 1-18, Ubuntu 6.06-12.10,

Android 2.2, SUSE, Mandriva či ostatní distribuce jako MS DOS, Minix, FreeDOS a další. [24]

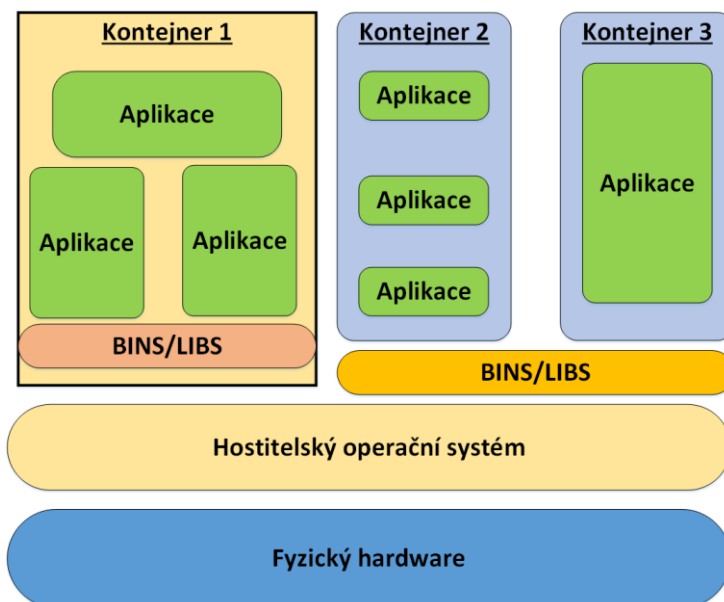
3.6 LXD

LXD je správce virtuálních kontejnerů nové generace. Poskytuje tedy virtualizaci na úrovni jádra operačního systému. Linux kontejnery se zde přibližují virtuálním strojům a jejich možnostem. Jedná se o projekt založený společností Canonical Ltd. Kontejnery široké škály distribucí jsou již předpřipraveny v podobě virtuálních obrazů. Základem je výkonné a jednoduché rozhraní REST API. Uvnitř LXD pracuje tzv. privilegovaný démon, který pomocí zmiňovaného REST API poskytuje komunikaci kontejneru uvnitř Unixu či prostřednictvím dostupné sítě. LXD nevzniklo překonfigurováním všeobecně známého LXC, nýbrž pracuje jako nadstavba tohoto nástroje. LXD přímo využívá nástroj LXC prostřednictvím *liblxc* a jeho vazby na jazyk Go pro tvorbu a správu kontejnerů. LXD tak můžeme označit jako alternativní nástroj k LXC, který pracuje s šablonami, přidanými funkcemi a ovládáním pomocí internetové sítě. Aktuální verze LXD je 4.0 a je podporována až do června roku 2025, přičemž dochází k pravidelným aktualizacím bezpečnostních oprav, ovšem nové přidané funkce jsou dostupné vždy v balíčku funkcí, který je vydáván přibližně každý měsíc. V rámci LXD je možné využívat cloudové platformy OpenNebula a OpenStack. [25]

Podle Ivanova ([26], s. 8-10) je v současné době nasazení aplikací uvnitř Linux kontejneru velkým trendem. Především se k tomuto trendu dospělo díky neustálému vývoji kontejnerizačních nástrojů a snadnému použití. Technologie založené na hypervizoru KVM a Xen dokázaly vyřešit většinu požadavků a omezení linuxového jádra, avšak i přes tuto skutečnost s příchodem jmenných prostorů jádra v podobě kontejnerů se stala trendem tzv. lehká virtualizace, která je založena na virtualizaci v úrovni jádra operačního systému.

Klasický hypervizor má oproti LXC podle Ivanova ([26], s. 8-10) hlavní výhodu v možnosti spouštění různých platforem operačních systémů na fyzickém hardware, detailnější kontrolu nad alokací systémových prostředků a v případě kolize jádra je díky izolaci procesu hostitelský systém neovlivněn. Ovšem oproti tomu LXC oplývá

jednodušší správou a menší složitostí, zabere daleko méně prostoru na disku, startovací časy kontejnerů jsou v řádech milisekund a poskytuje nativní podporu jádra.



Obr. 14 Architektura Linux Containers (LXC).

Zdroj: Vlastní zpracování v nástroji Visio Professional dle Practical LXC and LXD [27].

Mezi požadavky pro správné fungování LXD patří instalace software Go, minimální podporovaná verze jádra 3.13, jmenné prostory (pid, net, uts, ipc a mount) a další funkce, které jsou potřebné pro LXC. Dále LXD vyžaduje nainstalovanou verzi LXC 3.0.0 či vyšší a pro nejnovější Linux distribuce i LXCFS. Dále je doporučována instalace QEMU 4.2 nebo novější. [28]

Podporované šablony operačních systémů jsou dostupné na serveru s obrazy linuxových distribucí. V případě LXD je při vytváření kontejneru pohodlně k dostání kontejnerová šablona s instalačním obrazem za pomoci příkazu *images:* nebo pro LXC uživatele příkazem *lxc-download*. Jako zástupce dostupných šablon lze jmenovat Alpine, Archlinux, Centos 7-8, Debian, Fedora, Kali, Mint nebo Ubuntu. [29]

4 Teoretická východiska pro testování výkonnosti operačních systémů

V rámci této kapitoly jsou popsány testy pro virtualizační platformy, které budou prováděny při testování výkonnosti virtualizovaných operačních systémů, což je předmětem praktické části diplomové práce. Součástí této kapitoly je výčet a popis testovacích nástrojů, které představují ideální řešení pro otestování výkonnosti operačních systémů napříč různými platformami.

4.1 Testované parametry a hardware fyzického stroje

Výkonnostní testování se zakládá na ověření výkonu jednotlivých počítačových komponent, které jsou klíčové pro běh virtuálních strojů. Mezi testované komponenty patří centrální procesorová jednotka (CPU), operační paměť (RAM), pevný disk (HDD), grafický procesor (GPU) a síťová karta (NIC).

Testy budou realizovány na osobním počítači, kterým je notebook HP Laptop 15 - db0xxx s následujícími parametry:

- Základní deska: HP 84AD verze 85.26 se systémem BIOS Insyde F.22 a režimem UEFI
- Procesor: AMD A9-9425 Radeon R5 - 5 výpočetních jader (2C + 3G) rychlost 3,10 GHz, rychlost turbo 3,7 GHz, Paměť cache: L1 2 x 128 KB, L2 2 x 1024 KB
- Operační paměť: Samsung 1333,3 MHz 8 GB DDR4 SDRAM PC4-21300
- Pevný disk: Toshiba MQ04ABF100 - 931,51 GB, 5400 otáček za minutu
- Grafická karta: Radeon 520 2048 MB a AMD Radeon R5 Graphics 512 MB
- Síťová karta: Realtek RTL8822BE 802.11ac PCIe Adapter

Hostitelský počítač disponuje operačním systémem Microsoft Windows 10 Home verze 10.0.19041 sestavení 19041.

4.2 Teorie testování

Testování probíhalo vždy ve dvaceti cyklech pro dosažení co nejpřesnějších a směrodatných výsledku. Mezi každou soustavou testů byl proveden restart hostovaného operačního systému a testy byly zahájeny po ustálení běhu operačního systému, čehož bylo zjištěno sledováním vytížení systémových prostředků. Hostovanému stroji byla vždy přidělena totožná konfigurace a hardwarové prostředky. V případě každého hostitelského systému byla provedena pro jednotlivá virtualizační řešení tzv. fresh instalace operačního systému, to znamená, že systémy nebyly mezi nástroji migrovány a importovány.

Testovanými operačními systémy byly zvoleny zástupci platforem Windows a Linux. Konkrétně se jednalo o tyto 64bitové distribuce:

- CentOS 8 verze 8.3.2011 s jádrem 4.18.0-240.15.1.el8.x86_64
- Windows 10 Home verze 10.0.19042 sestavení 19042

Vzhledem k informačním technologiím, které byly právě k dispozici, probíhalo veškeré testování na výše zmiňovaném zařízení HP Laptop 15 s operačním systémem Windows 10 Home a hostitelský systém CentOS byl vytvořen virtuálně pomocí virtualizační platformy VMware Workstation Pro 16.1.0. Z tohoto důvodu není možné zahrnout jako součást testování testy nativních operačních systému a porovnávat je s virtuálními stroji. Díky odlišné hardwarové konfiguraci by toto porovnání nebylo relevantní. Mezi operačním systémem fyzického stroje a virtuálním hostitelským systémem CentOS byla vytvořena sdílená složka konfigurací v nástroji VMware Workstation Pro a následně příkazem `sudo mount -t fuse.vmhgfs-fuse .host:/ /mnt/hgfs -o allow_other` zavedena v příkazovém řádku systému CentOS. Tím bylo docíleno sdílení a efektivnějšího využití instalačních souborů při instalaci hostovaných operačních systémů.

4.3 Hardwarová konfigurace virtuálních strojů

Všechny virtuální stroje byly vybaveny dvěma jádry procesoru, 2048 MB operační paměti RAM a virtuálním pevným diskem o velikosti 60 GB. Pevný disk

hostovaného operačního systému CentOS 8 používal souborový systém XFS, který je v případě této distribuce doporučený vývojáři Linux. Hostovaný operační systém Windows 10 Home pracoval se souborovým systémem NTFS (New Technology File System). V případech, kdy virtualizační nástroje podporovaly 3D akceleraci, byla tato konfigurace virtuálním strojům přidělena. V rámci některých virtualizačních platforem bylo nutné doinstalovat doplňující ovladače pro správnou kompatibilitu mezi různými platformami operačních systémů.

4.4 Instalace a konfigurace testovaných virtualizačních platforem

V této podkapitole je popsán postup instalace virtualizačních platforem, jejich konfigurace a případné doplnění o přídatné nástroje nebo rozšíření.

4.4.1 VMware Workstation Player 16.1.0

Tento volně dostupný virtualizační nástroj byl jako zástupce z řady multiplatformních software nainstalován na oba hostitelské operační systémy. Jak CentOS 8, tak i Windows 10 jsou zároveň podporovány jako hostované systémy, tím pádem je lze otestovat v obou směrech virtualizace. V případě Windows 10 byl po instalaci hostovaného operačního systému doinstalován balíček VMware Tools, který přináší kompletní funkcionalitu tohoto virtualizačního nástroje včetně 3D akcelerace. VMware Tools byl zde po výběru v menu grafického rozhraní vložen jako CD disk prostřednictvím optické mechaniky virtuálního stroje a následně nainstalován.

V rámci CentOS 8 byla před instalací tohoto virtualizačního nástroje provedena aktualizace operačního systému pomocí příkazu *yum-update*. Následně byl stažen skriptovací soubor s příponou *.bundle* z oficiálních stránek VMware, kde byla zvolena verze pro operační systémy Linux. Tento soubor bylo nutné příkazem *chmod a+x* upravit na soubor spustitelný, díky čemuž bylo možné spustit samotnou instalaci. Před touto instalací se průvodce VMware dotáže, zda je žádoucí zároveň nainstalovat již zmiňovaný balík VMware Tools, což je odlišné oproti Windows. Dále byl proveden příkaz *yum groupinstall "Development tools"* pro doinstalování

potřebných funkcionalit v rámci linuxového jádra. Poté stačilo operační systém restartovat a při prvním spuštění VMware Workstation souhlasit s instalací modulů VMM (Virtual Machine Monitor) a VND (Virtual Network Device).

4.4.2 VMware Workstation Pro 16.1.0

Instalace a konfigurace této virtualizační platformy probíhala v podstatě identicky jako u předchozího nástroje, jehož instalace a konfigurace byla detailně popsána. Jediným rozdílem zde bylo využití časově omezené bezplatné licence, která ovšem byla pro účely testování výkonnosti operačního systému plně dostačující.

4.4.3 Oracle VM VirtualBox 6.1.16

V případě platformy Windows byl stažen instalační soubor z oficiálních stránek autorů software. Instalace proběhla s pomocí instalačního průvodce standardně. Na závěr bylo v menu grafického rozhraní přidáno virtuální CD do optické mechaniky virtuálního stroje a tím byl nainstalován balíček Guest Additions. Pomocí toho bylo zajištěno rozšíření nástroje o všechny jeho dostupné výhody.

Stejně tak jako v případě VMware Workstation byla u platformy Linux nejprve provedena kontrola aktualizací systému příkazem `yum update`, následovalo stáhnutí a instalace potřebných knihoven pomocí `yum install elfutils-libelf-devel`. Instalační soubor virtualizačního nástroje byl stažen přímo z oficiálních stránek VirtualBox. Tento soubor byl ve formátu RPM, takže nebylo nutné ho nijak upravovat a snadno se spustil instalační průvodce. Po instalaci samotného nástroje bylo stejně jako v platformě Windows vloženo instalační CD s balíčkem Guest Additions, který byl rovněž nainstalován.

Nástrojům nainstalovaným na obou platformách byl přidán navíc balíček s názvem VirtualBox 6.1.16 Extension Pack, který je multiplatformní a je ke stažení pro všechny operační systémy na jednom místě. Instalace v prostředí Windows proběhla dvojklikem na tento balíček. Co se týče CentOS 8, zde instalace vyžadovala přidání rozšiřujícího balíčku prostřednictvím Preferences v menu grafického rozhraní a přidání nového rozšíření na kartě Extensions.

4.4.4 Microsoft Hyper-V

Tento nástroj je dostupný jako součást operačního systému Microsoft Windows 10. Hyper-V stačí pouze zapnout s využitím ovládacích panelů a nástroje Zapnout nebo vypnout funkce systému Windows. Zde je možné v rámci operačního systému přidat platformu Hyper-V a nástroje pro správu technologie Hyper-V. Poté již stačí operační systém rebootovat a virtualizační nástroj je plně k dispozici. Vzhledem k tomu, že Hyper-V je součástí distribuce Windows 10 Pro, Education či Enterprise a fyzický stroj, který byl pro testování výkonnosti k dispozici, disponoval distribucí Windows 10 Home, bylo nutné pro toto testování vytvořit virtuální stroj se systémem Windows 10 Pro.

Oba testované operační systémy byly nainstalovány jako virtuální stroje první generace s konfigurační verzí 9.0.

4.4.5 QEMU/KVM

Virtualizační nástroj QEMU/KVM lze nainstalovat pouze v rámci operačního systému Linux. Nejprve bylo nutné nainstalovat potřebný balíček libvirt a grafické rozhraní virt-manager příkazem `sudo dnf install libvirt virt-manager`. Dále byl do skupiny uživatelů libvirt přidán uživatelský účet, pomocí kterého bude virtualizace prováděna. K tomu byl využit příkaz `sudo usermod -aG libvirt milan`. Následně se v přehledu aplikací zobrazil nainstalovaný Virtual Machine Manager, se kterým lze pohodlně vytvářet virtuální stroje.

Výkonnostní testování probíhalo s využitím software qemu-kvm verze 4.2.0.

4.4.6 LXD

Ke stažení tohoto virtualizačního nástroje na úrovni jádra operačního systému bylo využito doplňku snapd verze 2.49 s použitím příkazu `yum install snapd -y`. Dále byly zavedeny repozitáře EPEL příkazem `sudo yum install https://dl.fedoraproject.org/pub/epel/epel-release-latest-8.noarch.rpm`. Následně pomocí příkazů `grubby` a `echo`, které vyžadují uživatelská oprávnění root, došlo k definování zaváděcího a uživatelského prostoru pro kontejnery. Tato akce vyžadovala následný reboot operačního systému. Poté již stačilo nainstalovat

samotný nástroj LXD příkazem `sudo snap install lxd`. Stejně jako QEMU/KVM vyžadoval nástroj LXD zavedení nové skupiny uživatelů lxd obsahující uživatelský účet, v rámci kterého bylo prováděno výkonnostní testování. Konfigurace kontejneru byla provedena příkazem `lxd init`. Vytvoření samotného kontejneru s názvem cent8 proběhlo příkazem `lxc launch images:centos/8/amd64 cent8`. Pro plnou funkcionalitu kontejneru již stačilo nastavit bránu firewall pomocí příkazu `sudo firewall-cmd --add-interface=lxdbr0 --zone=trusted`, čímž došlo k nastavení defaultního bridge.

Následné připojení do kontejneru pod uživatelským účtem milan bylo provedeno pomocí příkazu `lxc exec cent8 -- su --shell /bin/bash --login milan`. Pro přístup pomocí root uživatele sloužil příkaz `lxc exec cent8 -- sudo /bin/bash`.

4.5 Testovací software

Tato kapitola obsahuje popis testovacích softwarů, které byly vybrány jako optimální nástroje pro výkonnostní testování parametrů operačních systémů. Výběr těchto nástrojů byl omezen na multiplatformní software pro dosažení co největší porovnatelnosti výsledků jednotlivých operačních systémů.

4.5.1 GeekBench – CPU

Tento nástroj slouží k testování výkonu procesoru. Pro účely praktické části diplomové práce byl použit v aktuálně dostupné verzi 5.4.0. Díky své široké multiplatformitě umožňuje testovat a porovnávat výkon napříč velkým množstvím zařízení s různými operačními systémy či architekturami. GeekBench podporuje platformy Windows, Linux, macOS, iOS nebo například Android. Pomocí GeekBench lze provádět srovnávací testy, které měří výkon procesoru při využití jednoho i více jader hodnocený v bodech pro každou variantu zvlášť. Pro zobrazení výsledků je v bezplatné verzi software nutné internetové připojení, protože skóre procesoru je nahráno na webové stránky GeekBench, kde je k dispozici detailní popis výsledků. Čím vyšší skóre, tím lepší výsledek a s ním spojený i výkon procesoru. Například dvojnásobné skóre znamená dvojnásobný výkon. V operačním systému Windows je software spuštěn v grafickém rozhraní a

výsledek je automaticky odeslán do internetového prohlížeče. Jinak je tomu v CentOS 8, kde vše probíhá v příkazovém řádku i co se týče konečného výsledku, který je zobrazen v podobě URL adresy odkazující na webovou stránku s výsledným skórem. [30]

Testovací úlohy prováděné tímto nástrojem dělí autoři software do tří sekcí. První sekcí je šifrování, kde dochází k měření výkonu kryptografických instrukcí. V druhé sekci jsou prováděny úlohy celočíselných instrukcí náročné na procesor. Poslední sekce je zaměřená na testování výkonu procesoru při vykonávání operací s plovoucí desetinnou čárkou, které jsou důležité například při hraní her nebo vytváření digitálního obsahu. Nově je v testování zahrnuta například aplikační oblast rozšířené reality či strojové učení. [31]

4.5.2 Novabench – CPU, RAM, HDD

Novabench je komplexním testovacím nástrojem, který provádí sadu testů zaměřených na procesor, operační paměť a pevný disk. Bezplatně je dostupný pro platformu Windows, kde jsou podporovány 64bitové verze operačních systémů. Využití na platformě Linux je zpoplatněno, a tak byl tento nástroj v praktické části diplomové práce používán pouze v rámci testování výkonnosti operačních systémů Windows v roli virtuálního stroje. Realizace testů probíhala ve verzi 4.0.9.

V případě testů CPU Novabench využívá všeobecných instrukcí a FPU, čímž vyhodnotí obecný výkon procesoru, řízení paměti a dalších proměnných. Při testech operační paměti RAM je měřen výkon přenosové rychlosti paměti. U pevného disku dochází k přímému měření sekvenční rychlosti čtení a zápisu na disk. Výhodou nástroje Novabench je možnost jeho práce off-line a uložení všech naměřených výsledků přímo v přehledu provedených testů. Tím je možné provést pohodlné porovnání vývoje výkonu počítače. [32]

4.5.3 PerformanceTest – CPU

Software od společnosti PassMark poskytuje možnost multiplatformního testování výkonu v podstatě všech komponent počítače. Je k dispozici pro platformy Windows, Linux, macOS, Android či iOS. PerformanceTest je placeným nástrojem,

ovšem prvních třicet dnů je možné vyzkoušet jeho fungování zdarma, čehož bylo využito k testování výkonnosti procesoru v praktické části diplomové práce. Nainstalována byla verze 10.1 sestavení 1000.

Při každém testování proběhla sada osmi testů zaměřených na celočíselnou i neceločíselnou matematiku, výpočet prvočísel, dlouhé instrukce (SSE, AVX, FMA), kompresi dat, šifrování, třídění souborů a simulaci fyziky. Z těchto testů PerformanceTest vypočítá dvě bodová skóre výkonnosti procesoru. Konkrétně se v jednom případě jedná o porovnání pouze počítačových procesorů a v druhém případě je potom porovnávána výkonnost i s mobilními zařízeními. Testování probíhalo v systému Windows pomocí grafického rozhraní aplikace, na rozdíl od CentOS 8, kde bylo nutné nástroj ovládat v příkazovém řádku. Výhodou tohoto nástroje je možnost testování off-line či přímo z USB zařízení bez nutnosti instalace. [33]

Pro spuštění tohoto software bylo nutné v případě CentOS 8 stáhnout dodatečné knihovny s názvem libncurses.so.5. K jejich instalaci sloužil příkaz *sudo yum install libncurses**.

4.5.4 Y-cruncher – HDD

Pro testování rychlosti zápisu a čtení pevného disku byl vybrán nástroj y-cruncher v nejnovější dostupné verzi 0.7.8 a sestavení 9507. Nástroj, jehož počátky sahají do roku 2009, je schopný pracovat na platformách Windows a Linux. Může sloužit také pro testování CPU, kde se proslavil jako první vícevláknový srovnávací testovací nástroj pro multijádrové procesory založený na výpočtu čísla π . [34]

Nástroj byl dokonce použit při stanovení několika světových rekordů v délce výpočtu desetinných míst čísla π . Posledním rekordem se stal v lednu 2020 výpočet T. Mullicana s 50×10^{12} desetinnými místy, který probíhal 303 dní a zapojeno bylo 48 HDD. [35]

Výkonnostní testování HDD v praktické části diplomové práce bylo prováděno funkcí I/O Benchmark, která měří šířku pásma disku, rychlost sekvenčního zápisu a čtení, prahovou rychlost zápisu a čtení. Dalším výkonnostním ukazatelem, který y-cruncher v tomto testování vypočítá, je poměr relativní rychlosti disku

k výpočetnímu výkonu procesoru. Vzhledem k tomu, že každý z testovaných operačních systémů zabíral různou část paměti RAM, byla pro největší možnou porovnatelnost výsledků přiřazená operační paměť nastavena vždy na 768 MB. Poté program vytvořil soubor o velikosti 6 GB, se kterým při výkonnostní analýze pracoval. Software při práci v operačním systému Windows vyžaduje administrátorská oprávnění. [36]

4.5.5 Fping/ping – odezva NIC

Měření rychlosti síťové odezvy bylo pro přesnější výsledné hodnoty provedeno v rámci platformy Windows s využitím nástroje Fping ve verzi 3.0. Na rozdíl od standardního příkazu ping, který poskytuje výsledky v celých milisekundách, testuje Fping síťovou odezvu v milisekundách s přesností na jedno desetinné místo. Software, jehož autorem je Wouter Dhondt, odesílá ICMP pakety na stanici v síti, kterou uživatel určí IP adresou. První verze tohoto software vznikla již v roce 1992. Po stažení aplikace byl software vložen do složky systému Windows a podsložky System32. Poté mohl být v příkazovém řádku používán na jakémkoliv místě v adresářové struktuře. Defaultně program Fping odešle 4 pakety a vypočítá minimální, maximální a průměrnou dobu odezvy. Čím nižší odezva je, tím můžeme výsledek testování NIC považovat za lepší.

V operačním systému CentOS 8 bylo využito programu ping, který je již součástí tohoto operačního systému. Zde nebylo třeba žádného dodatečného software vzhledem k tomu, že program ping zde změří síťovou odezvu v milisekundách s přesností na tři desetinná místa. U příkazu ping stačilo pouze pomocí nastavení `-c 4` omezit počet odeslaných paketů na stejný počet, jako tomu je v případě nástroje Fping.

4.5.6 iPerf – datová propustnost NIC

Datová propustnost síťové karty byla analyzována s využitím nástroje iPerf verze 3.1.3, což je software pro aktivní měření maximální dosažitelné šířky pásma v sítích IP. Software iPerf je multiplatformní a je dostupný pro platformy Windows, Linux, Android, iOS, macOS, FreeBSD a Docker. Každý test probíhá odesláním

datových paketů po dobu deseti sekund ze stanice klienta do stanice serveru. Mapování průběhu přenosu je zapsáno za každou sekundu a výsledkem je množství přenesených dat s šířkou pásma.

Jako stanice serveru figuroval v případě výkonnostního testování propustnosti síťové karty notebook v místní síti, kde byl nástroj spuštěn v příkazovém řádku příkazem *iperf3 -s*. Stanicí klienta byl samotný testovaný virtuální stroj, na kterém byl příkazem *iperf3 -c 192.168.0.121* v příkazovém řádku spuštěn testovací software. Ze stanice klienta v roli odesílatele byly odesílány pakety na IP adresu serveru zastupujícího roli příjemce prostřednictvím TCP portu 5201. [37]

4.5.7 GpuTest – GPU

GpuTest je jedním z mála volně dostupných multiplatformních nástrojů kompatibilních s platformami Windows, Linux a macOS. K výkonnostnímu testování využívá zátěžové testy GPU a srovnávací testy OpenGL s výsledky v bodech a FPS (Frames Per Second). Mezi nejpopulárnější nabízené testy patří FurMark a TessMark, které jsou známé v prostředí Windows. Pro testování virtuálních strojů byly zvoleny testy Plot3D a Triangle, které využívají OpenGL 2.1 nebo 3.2. Skóre všech testů je ukládáno do souboru v praktickém formátu CSV, který je součástí zip balíčku staženého z oficiálních stránek autorů software. K dispozici je také textový soubor s návodem na použití software a příklady příkazů pro případné spuštění testů bez grafického rozhraní. Na platformě Windows nabízí GpuTest grafické rozhraní, kde lze pohodlně nastavit typ testu, rozměr obrazovky, srovnávací test s výsledkem v bodech a antialiasing. [38]

Měření výkonu grafické karty bylo v praktické části diplomové práce realizováno ve verzi software GpuTest 0.7.0 s rozlišením 1920 × 1080 pixelů a s vypnutým antialiasingem. Spuštěn byl nejprve méně náročný test Triangle, který vykresluje chromatický trojúhelník. Následně probíhal test Plot3D, který simuluje průlet 3D grafem. V případě CentOS 8, kde není dostupné grafické rozhraní aplikace, byl test spuštěn příkazy *GpuTest /test=triangle /width=1920 /height=1080 /fullscreen /benchmark* a *GpuTest /test=plot3d /width=1920 /height=1080 /fullscreen /benchmark*.

4.5.8 RAMspeed – RAM

Jako testovací software pro měření výkonu operační paměti byl použit open source program s podporou tří hardwarových platform i386, amd64 a alpha. Nejnovější verze tohoto software, které byly k výkonnostnímu testování použity, nabízejí 18 výkonnostních testů paměti RAM. V případě platformy Windows se jednalo o verzi s označením 1.1.1 a platforma Linux pracovala s verzí 3.50. I přes různá označení verzí se jedná o totožný software pracující v příkazovém řádku, což můžeme považovat za jeho výhodu pro jednoduchost a kompaktní použití. Pro testování paměti RAM v praktické části diplomové práce byly zvoleny testy INTmem a FLOATmem. Tyto testy pracují s lineárními sekvenčními datovými toky využívajícími operační paměť a měří tak její rychlost zápisu i čtení. Test INTmem pracuje s celými čísly, naopak test FLOATmem měří výkon s čísly desetinnými. Test s celými čísly byl spuštěn příkazem *ramsmg -b 3* a test s desetinnými čísly příkazem *ramsmg -b 6*. [39]

5 Výkonnostní testování virtualizačních platforem

Obsahem této kapitoly je vyhodnocení výkonnostních testů operačních systémů Microsoft Windows 10 Home a CentOS 8, které byly realizovány s využitím virtualizace pomocí virtualizačních platforem. Testy probíhaly v režimech CentOS – CentOS, CentOS – Windows, Windows – CentOS, Windows – Windows.

Testované 64bitové operační systémy běžely v hostitelském operačním systému fyzického stroje, kde nebyla spuštěna žádná další aplikace, která by spotřebovávala systémové prostředky. U všech hostovaných operačních systémů byla provedena čistá instalace a nebyl instalován žádný dodatečný software. Mezi každou soustavou testů byl proveden restart hostovaného operačního systému. Testování nativního operačního systému Windows nebylo provedeno vzhledem k ovlivnění porovnatelnosti výsledků z důvodu nemožnosti snížení kapacity operační paměti fyzického stroje, kterým byl notebook HP Laptop 15. Hostitelský operační systém CentOS běžel jako virtuální stroj na fyzickém hardware.

Výsledky výkonnostního testování jsou v této kapitole zpracovány v tabulkách obsahujících pro každou virtualizační platformu a roli operačních systémů průměrnou hodnotu měření, směrodatnou odchylku, rozptyl, dolní mez, horní mez, kvartily a variační rozpětí. Pro lepší analýzu těchto charakteristik popisné statistiky jsou výsledky vizualizovány pomocí krabicových grafů.

Krabicové grafy reprezentují výsledky jednotlivých virtualizačních platforem a operačních systémů pomocí kvartilů. „Krabicová“ část grafu je vždy tvořena vlevo prvním kvartilem a vpravo třetím kvartilem. Plná čára uvnitř krabicového grafu představuje druhý kvartil neboli medián. Přerušovaná čára potom znázorňuje aritmetický průměr. Vertikální přímky spojené úsečkou (vousem) vedoucí z „krabicové“ části grafu označují vlevo dolní mez a vpravo horní mez získaných výsledků. Jednotlivé body ležící mimo krabicové grafy jsou odlehlé hodnoty statistického souboru.

5.1 Testování CPU

V této kapitole jsou vyhodnoceny výsledky výkonnostního testování operačních systémů se zaměřením na výkon procesoru. Testování probíhalo pomocí software GeekBench, který měřil výkon operačního systému s využitím jednoho jádra a následně s využitím dvou jader. Dalšími testovacími nástroji byly software Novabench a PerformanceTest. Všechny naměřené hodnoty jsou udávány v bodech.

5.1.1 GeekBench jedno jádro CPU

V měření výkonnosti CPU s využitím jednoho jádra pomocí nástroje GeekBench se s nejlepším průměrným výsledkem umístil hostovaný operační systém CentOS virtualizovaný pomocí software VirtualBox, který byl spuštěn v platformě Windows. Nejhorších výsledků dosáhl software Hyper-V s hostovaným operačním systémem CentOS a hostitelským operačním systémem Windows. Operační systém CentOS v roli hostovaného systému dosáhl kromě platformy Hyper-V lepších výsledků než operační systém Windows. Nízký výkon lze systému CentOS v případě platformy Hyper-V přisuzovat díky skutečnosti, že se jedná o virtualizační nástroj vyvíjený společností Microsoft a jeho primárním zaměřením je virtualizace systémů Windows.

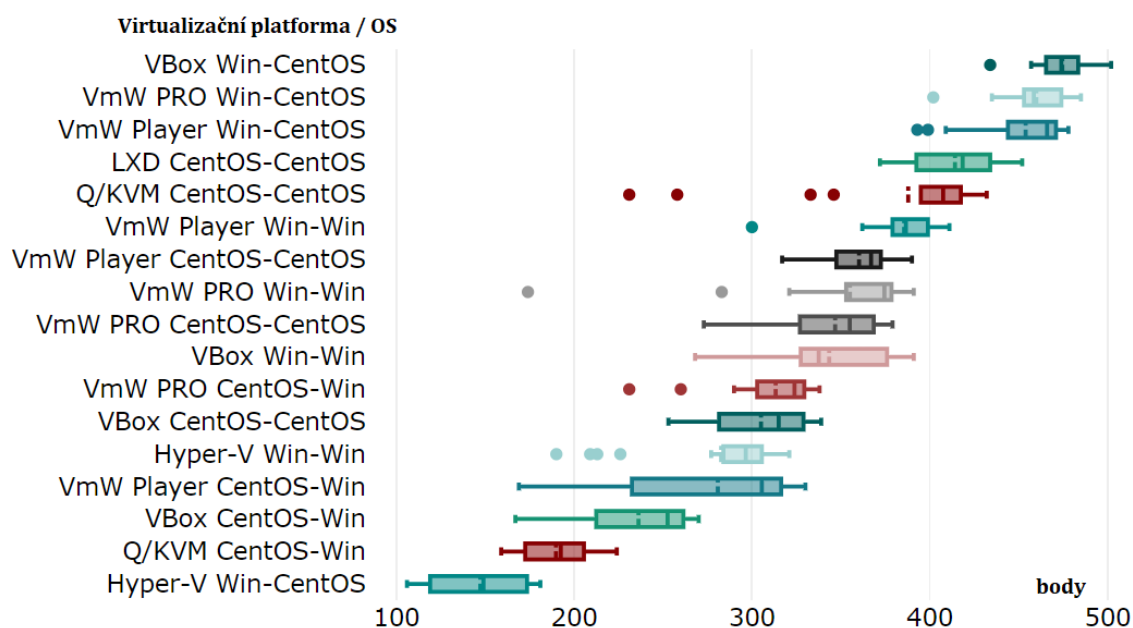
Virtualizační platforma Hyper-V se umístila s nejhorším průměrným výsledkem 147,3 bodů, který představoval přibližně 31 % průměrného výsledku výkonu CPU naměřeného s platformou VirtualBox, která dosáhla nejlepších statistických výsledků.

Tabulka 2 Výsledky výkonnostního testování s využitím nástroje GeekBench pro výkon CPU při použití jednoho jádra.

Virtualizační platforma / OS	Průměr	Sm. odch.	Rozptyl	Dolní mez	První kvartil	Druhý kvartil	Třetí kvartil	Horní mez	Var. rozpětí
VBox Win-CentOS	474,6	15,7	245,0	434,0	466,8	474,0	482,8	502,0	68,0
VmW PRO Win-CentOS	460,0	18,4	339,8	402,0	453,5	458,5	473,0	485,0	83,0
VmW Player Win-CentOS	454,0	25,5	648,6	393,0	445,0	466,0	470,5	478,0	85,0

Virtualizační platforma / OS	Průměr	Sm. odch.	Rozptyl	Dolní mez	První kvartil	Druhý kvartil	Třetí kvartil	Horní mez	Var. rozpětí
LXD CentOS-CentOS	414,2	24,8	616,1	372,0	392,8	418,5	432,0	452,0	80,0
Q/KVM CentOS-CentOS	387,9	53,7	2888,4	231,0	395,0	407,5	417,3	432,0	201,0
VmW Player Win-Win	385,6	23,3	540,8	300,0	379,5	386,5	399,0	411,0	111,0
VmW Player CentOS-CentOS	360,3	18,4	338,6	317,0	352,8	367,0	372,3	390,0	73,0
VmW PRO Win-Win	355,1	48,7	2370,0	174,0	353,0	374,5	378,3	391,0	217,0
VmW PRO CentOS-CentOS	346,8	27,8	772,6	273,0	327,5	355,0	366,3	379,0	106,0
VBox Win-Win	343,5	32,6	1064,9	268,0	327,8	337,5	375,5	391,0	123,0
VmW PRO CentOS-Win	313,4	26,6	708,6	231,0	306,5	324,0	329,3	338,0	107,0
VBox CentOS-CentOS	305,1	29,1	847,2	253,0	283,3	315,0	329,0	339,0	86,0
Hyper-V Win-Win	282,7	38,3	1463,7	190,0	287,5	296,5	305,3	321,0	131,0
VmW Player CentOS-Win	280,8	50,2	2520,5	169,0	237,3	305,5	315,3	330,0	161,0
VBox CentOS-Win	236,2	33,6	1130,7	167,0	216,8	252,5	260,3	270,0	103,0
Q/KVM CentOS-Win	189,8	19,3	390,3	159,0	173,8	192,5	204,8	224,0	65,0
Hyper-V Win-CentOS	147,3	27,3	745,6	106,0	120,5	149,0	173,3	181,0	75,0

Jednotky testování v bodech.



Obr. 15 Přehled výsledků provedených testů pomocí software GeekBench zaměřeného na výkon jednoho jádra CPU.

Zdroj: Vlastní zpracování na základě výsledků z realizovaných testů výkonnosti OS.

5.1.2 GeekBench všechna jádra CPU

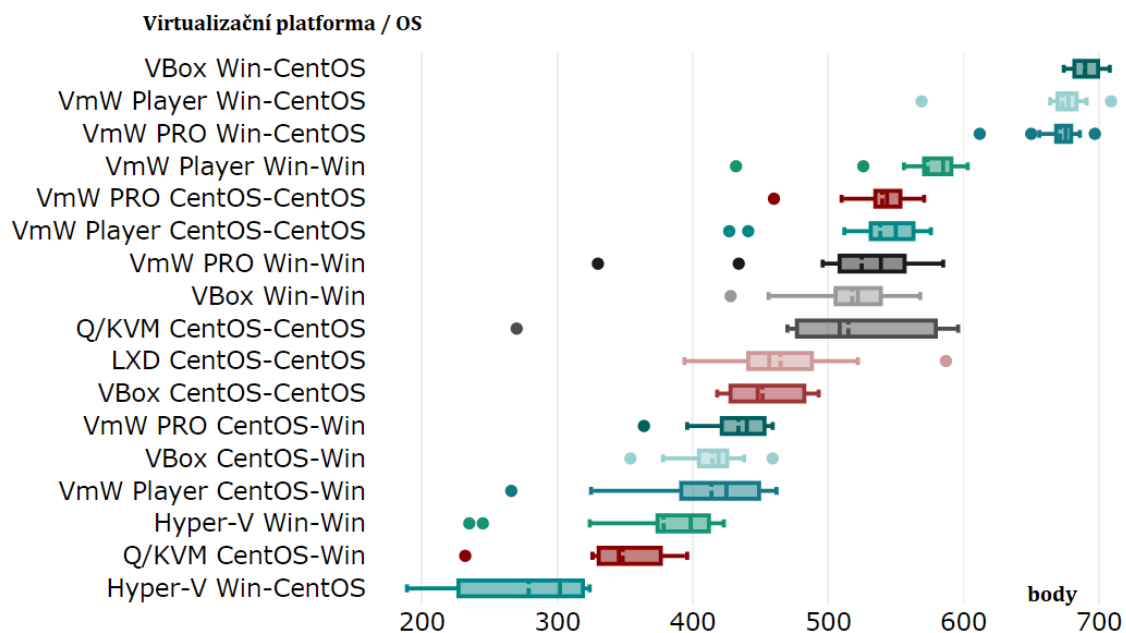
Měření výkonnosti všech jader procesoru nástrojem GeekBench ovládla opět nejlépe platforma VirtualBox v režimu Win-CentOS s průměrným výsledkem měření 689,6 bodů. Nejhoršího umístění stejně jako v případě testů jednoho jádra dosáhla platforma Hyper-V v režimu Win-CentOS s průměrným výsledkem 278,9 bodů. Zde se tedy jedná o rozdíl bezmála 60 %, z čehož lze usuzovat, že výkonnostní rozpětí jednotlivých platform s využitím všech jader procesoru je přibližně o 10 % menší než v případě práce virtualizačních platform s jedním jádrem procesoru.

Tabulka 3 Výsledky výkonnostního testování s využitím nástroje GeekBench pro výkon CPU při použití všech jader CPU.

Virtualizační platforma / OS	Průměr	Sm. odch.	Rozptyl	Dolní mez	První kvartil	Druhý kvartil	Třetí kvartil	Horní mez	Var. rozpětí
VBox Win-CentOS	689,6	9,6	91,6	674,0	682,0	690,0	699,3	708,0	34,0
VmW Player Win-CentOS	673,2	26,1	683,5	569,0	669,8	677,5	683,3	709,0	140,0

Virtualizační platforma / OS	Průměr	Sm. odch.	Rozptyl	Dolní mez	První kvartil	Druhý kvartil	Třetí kvartil	Horní mez	Var. rozpětí
VmW PRO Win-CentOS	671,3	16,9	285,6	612,0	668,8	675,5	679,3	697,0	85,0
VmW Player Win-Win	573,5	36,8	1352,6	432,0	571,0	585,0	590,0	603,0	171,0
VmW PRO CentOS-CentOS	540,0	23,8	566,3	460,0	536,0	543,5	552,8	571,0	111,0
VmW Player CentOS-CentOS	538,6	38,9	1513,2	427,0	531,8	550,0	563,0	576,0	149,0
VmW PRO Win-Win	524,8	55,9	3119,7	330,0	510,3	539,0	556,3	585,0	255,0
VBox Win-Win	517,8	34,1	1163,6	428,0	508,8	522,0	535,5	568,0	140,0
Q/KVM CentOS-CentOS	515,0	73,2	5360,2	270,0	477,5	508,5	578,3	596,0	326,0
LXD CentOS-CentOS	465,0	44,9	2015,8	394,0	443,5	456,5	483,0	587,0	193,0
VBox CentOS-CentOS	451,6	26,8	717,9	418,0	429,0	448,0	481,3	493,0	75,0
VmW PRO CentOS-Win	433,8	23,9	573,2	364,0	422,3	440,0	452,5	459,0	95,0
VBox CentOS-Win	414,6	22,7	517,0	354,0	404,8	419,0	425,3	459,0	105,0
VmW Player CentOS-Win	413,9	47,4	2242,8	266,0	393,8	425,0	446,0	462,0	196,0
Hyper-V Win-Win	378,6	53,0	2812,3	235,0	375,5	398,5	411,0	423,0	188,0
Q/KVM CentOS-Win	348,3	34,9	1285,2	232,0	330,8	345,5	374,3	396,0	164,0
Hyper-V Win-CentOS	278,9	45,4	2065,4	189,0	228,0	302,0	319,0	324,0	135,0

Jednotky testování v bodech.



Obr. 16 Přehled výsledků provedených testů pomocí software GeekBench zaměřeného na výkon všech jader CPU.

Zdroj: Vlastní zpracování na základě výsledků z realizovaných testů výkonnosti OS.

5.1.3 Novabench CPU

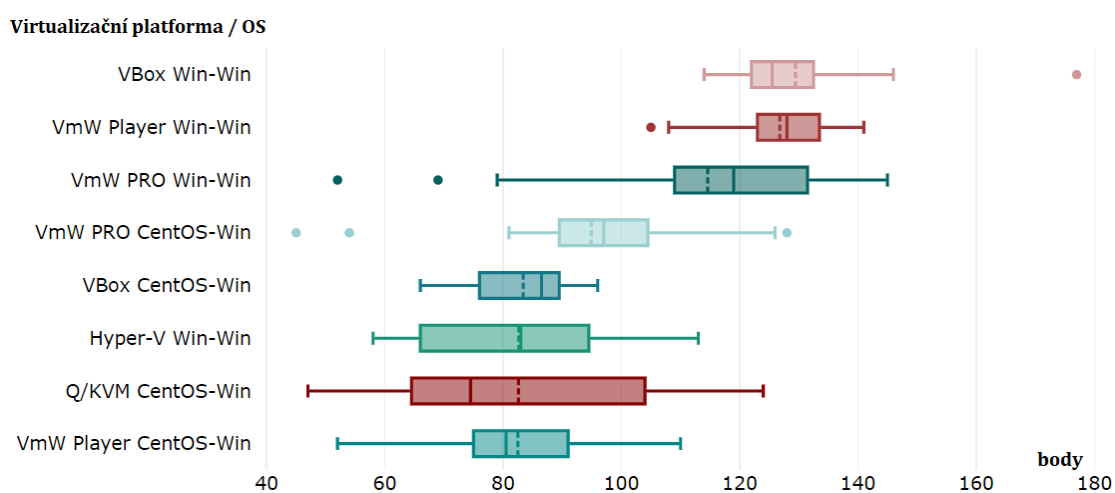
Testovací software Novabench pracoval pouze v režimu hostovaného operačního systému platformy Windows. Z tohoto důvodu zde vůbec nenalezneme virtualizační platformu LXD, která v rámci kontejnerizace umožňuje běh virtuálních strojů pouze s jádrem Linux. Nejlepšího průměrného výsledku dosáhla platforma VirtualBox v režimu Win-Win s hodnotou 129,5 bodů. Naopak nejhorších výsledků bylo naměřeno v rámci platformy VMware Player v režimu CentOS-Win s průměrnou hodnotou 82,5 bodů. O několik málo desetinných míst předběhly tuto platformu Hyper-V v režimu Win-Win a QEMU/KVM v režimu CentOS-Win.

Výkonnostní rozpětí jednotlivých platforem v tomto případě činilo přibližně 36 %, což je oproti ostatním testovacím softwarům zaměřených na výkon CPU téměř poloviční. Tuto skutečnost můžeme přisuzovat fungování nástroje Novabench pouze v rámci jedné platformy hostovaného operačního systému, což je hlavním rozdílem oproti ostatním testovacím softwarům.

Tabulka 4 Výsledky výkonostního testování CPU pomocí nástroje Novabench.

Virtualizační platforma / OS	Průměr	Sm. odch.	Rozptyl	Dolní mez	První kvartil	Druhý kvartil	Třetí kvartil	Horní mez	Var. rozpětí
VirtualBox Win-Win	129,5	13,5	182,8	114,0	122,5	125,5	131,8	177,0	63,0
Vmware Player Win-Win	126,8	10,1	101,3	105,0	123,5	128,0	133,3	141,0	36,0
Vmware PRO Win-Win	114,6	22,9	525,2	52,0	109,0	119,0	131,3	145,0	93,0
Vmware PRO CentOS-Win	94,9	18,8	353,8	45,0	90,3	97,0	104,3	128,0	83,0
VirtualBox CentOS-Win	83,4	8,2	66,9	66,0	76,0	86,5	89,3	96,0	30,0
Hyper-V Win-Win	82,7	16,3	266,8	58,0	67,0	83,0	94,3	113,0	55,0
Qemu/KVM CentOS-Win	82,6	24,2	617,4	47,0	65,3	74,5	103,0	124,0	77,0
Vmware Player CentOS-Win	82,5	14,5	210,9	52,0	76,5	80,5	90,5	110,0	58,0

Jednotky testování v bodech.



Obr. 17 Přehled výsledků provedených testů pomocí nástroje Novabench zaměřeného na výkon CPU.

Zdroj: Vlastní zpracování na základě výsledků z realizovaných testů výkonnosti OS.

5.1.4 PerformanceTest CPU

Nejlepších výsledků v případě testovacího nástroje PerformanceTest dosahoval operační systém CentOS v roli hostovaného systému. Z virtualizačních platforem se s průměrnými 1572,8 body nejlépe umístil s velice stabilním výkonem software LXD využívající kontejnerovou virtualizaci v režimu CentOS-CentOS. Naopak nejhorší umístění připadá platformě Hyper-V, která obsadila poslední místo v režimu Win-CentOS s průměrem 634,7 bodů a předposlední místo v režimu Win-Win s průměrnými hodnotami 883,6 bodů. Testování pomocí tohoto software lze považovat za směrodatné vzhledem k rozsahu testovaných parametrů rozdělených do dílčích testů.

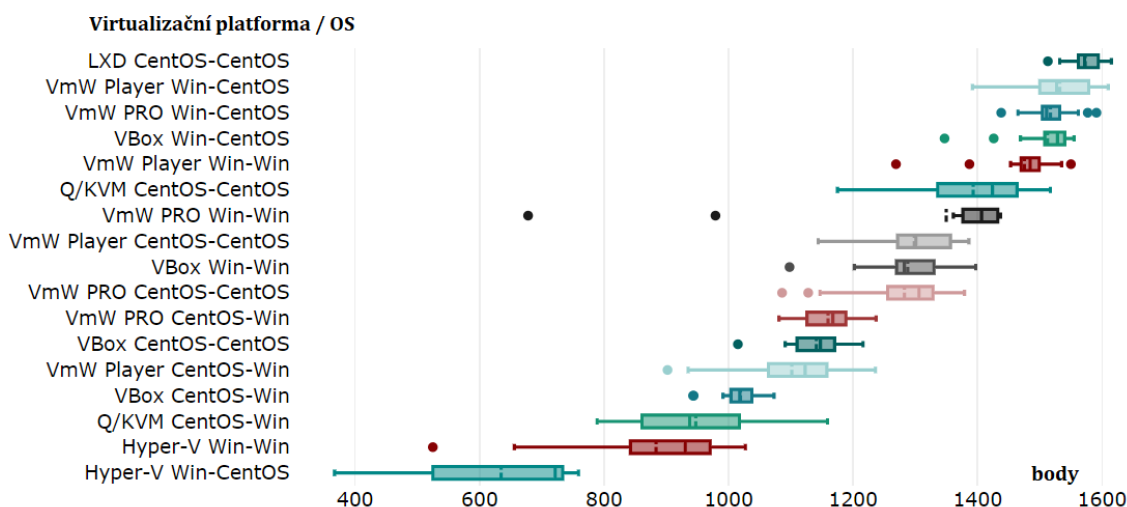
Nástroj PerformanceTest poskytoval v rámci platformy Linux výsledky testů zjišťujících výkon CPU při kompresi v jednotkách MB/s oproti platformě Windows, kde poskytoval výsledky v KB/s. Výsledky tohoto dílčího testu tedy byly převedeny na stejné jednotky. V případě platformy Windows byly hodnoty vynásobeny konstantou 1024^{-1} .

Tabulka 5 Výsledky testování výkonu CPU pomocí software PerformanceTest.

Virtualizační platforma / OS	Průměr	Sm. odch.	Rozptyl	Dolní mez	První kvartil	Druhý kvartil	Třetí kvartil	Horní mez	Var. rozpětí
LXD CentOS-CentOS	1572,8	25,2	637,0	1513	1563,5	1572,0	1593,8	1615	102,5
Vmware Player Win-CentOS	1532,1	52,1	2718,9	1392	1500,5	1527,0	1578,1	1610	218,2
Vmware PRO Win-CentOS	1517,1	35,5	1261,2	1438	1505,2	1511,2	1530,9	1591	152,5
VirtualBox Win-CentOS	1512,5	48,7	2368,3	1347	1509,8	1528,8	1540,1	1555	207,7
Vmware Player Win-Win	1475,2	57,6	3318,2	1269	1473,0	1484,5	1497,0	1550	281,0
Qemu/KVM CentOS-CentOS	1393,0	89,1	7937	1175	1344,5	1424,0	1463,5	1517	341,6
Vmware PRO Win-	1349,7	181,8	33054	678	1377,3	1406,5	1432,3	1437	759,0

Virtualizační platforma / OS	Průměr	Sm. odch.	Rozptyl	Dolní mez	První kvartil	Druhý kvartil	Třetí kvartil	Horní mez	Var. rozpětí
Win									
Vmware Player CentOS-CentOS	1298,5	62,9	3952	1144	1274,2	1301,0	1354,5	1386	242,2
VirtualBox Win-Win	1287,9	63,7	4055	1098	1270,0	1282,5	1327,5	1397	299,0
Vmware PRO CentOS-CentOS	1282,4	78,6	6171	1086	1260,8	1306,0	1327,2	1379	293,3
Vmware PRO CentOS-Win	1159,9	43,5	1893	1081	1128,5	1167,5	1187,8	1237	156,0
VirtualBox CentOS-CentOS	1141,1	46,3	2146	1015	1110,8	1147,6	1169,8	1216	201,2
Vmware Player CentOS-Win	1101,7	89,1	7934	902	1075,5	1123,0	1155,0	1236	334,0
VirtualBox CentOS-Win	1019,2	33,9	1149	943	1004,0	1018,0	1037,3	1073	130,0
Qemu/KVM CentOS-Win	947,4	103,8	11349	789	862,5	937,5	1011,8	1159	370,0
Hyper-V Win-Win	883,6	132,5	17547	525	867,8	930,5	967,3	1027	502,0
Hyper-V Win-CentOS	634,7	129,3	16710	367	525,7	721,5	732,9	759	392,5

Jednotky testování v bodech.



Obr. 18 Přehled výsledků provedených testů pomocí software PerformanceTest zaměřeného na celkový výkon CPU.

Zdroj: Vlastní zpracování na základě výsledků z realizovaných testů výkonnosti OS.

5.2 Testování HDD

Tato kapitola obsahuje vyhodnocení realizovaných výkonostních testů zaměřených na rychlost čtení a zápisu pevného disku. Výsledky byly získány pomocí měření s nástroji Y-cruncher a Novabench. První jmenovaný nástroj poskytuje výsledné hodnoty v mebibitech za sekundu. Druhý nástroj vyhodnotí výkon pevného disku v bodech. Součástí výkonostního testování nástrojem Y-cruncher je také testování poměru rychlosti HDD k výpočetnímu výkonu CPU.

5.2.1 Y-cruncher rychlost zápisu HDD

Nejvyšších rychlostí zápisu dat na pevný disk dosahovaly obě virtualizační platformy VMware. Varianta Player poskytovala rychlejší zápis na disk s průměrnou rychlostí 114,2 MiB/s v režimu Win-Win než varianta Pro s nejvyšší průměrnou rychlostí zápisu v režimu Win-CentOS se 106 MiB/s. Nejhorších rychlostí dosahoval nástroj LXD s průměrem 16,6 MiB/s. Toto zpomalení lze přisoudit vytvoření vlastního diskového oddílu pro virtualizovaný kontejner. Zde je opravdu velký výkonostní rozdíl pohybující se okolo 85 %. Platforma Hyper-V se pohybovala v pomyslném středu výkonosti oproti testování výkonu CPU, kde dosahovala spíše horších výsledků.

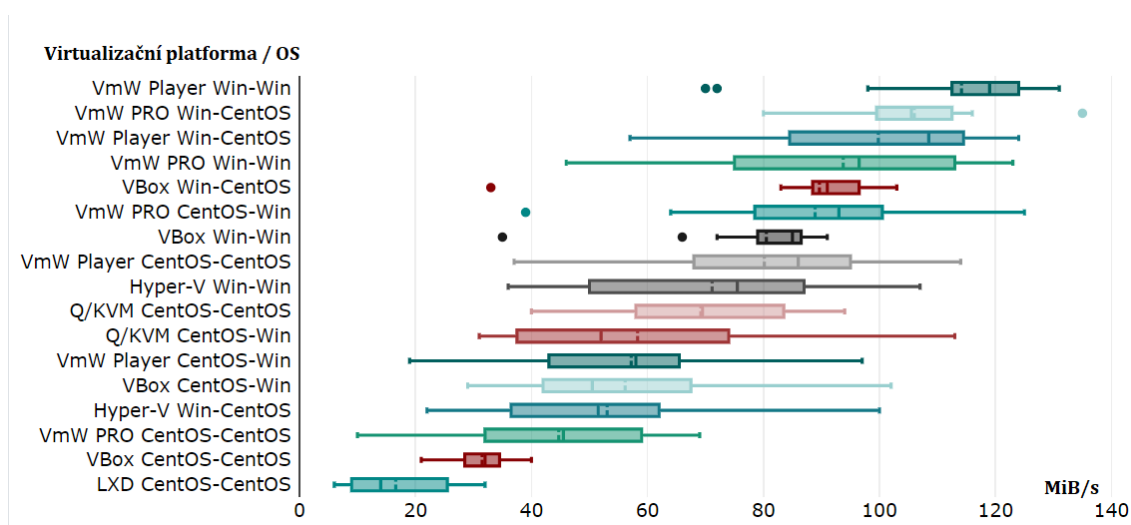
Díky vizualizaci výsledků pomocí grafů si lze povšimnout relativně velkého variačního rozpětí, které představuje rozdíl mezi největší a nejmenší naměřenou hodnotou. Ve většině případů přesahovalo variační rozpětí 60 MiB/s.

Tabulka 6 Výsledky testování rychlosti zápisu na pevný disk pomocí nástroje Y-cruncher.

Virtualizační platforma / OS	Průměr	Sm. odch.	Rozptyl	Dolní mez	První kvartil	Druhý kvartil	Třetí kvartil	Horní mez	Var. rozpětí
Vmware Player Win-Win	114,2	16,0	255,0	70,2	112,8	119,0	123,5	131,0	60,8
Vmware PRO Win-CentOS	106,0	10,6	112,4	80,3	99,4	105,5	112,3	135,0	54,7
Vmware Player Win-CentOS	99,8	20,8	432,1	56,7	84,9	108,5	113,8	124,0	67,3
Vmware PRO Win-Win	93,7	23,3	541,3	45,5	75,8	96,6	112,5	123,0	77,5
VirtualBox Win-CentOS	89,6	14,0	197,2	32,8	89,1	90,8	96,4	103,0	70,2
Vmware PRO CentOS-Win	88,8	19,3	372,2	38,5	78,9	93,0	100,0	125,0	86,5
VirtualBox Win-Win	80,3	12,1	146,3	35,1	80,2	84,9	85,9	91,1	56,0
Vmware Player CentOS-CentOS	80,1	21,2	449,3	37,1	68,2	86,2	94,0	114,0	76,9
Hyper-V Win-Win	71,0	21,6	465,6	36,0	50,1	75,6	85,8	107,0	71,0
Qemu/KVM CentOS-CentOS	69,1	15,6	243,2	40,2	58,2	69,5	82,7	94,4	54,2
Qemu/KVM CentOS-Win	58,3	21,8	499,4	31,4	38,7	52,3	73,8	113,0	81,6
Vmware Player CentOS-Win	57,2	19,6	382,3	19,0	43,2	58,2	63,9	97,0	78,0
VirtualBox CentOS-Win	56,2	19,4	376,1	29,4	42,5	50,5	66,0	102,0	72,6
Hyper-V Win-CentOS	53,0	18,7	350,8	22,0	36,9	51,4	60,7	100,0	78,0

Virtualizační platforma / OS	Průměr	Sm. odch.	Rozptyl	Dolní mez	První kvartil	Druhý kvartil	Třetí kvartil	Horní mez	Var. rozpětí
Vmware PRO CentOS-CentOS	44,7	16,7	280,3	10,2	32,9	45,6	58,6	68,7	58,5
VirtualBox CentOS-CentOS	31,5	4,4	18,9	20,7	28,6	32,0	34,4	40,1	19,4
LXD CentOS-CentOS	16,6	8,6	74,1	5,9	9,3	14,2	24,8	31,7	25,8

Jednotky testování v MiB/s.



Obr. 19 Přehled výsledků provedených testů pomocí software Y-cruncher zaměřeného na rychlost zápisu HDD.

Zdroj: Vlastní zpracování na základě výsledků z realizovaných testů výkonnosti OS.

5.2.2 Y-cruncher rychlost čtení HDD

Výsledky testování rychlosti čtení z pevného disku v podstatě kopírovaly až na výjimky výkonnostní umístění jednotlivých virtualizačních platforem v rychlosti zápisu. Nyní obsadil první příčku nástroj VMware Pro v režimu Win-Win s průměrnou rychlostí čtení 301,9 MiB/s. Na posledním místě se umístil stejně jako v případě rychlosti zápisu na disk nástroj LXD s průměrem 13,6 MiB/s. Téměř všechny virtualizační platformy dosahovaly stabilních výsledků s relativně nízkou mírou variačního rozpětí.

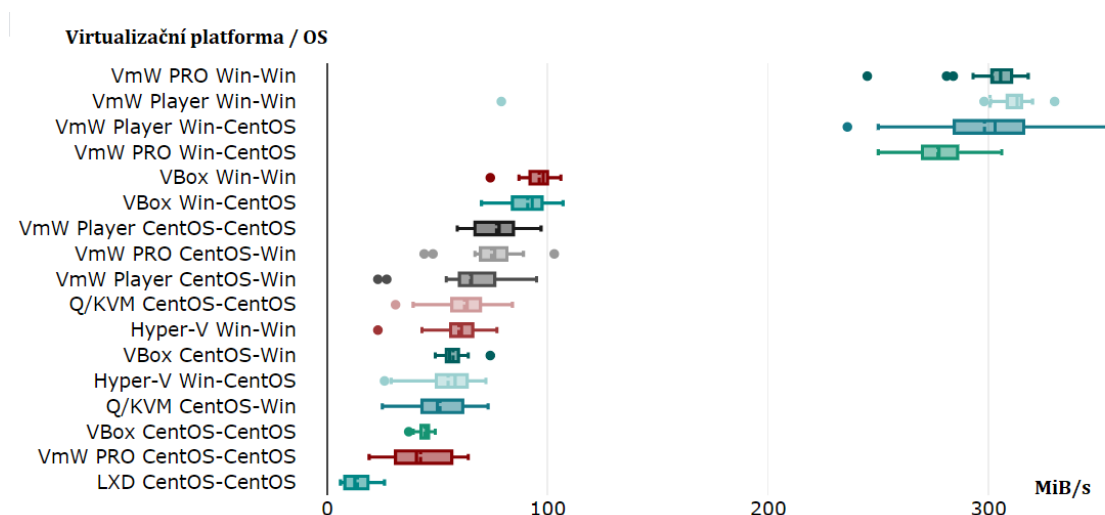
Lze si povšimnout zajímavých výsledků v případě platform VMware Player a Pro s hostitelskou platformou Windows. V této konfiguraci dosahovaly virtuální stroje nejvyšších výsledků. Zde je velké rozpětí mezi ostatními platformami, kde se umístil na dalším místě VirtualBox v režimu Win-Win s průměrem 96,2 a odstupem přibližně 68 % za nejlepší čtveřicí výsledků platform VMware.

Tabulka 7 Výsledky testování rychlosti čtení z pevného disku pomocí nástroje Y-cruncher.

Virtualizační platforma / OS	Průměr	Sm. odch.	Rozptyl	Dolní mez	První kvartil	Druhý kvartil	Třetí kvartil	Horní mez	Var. rozpětí
Vmware PRO Win-Win	301,9	16,2	262,6	245,0	301,8	305,5	310,3	318,0	73,0
Vmware Player Win-Win	300,7	51,2	2620,2	79,4	308,8	313,0	315,0	330,0	250,6
Vmware Player Win-CentOS	298,2	26,9	723,8	236,0	284,8	303,0	315,5	354,0	118,0
Vmware PRO Win-CentOS	277,1	13,1	172,0	250,0	270,5	277,5	286,0	306,0	56,0
VirtualBox Win-Win	96,2	7,0	49,2	73,8	92,3	98,4	99,9	106,0	32,2
VirtualBox Win-CentOS	90,9	9,0	80,4	70,0	84,2	92,9	97,4	107,0	37,0
Vmware Player CentOS-CentOS	76,7	10,4	107,7	58,5	67,2	77,5	83,9	97,1	38,6
Vmware PRO CentOS-Win	74,6	12,6	159,5	43,7	69,9	76,3	81,3	103,0	59,3
Vmware Player CentOS-Win	65,0	17,0	289,8	22,6	60,5	65,8	75,2	94,9	72,3
Qemu/KVM CentOS-CentOS	62,2	12,4	154,3	31,2	56,9	63,5	69,0	84,1	52,9
Hyper-V Win-Win	59,6	11,6	134,1	23,3	56,5	60,6	64,8	77,0	53,7
VirtualBox CentOS-Win	57,1	5,4	28,9	48,9	53,9	55,5	59,4	74,4	25,5
Hyper-V	54,8	12,2	148,2	26,0	49,4	58,3	63,0	71,7	45,7

Virtualizační platforma / OS	Průměr	Sm. odch.	Rozptyl	Dolní mez	První kvartil	Druhý kvartil	Třetí kvartil	Horní mez	Var. rozpětí
Win-CentOS									
Qemu/KVM CentOS-Win	51,1	12,2	156,7	24,9	43,2	50,2	61,5	73,1	48,2
VirtualBox CentOS-CentOS	44,3	3,0	8,9	36,9	42,8	45,0	46,2	49,1	12,2
Vmware PRO CentOS-CentOS	42,3	13,6	184,4	19,4	31,2	40,3	56,2	64,1	44,7
LXD CentOS-CentOS	13,6	6,2	38,2	6,0	8,1	12,8	17,0	25,6	19,6

Jednotky testování v MiB/s.



Obr. 20 Přehled výsledků provedených testů pomocí software Y-cruncher zaměřeného na rychlost čtení HDD.

Zdroj: Vlastní zpracování na základě výsledků z realizovaných testů výkonnosti OS.

5.2.3 Y-cruncher poměr rychlosti disku k výpočetnímu výkonu CPU

Testování relativního poměru rychlosti disku k výpočetnímu výkonu CPU je měřítkem reprezentujícím, která komponenta systému pracuje rychleji a jak se tyto komponenty při jejich kooperaci vzájemně ovlivňují. Práce procesoru totiž úzce souvisí s rychlostí pevného disku a naopak.

Pokud je výsledný poměr menší než 1, znamená to, že pevný disk pracuje pomaleji než procesor. V takovém případě je slabinou systému šířka pásma disku. Naopak

výsledný poměr větší než 1 značí rychlejší práci pevného disku, než je výkon procesoru. V tomto případě je problémem systému nízký výpočetní výkon CPU. U menších výpočtů, které zabírají řádově do desetinásobku operační paměti, se můžeme spokojit s poměrem okolo 1. Pro velmi náročné výpočty je potřebný poměr alespoň 2 a vyšší, což není případem testování v této diplomové práci.

Největšího poměru dosáhla s průměrnou hodnotou 1,6 platforma VMware Pro v režimu CentOS-CentOS s opravdu velkým variačním rozpětím. Nejmenšího průměrného poměru získala závislá platforma QEMU/KVM v režimu CentOS-CentOS s výsledky o průměru 0,4. Platforma LXD dosahující nízkých výsledků při zápisu a čtení z pevného disku se umístila v pomyslném středu.

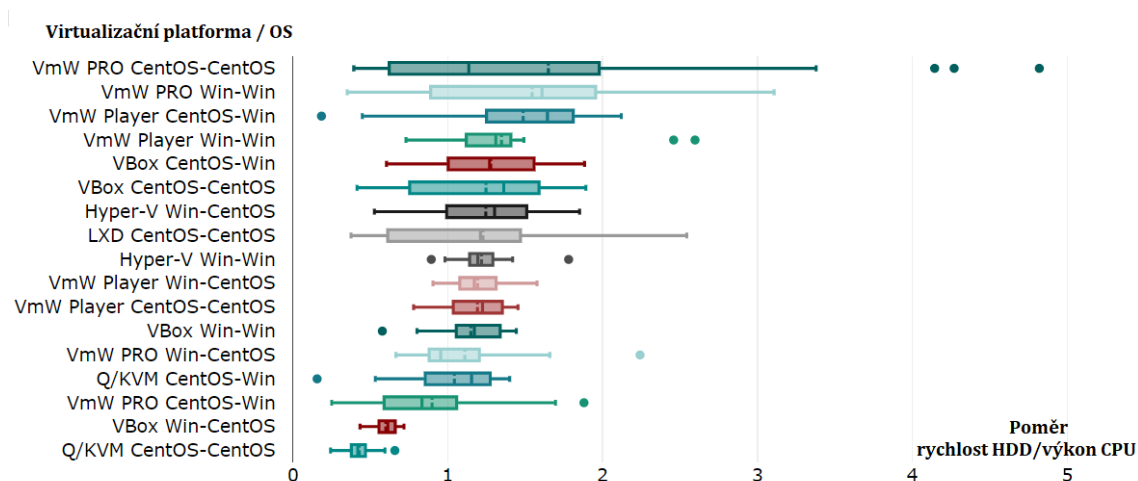
Velká většina virtualizačních platforem dosahovala poměru většího než 1, tím pádem můžeme konstatovat, že u těchto virtuálních strojů pracoval rychleji disk než procesor.

Tabulka 8 Výsledky měření relativního poměru rychlosti disku k výpočetnímu výkonu CPU pomocí nástroje Y-cruncher.

Virtualizační platforma / OS	Průměr	Sm. odch.	Rozptyl	Dolní mez	První kvartil	Druhý kvartil	Třetí kvartil	Horní mez	Var. rozpětí
Vmware PRO CentOS-CentOS	1,6	1,4	1,8	0,4	0,6	1,1	1,8	4,8	4,4
Vmware PRO Win-Win	1,5	0,7	0,4	0,4	0,9	1,6	1,9	3,1	2,8
Vmware Player CentOS-Win	1,5	0,5	0,3	0,2	1,3	1,6	1,8	2,1	1,9
Vmware Player Win-Win	1,3	0,4	0,2	0,7	1,1	1,3	1,4	2,6	1,9
VirtualBox CentOS-Win	1,3	0,4	0,1	0,6	1,0	1,3	1,5	1,9	1,3
VirtualBox CentOS-CentOS	1,2	0,4	0,2	0,4	0,8	1,4	1,6	1,9	1,5
Hyper-V Win-CentOS	1,2	0,4	0,1	0,5	1,0	1,3	1,5	1,9	1,3
LXD CentOS-CentOS	1,2	0,7	0,4	0,4	0,6	1,2	1,5	2,5	2,2

Virtualizační platforma / OS	Průměr	Sm. odch.	Rozptyl	Dolní mez	První kvartil	Druhý kvartil	Třetí kvartil	Horní mez	Var. rozpětí
Hyper-V Win-Win	1,2	0,2	0,0	0,9	1,2	1,2	1,3	1,8	0,9
Vmware Player Win-CentOS	1,2	0,2	0,0	0,9	1,1	1,2	1,3	1,6	0,7
Vmware Player CentOS-CentOS	1,2	0,2	0,0	0,8	1,1	1,2	1,4	1,5	0,7
VirtualBox Win-Win	1,1	0,2	0,0	0,6	1,1	1,2	1,3	1,4	0,9
Vmware PRO Win-CentOS	1,1	0,4	0,1	0,7	0,9	1,0	1,2	2,2	1,6
Qemu/KVM CentOS-Win	1,0	0,3	0,1	0,2	0,9	1,2	1,3	1,4	1,2
Vmware PRO CentOS-Win	0,9	0,4	0,1	0,3	0,6	0,8	1,0	1,9	1,6
VirtualBox Win-CentOS	0,6	0,1	0,0	0,4	0,6	0,6	0,7	0,7	0,3
Qemu/KVM CentOS-CentOS	0,4	0,1	0,0	0,2	0,4	0,4	0,5	0,7	0,4

Výsledné hodnoty testování jsou relativní poměry rychlosti pevného disku k výkonu procesoru.



Obr. 21 Přehled výsledků provedených testů pomocí software Y-cruncher zaměřeného na poměr rychlosti HDD k výkonu CPU.

Zdroj: Vlastní zpracování na základě výsledků z realizovaných testů výkonnosti OS.

5.2.4 Novabench HDD

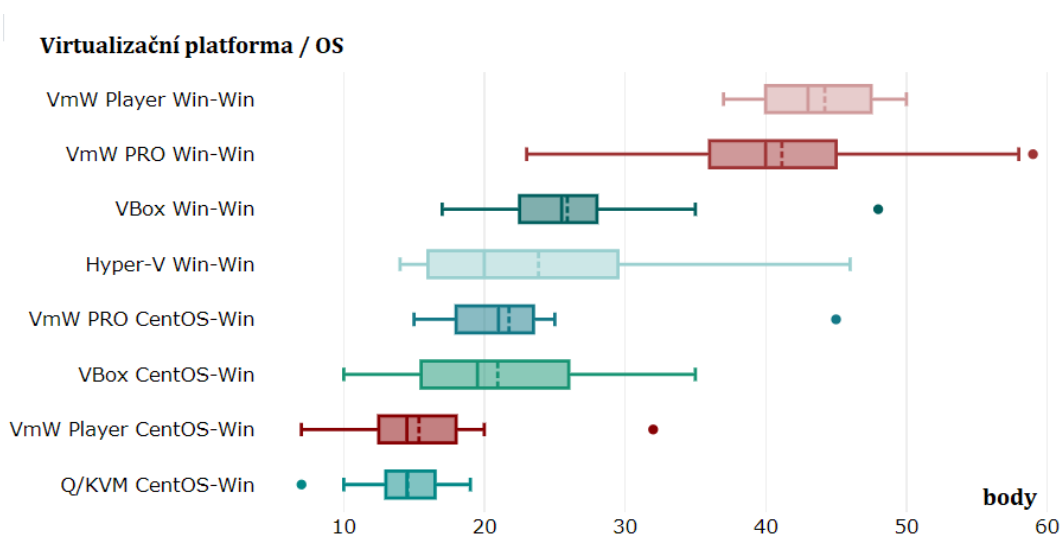
Stejně jako v případě testování CPU i zde byl nástroj Novabench použit pouze v případě hostovaného systému Windows. Zde se nejlépe umístila platforma VMware Player v režimu Win-Win s výsledkem o průměru 44,2 bodů. Nejhorší výsledky byly naměřeny v případě QEMU/KVM v režimu CentOS-Win.

V tomto testování dosáhly suverénně lepších výsledků virtuální stroje s operačním systémem Windows v roli hostitelského systému. Nicméně je patrné, že výsledky tohoto testování více méně korespondovaly s měřením prováděným nástrojem Y-cruncher. Platformy VMware Player a Pro v režimu Win-Win dosáhly o necelých 65 % lepších výsledků než platforma s nejhorším výkonem.

Tabulka 9 Výsledky výkonnostního testování pevného disku pomocí nástroje Novabench.

Virtualizační platforma / OS	Průměr	Sm. odch.	Rozptyl	Dolní mez	První kvartil	Druhý kvartil	Třetí kvartil	Horní mez	Var. rozpětí
Vmware Player Win-Win	44,2	6,1	37,6	37,0	40,0	43,0	47,3	65,0	28,0
Vmware PRO Win-Win	41,2	9,4	87,5	23,0	36,0	40,0	45,0	59,0	36,0
VirtualBox Win-Win	25,9	6,4	41,4	17,0	22,8	25,5	28,0	48,0	31,0
Hyper-V Win-Win	23,9	11,1	122,1	14,0	16,0	20,0	26,3	46,0	32,0
Vmware PRO CentOS-Win	21,8	6,2	38,2	15,0	18,0	21,0	23,3	45,0	30,0
VirtualBox CentOS-Win	21,0	6,6	43,9	10,0	15,8	19,5	25,0	35,0	25,0
Vmware Player CentOS-Win	15,4	5,2	26,5	7,0	12,8	14,5	18,0	32,0	25,0
Qemu/KVM CentOS-Win	14,6	2,8	8,2	7,0	13,0	14,5	16,3	19,0	12,0

Jednotky testování v bodech.



Obr. 22 Přehled výsledků provedených testů pomocí software Novabench zaměřeného na výkon HDD.

Zdroj: Vlastní zpracování na základě výsledků z realizovaných testů výkonnosti OS.

5.3 Testování NIC

Při měření výkonu síťové karty byla měřena rychlost odezvy v lokální i veřejné síti prostřednictvím nástroje Fping v případě operačního systému Windows a nástrojem ping v operačním systému CentOS. Oba tyto nástroje pracují na naprosto stejném principu, a tak je možné jejich výsledky zařadit do vzájemného porovnávání. Výsledky testování těmito nástroji jsou vyjádřeny v jednotkách milisekund. V případě síťové odezvy platí, že lepších výkonů dosahuje virtuální stroj s nižší průměrnou hodnotou výsledků získaných testováním.

Jako další nástroj pro ověření výkonu síťové karty posloužil software iPerf, který měří propustnost dat procházející síťovou kartou. Měření výkonu tímto nástrojem poskytuje výsledky v megabitech za sekundu. Čím vyšší je datová propustnost, tím je vyšší výkon síťové karty v rámci virtuálního stroje.

5.3.1 Fping/ping odezva síťového připojení v lokální síti

Nejnižší průměrné doby síťové odezvy v lokální síti dosáhla virtualizační platforma VMware Pro v režimu Win-CentOS s dobou 5,8 milisekund. Nejhorším výsledkem byla průměrná odezva v lokální síti 8,8 milisekund v případě platformy VMware

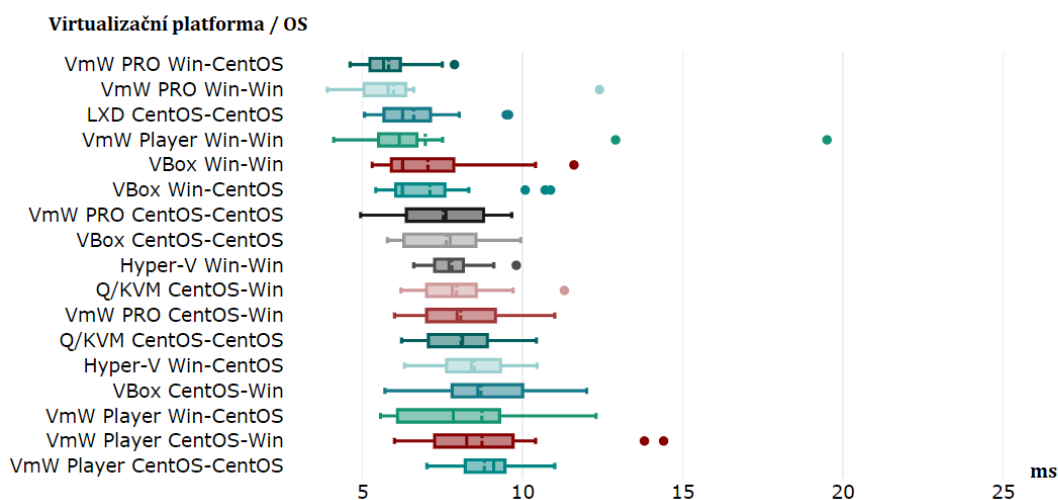
Player a režimu CentOS-CentOS. Rozdíl mezi těmito výsledky je přibližně 50 %. Prvních pět nejlepších průměrných výsledků dosáhly až na kontejnerové řešení LXD virtuální stroje s hostitelským operačním systémem Windows. Hostitelské operační systémy CentOS se umístily spíše v druhé polovině testovaného souboru.

Tabulka 10 Výsledky testování odezvy v lokální síti pomocí Fping/ping.

Virtualizační platforma / OS	Průměr	Sm. odch.	Rozptyl	Dolní mez	První kvartil	Druhý kvartil	Třetí kvartil	Horní mez	Var. rozpětí
Vmware PRO Win-CentOS	5,8	0,8	0,6	4,6	5,3	5,7	6,2	7,9	3,3
Vmware PRO Win-Win	6,0	1,6	2,7	3,9	5,1	5,8	6,3	12,4	8,5
LXD CentOS-CentOS	6,6	1,3	1,6	5,1	5,7	6,2	7,1	9,6	4,5
Vmware Player Win-Win	7,0	3,3	11,2	4,1	5,6	6,2	6,7	19,5	15,4
VirtualBox Win-Win	7,0	1,7	2,9	5,3	5,9	6,3	7,7	11,6	6,3
VirtualBox Win-CentOS	7,1	1,6	2,6	5,4	6,0	6,2	7,5	10,9	5,5
Vmware PRO CentOS-CentOS	7,5	1,4	2,0	4,9	6,5	7,6	8,8	9,7	4,7
VirtualBox CentOS-CentOS	7,6	1,2	1,5	5,8	6,3	7,7	8,5	9,9	4,2
Hyper-V Win-Win	7,8	0,8	0,7	6,6	7,3	7,7	8,1	9,8	3,2
Qemu/KVM CentOS-Win	7,9	1,2	1,6	6,2	7,0	7,8	8,5	11,3	5,1
Vmware PRO CentOS-Win	8,1	1,4	1,9	6,0	7,1	8,0	9,1	11,0	5,0
Qemu/KVM CentOS-CentOS	8,1	1,2	1,5	6,2	7,1	8,1	8,8	10,4	4,2
Hyper-V Win-CentOS	8,5	1,2	1,4	6,3	7,7	8,4	9,1	10,4	4,1
VirtualBox CentOS-Win	8,7	1,7	2,8	5,7	7,9	8,6	9,8	12,0	6,3

Virtualizační platforma / OS	Průměr	Sm. odch.	Rozptyl	Dolní mez	První kvartil	Druhý kvartil	Třetí kvartil	Horní mez	Var. rozpětí
Vmware Player Win-CentOS	8,7	4,7	21,9	5,6	6,1	7,8	9,3	27,6	22,0
Vmware Player CentOS-Win	8,7	2,2	4,6	6,0	7,3	8,3	9,6	14,4	8,4
Vmware Player CentOS-CentOS	8,8	1,0	1,0	7,0	8,3	9,1	9,4	11,0	4,0

Jednotky testování v milisekundách.



Obr. 23 Přehled výsledků provedených testů pomocí software Fping a ping zaměřených na rychlost odezvy v lokální síti.

Zdroj: Vlastní zpracování na základě výsledků z realizovaných testů výkonnosti OS.

5.3.2 Fping/ping odezva síťového připojení ve veřejné síti

Nejlepších výsledků v případě síťové odezvy ve veřejné síti dosáhla platforma VMware Pro v režimu Win-Win s průměrným časem 17,9 milisekund. S odstupem přibližně 23 % se umístila platforma Hyper-V v režimu Win-CentOS s nejhorším výsledkem 22,1 milisekund. V tomto případě byly testy v první polovině platform s nejlepšími výsledky relativně vyrovnané a nebylo zde žádných markantních rozdílů. Tak jako v případě předchozího testování lokální odezvy se hostitelské

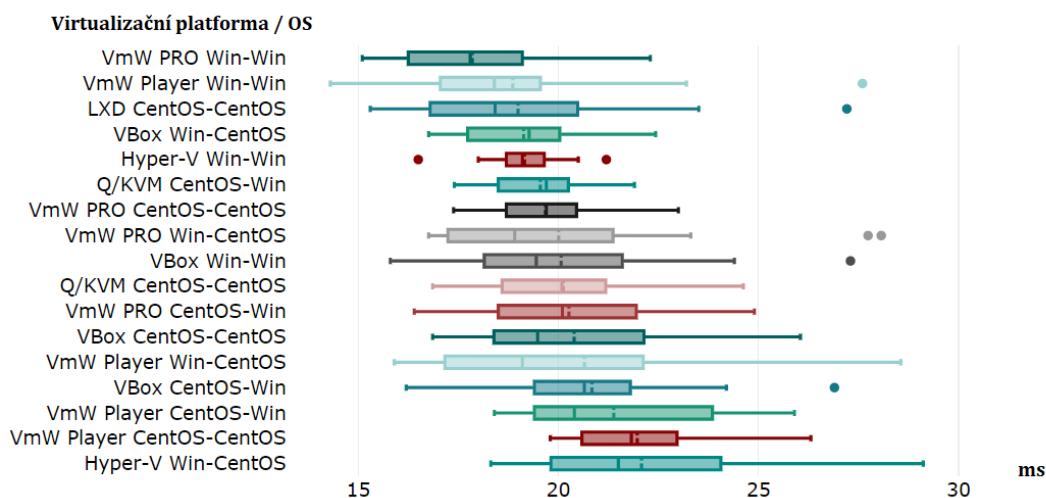
operační systémy CentOS umístily zejména v pomyslné polovině či spíše druhé části průměrných výsledků.

Tabulka 11 Výsledky testování odezvy ve veřejné síti pomocí Fping/ping.

Virtualizační platforma / OS	Průměr	Sm. odch.	Rozptyl	Dolní mez	První kvartil	Druhý kvartil	Třetí kvartil	Horní mez	Var. rozpětí
Vmware PRO Win-Win	17,9	2,0	4,0	15,1	16,3	17,8	18,9	22,3	7,2
Vmware Player Win-Win	18,9	2,8	8,0	14,3	17,1	18,4	19,5	27,6	13,3
LXD CentOS-CentOS	19,0	2,9	8,5	15,3	16,9	18,4	20,0	27,2	11,9
VirtualBox Win-CentOS	19,1	1,5	2,3	16,8	17,9	19,3	20,0	22,4	5,7
Hyper-V Win-Win	19,2	1,0	0,9	16,5	18,8	19,1	19,5	21,2	4,7
Qemu/KVM CentOS-Win	19,6	1,2	1,5	17,4	18,5	19,7	20,2	21,9	4,5
Vmware PRO CentOS-CentOS	19,7	1,3	1,8	17,4	18,8	19,7	20,4	23,0	5,6
Vmware PRO Win-CentOS	20,0	3,3	11,0	16,8	17,3	18,9	21,3	28,1	11,3
VirtualBox Win-Win	20,1	2,7	7,3	15,8	18,3	19,5	21,6	27,3	11,5
Qemu/KVM CentOS-CentOS	20,1	1,8	3,2	16,9	18,6	20,1	21,1	24,6	7,8
Vmware PRO CentOS-Win	20,3	2,3	5,2	16,4	18,5	20,1	21,8	24,9	8,5
VirtualBox CentOS-CentOS	20,4	2,7	7,1	16,9	18,5	19,5	22,0	26,1	9,2
Vmware Player Win-CentOS	20,7	4,7	22,5	15,9	17,2	19,1	21,5	33,4	17,5
VirtualBox CentOS-Win	20,8	2,3	5,4	16,2	19,5	20,7	21,8	26,9	10,7
Vmware Player CentOS-Win	21,4	2,4	5,6	18,4	19,5	20,4	23,6	25,9	7,5

Virtualizační platforma / OS	Průměr	Sm. odch.	Rozptyl	Dolní mez	První kvartil	Druhý kvartil	Třetí kvartil	Horní mez	Var. rozpětí
Vmware Player CentOS-CentOS	22,0	1,6	2,5	19,8	20,7	21,8	22,8	26,3	6,5
Hyper-V Win-CentOS	22,1	2,8	7,8	18,3	19,8	21,5	24,0	29,1	10,8

Jednotky testování v milisekundách.



Obr. 24 Přehled výsledků provedených testů pomocí software Fping a ping zaměřených na rychlost odezvy ve veřejné síti.

Zdroj: Vlastní zpracování na základě výsledků z realizovaných testů výkonnosti OS.

5.3.3 iPerf datová propustnost NIC

Největší datovou propustnost síťové karty obhájila platforma VirtualBox v režimu Win-Win s průměrem 42,2 Mbit/s. Druhou příčku s téměř stejnou průměrnou datovou propustností, konkrétně 40,1 Mbit/s, obsadila rovněž platforma VirtualBox v režimu Win-CentOS. Zajímavostí je porovnání této platformy s jejím fungováním v režimu CentOS-CentOS, kdy dosáhla průměru 16,9 Mbit/s, což je přibližně 40 % výkonu v případě režimu s hostitelským operačním systémem Windows, kde obsadila první dvě pozice. Virtualizační platforma VirtualBox poskytovala stabilní výsledky s velice malým variačním rozpětím.

Stejně jako při testování síťové odezvy ve veřejné síti se na posledním místě umístila platforma Hyper-V v režimu Win-CentOS díky výsledku 15,3 Mbit/s. Až na

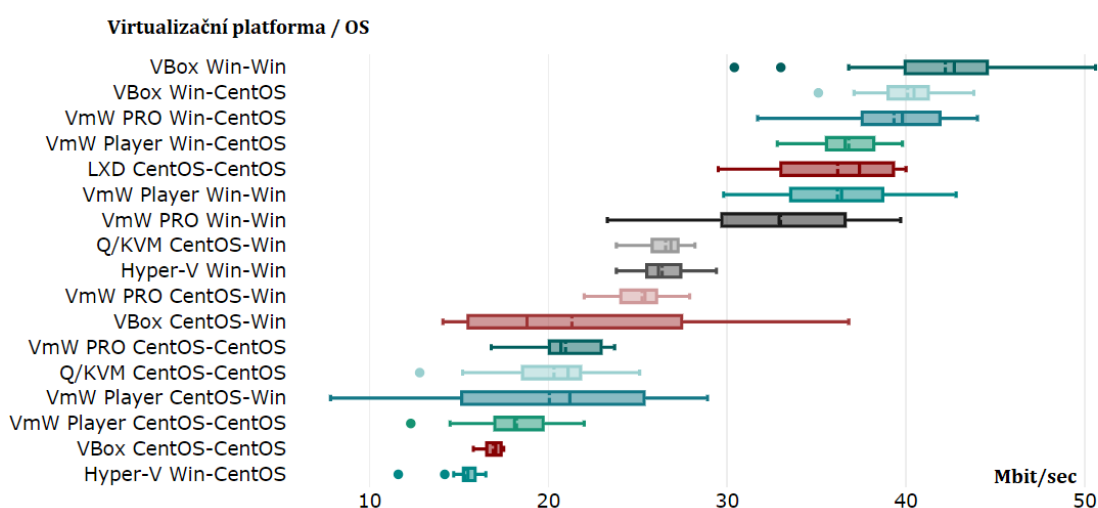
platformy LXD a QEMU/KVM, které jsou virtualizačním řešením výhradně pro Linux v roli hostitele, se umístily v první polovině žebříčku platformy pracující v režimu virtualizace s hostitelským operačním systémem Windows. Zde překonaly hostitelské systémy Windows průměrné výsledky jejich protějšku v podobě systému CentOS řádově o 10 Mbit/s a více.

Tabulka 12 Výsledky testování datové propustnosti síťové karty.

Virtualizační platforma / OS	Průměr	Sm. odch.	Rozptyl	Dolní mez	První kvartil	Druhý kvartil	Třetí kvartil	Horní mez	Var. rozpětí
VirtualBox Win-Win	42,2	4,9	24,4	30,4	40,2	42,7	44,5	50,6	20,2
VirtualBox Win-CentOS	40,1	1,9	3,5	35,1	39,1	40,5	41,0	43,8	8,7
Vmware PRO Win-CentOS	39,3	3,4	11,4	31,7	37,6	39,8	41,9	44,0	12,3
Vmware Player Win-CentOS	36,8	1,8	3,4	32,8	35,6	36,6	38,2	39,8	7,0
LXD CentOS-CentOS	36,2	3,4	11,3	29,5	33,2	37,4	39,3	40,0	10,5
Vmware Player Win-Win	36,2	3,4	11,9	29,8	33,8	36,4	38,4	42,8	13,0
Vmware PRO Win-Win	33,0	4,5	20,1	23,3	30,1	32,9	36,4	39,7	16,4
Qemu/KVM CentOS-Win	26,6	1,0	1,0	23,8	25,8	26,9	27,2	28,2	4,4
Hyper-V Win-Win	26,4	1,5	2,3	23,8	25,5	26,2	27,3	29,4	5,6
Vmware PRO CentOS-Win	25,2	1,4	2,1	22,0	24,2	25,4	26,0	27,9	5,9
VirtualBox CentOS-Win	21,3	6,8	46,0	14,1	15,6	18,8	26,5	36,8	22,7
Vmware PRO CentOS-CentOS	21,0	1,9	3,5	16,8	20,1	20,7	22,9	23,7	6,9
Qemu/KVM CentOS-CentOS	20,3	2,8	8,1	12,8	19,0	21,1	21,8	25,1	12,3
Vmware	20,1	6,4	41,2	7,8	16,3	21,2	25,2	28,9	21,1

Virtualizační platforma / OS	Průměr	Sm. odch.	Rozptyl	Dolní mez	První kvartil	Druhý kvartil	Třetí kvartil	Horní mez	Var. rozpětí
Player CentOS-Win									
Vmware Player CentOS-CentOS	18,2	2,3	5,4	12,3	17,0	18,1	19,7	22,0	9,7
VirtualBox CentOS-CentOS	16,9	0,5	0,2	15,8	16,6	17,1	17,3	17,5	1,7
Hyper-V Win-CentOS	15,3	1,0	1,0	11,6	15,3	15,5	15,9	16,5	4,9

Jednotky testování v Mbit/s.



Obr. 25 Přehled výsledků provedených testů pomocí software iPerf zaměřeného na datovou propustnost NIC.

Zdroj: Vlastní zpracování na základě výsledků z realizovaných testů výkonnosti OS.

5.4 Testování GPU

Testování výkonu grafické karty nástrojem GpuTest probíhalo ve dvou režimech. Prvním režimem bylo vykreslování trojúhelníku, který byl chromaticky vybarven spektrem barev. Další režim spočíval ve vykreslování 3D grafu, kterým prolétala kamera pozorovatele. Výsledky z obou testů byly vyhodnocovány v bodech a FPS. Výkonnostní porovnání pomocí těchto testů vyžadovalo zapnutí 3D akcelerace v rámci virtuálních strojů s hostovaným operačním systémem Windows. Operační systém CentOS umožňoval v některých případech spustit software GpuTest i bez

funkční 3D akcelerace. Tuto funkcionalitu některé virtualizační platformy neumožňovaly vůbec nebo případně pouze částečně. Mezi tyto platformy patří Hyper-V, jejíž akcelerační nástroj nazývaný Remote FX již není od 14. 7. 2020 podporován. [40] Z tohoto důvodu byl v tomto případě do porovnání zařazen pouze režim Win-CentOS, kdy bylo možné nástroj GpuTest spustit. Stejně tak v případě QEMU/KVM nefungovala 3D akcelerace v rámci režimu CentOS-Win. Dále 3D akceleraci nepodporuje od verze 6.1 platforma VirtualBox v režimu hostovaného systému Linux. Toto je v případě VirtualBoxu poněkud překvapivě vzhledem k velké popularitě a univerzálnosti této virtualizační platformy.

V rámci platformy VMware bylo třeba 3D akceleraci povolit pro hostované operační systémy CentOS dodatečně i mimo grafické rozhraní hypervizoru. Povolení probíhalo nejprve otevřením souboru *preferences* v příkazovém řádku pomocí příkazu *vim .vmware/preferences*. Následně pomocí funkce vložení byl do souboru v příkazovém řádku zapsán následující kód: *mks.gl.allowBlacklistedDrivers = "TRUE"*.

5.4.1 GpuTest vykreslování trojúhelníku

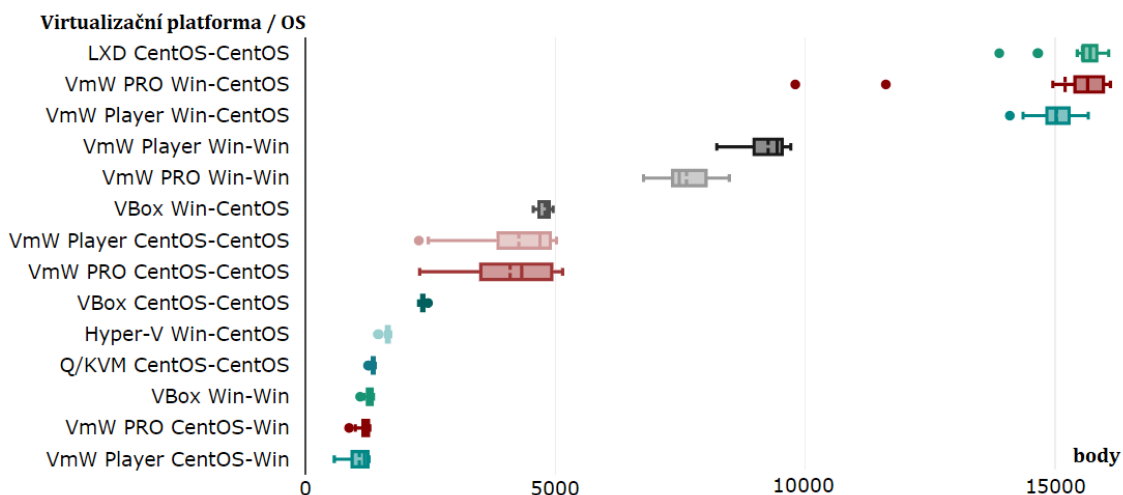
Při vykreslování trojúhelníku byl testován výkon grafické karty, v němž dosáhla nejlepších výsledků platforma LXDE v režimu CentOS-CentOS s průměrnými 15547 body. Na druhém a třetím místě se umístily platformy VMware Pro s 15199 body a Player s 15029 body, obě s režimem Win-CentOS. Za nimi s poměrně velkým bodovým rozdílem obsadily další pozice znovu tyto platformy ovšem v režimu Win-Win. Nejhorší výsledek byl vyhodnocen u platformy VMware Player v režimu CentOS-Win s 1079 body, což představuje necelých 10 % nejlepšího výkonu tohoto testování.

Zajímavým zjištěním je, že až na výše zmiňované výjimky, které se umístily na čtvrtém a pátém místě, nedocházelo v tomto testování k velkým výkonům hostovaného operačního systému Windows. V některých případech byl v režimech CentOS-Win nebo případně Win-Win problém s 3D akcelerací, a tak nemohla být část testování do porovnání ani zahrnuta.

Tabulka 13 Výsledky testování výkonu grafické karty při vykreslování trojúhelníku.

Virtualizační platforma / OS	Průměr	Sm. odch.	Rozptyl	Dolní mez	První kvartil	Druhý kvartil	Třetí kvartil	Horní mez	Var. rozp.
LXD CentOS-CentOS	15547	523	273704	13883	15573	15703	15825	16072	2189
Vmware PRO Win-CentOS	15199	1552	2409529	9801	15408	15650	15963	16106	6305
Vmware Player Win-CentOS	15029	388	150527	14094	14886	15018	15263	15664	1570
Vmware Player Win-Win	9258	401	160785	8231	8982	9438	9538	9711	1480
Vmware PRO Win-Win	7624	450	202586	6764	7364	7480	7996	8482	1718
VirtualBox Win-CentOS	4794	116	13471	4559	4677	4844	4874	4956	397
Vmware Player CentOS-CentOS	4270	907	822701	2269	4022	4691	4877	5023	2754
Vmware PRO CentOS-CentOS	4095	927	859377	2285	3559	4326	4905	5146	2861
VirtualBox CentOS-CentOS	2349	44	1904	2265	2327	2344	2365	2453	188
Hyper-V Win-CentOS	1634	64	4146	1448	1623	1647	1673	1705	257
Qemu/KVM CentOS-CentOS	1348	41	1658	1253	1340	1360	1376	1394	141
VirtualBox Win-Win	1278	67	4460	1094	1239	1294	1332	1360	266
Vmware PRO CentOS-Win	1185	102	10307	874	1155	1209	1258	1288	414
Vmware Player CentOS-Win	1079	229	52521	576	1016	1179	1246	1272	696

Jednotky testování v bodech.



Obr. 26 Přehled výsledků provedených testů pomocí software GpuTest zaměřeného na výkon GPU při vykreslování trojúhelníku.

Zdroj: Vlastní zpracování na základě výsledků z realizovaných testů výkonnosti OS.

5.4.2 GpuTest vykreslování 3D grafu

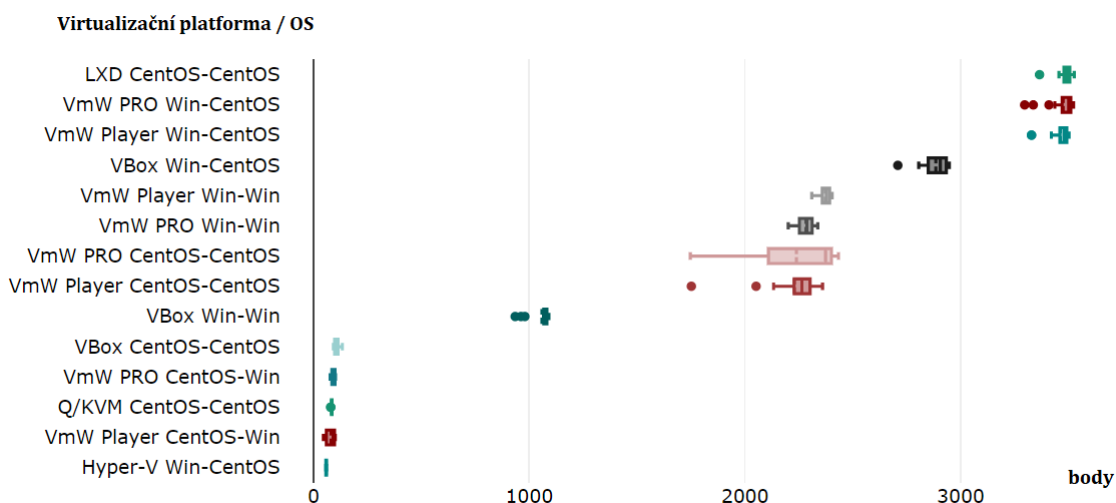
Testování výkonu grafické karty při vykreslování 3D grafu probíhalo se stejnými podmínkami a možnostmi virtualizačních platform jako v případě trojúhelníku, tudíž výčet platform zahrnutých do testování je shodný. V tomto testování byly nejlepší tři průměrné výsledky obsazeny stejnými zástupci nástrojů pro virtualizaci jako v předchozím případě. Lepším výkonem oproti testování trojúhelníku disponovala nyní platforma VirtualBox, která se díky tomu posunula na čtvrté místo. Rozdíl mezi nejlepším výsledkem dosaženým LXD s 3487,9 body v režimu CentOS-CentOS a nejhorším výsledkem, který vykazoval Hyper-V s 59 body v režimu Win-CentOS, je obrovský. Hyper-V dosahoval pouhých několika procent výkonu LXD.

V případě tohoto testování by bylo možné konstatovat, že konkurovat si mohou virtualizační platformy umístěné na prvních osmi či devíti nejlepších pozicích. V podstatě všechny platformy poskytovaly velice stabilní výkony s relativně malými výkyvy a variačním rozpětím.

Tabulka 14 Výsledky testování výkonu grafické karty při vykreslování 3D grafu.

Virtualizační platforma / OS	Průměr	Sm. odch.	Rozptyl	Dolní mez	První kvartil	Druhý kvartil	Třetí kvartil	Horní mez	Var. rozpětí
LXD CentOS-CentOS	3487,9	33,9	1149	3366	3479,0	3493,0	3503,3	3527	161,0
Vmware PRO Win-CentOS	3475,3	59,9	3593	3297	3472,0	3501,5	3510,5	3524	227,0
Vmware Player Win-CentOS	3462,4	48,4	2347	3329	3461,3	3481,5	3492,0	3503	174,0
VirtualBox Win-CentOS	2885,3	59,6	3558	2709	2854,5	2906,0	2932,3	2948	239,0
Vmware Player Win-Win	2372,9	25,9	673	2310	2361,8	2378,0	2393,0	2405	95,0
Vmware PRO Win-Win	2283,5	38,1	1454	2201	2252,8	2287,5	2312,0	2338	137,0
Vmware PRO CentOS-CentOS	2239,1	216,7	46977	1747	2130,3	2374,0	2401,3	2434	687,0
Vmware Player CentOS-CentOS	2229,4	131,0	17155	1752	2231,3	2264,5	2297,5	2360	608,0
VirtualBox Win-Win	1059,2	43,3	1874	935	1067,8	1073,0	1082,3	1091	156,0
VirtualBox CentOS-CentOS	105,8	10,0	101	92	98,0	101,5	114,0	134	42,0
Vmware PRO CentOS-Win	91,2	7,5	57	77	85,5	90,5	99,3	102	25,0
Qemu/KVM CentOS-CentOS	84,1	1,8	3	80	83,8	84,0	85,3	86	6,0
Vmware Player CentOS-Win	81,7	20,7	428	46	62,8	93,5	97,5	101	55,0
Hyper-V Win-CentOS	59,0	1,7	3	56	57,0	59,0	60,3	62	6,0

Jednotky testování v bodech.



Obr. 27 Přehled výsledků provedených testů pomocí software GpuTest zaměřeného na výkon GPU při vykreslování 3D grafu.

Zdroj: Vlastní zpracování na základě výsledků z realizovaných testů výkonnosti OS.

5.5 Testování RAM

Výkonnostní testy RAM byly provedeny s nástroji RAMspeed a Novabench. Oba nástroje měřily přenosový výkon operační paměti. Nástroj RAMspeed poskytoval výsledky při operacích prováděných s celými a desetinnými čísly v jednotkách MB/s. Oproti tomu software Novabench vyhodnotil získané výsledky a poskytl skóre paměti RAM v bodech.

5.5.1 RAMspeed výkon operační paměti při práci s celými čísly

Nejlepšího výkonnostního výsledku dosáhla platforma VMware Pro při práci v režimu Win-CentOS. Průměrná rychlost čtení a zápisu do operační paměti v tomto případě dosahovala 4949,1 MB/s. Nejhorší průměrný výsledek byl 2003,5 MB/s, čehož dosáhla platforma Hyper-V v režimu Win-CentOS. Rozdíl mezi těmito dvěma výkony byl bezmála 60 %. Platformy QEMU/KVM a Hyper-V se umístily spíše v druhé polovině výkonnostních výsledků. Prvních sedm nejlepších průměrných rychlostí zápisu a čtení obsadily operační systémy Windows v roli hostitele. Výjimku tvořila pouze platforma LXD, která je závislým virtualizačním nástrojem operačních systémů Linux.

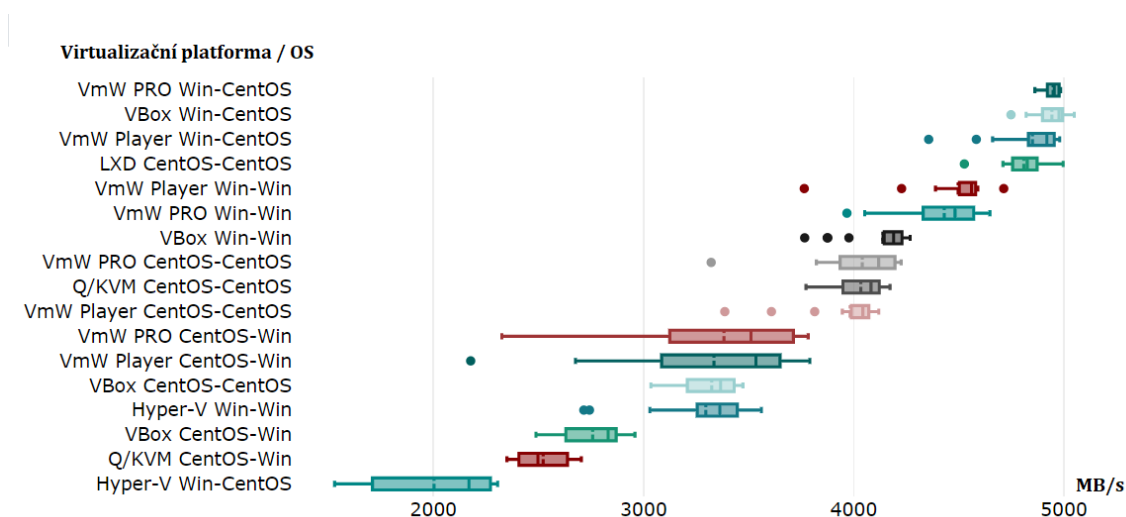
Prvních deset platform z výsledků vykazovalo nízkou míru variačního rozpětí a rozdíly ve výkonu nebyly mezi těmito platformami markantní. Naopak sedm virtualizačních řešení, které se umístily na posledních sedmi příčkách, vykazovaly větší výkonnostní výkyvy.

Tabulka 15 Výsledky výkonnostního testování rychlosti čtení a zápisu operační paměti při operacích s celými čísly.

Virtualizační platforma / OS	Průměr	Sm. odch.	Rozptyl	Dolní mez	První kvartil	Druhý kvartil	Třetí kvartil	Horní mez	Var. rozpětí
Vmware PRO Win-CentOS	4949,1	31,7	1001,9	4862	4922,7	4954,4	4977,2	4985	122,6
VirtualBox Win-CentOS	4943,1	76,3	5818,9	4749	4898,9	4977,2	4992,4	5049	300,9
Vmware Player Win-CentOS	4850,7	156,0	24334	4357	4832,5	4919,1	4952,2	4981	623,6
LXD CentOS-CentOS	4809,6	93,3	8700	4527	4757,3	4825,6	4872,6	4997	469,9
Vmware Player Win-Win	4497,0	192,4	37025	3765	4504,5	4560,7	4578,6	4714	949,0
Vmware PRO Win-Win	4431,0	189,2	35789	3968	4374,0	4482,4	4554,6	4648	680,1
VirtualBox Win-Win	4138,7	140,1	19636	3767	4147,9	4189,9	4229,4	4269	502,0
Vmware PRO CentOS-CentOS	4041,0	208,6	43503	3322	3948,8	4118,9	4196,0	4226	903,8
Qemu/KVM CentOS-CentOS	4034,0	105,5	11135	3773	3950,3	4082,2	4118,0	4173	399,7
Vmware Player CentOS-CentOS	3983,2	178,6	31898	3387	4007,4	4043,8	4067,3	4119	732,5
Vmware PRO CentOS-Win	3382,9	398,1	158461	2326	3126,5	3511,6	3703,8	3784	1457,5
Vmware Player CentOS-Win	3335,4	407,7	166218	2178	3129,3	3534,8	3648,2	3791	1613,3

Virtualizační platforma / OS	Průměr	Sm. odch.	Rozptyl	Dolní mez	První kvartil	Druhý kvartil	Třetí kvartil	Horní mez	Var. rozpětí
VirtualBox CentOS-CentOS	3324,7	133,1	17720	3035	3229,3	3367,0	3430,5	3473	438,1
Hyper-V Win-Win	3296,5	226,4	51243	2716	3276,8	3363,2	3445,1	3561	844,7
VirtualBox CentOS-Win	2758,2	143,1	20472	2488	2635,5	2832,0	2867,3	2959	470,9
Qemu/KVM CentOS-Win	2522,8	118,1	14694	2350	2407,7	2497,9	2631,9	2704	353,5
Hyper-V Win-CentOS	2003,5	287,8	82819	1530	1716,4	2169,8	2270,7	2306	775,6

Jednotky testování v MB/s.



Obr. 28 Přehled výsledků provedených testů pomocí software RAMspeed zaměřeného na rychlost RAM při práci s celými čísly.

Zdroj: Vlastní zpracování na základě výsledků z realizovaných testů výkonnosti OS.

5.5.2 RAMspeed výkon operační paměti při práci s desetinnými čísly

Při operacích s desetinnými čísly vystřídala s nejlepším výkonem platforma VirtualBox virtualizační řešení VMware. V režimu Win-CentOS dosáhl VirtualBox průměrné rychlosti RAM 5253,5 MB/s. Měřené rychlosti tohoto virtualizačního řešení byly opravdu stabilní a nejlepších výsledků dosahoval VirtualBox i v případě mediánu. Stejně jako v předchozím případě je poměrně znatelný výkonnostní rozdíl mezi skupinou prvních deseti a posledních sedmi virtualizačních platform. Až na opravdu malé změny v pořadí testovaných virtuálních strojů výsledky

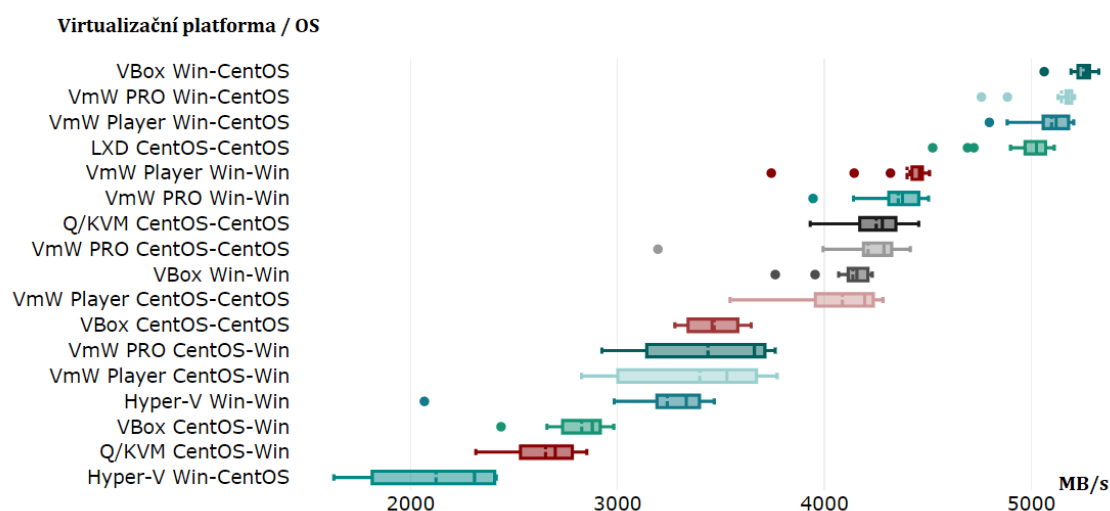
korespondovaly s rozložením průměrných rychlostí platform při práci s celými čísly.

Tabulka 16 Výsledky výkonnostního testování rychlosti čtení a zápisu operační paměti při operacích s desetinnými čísly.

Virtualizační platforma / OS	Průměr	Sm. odch.	Rozptyl	Dolní mez	První kvartil	Druhý kvartil	Třetí kvartil	Horní mez	Var. rozpětí
VirtualBox Win-CentOS	5253,5	57,3	3284	5063	5228,5	5266,8	5281,8	5326	263,8
Vmware PRO Win-CentOS	5146,2	111,5	12440	4759	5168,6	5178,3	5194,3	5209	449,7
Vmware Player Win-CentOS	5098,3	102,6	10520	4798	5062,7	5120,5	5178,6	5205	407,4
LXD CentOS-CentOS	4971,2	149,1	22219	4524	4976,1	5025,2	5069,8	5111	587,6
Vmware Player Win-Win	4400,1	168,9	28536	3744	4426,0	4459,9	4471,7	4508	764,5
Vmware PRO Win-Win	4357,1	128,1	16412	3946	4315,4	4378,2	4456,3	4504	558,7
Qemu/KVM CentOS-CentOS	4250,7	138,6	19207	3932	4173,9	4280,4	4342,7	4456	524,5
Vmware PRO CentOS-CentOS	4211,5	256,8	65945	3196	4192,7	4288,2	4325,3	4415	1219,6
VirtualBox Win-Win	4137,7	107,5	11555	3763	4120,6	4157,5	4209,3	4232	468,5
Vmware Player CentOS-CentOS	4087,1	223,1	49769	3545	3969,1	4195,0	4234,1	4283	738,5
VirtualBox CentOS-CentOS	3467,7	128,1	16413	3278	3359,7	3457,5	3575,5	3647	368,9
Vmware PRO CentOS-Win	3437,6	308,6	95206	2925	3161,7	3662,1	3710,5	3763	838,0
Vmware Player CentOS-Win	3397,9	319,4	102039	2827	3005,9	3529,1	3671,9	3772	945,0
Hyper-V	3240,9	297,6	88560	2067	3208,9	3333,0	3395,6	3468	1400,8

Virtualizační platforma / OS	Průměr	Sm. odch.	Rozptyl	Dolní mez	První kvartil	Druhý kvartil	Třetí kvartil	Horní mez	Var. rozpětí
Win-Win									
VirtualBox CentOS-Win	2827,5	134,6	18123	2438	2762,0	2878,7	2916,7	2982	544,5
Qemu/KVM CentOS-Win	2652,8	157,8	26199	2316	2533,2	2699,6	2781,3	2852	536,5
Hyper-V Win-CentOS	2123,2	296,1	87666	1629	1816,3	2309,4	2406,9	2415	785,5

Jednotky testování v MB/s.



Obr. 29 Přehled výsledků provedených testů pomocí software RAMspeed zaměřeného na rychlost RAM při práci s desetinnými čísly.

Zdroj: Vlastní zpracování na základě výsledků z realizovaných testů výkonnosti OS.

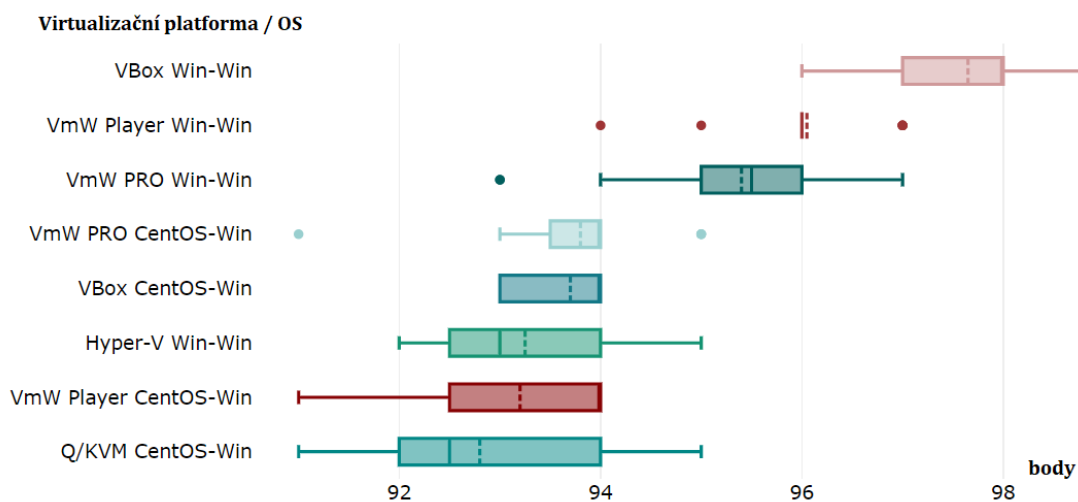
5.5.3 Novabench výkon RAM

Software Novabench byl opět testován na hostovaných systémech Windows. Zde zvítězila s nejlepším dosaženým průměrným výkonem 97,7 bodů platforma VirtualBox v režimu Win-Win. První tři nejlepší virtualizační řešení pracovaly v režimu Win-Win. Nejhůře s pamětí RAM pracovala platforma QEMU/KVM s průměrem 92,8 bodů. Rozdíl nejlepšího a nejhoršího průměrného výkonu je přibližně 7 %, což lze přisuzovat zejména omezení tohoto nástroje pouze na hostované systémy Windows.

Tabulka 17 Výsledky výkonostního testování RAM pomocí software Novabench.

Virtualizační platforma / OS	Průměr	Sm. odch.	Rozptyl	Dolní mez	První kvartil	Druhý kvartil	Třetí kvartil	Horní mez	Var. rozpětí
VirtualBox Win-Win	97,7	0,7	0,5	96,0	97,0	98,0	98,0	99,0	3,0
Vmware Player Win-Win	96,1	0,7	0,4	94,0	96,0	96,0	96,0	97,0	3,0
Vmware PRO Win-Win	95,4	1,1	1,2	93,0	95,0	95,5	96,0	97,0	4,0
Vmware PRO CentOS-Win	93,8	0,9	0,8	91,0	93,8	94,0	94,0	95,0	4,0
VirtualBox CentOS-Win	93,7	0,5	0,2	93,0	93,0	94,0	94,0	94,0	1,0
Hyper-V Win-Win	93,3	0,9	0,9	92,0	92,8	93,0	94,0	95,0	3,0
Vmware Player CentOS-Win	93,2	1,0	1,1	91,0	92,8	94,0	94,0	94,0	3,0
Qemu/KVM CentOS-Win	92,8	1,3	1,7	91,0	92,0	92,5	94,0	95,0	4,0

Jednotky testování v bodech.



Obr. 30 Přehled výsledků provedených testů pomocí software Novabench zaměřeného na výkon RAM.

Zdroj: Vlastní zpracování na základě výsledků z realizovaných testů výkonnosti OS.

6 Shrnutí výsledků výkonnostního testování

V této kapitole jsou vyhodnoceny výsledky realizovaných výkonnostních testů. Operační systémy a virtualizační platformy, které sloužily pro vytvoření virtuálních strojů, jsou zde hodnoceny jak souhrnně, tak i podle výkonu vybraných počítačových komponent, které byly hlavním předmětem testování výkonnosti.

6.1 Výpočetní výkon procesoru

Pro ověření výkonu CPU byly provedeny čtyři komplexní výkonnostní testy, které se skládaly z několika dílčích testů zaměřených na různé oblasti výpočetních operací a logických úloh procesoru. K tomuto účelu bylo využito třech testovacích nástrojů pro co největší přesnost porovnání.

Nejlepších výsledků dosahovaly virtuální stroje s operačním systémem CentOS v roli hostovaného systému. Zejména se jednalo o režim Win-CentOS za použití virtualizační platformy VirtualBox, která poskytovala opravdu suverénní výkon procesoru v porovnání s jinými platformami. Za tímto virtualizačním řešením následovaly obě platformy VMware rovněž v režimu Win-CentOS.

V režimu virtualizace CentOS-CentOS dosáhly nejlepších naměřených výsledků zástupci platform, které jsou závislé na hostovaném operačním systému Linux, konkrétně se jednalo o LXD a QEMU/KVM. To lze bezesporu přisoudit právě jejich specializaci na linuxové operační systémy.

Při testování virtualizačních řešení v režimu Win-Win si velice podobně vedly platformy VirtualBox, VMware Player i VMware Pro. Tyto platformy se v tomto režimu držely v rámci celého testování výkonnosti CPU v pomyslném středu výsledných hodnot.

Jako režim virtualizace s nejhoršími výsledky lze bezesporu označit hostitelský operační systém CentOS s hostovaným operačním systémem Windows (CentOS-Windows). Zde dosahovala výkonnost CPU virtuálních strojů zhruba 30–70 % ostatních virtualizačních režimů. Velmi nízké výkony CPU poskytovala platforma Hyper-V, a to jak v režimu Win-Win, tak i v režimu Win-CentOS.

6.2 Rychlost zápisu a čtení pevného disku

Pro měření rychlosti zápisu a čtení pevného disku byly použity dva testovací nástroje. Nástroj Y-cruncher poskytoval dílčí výsledky pro rychlost zápisu a čtení zvláště. Druhý nástroj Novabench výsledky měření sjednotil v rámci bodového ohodnocení výkonu disku.

6.2.1 Rychlost zápisu HDD

Nejvyšší rychlosti zápisu dosáhla platforma VMware v režimu Win-Win. Ihned za ní se umístila platforma VMware Pro v režimu Win-CentOS a další dvě příčky si tyto platformy rozdělily v opačných režimech. Všechna zmiňovaná virtualizační řešení dosáhla srovnatelných výsledků. Nejpomalejší průměrný zápis disku byl naměřen platformě LXD v režimu CentOS-CentOS. Tato skutečnost byla dána zřejmě složitějším přístupem k disku pomocí vlastního diskového oddílu virtuálního kontejneru.

Celkově v případě zápisu dosahoval u většiny virtualizačních platforem nejhorších rychlostí režim CentOS-CentOS. Výjimku tvořila pouze platforma QEMU/KVM, která se v této výkonnostní oblasti umístila v pomyslném středu v obou možných režimech virtualizace. Jako hostitelský operační systém zde lépe obstál Windows. V případě role hostovaného systému byly výsledky vyrovnanější, nicméně o několik procent opět zvítězil v rychlosti zápisu disku operační systém Windows.

6.2.2 Rychlost čtení HDD

V rámci testování rychlosti čtení pevného disku se s nejlepšími výkony umístily na prvních příčkách obě virtualizační platformy VMware Pro i VMware Player. Jednalo se o režimy virtualizace Win-Win a Win-CentOS. Těmito výkony předčily všechna zbylá virtualizační řešení o více než 70 %. Nejhůře dopadla opět platforma LXD v režimu CentOS-CentOS.

Celkově lze i v rychlostech čtení pevného disku označit Windows jako výkonnější hostitelský systém. Ovšem v případě hostovaného systému není výsledek úplně

jednoznačný a oba operační systémy pracovaly s relativně podobnou mírou výkonnosti.

6.2.3 Relativní poměr rychlosti pevného disku k výkonu procesoru

Největšího relativního poměru rychlosti pevného disku k výkonu procesoru se podařilo dosáhnout platformě VMware PRO v režimu CentOS-CentOS, což znamená, že procesor virtuálního stroje pracoval pomaleji než pevný disk. Výsledky v případě tohoto měření ovšem vykazují obrovské variační rozpětí a poměrně velké výkyvy hodnot. Naopak nejmenší průměrný relativní poměr vykazovala platforma QEMU/KVM v režimu CentOS-CentOS, kde byla tedy největší slabinou rychlost pevného disku. Kromě tohoto virtualizačního řešení a platformy VirtualBox v režimu Win-CentOS se všechny virtuální stroje pohybovaly okolo poměru 1,0 a vyššího, což je pro malé výpočty dostačující.

6.2.4 Celkové bodové ohodnocení nástrojem Novabench

I v případě výsledků testování provedeného nástrojem Novabench se s nejlepším ohodnocením umístily platformy VMware Player a Pro v režimu Win-Win. Nejhůře dopadl výsledek pro platformu QEMU/KVM, což plně koresponduje s testováním výkonu nástrojem Y-cruncher. Jako lepší hostitelský systém zde můžeme jednoznačně označit operační systém Windows.

6.3 Výkon síťové karty

Výkon síťové karty byl měřen pomocí odezvy v lokální a veřejné síti. K tomuto účelu sloužily nástroje Fping a ping. Dalším výkonnostním ukazatelem se stala datová propustnost síťové karty měřená nástrojem iPerf.

Nejnižší průměrná odezva v lokální síti byla naměřena platformě VMware Pro s režimem Win-CentOS. Tato platforma ovládla i nejlepší výsledek v režimu Win-Win. V režimu CentOS-CentOS byla naměřena nejnižší odezva platformě LXD. Hostitelský systém Windows zde disponoval lepšími výsledky.

Průměrná odezva ve veřejné síti dopadla nejlépe v podání platformy VMware Pro s režimem Win-Win. Nejdelších prodlev síťového připojení bylo naměřeno u

platformy Hyper-V pracující v režimu Win-CentOS. Celkově tedy můžeme označit za výkonnější operační systém s nižší síťovou odezvou v lokální i veřejné síti systém Windows v roli hostitelského operačního systému.

Předmětem výkonnostního testování zde byla také datová propustnost, kde s nejlepšími výsledky získala první dvě místa platforma VirtualBox v režimech Win-Win a Win-CentOS. Nejmenších výkonů dosáhla platforma Hyper-V v režimu Win-CentOS. I zde se jako hostitelský systém s nejlepšími výsledky umístil Windows, a tak můžeme tento operační systém celkově považovat jako výkonnější v tomto režimu. Lepšími výsledky v roli hostitelského systému oplýval naopak CentOS.

6.4 Výkon grafické karty

Při testování grafické karty muselo být několik virtualizačních řešení vyřazeno z důvodu absence možnosti 3D akcelerace. I po vyřazení těchto virtuálních strojů, kde nástroj GpuTest nebylo možné spustit kvůli nedostupné 3D akceleraci, dosáhlo při testování obstojných výsledků pouze osm virtualizačních řešení. Nejlépe v obou testech bodovala platforma LXD v režimu CentOS-CentOS. Dále lze do srovnávací analýzy zařadit platformy VMware Pro, VMware Player a VirtualBox. Všechny tyto zmiňované platformy poskytovaly v případě hostovaného operačního systému CentOS velice spolehlivé výsledky. CentOS v roli hostovaného systému v kombinaci s platformou LXD či VMware tak lze označit za ideální virtualizační řešení pro využití maximálních výkonů grafické karty.

6.5 Přenosový výkon operační paměti

Přenosový výkon operační paměti testovaný pomocí operací s celými a následně desetinnými čísly byl předmětem výkonnostního testování paměti RAM. V tomto případě jsou výsledky jednoznačné. Ideálními kandidáty pro získání co největšího potenciálně dostupného výkonu operační paměti jsou virtualizační řešení implementované platformami VirtualBox a VMware Pro v režimu Win-CentOS. Dobře si v žádném případě nevedla varianta virtualizačního řešení v režimu CentOS-Win. Ani jedna z virtualizačních platform nedokázala s takovými

virtuálními stroji dosáhnout alespoň průměrných výsledků. Poněkud překvapivým propadákem zde byl výkon platformy Hyper-V, která v obou přípustných režimech virtualizace pracovala přibližně s třetinovým výkonem nejlepších virtualizačních řešení. Při testování nástrojem Novabench tyto výsledky naprosto korespondovaly s výsledky nástroje RAMspeed získanými u zástupců virtualizačních řešení, kdy jako hostitelský systém figuroval Windows. Role si vyměnily pouze platformy Hyper-V a QEMU/KVM, které se dělily o nejhorší výsledky na posledních místech.

7 Závěry a doporučení

Stěžejním záměrem této diplomové práce byl návrh výkonnostních testů vhodných pro ověření výkonu operačních systémů virtuálních strojů a jejich následná realizace. Tento cíl byl naplněn s využitím virtualizačních platforem, které se skládaly ze zástupců komerčního, otevřeného, populárního i méně známého virtualizačního software. Navržená metodika testování byla orientována na výkon klíčových komponent počítače, mezi které patří procesor, pevný disk, síťová karta, grafická karta a operační paměť. Samotnému testování virtuálních operačních systémů předcházela teoretická rešerše zaměřená na historii virtualizace, její základní východiska, trendy, druhy dle oblasti využití a virtualizační architektury. Podrobněji byly popsány typy virtualizace a představeny použité virtualizační platformy.

Jednotlivé platformy zajišťující virtualizaci byly nainstalovány na oba hostitelské operační systémy, kde vždy následovala čistá instalace hostovaného systému. Velká většina virtualizačních nástrojů byla instalována pomocí jejich grafického rozhraní, což tuto část práce velmi usnadňovalo. Konkrétně se jednalo o platformy VMware, VirtualBox a Hyper-V. Instalace software QEMU/KVM probíhala v příkazovém řádku, avšak následnou práci v tomto nástroji umožňovalo grafické rozhraní. Kontejnerová virtualizační platforma LXD vyžadovala instalaci i obsluhu pomocí příkazového řádku.

Pro dosažení nejvyšší možné míry porovnatelnosti byly nástroje sloužící pro testování výkonu operačních systémů vybírány dle možností jejich použití s důrazem na multiplatformní funkcionalitu. Až na výjimku, kterou tvořil software Novabench, se toto kritérium podařilo naplnit a všechny testovací nástroje na měření výkonu pracovaly v rámci operačního systému Windows i CentOS. Tyto systémy byly testovány navrženou sadou testů ve všech čtyřech možných kombinacích hostitelského a hostovaného operačního systému.

Dle provedených testů lze s jistotou doporučit pro dosažení nejvyššího výpočetního výkonu procesoru virtuálního stroje platformu VirtualBox, jež disponovala kvalitními výsledky s minimálními výchyly. Pro operace zaměřené

na čtení a zápis pevného disku je nejlepší možnou volbou virtualizační řešení ve variantě s hostitelským systémem Windows, jenž v tomto ohledu nabízí nejvyšší výkon. Na základě analýzy výsledků lze v tomto případě doporučit kteroukoliv z testovaných virtualizačních platforem VMware vynikajících i v případě vykreslování grafických scén. Při práci s virtuálním strojem, která vyžaduje rychlé fungování operační paměti, je pro virtualizaci ideálním řešením opět platforma VirtualBox. Spolu s dobrými výsledky v oblasti síťové karty a procesoru se tedy jedná o všestranný virtualizační nástroj.

Naopak ve výkonnosti téměř všech vybraných počítačových komponent nedosahovaly dobrých výsledků platformy Hyper-V a QEMU/KVM závislé na hostitelském operačním systému. Zejména je není možné doporučit pro režimy virtualizace Windows – CentOS v případě Hyper-V a CentOS – Windows v případě QEMU/KVM. Rozdílná platforma hostitelského a hostovaného operačního systému zde způsobovala výkonnostní pokles.

8 Seznam použité literatury

- [1] BLOKDIJK, Gerard a Ivanka MENKEN. Virtualization: The Complete Cornerstone Guide to Virtualization Best Practices: Concepts, Terms and Techniques for Successfully Planning, Implementing and Managing Enterprise IT Virtualization Technology. 2nd Edition. Milton Keynes: Lightning Source (UK), 2010. ISBN 978-1-74244-588-5.
- [2] VON HAGEN, William. Professional Xen Virtualization. Indianapolis, IN: Wiley Pub., c2008. ISBN 978-0-470-13811-3.
- [3] PORTNOY, Matthew. Virtualization Essentials. Second edition. Indianapolis, Indiana: John Wiley, 2016. ISBN 978-1-119-26772-0.
- [4] MENKEN, Ivanka a Gerard BLOKDIJK. Cloud Computing Virtualization Specialist Complete Certification Kit: includes exclusive access to the elearning program and trainer support. 2nd Edition. Newstead: Emereo, 2010. ISBN 978-1-74244-453-6.
- [5] LE, Dac-Nhuong, Raghvendra KUMAR, Gia Nhu NGUYEN a Jyotir Moy CHATTERJEE. Cloud Computing and Virtualization. Beverly, MA: Wiley-Scrivener, 2018. ISBN 978-1-119-48790-6.
- [6] CERLING, Tim. Mastering Microsoft Virtualization. Indianapolis, Ind.: Wiley Pub., c2010. ISBN 978-0-470-44958-5.
- [7] BUYYA, Raykumar, Christian VECCHIOLA a S. Thamarai SELVI. Mastering Cloud Computing: Foundations and Applications Programming. Waltham, MA: Morgan Kaufmann, 2013. ISBN 978-0-12-411454-8.
- [8] International Journal of Advanced Research in Computer Science and Technology: A Study on System Virtualization Techniques [online]. 2014. India: ISSN National Centre for India, Jan-March 2014 [cit. 2020-11-01]. ISSN 2347-8446. Dostupné z: <http://www.ijarcst.com/conference/first/conf28.pdf>
- [9] POTDAR, Amit M, Narayan D G, Shivaraj KENGOND a Mohammed Moin MULLA. Performance Evaluation of Docker Container and Virtual Machine. Procedia Computer Science [online]. 2020, 171, 1419-1428 [cit. 2020-11-04]. ISSN 18770509. Dostupné z: doi: 10.1016/j.procs.2020.04.152
- [10] VMware: Společnost [online]. Palo Alto: VMware, © 2021 [cit. 2021-03-19]. Dostupné z: <https://www.vmware.com/company.html>
- [11] VMware: Desktop Hypervisor [online]. Palo Alto: VMware, © 2021 [cit. 2021-02-26]. Dostupné z: <https://www.vmware.com/products/desktop-hypervisor.html>

- [12] VMware: VMware Workstation Player [online]. Palo Alto: VMware, © 2021 [cit. 2021-02-26]. Dostupné z: <https://www.vmware.com/products/workstation-player.html>
- [13] VMware: VMware Tools Dokumentace [online]. Palo Alto: VMware, © 2021 [cit. 2021-03-21]. Dostupné z: <https://docs.vmware.com/en/VMware-Tools/index.html>
- [14] VMware: Workstation Pro [online]. Palo Alto: VMware, © 2021 [cit. 2021-03-21]. Dostupné z: <https://www.vmware.com/cz/products/workstation-pro.html>
- [15] KURIAN, Ashish. Latency Analysis and Reduction in a 4G Network [online]. Delft, 2018 [cit. 2021-03-22]. Dostupné z: <http://resolver.tudelft.nl/uuid:e1badd8d-a384-49a1-b958-a0c1e499c539>. Diplomová práce. Delft University of Technology. Vedoucí práce Remco Litjens.
- [16] DASH, Pradyumna. Getting Started with Oracle VM VirtualBox: Build your own virtual environment from scratch using VirtualBox. Birmingham: Packt Publishing, 2013. ISBN 978-1-78217-782-1.
- [17] Oracle VM VirtualBox: User Manual Version 6.1.16. Oracle [online]. Austin: Oracle Corporation, ©2004-2020 [cit. 2021-03-25]. Dostupné z: <https://download.virtualbox.org/virtualbox/6.1.16/UserManual.pdf>
- [18] Windows: Introduction to Hyper-V on Windows 10. Microsoft: Documentation [online]. Redmond, © 2021 [cit. 2021-03-30]. Dostupné z: <https://docs.microsoft.com/en-us/virtualization/hyper-v-on-windows/about/>
- [19] Windows: Supported Windows guests. Microsoft: Documentation [online]. Redmond, © 2021 [cit. 2021-03-30]. Dostupné z: <https://docs.microsoft.com/en-us/virtualization/hyper-v-on-windows/about/supported-guest-os>
- [20] Windows: Supported Linux and FreeBSD virtual machines for Hyper-V on Windows. Microsoft: Documentation [online]. Redmond, © 2021 [cit. 2021-03-30]. Dostupné z: <https://docs.microsoft.com/en-us/windows-server/virtualization/hyper-v/Supported-Linux-and-FreeBSD-virtual-machines-for-Hyper-V-on-Windows>
- [21] SYREWICZE, Andy a Richard SIDDAWAY. Pro Microsoft Hyper-V 2019: Practical Guidance and Hands-On Labs. [online]. Berkeley, CA: Apress, 2018 [cit. 2021-03-29]. ISBN 978-1-4842-4115-8. Dostupné z: doi:10.1007/978-1-4842-4116-5
- [22] DAKIC, Vedran, Humble Devassy CHIRAMMAL, Prasad MUKHEDKAR a Anil VETTATHU. Mastering KVM Virtualization: Design expert data center virtualization solutions with the power of Linux KVM. Second edition. Birmingham: Packt Publishing, 2020. ISBN 978-1-83882-871-4.

- [23] VIRTUALIZATION: What is KVM? Red Hat [online]. © 2021 [cit. 2021-03-30]. Dostupné z: <https://www.redhat.com/en/topics/virtualization/what-is-KVM>
- [24] KVM: Guest Support Status. KVM [online]. 28 August 2015 [cit. 2021-03-31]. Dostupné z: https://www.linux-kvm.org/index.php?title=Guest_Support_Status&oldid=173459
- [25] LXD: Introduction. Linux containers [online]. © 2021 [cit. 2021-03-31]. Dostupné z: <https://linuxcontainers.org/lxd/introduction/#LXD>
- [26] IVANOV, Konstantin. Containerization with LXC: Get acquainted with the world of LXC. Birmingham: Packt Publishing, 2017. ISBN 978-1-78588-894-6.
- [27] KUMARAN S., Senthil. Practical LXC and LXD: Linux Containers for Virtualization and Orchestration [online]. Berkeley, CA: Apress, 2017 [cit. 2021-03-31]. ISBN 978-1-4842-3023-7. Dostupné z: doi:10.1007/978-1-4842-3024-4
- [28] LXD: Requirements. Linux containers [online]. © 2021 [cit. 2021-03-31]. Dostupné z: <https://linuxcontainers.org/lxd/docs/master/requirements>
- [29] Image server: Image server for LXC and LXD. Linux Containers [online]. Mar 31 2021 [cit. 2021-03-31]. Dostupné z: <https://uk.images.linuxcontainers.org/>
- [30] Primate Labs Support: Interpreting Geekbench 5 Scores. Geekbench [online]. © 2021 [cit. 2021-04-01]. Dostupné z: <http://support.primatelabs.com/kb/geekbench/interpreting-geekbench-5-scores>
- [31] Geekbench 5: CPU Workloads. Geekbench [online]. November 2019 [cit. 2021-04-01]. Dostupné z: <https://www.geekbench.com/doc/geekbench5-cpu-workloads.pdf>
- [32] Documentation: Novabench Test Information. Novabench [online]. © 2007-2021 [cit. 2021-04-01]. Dostupné z: <https://novabench.com/docs/tests>
- [33] PerformanceTEST: Advanced CPU Benchmark Test. PassMark Software [online]. © 2021 [cit. 2021-04-02]. Dostupné z: https://www.passmark.com/products/performancetest/pt_advcpu.php
- [34] Y-cruncher: A Multi-Threaded Pi-Program. Numberworld [online]. February 14, 2021 [cit. 2021-04-02]. Dostupné z: numberworld.org/y-cruncher/
- [35] MULLICAN, Timothy. Calculating Pi: My attempt at breaking the Pi World Record. Bits and Bytes [online]. © 2020 [cit. 2021-04-02]. Dostupné z: <https://blog.timothymullican.com/calculating-pi-my-attempt-breaking-pi-record>

- [36] User Guides: Swap Mode. Numberworld [online]. September 8, 2019 [cit. 2021-04-02]. Dostupné z: <http://www.numberworld.org/y-cruncher/guides/swapmode.html#benchmark>
- [37] IPerf – The ultimate speed test tool for TCP, UDP and SCTP: User docs. IPerf [online]. © 2021 [cit. 2021-04-03]. Dostupné z: <https://iperf.fr/iperf-doc.php>
- [38] Geeks3D Softwares: GPUPTest. Geeks3D [online]. © 2012 [cit. 2021-04-03]. Dostupné z: <https://www.geeks3d.com/gputest/>
- [39] RAMspeed: A cache and memory benchmarking tool. Alasir [online]. © 2002–11 [cit. 2021-04-03]. Dostupné z: <http://alasir.com/software/ramspeed/>
- [40] Podpora: Aktualizace zakažte a odeberte komponentu RemoteFX vGPU ve Windows. Microsoft [online]. © 2021 [cit. 2021-04-08]. Dostupné z: https://support.microsoft.com/cs-cz/topic/aktualizace-zaka%C5%B8te-a-odeberte-komponentu-remotefx-vgpu-ve-windows-bbdf1531-7188-2bf4-0de6-641de79f09d2#bkmk_alternative

Zadání diplomové práce

Autor: Bc. Milan Pechánek

Studium: I1900312

Studijní program: N0688A140001 Informační management

Studijní obor:

Název diplomové práce: Virtualizace pro testování výkonnosti operačních systémů

Název diplomové práce Virtualization for testing performance of operating system
AJ:

Cíl, metody, literatura, předpoklady:

Cílem práce je navrhnout a realizovat testy pro virtualizační platformy, využitelné pro testování výkonnosti virtualizovaných operačních systémů. V teoretické části autor zpracuje nové pohledy na problematiku virtualizace, zmapuje aktuální trendy v oblasti virtualizace a navrhne metodiku pro jejich testování s důrazem na ovlivnění výkonu virtualizovaného OS.

V praktické části autor realizuje sady testů dle navržené metodiky a za využití metod popisné statistiky zpracuje získané výsledky. Testování bude probíhat v režimech CentOS - CentOS, CentOS - Windows, Windows - CentOS, Windows - Windows, na aktuálně nejnovějších dostupných verzích CentOS a Microsoft Windows.

PORTNOY, Matthew. *Virtualization essentials. Second edition. Indianapolis, Indiana: John Wiley, [2016]. ISBN 9781119267720.*

RUEST, Danielle a Nelson RUEST. *Virtualizace: podrobný průvodce. Brno: Computer Press, 2010. ISBN 978-80-251-2676-9.*

OLZAK, Thomas a Ken MAJORS. *Microsoft virtualization: master Microsoft server, desktop, application, and presentation virtualization. Boston: Syngress/Elsevier, c2010. ISBN 978-1-59749-431-1.*

KELBLEY, John a Mike STERLING. *Microsoft Windows Server 2008 R2 Hyper-V: podrobný průvodce administrátora. Brno: Computer Press, 2011. ISBN 978-80-251-3286-9.*

VON HAGEN, William. *Professional Xen virtualization. Indianapolis, IN: Wiley Pub., c2008. ISBN 978-0-470-13811-3.*

MARSHALL, David, Wade A. REYNOLDS a Dave MCCRORY. *Advanced server virtualization: VMware and Microsoft platforms in the virtual data center. Boca Raton: Auerbach Publications, 2006. ISBN 978-084-9339-318.*

Garantující pracoviště: Katedra informačních technologií,
Fakulta informatiky a managementu

Vedoucí práce: Mgr. Josef Horálek, Ph.D.

Datum zadání závěrečné práce: 21.10.2019