

**МАРКОВСКИЕ МОДЕЛИ НАДЁЖНОСТИ
ВОССТАНАВЛИВАЕМОГО КЛАСТЕРА С МИГРАЦИЕЙ
ВИРТУАЛЬНЫХ КОНТЕЙНЕРОВ**

До Мань Кием

Аспирант

Факультет ПИиКТ, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: domanhkiemnd@gmail.com

Научный руководитель — *Богатырев Владимир Анатольевич*

Технология контейнерной виртуализации всё шире применяется при построении отказоустойчивых кластеров высокой готовности с малыми задержками обслуживания потоков запросов. При проектировании таких кластеров ключевой задачей является обоснование структурно-параметрических решений с учётом влияния числа развёртываемых контейнеров на производительность, задержки обслуживания и надёжность системы [1, 2].

Для обоснования решений по обеспечению высокой готовности кластера разработаны марковские модели восстанавливаемого кластера при реконфигурации с учётом миграции виртуальных контейнеров. Рассматривается кластер, включающий два физических сервера и балансировщик нагрузки, управляющий распределением запросов и миграцией контейнеров при отказах серверов.

Новизна предложенных моделей состоит в учёте **двухэтапности** восстановления работоспособности кластера. **Этап 1** — миграция контейнеров после отказа сервера *до* его физического восстановления. **Этап 2** — загрузка контейнеров после физического восстановления отказавшего сервера. Рассмотрены два варианта реконфигурации.

Вариант 1: на этапе 1 миграция контейнеров не выполняется; исправный сервер продолжает работу с исходным числом контейнеров. На этапе 2 в восстановленный сервер загружается изначальное число контейнеров n_0 . Коэффициент готовности: $K = P_0 + P_1 + P_2$.

Вариант 2: на этапе 1 под управлением балансировщика выполняется миграция n_1 контейнеров на исправный сервер ($n_1 \geq n_0$). На этапе 2 оба сервера получают заданное число контейнеров. Коэффициент готовности: $K = P_0 + P_2 + P_5 + P_7$, где P_i — стационарные вероятности состояний системы.

Диаграммы состояний и переходов для обоих вариантов представлены на рис. 1.

Иллюстрации

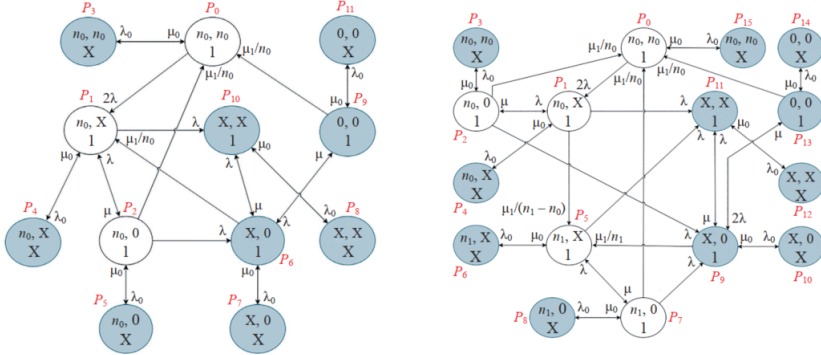


Рис. 1. Слева: вариант 1 — без миграции на этапе 1. Справа: вариант 2 — с миграцией на этапе 1

На рисунках белые узлы — работоспособные состояния кластера, закрашенные узлы — неработоспособные. Обозначения: n_0 — исходное число контейнеров на каждом сервере; n_1 — число контейнеров, загружаемых на исправный сервер при реконфигурации; «0» — сервер физически восстановлен, контейнеры ещё не загружены; «1» — балансировщик исправен; «X» — компонент отказал; λ , λ_0 — интенсивности отказов сервера и балансировщика; μ , μ_1 — интенсивности физического и информационного восстановлений серверов; μ_0 — интенсивность восстановления балансировщика.

При расчётах: $n_0 = 2$, $\lambda = \lambda_0 = 10^{-4}$ 1/ч, $\mu_0 = \mu = \mu_1 = 0,1$ 1/ч. Результаты показывают, что увеличение числа мигрирующих контейнеров n_1 на этапе 1 снижает коэффициент готовности кластера (таблица).

Таблица. Зависимость коэффициента готовности кластера от числа контейнеров n_1

n_1 , шт.	Коэфф. готовн. K	Примечание
2	0,998995	Миграция контейнеров на этапе 1 отсутствует
3	0,998331	Число загружаемых контейнеров меньше числа контейнеров в отказавшем сервере
4	0,997999	Полная миграция всех контейнеров с отказавшего сервера
5	0,997799	Число контейнеров в исправном сервере больше, чем в отказавшем

Снижение коэффициента готовности при увеличении n_1 объясняется тем, что миграция замедляет процесс реконфигурации: к времени физического восстановления добавляется время информационного восстановления, что увеличивает риск перехода системы в неработоспособные состояния. Вместе с тем миграция позволяет поддерживать оптимальное число активных контейнеров, обеспечивая более высокую производительность при частичном отказе.

Предложенные модели ориентированы на обоснование проектных решений по обеспечению надёжности восстанавливаемых кластеров с контейнерной виртуализацией — в частности, по выбору дисциплин восстановления и числа мигрирующих контейнеров на каждом этапе реконфигурации [3].

Литература

1. Фунг В., Богатырев В. А., Кармановский Н. С., Лэ В. Х. Оценка вероятностно-временных характеристик компьютерной системы с контейнерной виртуализацией // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2024. Т. 24, № 2. С. 249–255.
2. Bogatyrev V. A., Derkach A. N. Evaluation of a cyber-physical computing system with migration of virtual machines during continuous computing // Computers. 2020. V. 9. № 2. P. 42.
3. Bogatyrev V. A., Bogatyrev S. V., Bogatyrev A. V. Assessment of the readiness of a computer system for timely servicing of requests combined with information recovery of memory // Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics. 2023. V. 23. № 3. P. 608–617.