

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ “ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА”

Бочкарьов О. Ю.

Технології віртуалізації в ОС Linux

Навчальний посібник

для студентів галузі знань F «Інформаційні технології»
спеціальності F7 «Комп’ютерна інженерія»

Видавець ФОП Марченко Т.В.
Львів

УДК 004.4
Б 72

*Рекомендовано Науково-методичною радою
Національного університету “Львівська політехніка”
як навчальний посібник для студентів спеціальності
F7 “Комп’ютерна інженерія”
(протокол № 89 від 20 червня 2025 р.)*

Рецензенти:

Рак Т. Є., доктор технічних наук, доцент, професор кафедри інформаційних технологій, проректор з науково-педагогічної роботи ПЗВО “ІТ СТЕП Університет”;

Ткачук Р. Л., доктор технічних наук, професор, начальник кафедри управління інформаційною безпекою, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності;

Глухов В. С., доктор технічних наук, професор, професор кафедри електронних обчислювальних машин, Національний університет “Львівська політехніка”

Бочкарьов О. Ю.

Б 72 **Технології віртуалізації в ОС Linux** : навч. посібник / О. Ю. Бочкарьов.
– Львів: Видавець Марченко Т.В. – 219 с.

ISBN 978-617-8682-06-4

В навчальному посібнику розглянуто перспективні способи та технології віртуалізації в ОС Linux. Основна увага приділена технологіям апаратної віртуалізації в ОС Linux та відповідним програмним засобам системного та користувацького рівня.

Навчальний посібник призначений для студентів спеціальності F7 “Комп’ютерна інженерія” галузі знань F “Інформаційні технології”.

ISBN 978-617-8682-06-4

УДК 004.4

© Бочкарьов О. Ю.

© Видавець Марченко Т.В.

ЗМІСТ

Вступ.....	6
1. Віртуальні машини та віртуалізація.....	8
1.1. Технології віртуалізації та способи їх застосування.....	8
1.1.1. Концепція віртуалізації.....	8
1.1.2. Класифікація способів та технологій віртуалізації.....	10
1.1.3. Застосування технологій віртуалізації.....	15
1.2. Забезпечення та апаратна підтримка віртуалізації.....	19
1.2.1. Проблема апаратної віртуалізації.....	19
1.2.2. Перехоплення та емуляція (Trap-and-Emulate).....	21
1.2.3. Бінарна трансляція (Binary Translation).....	22
1.2.4. Проблема управління сторінками пам'яті.....	24
1.2.5. Апаратна підтримка віртуалізації.....	25
1.3. Технології апаратної віртуалізації на основі гіпервізорів.....	32
1.3.1. Гіпервізор «Тип 0» (Type-0 hypervisor).....	32
1.3.2. Гіпервізор «Тип 1» (Type-1 hypervisor).....	35
1.3.3. Гіпервізор «Тип 2» (Type-2 hypervisor).....	40
1.4. Способи апаратної та програмної віртуалізації.....	44
1.4.1. Паравіртуалізація.....	44
1.4.2. Емуляція.....	47
1.4.3. Контейнеризація.....	50
1.4.4. Програмна віртуалізація.....	53
Контрольні питання.....	56
2. Апаратна віртуалізація в ОС Linux.....	59
2.1. Технологія апаратної віртуалізації KVM.....	59
2.1.1. Огляд технології віртуалізації KVM.....	59
2.1.2. Апаратна підтримка та налаштування KVM.....	62
2.1.3. Управління віртуалізацією за допомогою libvirt.....	64
2.2. Програмний емулятор QEMU та організація функціонування KVM.....	68
2.2.1. Використання програмного емулятора QEMU.....	68
2.2.2. Організація функціонування KVM.....	74
2.2.3. Програмний інтерфейс KVM.....	77
2.3. Створення віртуальної машини та використання virsh.....	81
2.3.1. Налаштування програмних засобів віртуалізації.....	81
2.3.2. Створення віртуальної машини (virt-install).....	85
2.3.3. Автоматизація створення віртуальної машини.....	89
2.3.4. Використання консолі управління virsh.....	91

2.3.5. Використання virt-manager.....	96
2.4. Клонування та створення знімків віртуальних машин.....	98
2.4.1. Клонування віртуальних машин.....	98
2.4.2. Створення знімків віртуальних машин.....	105
2.4.3. Використання знімків віртуальних машин.....	111
2.5. Міграція віртуальних машин.....	113
2.5.1. Забезпечення міграції віртуальних машин.....	113
2.5.2. Офлайн міграція віртуальних машин.....	118
2.5.3. Динамічна міграція віртуальних машин.....	120
2.5.4. Динамічна міграція ВМ з використанням KVM та libvirt.....	122
Контрольні питання.....	125
3. Контейнеризація в ОС Linux.....	127
3.1. Віртуалізація на рівні операційної системи:	
Linux namespaces та cgroups.....	127
3.1.1. Технології та способи контейнеризації.....	127
3.1.2. Механізм розподілу системних ресурсів Linux namespaces.....	131
3.1.3. Механізм управління системними ресурсами cgroups.....	136
3.2. Технології контейнеризації LXC, Docker та Kubernetes.....	141
3.2.1. Система контейнеризації Linux Containers (LXC).....	141
3.2.2. Технологія контейнеризації Docker.....	144
3.2.3. Автоматизація роботи з контейнерами за допомогою Kubernetes.....	151
3.2.4. Системи управління конфігурацією програмного забезпечення.....	161
Контрольні питання.....	168
4. Програмна віртуалізація.....	170
4.1. Технології програмної віртуалізації.....	170
4.1.1. Принципи програмної віртуалізації.....	170
4.1.2. Віртуальна машина JVM.....	173
4.1.3. JIT-компіляція.....	181
4.1.4. Адаптивна оптимізація програмного коду.....	184
4.2. Програмна технологія LLVM.....	188
4.2.1. Огляд програмної технології LLVM.....	188
4.2.2. Компоненти програмної технології LLVM.....	195
4.2.3. Структура LLVM IR.....	198
4.2.4. Порядок роботи з інструментами LLVM.....	202
4.2.5. Приклад використання LLVM.....	205
Контрольні питання.....	207

Термінологічний словник.....	209
Література.....	217

Вступ

Використання технологій віртуалізації дозволяє суттєво підвищити продуктивність інформаційних систем та інтернет-сервісів, в тому числі з використанням технологій хмарних обчислень (cloud computing) за рахунок розширення функціональності системного рівня по управлінню апаратним забезпеченням та програмними компонентами [1-7]. Технології апаратної та програмної віртуалізації застосовують для підвищення ефективності використання системних ресурсів, в тому числі шляхом запуску кількох віртуальних машин на одному фізичному сервері, що зменшує витрати на обладнання та енергію. Технології віртуалізації також дозволяють створювати ізольовані середовища для тестування, захищати дані, забезпечувати гнучкість інфраструктури та спрощувати управління, включаючи швидке розгортання, резервне копіювання та відновлення систем. Відтак розробка і використання технологій віртуалізації є надзвичайно актуальним питанням в області інформаційних технологій. Безкоштовна та відкрита операційна система Linux (ОС Linux) є основною ОС сучасних суперкомп'ютерів та високопродуктивних комп'ютерних систем. Крім цього ядро ОС Linux широко використовується для управління мобільними обчислювальними пристроями (смартфонами, планшетами, тощо) та вбудованими обчислювальними пристроями різного призначення, в тому числі в рамках концепції Інтернету речей (Internet of Things, IoT). Розробка та застосування технологій віртуалізації, як на рівні системного, так і на рівні прикладного програмного забезпечення, є одним з головних напрямків розвитку ОС Linux. Значна кількість інформаційних систем на основі ОС Linux в тому, чи іншому вигляді використовує технології віртуалізації задля максимального використання обчислювального ресурсу сучасних комп'ютерних систем та забезпечення високої продуктивності роботи.

В навчальному посібнику розглянуто основи розробки та використання технологій віртуалізації в ОС Linux на системному та користувацькому рівні. Оглянуто концепцію та основні принципи віртуалізації. Наведено класифікацію основних способів та технологій віртуалізації в сучасних комп'ютерних системах. Розглянуто варіанти застосування технологій віртуалізації на практиці. Основна увага приділена технологіям апаратної віртуалізації в ОС Linux та відповідним програмним засобам системного та користувацького рівня. Розглянуто базову для ОС Linux технологію апаратної віртуалізації KVM, питання її апаратної підтримки та налаштування. Оглянуто способи управління апаратною віртуалізацією в ОС Linux з використанням системного програмного забезпечення та утиліт libvirt. Детально розглянуто принципи роботи програмного емулятора QEMU та організацію функціонування KVM у взаємодії з QEMU на користувацькому рівні, в тому числі розглянуто програмний інтерфейс KVM. Оглянуто основну функціональність засобів віртуалізації KVM/QEMU, зокрема клонування віртуальних машин, створення та використання знімків віртуальних машин, а також міграцію віртуальних машин,

в тому числі міграцію з зупинкою та динамічну міграцію. Оглянуто способи та технології контейнеризації (віртуалізації на рівні операційної системи) в ОС Linux, в тому числі механізм розподілу системних ресурсів Linux namespaces та механізм управління системними ресурсами cgroups. Розглянуто питання використання віртуалізації на рівні операційної системи на прикладі технологій контейнеризації LXC, Docker та Kubernetes. Оглянуто принципи та технології програмної віртуалізації, в тому числі розглянуто віртуальну машину JVM. Розкрито питання JIT-компіляції та адаптивної оптимізації програмного коду. Розглянуто програмну технологію LLVM, її основні компоненти, порядок роботи з інструментами LLVM та приклади їх використання.

Метою навчального посібника є виробити у студентів чітке та систематизоване уявлення про технології апаратної та програмної віртуалізації комп'ютерних систем та обчислювальних середовищ, надати студентам базові знання про принципи роботи та використання технологій віртуалізації в ОС Linux, а також надати навички практичного застосування цих технологій для віртуалізації компонент інформаційних систем на системному та користувацькому рівні. Використання навчального посібника допоможе студенту досягнути наступних результатів навчання: знати загальні принципи побудови та використання засобів апаратної та програмної віртуалізації комп'ютерних систем та обчислювальних середовищ; знати принципи створення та використання віртуальних машин, гіпервізорів та програмних засобів контейнеризації; знати основні напрямки та методи проектування апаратно-програмних компонент засобів апаратної та програмної віртуалізації, а також внутрішні механізми функціонування віртуальних машин; розуміти концептуальні основи функціонування системного та прикладного програмного забезпечення технологій віртуалізації в ОС Linux, в тому числі KVM, QEMU та libvirt; вивчити принципи роботи засобів апаратної віртуалізації, гіпервізорів та програмних технологій контейнеризації в ОС Linux; вміти працювати з сучасними засобами апаратної і програмної віртуалізації в ОС Linux; вивчити принципи роботи програмної технології LLVM та порядок роботи з інструментами LLVM.

Навчальний посібник призначений для студентів спеціальності F7 «Комп'ютерна інженерія» галузі знань F «Інформаційні технології», зокрема для студентів другого (магістерського) рівня вищої освіти спеціалізацій F7.01 «Комп'ютерні системи та мережі», F7.02 «Системне програмування», F7.03 «Спеціалізовані комп'ютерні системи». В основу посібника покладено навчальні матеріали, розроблені та підготовлені автором для викладання навчальних дисциплін «Проектування віртуальних машин», «Проектування операційних систем, утиліт і драйверів» та «Організація обчислювальних процесів у паралельних системах» на кафедрі електронних обчислювальних машин Національного університету «Львівська політехніка».

НАВЧАЛЬНЕ ВИДАННЯ

Бочкар'ов Олексій Юрійович

Технології віртуалізації в ОС Linux

Навчальний посібник

для студентів галузі знань F «Інформаційні технології»
спеціальності F7 «Комп'ютерна інженерія»

Навчальний посібник

Формат 70x100/16. Папір офсетний. Друк цифровий.

Гарнітура Times New Roman.

Умовн. друк. арк. 17,55.

Видавець Марченко Т.В.

м. Львів, 79053, Україна, Перфецького 11 А, тел. +380503701957

e-mail: magno106@ukr.net

<http://magnolia.lviv.ua>

Видавець Марченко Т.В.

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи
до Державного реєстру видавців, виготовлювачів і
розповсюджувачів видавничої продукції:

ДК№6784 від 30.05.2019 року,

видане Державним комітетом інформаційної політики,
телебачення та радіомовлення України

Надруковано у друкарні видавця ФОП Марченко Т.В.