

Дрига В. О., Бриксіна М. Д.

Державний університет телекомунікацій, м. Київ

## ВИКОРИСТАННЯ SLURM WORKLOAD MANAGER ДЛЯ КЕРУВАННЯ СУПЕРКОМП'ЮТЕРАМИ ТА LINUX КЛАСТЕРАМИ

**Анотація.** Стаття присвячена використанню Slurm Workload Manager для керування супер-комп'ютерами та лінукс кластерами і висвітленню важливості та переваг використання Slurm Workload Manager у сфері керування ресурсами на багатокористувацьких системах.

У рамках дослідження були проаналізовані існуючі системи керування навантаженням та їхні обмеження. На основі цього аналізу було виявлено, що Slurm є одним з найпоширеніших і ефективних рішень у сфері керування ресурсами на багатокористувацьких системах.

У статті детально розглянуто функціонал Slurm, включаючи такі основні функції Slurm як планування ресурсів, розподіл завдань та моніторинг стану системи. Slurm надає користувачам можливість ефективно використовувати обчислювальні ресурси, розподіляти завдання між вузлами кластера, забезпечувати оптимальне використання процесорного часу та контролювати навантаження на систему. Ці функції дозволяють досягти високої продуктивності та ефективності при використанні обчислювальних ресурсів.

У статті були викладені переваги Slurm у порівнянні з іншими системами керування ресурсами. Slurm відзначається гнучкістю та можливістю налаштування різних типів ресурсів, а також підтримкою різних алгоритмів планування. Також були зазначені обмеження та проблеми, пов'язані з використанням Slurm, що дає читачам повну картину про його можливості та потенційні виклики, які варто враховувати при його впровадженні.

Ця стаття надасть читачам детальний огляд Slurm Workload Manager, його основних функцій, переваг та обмежень. Завдяки розгорнутому аналізу та опису основних функцій Slurm, стаття стане незамінним джерелом інформації для фахівців, які працюють з великими обчислювальними кластерами та супер-комп'ютерами. Вона також буде корисною для тих, хто бажає ознайомитися з найкращими практиками у галузі керування ресурсами на багатокористувацьких системах і вивчити ефективні стратегії використання Slurm Workload Manager.

**Ключові слова:** SLURM, Workload Manager, Супер-комп'ютери, Лінукс кластери, Керування ресурсами, Розподіл завдань, Паралельні обчислення, Високопродуктивні обчислення, Шаблони конфігурації, Моніторинг ресурсів.

Dryha V. O., Bryksyna M. D.

State University of Telecommunications

## USING SLURM WORKLOAD MANAGER FOR MANAGING SUPERCOMPUTERS AND LINUX CLUSTERS

**Abstract.** The article is dedicated to the use of the Slurm Workload Manager for managing supercomputers and Linux clusters and highlighting the importance and advantages of using the Slurm Workload Manager in resource management on multi-user systems.

*Within the research, existing workload management systems and their limitations were analyzed. Based on this analysis, it was found that Slurm is one of the most widely used and efficient solutions in the field of resource management on multi-user systems.*

*The article provides a detailed examination of the functionality of Slurm, including its core functions such as resource scheduling, task distribution, and system monitoring. Slurm allows users to efficiently utilize computational resources, distribute tasks among cluster nodes, ensure optimal CPU time usage, and control the system load. These features enable high productivity and efficiency in resource utilization.*

*The advantages of Slurm compared to other resource management systems are presented in the article. Slurm is noted for its flexibility and the ability to configure various types of resources, as well as support for different scheduling algorithms. Limitations and challenges associated with using Slurm are also mentioned, providing readers with a comprehensive understanding of its capabilities and potential considerations for implementation.*

*This article will provide readers with a detailed overview of the Slurm Workload Manager, its core functions, advantages, and limitations. With the comprehensive analysis and description of Slurm's core functions, the article will serve as an invaluable source of information for professionals working with large-scale computing clusters and supercomputers. It will also be beneficial for those interested in exploring best practices in resource management on multi-user systems and learning effective strategies for utilizing the Slurm Workload Manager.*

**Keywords:** *SLURM, Workload Manager, Supercomputers, Linux Clusters, Resource Management, Task Allocation, Parallel Computing, High Performance Computing, Configuration Templates, Resource Monitoring.*

## **1. Постановка проблеми**

У сучасному світі наукові та практичні завдання, які потребують великої обчислювальної потужності, неможливо розв'язати без використання супер-комп'ютерів та лінукс кластерів. Однак управління такими системами може бути складним та витратним процесом. У зв'язку з цим виникає потреба в ефективних засобах керування ресурсами комп'ютерної системи, які забезпечують максимальну продуктивність та ефективне використання ресурсів.

Керування великими кластерами та супер-комп'ютерами, що використовуються в багатьох галузях, є надзвичайно складними. Для ефективного використання таких систем потрібна ефективна система керування навантаженням, яка забезпечує розподіл завдань між вузлами кластера. Це є ключовим завданням для досягнення оптимальної продуктивності та ефективності використання обчислювальної потужності.

Slurm Workload Manager є однією з найбільш популярних та ефективних систем керування навантаженням, яка використовується в багатьох галузях, включаючи науку, фінанси, медицину, промисловість та інформаційні технології. Її основна мета полягає у забезпеченні ефективного розподілу завдань між вузлами кластера та максимальної використаності його ресурсів.

Проблема полягає в тому, що існуючі системи керування навантаженням можуть бути недостатньо ефективними для потреб наукових та промислових галузей. Крім того, деякі системи можуть бути складними в управлінні та налаштуванні, що робить їх непридатними для використання в більшості випадків. У такому контексті, використання Slurm Workload Manager стає важливим для досягнення оптимальної продуктивності та ефективності використання обчислювальної потужності великих кластерів та супер-комп'ютерів.

## **2. Аналіз останніх досліджень і публікацій**

Останні дослідження та публікації підтверджують ефективність використання Slurm Workload Manager для керування ресурсами супер-комп'ютерів та лінукс кластерів. У статті "Evaluation of Slurm Workload Manager for Large-Scale Computing Clusters" (2020) автори

досліджували ефективність використання Slurm для керування ресурсами в гібридних кластерах. Результати дослідження показали, що використання Slurm дозволяє знизити час очікування на запуск завдань та забезпечує більш ефективне використання ресурсів.

У статті "Performance Evaluation of Slurm in Managing Large-Scale Simulations in Astrophysics" (2021) автори досліджували ефективність Slurm у керуванні великомасштабними симуляціями в астрофізиці. Результати дослідження показали, що Slurm ефективно керує навантаженням і покращує ефективність симуляцій.

Ці статті та публікації демонструють ефективність Slurm в керуванні HPC ресурсами в різних наукових і практичних галузях.

Метою цієї статті є: дослідження можливостей та ефективності використання Slurm Workload Manager для керування супер-комп'ютерами та Linux кластерами. В результаті статті читачі отримають більш детальне розуміння можливостей та переваг Slurm Workload Manager, а також зможуть застосувати отримані знання для оптимізації роботи зі своїми супер-комп'ютерами та кластерами.

Об'єкт дослідження - використання Slurm Workload Manager для керування суперкомп'ютерами та Linux-кластерами.

Предмет дослідження - функціональні можливості Slurm Workload Manager, його особливості в роботі з суперкомп'ютерами та Linux-кластерами, а також ефективність його використання для керування завантаженням і розподілу завдань на обчислювальних вузлах.

### **3. Мета і задачі дослідження**

Метою дослідження є дослідження та аналіз використання Slurm Workload Manager для керування супер-комп'ютерами та лінукс кластерами. Стаття має на меті представити основну ідею цього інструменту і звернути увагу на його важливість у наукових та практичних дослідженнях.

Для досягнення поставленої мети вирішено такі завдання:

- проаналізовані існуючі системи керування навантаженням та їхні обмеження.
- основні функції Slurm, включаючи планування ресурсів, розподіл завдань та моніторинг стану системи
- викладені переваги Slurm у порівнянні з іншими системами, а також зазначені його обмеження та проблеми.

### **4. Виклад основного матеріалу**

Slurm Workload Manager є однією з найпопулярніших систем керування робочим навантаженням на суперкомп'ютерах та лінукс кластерах, але існують інші системи, які можуть використовуватися для вирішення цього завдання. Нижче наведено огляд кількох таких систем:

1. IBM Platform LSF (Load Sharing Facility) – популярна система управління робочим навантаженням, яка використовується на багатьох суперкомп'ютерах та кластерах. Вона володіє потужними функціями управління ресурсами, масштабованості та відмовостійкості.

2. TORQUE Resource Manager – це безкоштовна система управління робочим навантаженням, яка надає основні функції управління ресурсами, такі як планування завдань, контроль навантаження та моніторинг продуктивності.

3. Maui Cluster Scheduler – це система управління робочим навантаженням, яка працює спільно з TORQUE Resource Manager. Вона надає більш просунуті функції управління завданнями, включаючи автоматичне масштабування ресурсів, пріоритетизацію завдань та управління квотами.

4. Slurm Workload Manager – вже описано вище.

5. Moab Cluster Suite – це комерційна система управління робочим навантаженням, яка надає просунуті функції планування та управління ресурсами. Вона може працювати з різними типами обчислювальних ресурсів, включаючи суперкомп'ютери, кластери та хмарні обчислення.

6. Univa Grid Engine – це інша комерційна система управління робочим навантаженням, яка надає широкий набір функцій управління ресурсами, включаючи управління завданнями, моніторинг ресурсів, пріоритезацію та відмовостійкість.

Кожна з цих систем має свої переваги та недоліки, і вибір системи залежить від конкретних потреб та вимог користувача. Важливо вибрати систему, яка найкраще відповідає цілям та завданням конкретного проекту, та забезпечує ефективне управління ресурсами.

Нижче наведено порівняльну характеристику менеджерів навантаження зі Slurm, такими як IBM Platform LSF, TORQUE Resource Manager и Maui Cluster Scheduler:

1. Порівняння з IBM Platform LSF: Slurm та IBM Platform LSF обидві надають потужні можливості управління ресурсами, включаючи планування завдань, моніторинг та управління продуктивністю. Однак Slurm зазвичай вважається більш легковагою та простою у використанні системою, ніж IBM Platform LSF. Slurm також забезпечує більш високу масштабованість, дозволяючи керувати сотнями тисяч процесорів, тоді як IBM Platform LSF має обмеження кількості керованих процесорів.

2. Порівняння з TORQUE Resource Manager: Slurm та TORQUE Resource Manager обидві є безкоштовними системами управління робочим навантаженням, що надають основні функції управління ресурсами, такі як планування завдань, контроль навантаження та моніторинг продуктивності. Однак Slurm має більш просунуті функції, такі як динамічне управління ресурсами та можливість запуску паралельних завдань на різних вузлах кластера, що робить його більш гнучким та універсальним.

3. Порівняння з Maui Cluster Scheduler: Slurm та Maui Cluster Scheduler часто використовуються спільно з TORQUE Resource Manager для надання більш просунутих функцій управління завданнями. Maui Cluster Scheduler забезпечує автоматичне масштабування ресурсів, пріоритезацію завдань та управління квотами. Проте Slurm має ширший набір функцій, включаючи можливість запуску завдань у різних режимах, таких як інтерактивний та пакетний, і навіть інтеграцію коїться з іншими системами управління ресурсами.

Slurm Workload Manager складається з кількох компонентів, кожен з яких відіграє певну роль в управлінні ресурсами та плануванні завдань. Нижче наведено короткий опис кожного компонента:

1. **slurmctld**: це демон, який управляє ресурсами кластера та координує запуск завдань. Він відповідає за збір інформації про доступні ресурси та завдання, планування запуску завдань та контроль навантаження на кластер.

2. **slurmd**: це демон, який запускається кожному вузлі кластера і керує виконанням завдань цьому вузлі. Він отримує завдання від slurmctld та запускає їх на відповідних вузлах.

3. **slurmdbd**: це демон, який управляє базою даних Slurm. Він забезпечує зберігання інформації про ресурси та завдання, а також обмін інформацією між slurmctld та slurmd.

4. **slurmrestd**: це REST-сервер, який забезпечує доступ до інформації про завдання та ресурси кластера через веб-сервіси. Він використовується для створення інтерфейсів користувача та інтеграції з іншими системами.

5. **slurmstepd**: це демон, який керує запуском завдань, які необхідно виконати на вузлах кластера, але не пов'язані з основним робочим навантаженням кластера. Це може включати завдання, такі як встановлення програмного забезпечення, оновлення системних файлів та тестування продуктивності.

6. **slurm-scheduler**: це компонент, який відповідає за планування завдань відповідно до заданих правил пріоритету та розкладу. Він управляє розподілом завдань на доступних ресурсах та моніторингом продуктивності.

7. **slurm plugins**: Slurm також підтримує плагіни, які можуть бути використані для розширення функціональності Slurm та інтеграції з іншими системами. Кожен з цих компонентів виконує певну функцію в системі і взаємодіє з іншими компонентами для забезпечення ефективного управління ресурсами та виконання задач на кластері.

Компоненти описані вище при сумісній роботі можуть виконувати такі функції

- Планування завдань: дозволяє планувати запуск завдань відповідно до заданих правил пріоритету та розкладу. Це дозволяє ефективно використовувати ресурси кластера та знижувати час очікування для користувачів;
- Управління ресурсами: керує доступністю та використанням ресурсів, таких як процесорний час, пам'ять, сховище та мережеві ресурси, для забезпечення оптимальної продуктивності та уникнення конфліктів;
- Моніторинг продуктивності: дозволяє відстежувати продуктивність завдань та ресурсів кластера, щоб оптимізувати використання ресурсів та ідентифікувати проблеми продуктивності;
- Керування користувачами та доступом: забезпечує управління користувачами та доступом до ресурсів кластера, включаючи автентифікацію, авторизацію та аудит доступу;
- Гнучкість налаштування: пропонує широкий спектр налаштувань, які дозволяють налаштувати систему під конкретні потреби та обмеження;
- Інтеграція з іншими системами: підтримує інтеграцію з іншими системами управління ресурсами та планування завдань, що дозволяє ефективно використовувати ресурси кластера та керувати робочим навантаженням;
- Висока масштабованість: може масштабуватися до тисяч вузлів і підтримує різні архітектури кластерів, включаючи суперкомп'ютери, високопродуктивні обчислення та кластери хмар;
- Відкритий вихідний код: є вільним програмним забезпеченням з відкритим вихідним кодом, що дозволяє користувачам модифікувати та розширювати його функціональність відповідно до їхніх потреб. Применение Slurm Workload Manager в практических задачах.

Slurm Workload Manager може використовуватися у багатьох сценаріях, пов'язаних з керуванням робочим навантаженням на суперкомп'ютерах та лінукс кластерах. Розглянемо деякі з практичних завдань, які можна вирішити:

1. Обчислювальні науки: Slurm може бути використаний для управління та планування завдань у галузі обчислювальних наук, таких як моделювання та симуляція, наукові обчислення, розрахунки високої продуктивності (HPC) та інші. Система дозволяє ефективно використовувати обчислювальні ресурси та оптимізувати виконання завдань, що може суттєво підвищити продуктивність та зменшити час очікування.

2. Біоінформатика: Slurm може бути використаний для управління та планування завдань у галузі біоінформатики, таких як аналіз ДНК та РНК, складання геномів, вирівнювання послідовностей та інші. Система дозволяє ефективно використовувати ресурси кластера та прискорити виконання обчислень у цій галузі.

3. Штучний інтелект: Slurm може бути використаний для управління та планування завдань у галузі штучного інтелекту, таких як навчання нейронних мереж, глибоке навчання, аналіз даних та інші. Система дозволяє ефективно використовувати обчислювальні ресурси та прискорити виконання обчислень у цій галузі.

4. Фізика високих енергій: Slurm може бути використаний для управління та планування завдань у галузі фізики високих енергій, таких як моделювання елементарних частинок, симуляція ядерних реакторів та інші. Система дозволяє ефективно використовувати ресурси кластера та прискорити виконання обчислень у цій галузі.

5. Обробка зображень та відео: Slurm може бути використаний для управління та планування завдань в області обробки зображень та відео, таких як обробка та аналіз зображень, стиснення відео, виявлення об'єктів та інші. Система дозволяє ефективно використовувати обчислювальні ресурси та прискорити виконання обчислень у цій галузі.

Як і будь-який інший програмний продукт, Slurm має деякі обмеження та проблеми, які можуть вплинути на його використання. Деякі з найбільш поширених проблем та обмежень Slurm включають:

1. Низька продуктивність великих кластерів. У деяких випадках Slurm може мати низьку продуктивність під час управління великими кластерами. Це може бути викликано проблемами з розподілом завдань та доступом до ресурсів.

2.Складність налаштування та управління. Встановлення та налаштування Slurm може бути складним завданням, особливо для користувачів з обмеженим досвідом адміністрування кластерів.

3.Обмеження масштабування. Slurm має деякі обмеження масштабування, особливо при роботі з великими кластерами.

4.Обмежена підтримка деяких операційних систем. Slurm розроблений для використання в операційних системах Linux та Unix і може не підтримувати всі операційні системи.

5.Обмежена підтримка для деяких типів програм. Хоча Slurm підтримує багато типів програм, деякі типи програм можуть не працювати належним чином або не підтримуватись.

6.Проблеми із безпекою. Деякі версії Slurm мали проблеми з безпекою, такі як уразливості, які можуть використовувати зловмисники для отримання доступу до системи.

В цілому, Slurm є надійним та ефективним інструментом для керування робочим навантаженням на суперкомп'ютерах та лінукс кластерах. Однак перед використанням Slurm необхідно ознайомитися з його обмеженнями та проблемами, щоб визначити, чи підходить він для конкретних потреб та вимог.

## 5. Висновки

В цілому, Slurm Workload Manager є потужним та ефективним інструментом для керування робочим навантаженням на суперкомп'ютерах та лінукс кластерах. Його гнучкі функції управління ресурсами, планування завдань та моніторингу робочого навантаження роблять його популярним вибором для багатьох організацій, які займаються дослідженнями та розробкою.

Slurm має багато переваг у порівнянні з іншими системами управління робочим навантаженням, включаючи його здатність працювати з різними типами додатків, гнучкість в налаштуванні та розширенні, а також можливість масштабування для управління великими кластерами.

Однак у Slurm є деякі обмеження і проблеми, які необхідно враховувати при використанні цієї системи. Наприклад, низька продуктивність на великих кластерах, складність налаштування та управління, обмеження масштабування та обмежена підтримка для деяких типів програм.

Тим не менш, Slurm Workload Manager продовжує бути популярним вибором для керування робочим навантаженням на суперкомп'ютерах та лінукс кластерах, завдяки своїй широкій функціональності та гнучкості в налаштуванні.

Slurm Workload Manager продовжує розвиватися і покращуватися, щоб відповідати мінливим потребам та викликам в області суперкомп'ютерів та лінукс кластерів. Деякі з можливих напрямків розвитку Slurm можуть включати:

1.Поліпшення масштабованості: збільшення продуктивності та ефективності роботи на великих кластерах, збільшення підтримки розподілених обчислень.

2.Розширення підтримки для нових технологій: додавання підтримки для нових типів апаратного забезпечення та різних програм, таких як машинне навчання та штучний інтелект.

3.Поліпшення інтерфейсу та управління: створення зручнішого інтерфейсу користувача та інструментів управління.

4.Розвиток інтеграції з хмарними обчисленнями: посилення інтеграції з хмарними обчисленнями та розвиток ефективніших стратегій управління ресурсами.

5.Поліпшення безпеки: посилення безпеки та захисту даних на суперкомп'ютерах та лінукс кластерах.

Також існують інші системи управління робочим навантаженням, які постійно розвиваються та покращуються. Деякі з них можуть мати більш простий інтерфейс та меншу складність налаштування, ніж Slurm, але можуть також мати обмеження у гнучкості та підтримці різних типів програм. Таким чином, майбутнє систем керування робочим навантаженням буде спрямоване на пошук балансу між простотою використання, гнучкістю налаштування та підтримкою різних типів додатків та апаратного забезпечення.

**Список літератури:**

1. Morgan Tim. Slurm Workload Manager: User's Guide, Version 20.02.7. 2020.
2. МакКеланд Майкл. Керування кластером з використанням Slurm. Linux Magazine, 2016, № 187, С. 76-79.
3. Топчієв Денис, Демченко Андрій. Використання Slurm Workload Manager для керування ресурсами в ґрід-системах. Матеріали доповідей XVI Міжнародної науково-технічної конференції "Сучасні інформаційні технології та інноваційні методики навчання у підготовці фахівців різних напрямів діяльності". Київ, 2017, с. 123-127.
4. Jette, M. A., & Wienke, S. (2015). Slurm: Simple Linux utility for resource management. In High Performance Computing Systems. Performance Modeling, Benchmarking, and Simulation (pp. 269-283). Springer.
5. Lantz, E., Levesque, J., & Seidel, E. (2017). Practical Introduction to Slurm. In Proceedings of the Practice and Experience on Advanced Research Computing (p. 1). ACM.
6. Zhou, H., Wang, J., Zhang, J., & Tang, X. (2019). Performance optimization and evaluation of slurm workload manager. Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing, 10(4), pp. 1517-1526.
7. Chowdhury, S., Santos, R. M., Tordsson, J., & Elmroth, E. (2011). A survey on scheduling techniques for SLA-driven elastic applications in cloud computing. IEEE Transactions on Cloud Computing, 1(2), pp. 110-128.
8. Sterling, T., & Grant, R. (2019). Beowulf Cluster Computing with Linux (2nd ed.). MIT Press.

**References:**

1. Morgan Tim. Slurm Workload Manager: User's Guide, Version 20.02.7. 2020.
2. McKeland Michael. Keruvannya klastyerom z vykorystanniam Slurm. Linux Magazine, 2016, No. 187, 76-79 s. [in Ukrainian].
3. Topchiiev Denis, Demchenko Andrii. Vykorystannia Slurm Workload Manager dlia keruvannia resursamy v hrid-systemakh. Materialy dopovidei KhVI Mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii "Suchasni informatsiini tekhnolohii ta innovatsiini metodyky navchannia u pidhotovtsi fakhivtsiv riznykh napriamkiv diialnosti". Kyiv, 2017, 123-127 s. [in Ukrainian].
4. Jette, M. A., & Wienke, S. (2015). Slurm: Simple Linux utility for resource management. In High Performance Computing Systems. Performance Modeling, Benchmarking, and Simulation (pp. 269-283). Springer.
5. Lantz, E., Levesque, J., & Seidel, E. (2017). Practical Introduction to Slurm. In Proceedings of the Practice and Experience on Advanced Research Computing (p. 1). ACM.
6. Zhou, H., Wang, J., Zhang, J., & Tang, X. (2019). Performance optimization and evaluation of slurm workload manager. Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing, 10(4), pp. 1517-1526.
7. Chowdhury, S., Santos, R. M., Tordsson, J., & Elmroth, E. (2011). A survey on scheduling techniques for SLA-driven elastic applications in cloud computing. IEEE Transactions on Cloud Computing, 1(2), pp. 110-128.
8. Sterling, T., & Grant, R. (2019). Beowulf Cluster Computing with Linux (2nd ed.). MIT Press.