

Main Features of Virtualization Platforms on the Example of Proxmox VE

Ivan Mihaylov - PhD candidate
University of Economics - Varna, Varna, Bulgaria
imihaylov@ue-varna.bg

Abstract

The Virtualization topic has been researched for years, but it gained popularity in the last century. Virtualization is technology, which unites and devices calculating resources to provide one or more work environments. It is achieved with inserting abstract software between default hardware and OS. In the scientific research their essence, advantages and ways of application are considered. The main types of virtualization are classified and it is emphasized to virtualization, which is based on hypervisor. An analysis is made of different types of hypervisors. Based on the authors' research, a platform for virtualization is suggested - Proxmox VE, which is easy to implement and to use. The characteristics of the suggested platform are examined in detail and it's practical usage in University of economics – Varna is analyzed. The result of the analysis shows a criteria for choosing a virtualization platform.

Keywords: virtualization technology, hypervisor, Proxmox, virtual machine, virtualization platforms

JEL Code: C88

Въведение

С развитието на технологиите организациите имат все по-голяма нужда от съхранението и обработката на големи обеми от данни. Те разчитат все повече на сигурността на използваните информационни и комуникационни технологии (ИКТ). Важен компонент за осигуряването на високо ниво на сигурност и отказоустойчивост е както наличието на достатъчно на брой сървърни единици, така и поддържането им в актуално състояние. Това от своя страна води до увеличаване на разходите за организацията. Технологиите за виртуализация са едно от възможните решения на този проблем. Голяма част от платформите за виртуализация са платени и високите им цени водят до търсенето на други алтернативи. Поради тази причина в настоящия доклад са разгледани безплатните платформи за виртуализация. Настоящото изследване е базирано на основните характеристики и предимства на платформата Proxmox VE като техен представител.

1. Виртуализация

Виртуализацията е много актуална тема в последните години и усилено се разглежда от изследователите. В научната литература има множество определения за виртуализацията. Повечето определения засягат само технологичния аспект. Според Божинов и др. (2011) „технологията за виртуализация е разработена за първи път в средата на 60-те години на миналия век от IBM Corporation. Свързва се с разпределянето и оптимизирането на ресурсите на *mainframe* машините, което да позволи както по-висока ефективност на използваните ресурси, така и непрекъсваемост на работата, в случай, че спре изпълнението на някой от стартиралите процеси“ (Bozhinov et al., 2011). Други автори се обединяват около определението за виртуализацията като „технологията, която позволява на множество гост операционни системи да споделят един и същ хардуер в изолирана среда“ (Algarni et al., 2018), (Varma et al., 2016), (Kővári & Dukan, 2012). VMWare, 2007 определя виртуализацията като отделяне на заявка за услуга от основната физическа доставка на тази услуга. От една страна, Parallels (2009) описва технологиите за виртуализация като абстрахиране на виртуални сървъри от основния хардуер, докато Intel (2022) разглеждат виртуализацията като абстракция на компютърния хардуер – скриване на физическия компютър от начина, по който се използва. Това позволява ИТ ресурсите да се разпределят динамично според конкретни потребителски нужди. От друга страна, Пенев (2021) определя виртуализацията

като методология или рамка (framework) за разделяне на ресурсите на сървъра в множество среди за изпълнение. Това се осъществява чрез прилагане на различни технологии, концепции като хардуерно и софтуерно разделяне, споделяне на време, частична или пълна машинна емуляция, симулация, качество на услуги и много други. От дадените определения се вижда, че виртуализацията е технология, която позволява създаването на множество симулирани среди или специални ресурси от една физическа хардуерна система. Чрез нея може да се конфигурират услуги, без да се засегнат други такива, в една и съща физическа среда. Една физическа машина се превръща в споделян ресурс, който може да бъде използван от няколко услуги едновременно. От теоретична гледна точка виртуализацията може да се обобщи като абстракция между компютърните хардуерни системи и софтуера, работещ върху тях. Виртуализацията на сървъра е използването на софтуер, който позволява на хардуера да работи с множество операционни системи и услуги едновременно, докато виртуалният сървър е софтуер, който позволява използването на много хардуер за стартиране на системата по интегриран начин. С развитието на ИКТ тя играе все по-важна роля в ИТ инфраструктурите и центровете за данни. В своя автореферат Радев (2018) обобщава предимствата на виртуализацията: ефективно използване на ИТ ресурсите; динамично осигуряване на изчислителни ресурси, когато и където са необходими; редуциране на разходите за изграждане и управление на ИТ инфраструктура, което дава като резултат бърза възвращаемост на инвестициите; намаляване на консумацията на електроенергия и спестяване на физическо пространство за разполагане на устройствата. За целите на доклада накратко са представени основните понятия, използвани при виртуализацията:

- **Хипервайзор** – системен софтуер, който създава, изпълнява и управлява виртуални машини (VM). Хипервайзорът позволява на един хост да поддържа множество гост VM чрез виртуално споделяне на ресурси. Друго наименование на хипервайзор е монитор на виртуални машини (Virtual Machine Monitor (VMM) (VMWare, 2021).

- **Виртуална машина (VM)** – понятието е дефинирано от Sugerman, Venkitachalam & Lim (2001) като „изолирано и напълно защитено копие на физическия хардуер на машината“. Виртуалните машини разчитат на способността на хипервайзора да заделя от ресурсите на физическия хардуер и да ги разпределя по подходящ начин.

- **Хост (физически хост)** – представлява физическия хардуер.

- **Гост машини** – виртуални машини, които използват ресурсите на хоста. Гост машините използват процесор, памет и хранилища за данни като набор от изчислителни ресурси, които могат лесно да бъдат премествани. Потребителите могат да контролират виртуални копия на процесора, паметта, хранилища за данни и други ресурси, така че гост машините да получават ресурсите, от които се нуждаят, когато имат нужда от тях (Redhat, 2018).

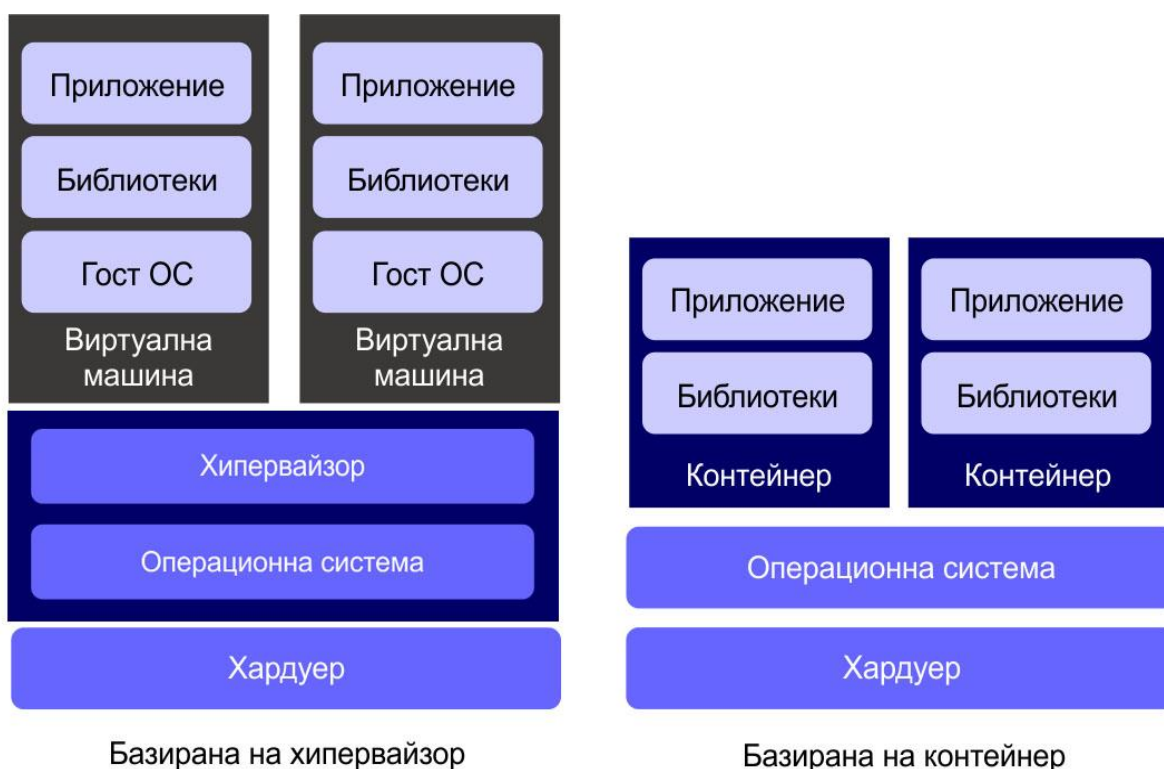
- **Контейнер** – в контекста на виртуализацията под контейнер се разбира виртуална среда за изпълнение, която работи върху ядрото на една операционна система (ОС) и симулира операционна система, а не основния хардуер. Контейнерите използват само нужните ресурси за инсталираните в тях приложения. Останалите ресурси на системата са налични за други контейнери. Те не са абстракция на целия хардуер. Виртуализацията чрез контейнери предоставя по-високи скорости на стартиране и работа.

- **Мащабируемост** – способността за автоматично заделяне и освобождаване на необходимите ресурси в зависимост от броя на приложенията, с които работи потребителят. Чрез виртуализацията се постига мащабируемост. Същността на работа е на един и същ физически сървър да са разположени много на брой виртуални машини. Това позволяват на всяка виртуална машина да има инсталирана собствена операционна система (ОС), библиотеки и приложения, но да работи на един и същ физически сървър. Отделните гост машини не взаимодействат помежду си, което води до по-висока защита и поверителност на

данните. Независимата ОС и приложният софтуер са ключово предимство при виртуализацията на хипервайзор.

Решенията за виртуализация на ресурси могат условно да бъдат класифицирани в две големи групи (виж. Фигура 1):

- **Виртуализация, базирана на хипервайзор** – всеки виртуален хост има копие на собственото си ядро на операционната система;
- **Виртуализация, базирана на контейнери** – всички виртуални машини или контейнери споделят ядрото на операционната система на хоста.



Фигура 1 – Решения за виртуализация. Източник : Sikeridis *et al.* (2017)
Адаптирана от автора

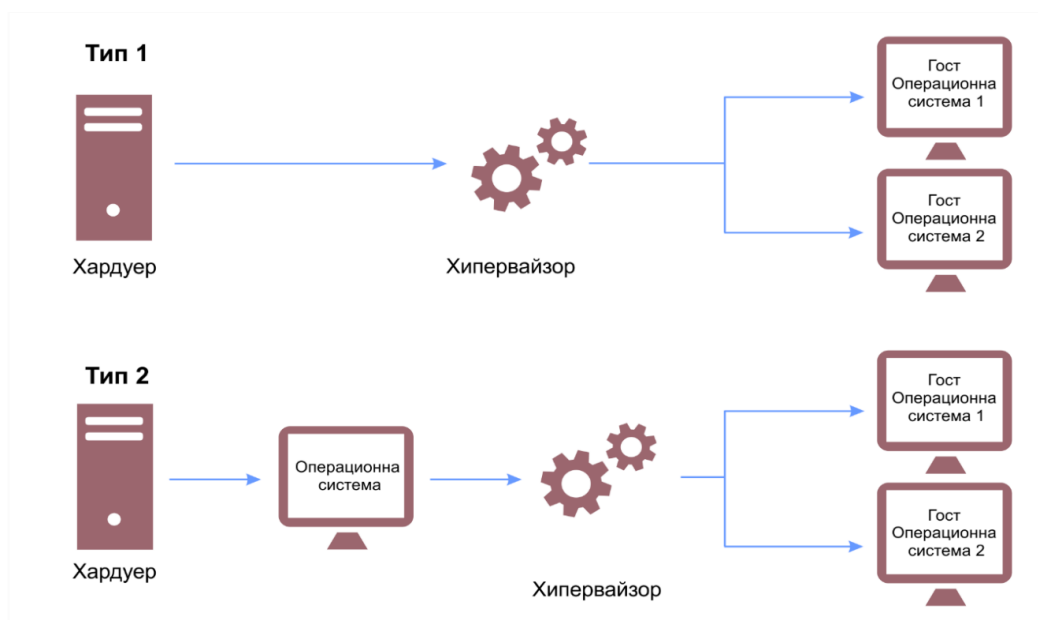
Виртуализациите, базирани на хипервайзори и контейнери се използват за различни цели. От една страна, хипервайзорите се използват за създаване и стартиране на виртуални машини (VM), всяка от които има свои собствени цялостни операционни системи, надеждно изолирани от другите. От друга страна, контейнерите оперират само с приложението и свързаните с него услуги и библиотеки. Това ги прави по-леки и преносими от виртуалните машини, така че често се използват за бързо и гъвкаво разработване и прехвърляне на приложения. Практиката показва, че по-често използван похват за виртуализация, както и предлагащ повече възможности, е виртуализацията, базирана на хипервайзори.

2. Основни характеристики на платформите за виртуализация, базирана на хипервайзор

Виртуализацията се постига чрез вмъкване на слой от системен софтуер, наричан хипервайзор, между гост операционната система и физическия хост (VMWare, 2007). В най-често срещаните техники на виртуализация този слой се създава чрез софтуерна емуляция на архитектурата на основната хардуерна платформа (Crosby & Brown, 2006). Правилно

проектираният хипервайзор предоставя на гост машините среда за изпълнение, идентична с хардуера на хоста, минимално влошава производителността и има пълен контрол върху системните ресурси.

Някои автори разделят техниките за виртуализация, базирана на хипервайзор, на два типа: **Тип 1** и **Тип 2** (Ding et al., 2012). Основната разлика между двата типа е, че при виртуализация от Тип 1, хипервайзорът е инсталиран директно върху физическия хардуер, докато при Тип 2 хипервайзорът работи на операционна система (ОС) подобно на други компютърни програми. При Тип 1 хипервайзорът има директен достъп до хардуерните ресурси и не преминава през ОС. Този тип е по-ефективен от Тип 2 и осигурява по-голяма мащабируемост, сигурност и производителност (VMWare, 2007). Техниките за виртуализация при хипервайзор от Тип 2 се изпълняват като приложение, инсталирано на ОС. Хипервайзорът от този тип има по-малък контрол върху основния хардуер и не може да осигури ефективно споделяне на ресурси между инсталираните гост операционни системи. Фигура 2 илюстрира разликата между двата типа.



Фигура 2 – Хипервайзори Тип 1 и Тип 2,

Източник: Bigelow and Kirsch (2021) Адаптирана от автора

Най-често използваният хипервайзор е Тип 1 или хипервайзор, инсталиран директно на хост машината, при който софтуерът за виртуализация се инсталира на физическия хардуер, където обикновено е инсталирана операционната система. Хипервайзорите от Тип 1 не са податливи на атаки към операционната система, те са изключително сигурни. Работят по-добре и по-ефективно от инсталираните върху ОС хипервайзори (Тип 2). Поради тези причини повечето корпоративни компании избират този тип за своите нужди.

Въпреки че хипервайзорът от Тип 2 е инсталиран върху една операционна система, той предлага възможност за инсталация на множество и различни по вид ОС, инсталирани върху него. Недостатък на Тип 2 е по-високата латентност в сравнение с хипервайзор от Тип 1. Това се дължи на факта, че комуникацията между хардуера и хипервайзора преминава през допълнителния слой на ОС. Хипервайзорите от Тип 2 са известни още като „клиентски хипервайзори“, тъй като най-често се използват от крайни потребители за тестване на софтуер, където по-високата латентност не е проблем.

Двата типа хипервайзори могат да осигурят множество виртуални ресурси на

различни потребители на един хост. Един физически хост може да предоставя няколко виртуални сървъра, които изпълняват натоварвания за различни клиенти.

На пазара има много софтуерни компании, занимаващи се с разработката на системи за управление на виртуализацията. Продуктите на голяма част от тях са платени. Съществуват и безплатни, както и такива с отворен код, които могат да бъдат доработвани и модифицирани според нуждите.

В доклада е представено проучване, проведено от автора, за определяне на най-популярните хипервайзори и е създадена обобщена таблица (виж. Таблица 1), в която са групирани по тип на хипервайзора и вид на лиценза. Важно е да се отбележи, че много от предлаганите безплатно хипервайзори, имат възможност за платена поддръжка.

Таблица 1. Примери за хипервайзори от Тип 1 и Тип 2

Тип Лиценз	Тип 1	Тип 2
Платени	<ul style="list-style-type: none"> • Microsoft Hyper-V • Citrix • Openvz 	<ul style="list-style-type: none"> • VMware Workstation • Pro/Fusion/Player • Parallels Desktop • Oracle VM VirtualBox Enterprise • Red Hat Enterprise Virtualization
Безплатни	<ul style="list-style-type: none"> • Proxmox VE • Xen Project • VMware vSphere ESXi • Oracle VM Server • oVirt 	<ul style="list-style-type: none"> • Oracle VirtualBox • QEMU • MobaLiveCD • Portable VirtualBox • Gnome Boxes

Според класация от PeerSpot (2022) едни от най-популярните платформи за виртуализация са: Proxmox VE, VMware vSphere, Oracle VM. От тях потребителите открояват Proxmox VE като платформа с най-добро удобството на работа благодарение на иновативния интерфейс, лесното му и бързо инсталиране и възможността за използване на различен по вид и архитектура хардуер.

Прилагането на виртуализация чрез платформи като Proxmox VE може да увеличи максимално използването на ресурсите, тъй като работата на няколко единици физически сървъри може да бъде изпълнено от една физическа сървърна единица.

3. Платформата Proxmox VE

В резултат на проучване на предлаганите платформи за виртуализация е избрана Proxmox VE, която е безплатна и с отворен код, но предлага и платена поддръжка чрез абонаментна система. Чрез тази платформа са представени основните характеристики на хипервайзори от Тип 1.

Proxmox Virtual Environment (VE) е платформа за стартиране на виртуални машини и контейнери. Базиран е на Linux дистрибуцията Debian. За максимална гъвкавост в нея са внедрени две технологии за виртуализация:

- **Kernel Virtual Machine (KVM)** – Технология, базирана на ядрото на виртуална машина. Тя предлага пълно решение за виртуализация за Linux на x86 хардуер, съдържащ разширения за виртуализация (Intel VT или AMD-V). Състои се от модул на ядрото наречен *kvm.ko*, който осигурява основната инфраструктура за виртуализация и специфичен за процесора модул – *kvm-intel.ko* или *kvm-amd.ko*. Предлага стартиране на множество виртуални машини, работещи с немодифицирани Linux или Windows образи. Всяка виртуална машина притежава собствен виртуализиран хардуер, мрежова карта, диск, графичен адаптер и т.н. (Linux KVM, 2012).

- **Linux Containers (LXC)** – Технология, базирана на Linux контейнери за виртуализация. Представява метод за виртуализация на ниво операционна система за изпълнение на множество изолирани Linux системи на хост за управление, които използват едно ядро на Linux.

От работата с аналогични системи за виртуализация интерфейсът на Proxmox VE може да се открие като едно от основните ѝ предимства. Той предоставя лесно администриране чрез централизирано управление на ресурсите.

Като друго предимство може да се определи възможността хипервайзорът да се използва на един сървър или да се мащабира до голям набор от кълстери. Кълстерът представлява голяма група възли, свързани помежду си в мрежа, които взети заедно осигуряват голяма изчислителна мощ. В много отношения, те могат да се разглеждат като една система. Сървърите в кълстер извършват една и съща задача и се контролират от софтуер. В контекста на облачните технологии дадена компютърна машина се обозначава с понятието „възел“ (node), като и се присвоява идентификатор с цел придобиване на уникалност спрямо други машини.

Освен чрез команден интерфейс, администрирането на платформата Proxmox VE е възможно да се извършва и с помощта на графичен уеб-базиран интерфейс (GUI). Интегрираният GUI дава подробен преглед и възможност за управление на всички KVM машини, контейнери за съхранение и дори на целия кълстер. Възможен е контрол на всички функционалности от GUI, както и следене на хронология и системни дневници на всеки един възел. Могат да се изпълняват задачи за архивиране, възстановяване и дейности свързани с High availability (HA)¹. Proxmox VE използва файлова система Proxmox Cluster (Pmxcfs). Тя се управлява от файлова система с база от данни за съхранение на конфигурационни файлове, репликирани в реално време до всички сървъри в кълстера, използвайки слоя за комуникация на клиентските сървъри наречен corosync². С помощта на corosync тези файлове се репликират в реално време на всички възли в кълстера. Файловата система съхранява всички данни в постоянна база от данни на диска, също така се прави копие на данните в RAM паметта (Proxmox Server Solutions GmbH, 2021). Proxmox VE е единствената платформа за виртуализация, използваща тази кълстерна файлова система.

Proxmox VE предоставя възможност за администриране чрез задаване на роли на потребителите. Могат да се дефинират роли, позволяващи пълен достъп до всички обекти (като виртуални машини, хранилища, възли, кълстери и т.н.). Възможно е и дефинирането на роли с ограничен достъп само до даден ресурс. Това позволява контрол над потребителите, притежаващи достъп до системите. Proxmox VE поддържа множество източници за удостоверяване като Microsoft Active Directory, LDAP, стандартно удостоверяване на Linux както и вграден сървър за удостоверяване на Proxmox.

Моделът за съхранение на данни в Proxmox VE е много гъвкав. Диските образи на

¹ **High availability (HA)** – способността на системата за възстановяване от неочаквани събития във възможно най-кратък срок. Прилага се при критични приложения и услуги изискващи непрекъсната работа в даден момент.

² **Corosync** – програма с отворен код, която осигурява членство в кълстер и възможности за комуникация между сървърите. Използва се за съхраняване на всички свързани с Proxmox VE конфигурационни файлове.

виртуалните машини могат да се съхраняват в едно или няколко локални хранилища или в споделено хранилище като NFS и SAN. Възможно е конфигуриране на множество дефиниции за съхранение, налични са всички технологии за съхранение на операционната система Linux Debian.

Едно от основните предимства от съхраняването на виртуална машина в споделено хранилище е възможността за мигриране на работещи машини без прекъсване, тъй като всички сървъри в кълстера имат директен достъп до дисковите образи на виртуалните машини. Това позволява преместването на една виртуална машина от един физически сървър на друг, без тя да бъде изключвана и без загуба на услуга. Виртуалната машина в един момент работи едновременно на двата сървъра докато се мигрира и крайният потребител не разбира за нейното преместване.

В Таблица 2 са показани различните възможности за съхранение, предлагани от Proxmox VE, разделени по тип на съхранение.

Таблица 2. Възможности на съхранение, предлагани от Proxmox VE
Източник: Proxmox Server Solutions GmbH (2021) Адаптирана от автора

Мрежово	Локално
<ul style="list-style-type: none"> • LVM Group; • iSCSI; • Network File System; • CIFS Share; • Ceph RBD; • ISCSI LUN; • GlusterFS. 	<ul style="list-style-type: none"> • Logical Volume Manager (LVM) Group; • Fibre Channel (FC); • Distributed Replicated Block Device (DRBD); • ZFS Storage.

Както виртуалните изчисления, така и виртуалното съхранение имат добре формулирани решения. KVM се грижи за виртуалните изчисления, а за съхранението на данните се грижат Ceph разпределените хранилища.

Реализацията на виртуална мрежа няма единен стандарт, нуждите на различните бизнеси са различни това също води до различия в архитектурата на виртуалните мрежи. По отношение на виртуални мрежи, Proxmox поддържа VLAN, VXLAN виртуални мрежи, базирана на Linux виртуална мрежа и отворен виртуален комутатор (Open vSwitch).

При необходимост има възможност за добавяне на виртуален рутер, виртуална защитна стена, виртуално балансиране на натоварването, както и създаване на правила за защитна стена на виртуалните интерфейси на всяка конкретна VM. За да се ограничи трафика е възможно задаването на правила за защитна стена на физическите или логическите интерфейси на възлите в кълстера.

Архивирането се извършва чрез вградения инструмент, наречен „vzdump“. Създават се последователни моментни снимки на работещи контейнери и KVM гост машини. Създава се архив на данните за виртуалните машини или контейнерите, който включва конфигурационните им файлове. KVM архивирането работи за всички типове съхранение, включително ISO образи на виртуални машини на NFS, CIFS, iSCSI LUN, Ceph RBD.

Изследването показва, че прилагането на виртуализация чрез платформа като Proxmox VE може да оползотвори максимално използването на ресурсите, тъй като работата на няколко единици физически сървъри може да бъде изпълнена от една физическа сървърна единица.

4. Резултати

За изграждането на облачна инфраструктура в Икономически университет – Варна са извършени множество опити, изследвания и проучвания. След анализиране на различни техники за виртуализация е направена оценка на производителността на различни хипервайзори. Въз основа на описаните по-горе предимства на хипервайзора и резултатите от проучванията, е избрана платформата Proxmox VE. От анализиранияте документации и извършените тестове е установено, че платформата е най-подходяща за наличния хардуер, както и за нуждите на Университета.

Облачната инфраструктура е съставена от 12 физически машини, като на всяка една машина е инсталиран хипервайзор Proxmox VE. Хостовете са включени в клъстер. Характеристиките на физическите хостове са описани в

Таблица 3.

Таблица 3. Технически характеристики на физически хостове

Хост	CPU (Процесор)	RAM (оперативна памет)
1	32 x Intel(R) Xeon(R) Silver 4110 CPU @ 2.10GHz (2 Sockets)	64 GB
2	4 x Intel(R) Xeon(R) E-2124 CPU @ 3.30GHz (1 Socket)	16GB
3	4 x Intel(R) Xeon(R) E-2124 CPU @ 3.30GHz (1 Socket)	16GB
4	4 x Intel(R) Xeon(R) E-2124 CPU @ 3.30GHz (1 Socket)	16GB
5	4 x Intel(R) Xeon(R) E-2124 CPU @ 3.30GHz (1 Socket)	16GB
6	4 x Intel(R) Xeon(R) E-2124 CPU @ 3.30GHz (1 Socket)	16GB
7	4 x Intel(R) Xeon(R) E-2124 CPU @ 3.30GHz (1 Socket)	16GB
8	4 x Intel(R) Xeon(R) E-2124 CPU @ 3.30GHz (1 Socket)	16GB
9	8 x Intel(R) Xeon(R) CPU E5620 @ 2.40GHz (1 Socket)	12 GB
10	8 x Intel(R) Xeon(R) CPU E5520 @ 2.27GHz (1 Socket)	12 GB
11	4 x Intel(R) Xeon(R) CPU E3-1220 V2 @ 3.10GHz (1 Socket)	8 GB
12	4 x Intel(R) Xeon(R) CPU E5504 @ 2.00GHz (1 Socket)	6 GB

Както се вижда от

Таблица 3 хардуерът е съставен от машини с различни характеристики, различно поколение процесори, различна по обем оперативна памет (RAM). Това е едно от основните предимства на Proxmox VE – могат да се комбинират различни хардуерни ресурси и да се използват дори по-стари машини. Те могат да се използват от услуги, изискващи по-малко ресурси, а при нужда да се мигрират незабавно на по-мощни машини. На платформата са разположени голям набор услуги, използвани от Университета: уеб сървъри, университетска информационната система, системата за провеждане на тестове, система за кандидатстудентски прием, документооборот, софтуерни решения за нуждите на отдел „Счетоводство“, ЕРП системи, складов софтуер, системи за мониторинг и др.

Въз основа на направения анализ на платформите за виртуализация, както и реализираната виртуализация в Икономически университет – Варна могат да се изведат следните критерии за избор на платформа за виртуализация:

- тип виртуализация;
- цена на платформата;
- гъвкавост (потенциал за развитие);
- лесна инсталация;
- кратък период на внедряване – бързо и ефективно;
- интуитивен интерфейс;
- лекота на употреба;
- съвместимост със съществуващия хардуер;
- съвместимост със съществуващия софтуер;
- възможност за обновяване;
- качество на документацията;
- надеждност (степенна, в която системата може да остане работоспособна);
- сигурност на достъпа до функциите на платформата (контрол на достъпа на потребителите и възможност за проследяване на техните действия);
- сигурност на данните в платформата;
- необходимост от допълнителни обучения на работещите в организацията ИТ специалисти;
- предоставяне на поддръжка на платформата след внедряването.

Това са основните критерии, според които организациите могат по-лесно да изберат подходящата за тях платформа за виртуализация.

Заклучение

Съвременната реалност на бурно развитие на ИТ сектора и необходимостта от нови средства за съхраняване и обработване на големите обеми данни, които генерират организациите от всички сфери, водят до все по-трудни избори, които те трябва да направят. На пазара има технологии и приложения с много сходно описание на тяхната функционалност, но на различна цена. За компаниите е важно да направят информиран избор и да внедрят най-подходящото за тях решение. С тази цел в доклада е представена технологията на виртуализация, разгледани са възможностите за нейното приложение и е предложена платформа, която да се внедри. Това е платформата Proxmox VE, която успешно е внедрена и се използва в Икономически университет – Варна.

В доклада са изведени критерии за избор на платформа за виртуализация, които са важни при избора на такъв тип софтуер и могат да помогнат на организациите по-лесно да се ориентират коя платформа е най-подходяща за техните нужди.

References

1. Algarni, A., Iqbal, M., Alroobaea, R., Ghiduk, A., & Nadeem, F. (2018) *Performance Evaluation of Xen, KVM, and Proxmox Hypervisors*. International Journal of Open Source Software and Processes, 9, 39–54.
2. Bigelow, S. J., & Kirsch, B. (2021). *What's the difference between Type 1 vs. Type 2 hypervisor?* [Online] Available from: <https://searchservvirtualization.techtarget.com/feature/Whats-the-difference-between-Type-1-and-Type-2-hypervisors> [Accessed 23/10/2022].
3. Bozhinov, B. V., Tsanov, E., Kuznetsov, Yu., Kazakov, K., & Stoyanov, K. (2011). *Izsledvane i analiz na vazmozhnostite prilozhenie na virtualizatsiya v uchebno-prepodavatelskiya i izsledovatel'skiya protses po distsiplini, svarzani s novite Informatsionni Tehnologii*. In Almanah nauchni izsledvaniya „Problemi na biznesa i vissheto obrazovanie”
4. Crosby, S., & Brown, D. (2006). *The Virtualization Reality*. ACM Queue, 4, 34–41.
5. Ding, J.-H., Lin, C., Chang, P.-H., Tsang, C.-H., Hsu, W.-C., & Chung, Y.-C. (2012). *ARMvisor : System Virtualization for ARM*.

6. Intel. (2022) *Intel® Virtualization Technology for Directed I/O Architecture Specification*. [Online] Available from: <https://cdrdv2.intel.com/v1/dl/getContent/671081?explicitVersion=true&wapkw=Virtualization Usage Models> [Accessed 08/10/2022].
7. Kővári, A., & Dukan, P. (2012) *KVM & OpenVZ virtualization based IaaS open source cloud virtualization platforms: OpenNode, Proxmox VE*.
8. Linux KVM. (2012). Kernel Virtual Machine. [Online] Available from: https://www.linux-kvm.org/page/Main_Page [Accessed 22/10/2022].
9. Parallels (2009) *Top Ten Considerations For Choosing A Server Virtualization Technology*. [Online] Available from: http://www.parallels.com/r/pdf/wp/pvc/Parallels_Virtuozzo_Containers_WP_top_ten.pdf [Accessed 05/09/2022].
10. PeerSpot (2022) *Top 8 Server Virtualization Software* [Online] Available: <https://www.peerspot.com/categories/server-virtualization-software> [Accessed 05/11/2022].
11. Penev, A. (2021) *Sashtnost na Virtualizatsiyata*. [Online] Available from: <https://www.alexander-penev.info/sites/default/files/v-1.virtualization-2021-2022.pdf> [Accessed 20/10/2022].
12. Proxmox Server Solutions GmbH. (2021). *Proxmox VE Administration Guide*. [Online] Available from: <https://pve.proxmox.com/pve-docs/pve-admin-guide.pdf> [Accessed 03/10/2022].
13. Radev, M. (2018) *Kompleksna virtualizatsiya na IT infrastrukturni. Avtoreferat na disertatsionen trud*. Varna.
14. Redhat. (2018) *Understanding virtualization*. [Online] Available from: <https://www.redhat.com/en/topics/virtualization?intcmp=7016000000127cYAAQ> [Accessed 22/10/2022].
15. Sikeridis, D., Papapanagiotou, I., Rimal, B., & Devetsikiotis, M. (2017) *A Comparative Taxonomy and Survey of Public Cloud Infrastructure Vendors*.
16. Sugerman, J., Venkitachalam, G., & Lim, B. H. (2001) *Virtualizing I/O Devices on VMware Workstation's Hosted Virtual Machine Monitor*. VMware, Inc.
17. Varma, P., Chakravarthy, K., Vatsavayi, V. K., & Somalaraju, V. raju. (2016). *Analysis of a Network IO Bottleneck in Big Data Environments Based on Docker Containers*. *Big Data Research*, 3.
18. VMWare. (2007) *Understanding Full virtualization, Paravirtualization and hardware* [Online] Available from: https://vmware.com/content/dam/digitalmarketing/vmware/en/pdf/techpaper/VMware_paravirtualization.pdf [Accessed 10/10/2022].
19. VMWare. (2021) *What is a hypervisor?* [Online] Available from: <https://www.vmware.com/topics/glossary/content/hypervisor.html?resource=cat-1243073610#cat-1243073610> [Accessed 08/10/2022].