Определение ограничений облачной платформы на миграцию ресурсов

А.С. Чадин <alexander.chadin@icloud.com>

Г.А. Бизюкин <uashir@mail.ru>

МИРЭА – Российский Технологический Университет,
119454, Россия, г. Москва, проспект Вернадского, д. 78.

Аннотация. В этой статье рассматриваются разные виды миграции виртуальных машин между вычислительными ресурсами, их логические и физические ограничения в системе OpenStack. Для живой миграции рассмотрены такие методы миграции памяти как pre-cory и post-cory, их временные различия. В разд. 2 для метода post-cory описан алгоритм работы на уровне гипервизора. Проведено сравнение временных показателей для методов pre-cory и post-cory. В разд. 3 описаны физические ограничения для виртуальных сред; эти ограничения учитываются при составлении соглашения об уровне предоставления услуг. Логические ограничения на миграцию виртуальных машин описаны в разд. 5; эти ограничения должны учитываться при построении стратегии распределения ресурсов в облаке. В разд. 6 кратко проанализированы родственные работы. В заключении отмечено, что ограничения необходимо учитывать при разработке стратегий распределения ресурсов.

Ключевые слова: облачные системы; живая миграция; распределение ресурсов.

DOI: 10.15514/ISPRAS-2019-31(1)-4

Для цитирования: Чадин А.С., Бизюкин Г.А. Определение ограничений облачной платформы на миграцию ресурсов. Труды ИСП РАН, том 31, вып. 1, 2019 г., стр. 59-68. DOI: 10.15514/ISPRAS-2019-31(1)-4

1. Введение

Облачные вычисления позволяют использовать разные типы ресурсов (CPU, RAM, Storage) наиболее эффективно за счёт предоставления этих ресурсов многим пользователям и проектам в распределенном режиме. При этом одним из самых значимых преимуществ облачного окружения является возможность переносить виртуальные ресурсы между различными узлами. Для автоматического переноса виртуальных ресурсов проектируются системы, учитывающие показатели нагрузки в облачном окружении, аппаратные и логические ограничения. Такие системы работают с аппаратными платформами, которые могут быть построены на различных архитектурах и между ними может отсутствовать совместимость. Данные ограничения необходимо учитывать при проектировании стратегий распределения вычислительных ресурсов в кластере. В данной работе рассмотрены временные, физические и логические ограничения в миграциях виртуальных машин в облачной системе OpenStack [1].

2. Виды миграций виртуальных машин

Миграция виртуальных ресурсов используется для балансирования вычислительных ресурсов в облачном кластере, снижения потребления электроэнергии и переноса ресурсов между географически-распределенными проектами. Миграцией виртуальных машин называют процесс переноса ресурсов виртуальной машины с исходного вычислительного узла на целевой вычислительный узел. Миграция виртуальной машины включает в себя перенос состояния регистров CPU, подключенных устройств [2]. Выделяют три типа миграции.

- *Холодная миграция.* Виртуальная машина находится в выключенном состоянии, её копия создается на целевом узле, к которой подключаются все внешние устройства (блочные устройства, GPU).
- *Горячая миграция.* Виртуальная машина переводится в состояние гибернации (энергосберегающий режим) и страницы оперативной памяти переносятся на целевой узел, где копия виртуальной машины выходит из гибернации.
- *Живая миграция.* Виртуальная машина находится в активном состоянии, её страницы оперативной памяти переносятся гипервизором на целевой узел. После переноса большинства страниц виртуальная машина приостанавливает свою работу и оставшиеся страницы копируются. После копирования всех страниц оперативной памяти подключаются внешние устройства.

Из перечисленных типов миграций наибольший интерес для исследований представляет живая миграция, так как при ее использовании пользователь виртуальной машины может взаимодействовать с рабочим окружением виртуальной машины. В таких условиях время недоступности виртуальной машины должно быть сведено к минимуму.

Различают два метода живой миграции виртуальной машины:

- *Предварительная копия (pre-cory)* – гипервизор копирует страницы памяти виртуальной машины на целевой узел, и только после копирования последней страницы памяти запускает новую виртуальную машину. Данный метод подходит для миграции виртуальных машин с данными, потеря которых критична. В случае потери сетевого соединения между двумя гипервизорами исходная виртуальная машина продолжит свою работу.
- *Копия страниц по запросу (post-cory)* – на целевой узел переносится вся информация, необходимая для запуска виртуальной машины. Страницы оперативной памяти переносятся по запросу. В случае потери соединения восстановить виртуальную машину не представляется возможным.

Рассмотрим время работы метода предварительной копии. При переносе страниц оперативной памяти на целевой узел виртуальная машина продолжает быть доступной для пользователя (с сохранением ввода-вывода, сетевой активности). Для управления и прогнозирования нагрузки узлов в кластере операторы определяют общее время миграции виртуальной машины. Общее время миграции виртуальной машины можно выразить через следующую формулу:

$$T = T_c + T_d$$

Здесь:

T – общее время миграции виртуальной машины. Учитывается от момента поступления команды в гипервизор до включения скопированной виртуальной машины на целевом узле.

T_c – время итеративного перемещения страниц оперативной памяти ВМ. Учитывается от момента поступления команды в гипервизор до момента приостановки ВМ.

T_d – время недоступности ВМ. Учитывается от момента приостановки ВМ на исходном узле для копирования измененных страниц оперативной памяти до включения скопированной виртуальной машины на целевом узле. [4]

Время недоступности ВМ можно также выразить через следующую формулу:

$$t_d = \left(\frac{P + H}{b_d} \right) n_{K+1}$$

Здесь:

P – общий объем страниц памяти, которые мигрируют, в байтах;

H – накладные расходы на протокол миграции (для каждой страницы);

b_d – пропускная способность сети (в байтах в секунду);

n_{K+1} – набор страниц для последней итерации миграции.

Таким образом, общее время миграции виртуальной машины можно выразить следующей формулой:

$$t_{tot} = \left(\frac{P + H}{b}\right) \sum_{k=1}^K n_k + t_d$$

При живой миграции важно учитывать тот факт, что в условиях высокой нагрузки, при которых обновление страниц ОЗУ происходит быстрее, чем сетевой канал способен передать, возможна длительная недоступность виртуальной машины. Это объясняется тем, что гипервизор KVM виртуальной машины при переносе страниц оперативной памяти принимает решение о приостановке виртуальной машины и переносе оставшихся страниц памяти при достижении одного из следующих условий [5]:

- достигнуто максимальное количество итераций переноса измененных страниц памяти;
- достигнуто определенное процентное соотношение перенесённой и общей памяти у VM;
- объём измененных страниц оперативной памяти незначителен в сравнении с общим количеством оперативной памяти VM.

Таким образом, количество страниц памяти, которые передаются при первой итерации миграции, пропорционально общему количеству выделенной виртуальной машине оперативной памяти. Последующие итерации пропорциональны скорости изменения страниц памяти на мигрируемой виртуальной машине [6].

Метод копии страниц по запросу (post copy) запускает виртуальную машину на целевом узле в максимально сжатые сроки. Фактически, на целевой узел копируются состояния регистров CPU и дополнительная информация, необходимая для запуска виртуальной машины. Параллельно с запуском виртуальной машины начинается процесс переноса оперативной памяти с исходного узла на целевой.

В случае, если процесс виртуальной машины запрашивает страницу памяти, которая ещё не была перенесена, генерируется отказ страницы (page fault) и гипервизор обращается к исходной VM по сети для получения страницы. Для того, чтобы работа пользователя не была заблокирована на время получения страницы памяти, гипервизор переключает контекст с потока, вызвавшего page fault, на другой поток. После того, как виртуальная машина получит запрошенную страницу памяти, она возвращает контекст на заблокированный поток. Подробно процесс обработки отказа страницы в ходе живой миграции представлен на рис. 1.

В табл. 1 приведено сравнение методов pre copy и post copy по временным критериям.

Табл. 1. Сравнение видов живой миграции по временным критериям
Tab. 1. Comparison of live migration types according to timing criteria

	Предварительная копия (pre copy)	Копирование по запросу (post copy)
Общее время миграции	(Объем RAM / сетевая пропускная способность) + накладные расходы + недетерминированное количество переноса измененных страниц	(Объем RAM / сетевая пропускная способность) + накладные расходы
Время недоступности VM (худший случай)	Перенос регистров VM + (Объем RAM / сетевая пропускная способность)	Перенос регистров VM

Из данного сравнения видно, что метод post copy является более быстрым методом с меньшим временем недоступности VM, но обладает повышенным риском потери виртуальной машины из-за обрыва в сети передачи данных.

Рис. 1. Процесс обработки ошибки страницы в гипервизоре
Fig. 1. The processing of page faults in the hypervisor

В некоторых случаях запрашиваемые страницы памяти расположены рядом друг с другом, и отдельный запрос каждой из страниц приведёт к повышенной нагрузке на сеть и увеличению времени задержки для клиента. Адаптивные алгоритмы на основе статистической информации об активности виртуальной машины способны предсказывать последовательность страниц памяти, которая может быть запрошена мигрируемой VM в последующем. Эта способность используется для одновременного переноса сразу группы страниц памяти [8].

3. Физические ограничения на миграцию ресурсов

Любые действия, совершаемые в кластере, должны быть ограничены показателями соглашения об уровне предоставляемых услуг (Service Level Agreement). Данное соглашение заключается между клиентом (заказчиком) и облачным провайдером, которое определяет условия предоставления услуг. Рассмотрим некоторые показатели, влияющие на качество предоставления услуг и имеющие значение при распределении ресурсов в облаке:

- **Производительность vCPU.** Определяется по числу обработанных запросов в секунду (MIPS – million instructions per second). По указанной величине можно сравнить предполагаемую производительность ядра виртуальной машины с существующим оборудованием провайдера. Миграция виртуальной машины на узел с менее быстрым процессором или сокращенным набором процессорных инструкций может снизить показатель MIPS. Одновременная миграция множества виртуальных машин может потреблять большое количество процессорного времени, что отразится на существующих виртуальных машинах на исходном и целевом узлах.
- **Производительность СХД.** Измеряется по количеству операций в секунду (IOPS – Input/Output Operations Per Second). Для разных типов дисков выбирается разный блок чтения/записи. В SLA провайдером фиксируется размер блока чтения/записи, количество параллельных процессов и алгоритм нагрузки СХД, при которых были получены соответствующие показатели IOPS. Также в SLA фиксируется допустимое уменьшение IOPS от эталонного значения – не более 10%.

- **Средняя сетевая задержка.** Как правило, задержка выше 5 мс во внутренней сети провайдера является критичной. Если миграция виртуальных машин производится между вычислительными центрами (соответственно, используется внешняя сеть передачи данных), переназначение внешнего динамического ip-адреса может вызвать кратковременную потерю пакетов.
- **Доступность VM.** Пользователь рассчитывает на доступность виртуальной машины большую часть времени, и миграция не должна прервать работу VM, либо привести к потере данных. Среди двух методов миграции предпочтительным является метод предварительной копии, так как при нём исходная виртуальная машина продолжает свою работу и не будет потеряна в случае обрыва соединения внутри ЦОД.
- **Согласованность логических и физических ресурсов.** Миграция виртуальной машины проектом OpenStack Nova (при неправильной обработке ошибок от OpenStack Cinder с интегрированным Ceph) может завершиться появлением двух активных виртуальных машин с одним и тем же UUID (при этом в базе данных Nova запись о виртуальной машины с таким UUID будет одна), подключенных к одному блочному устройству, что приведёт к безвозвратной потере данных пользователя. Провайдер должен обеспечивать согласованность ресурсов, предоставляемых пользователю с фактическим наличием ресурсов на уровне гипервизора и системы хранения данных.

Перечень приведенных показателей и их фактические ограничения могут меняться в зависимости от набора предоставляемых физических ресурсов. В ходе миграции VM данные ограничения являются основой для логических ограничений, что описано в последующей подглаве.

4. Логические ограничения на миграцию ресурсов

В зависимости от состояния загруженности облачного кластера, администратор может принять решение о необходимости распределения ресурсов для сохранения работы виртуальных ресурсов в заданных показателях. Для облачной системы OpenStack роль администратора в принятии решений может на себя взять автоматизированная система по распределению ресурсов. На сегодняшний день выделяют [9] два основных направления в распределении ресурсов: балансирование вычислительной нагрузки и динамическая консолидация узлов. Чтобы автоматизированная система могла распределять ресурсы, должны быть приняты во внимание следующие факторы:

- Живая миграция виртуальной машины может влиять на сетевую задержку. Работающая виртуальная машина, обрабатывающая большой массив информации, склонна к частому обновлению страниц оперативной памяти. От пропускной способности сетевого канала и степени загруженности оперативной памяти VM зависит время миграции между вычислительными узлами. Для перемещения страниц оперативной памяти в режиме реального времени рекомендуется выделять отдельный сетевой канал для гипервизора.
- Для построения плана распределения ресурсов необходимо собирать и хранить показатели CPU и RAM (включая количество тактов CPU, затраченных на все выделенные VM ядра) как для виртуальных машин, так и для вычислительных узлов. Для сбора метрик может быть задействован сервис OpenStack Ceilometer с активными libvirt-агентами на вычислительных узлах. Для данного сервиса необходимо активировать модуль SNMP [10], который по UDP-протоколу публикует телеметрию узла. Сбор статистики по сетевым показателям (таким как пропускная способность сети и количество переданных пакетов в секунду) позволит оценить приблизительное время миграции виртуальной машины. Собранные метрики Ceilometer отправляет в базу данных временных рядов (time series database) такую как Gnocchi [11].
- Процесс живой миграции виртуальной машины требует от исходного вычислительного узла свободных ресурсов пропорционально объему занимаемых ресурсов виртуальной

- машиной. Коэффициент оверкоммита ресурсов гипервизора должен быть выставлен с учетом возможной необходимости миграции.
- d) Живая миграция возможна только между двумя однотипными гипервизорами. Модели процессоров и набор их инструкций могут различаться.
- e) Должна использоваться одна и та же подсеть между вычислительными узлами. По окончании миграции виртуальная машина должна послать анонсирующий Ethernet-пакет с локацией нового сетевого контроллера (NIC) чтобы получить адрес во внутренней сети.
- f) Если виртуальная машина запущена с временного образа (ephemeral), образ должен находиться на общем хранилище (shared storage), доступном по сети. Это необходимо для исключения физического перемещения образов по сети чтобы сократить время недоступности VM. В качестве протокола для предоставления общего хранилища может использоваться NFS.

Приведенные выше ограничения применимы для гипервизора KVM и облачной системы OpenStack. Коэффициент оверкоммита выставляется применительно к ядрам процессора и оперативной памяти. В публичном облаке распространенными значениями являются коэффициенты 16x для CPU и 1.5x для RAM. Таким образом, планировщик виртуальных машин Nova Scheduler определяет на вычислительном узле в 16 раз больше вычислительных ядер, чем физически имеется, что позволит разместить больше виртуальных машин на узле.

Принятие решения о стабилизации вычислительного кластера можно переложить на автоматизированную систему, в которой роли администратора отведено контролирующее значение. Учитывая физические и логические ограничения, система генерирует план действий, который администратор может подтвердить. Проектирование таких систем и стратегий их работы (балансирование вычислительных ресурсов, консолидация для снижения энергопотребления) – цель последующих исследований.

5. Обзор родственных работ

В работе [2] Кристофер Кларк (Christopher Clark) и Кейр Фрейзер (Keir Fraser) рассматривают две проблемы с доступом к ресурсам при миграции виртуальной машины – проблема доступа к сетевым ресурсам и проблема доступа к блочным устройствам. Для решения доступа к сети предложено на целевом узле сохранять тот же ip-адрес для виртуальной машины, что и на исходном (при условии, что оба узла находятся в рамках одной и той же сети). Проблему с доступом к блочным устройствам предлагалось решать с помощью NAS.

Антон Белоглазов (Anton Beloglazov) и Раджкumar Буйя (Rajkumar Buyya) [3] при проектировании сервиса динамической консолидации OpenStack Neat определяют физические требования к облачной среде в наличии распределенного хранилища NFS или GlusterFS для доступа к блочным устройствам. Помимо этого, в качестве логических требований указана необходимость иметь учетную запись пользователя с правами, достаточными для перевода узла в состояние ACPI S3.

Фабио Чеккони (Fabio Checconi), Томмазо Кучинотта (Tommaso Cucinotta) и Мануэль Стейн (Manuel Stein) в своей работе [12] при рассмотрении проблем живой миграции виртуальных машин выделяют необходимость равного распределения процессорного времени между виртуальными машинами. Для виртуальной машины, которая мигрирует на другой узел, это позволит избежать чрезмерного обновления страниц оперативной памяти (что сократит количество итераций по переносу оперативной памяти). Для этого предлагается использовать планировщик AQuoSA [13], гарантирующий виртуальной машине определенное количество микросекунд до переключения контекста.

В работе по динамической оптимизации нагрузки [14] рассматривается стратегия распределения и консолидации виртуальных машин между узлами для повышения времени отклика узлов и снижения совокупной стоимости владения. Данная стратегия предполагает наличие распределенного хранилища (shared storage) на узлах, сбор и выдача метрик

системой OpenStack Ceilometer (на момент написания статьи проект Ceilometer ещё обладал самостоятельным компонентом для хранения и выдачи метрик), а также специальным образом настроенная сетевая карта с технологией Wake-on-LAN.

Дориан Минаролли (Dorian Minarolli), Артаном Мазрекай (Artan Mazrekaj) и Бендт Фрейслебен (Bernd Freisleben) в работе по долгосрочным прогнозам нагрузок [15] в качестве главных ограничений на миграцию вводят логические показатели SLA. Для каждого показателя определяются пороговые значения, которые необходимо учитывать при построении плана миграции виртуальных машин.

Тема выявления и учета ограничений на миграцию виртуальных машин кажется недостаточно проработанной.

6. Заключение

Процесс миграции виртуальных машин в облачной среде затрагивает разные типы ресурсов, требующие синхронизации для сохранения консистентности рабочих процессов ВМ. Данная работа определяет логические и физические ограничения, которые помогут проводить распределение нагрузки с соблюдением пользовательского SLA. Для снижения энергопотребления и уменьшения задержки в ВМ необходимо оперативно реагировать на изменения нагрузки в вычислительном кластере. Разработка сервиса по распределению ресурсов в облачных средах и соответствующих стратегий, нацеленных на снижение времени задержки ответа, должна вестись с учётом логических и физических ограничений на миграцию ресурсов, что наталкивает на необходимость продолжить изучать различные подходы к миграции и их применимость к гетерогенным рабочим нагрузкам.

Рабочее окружение системы OpenStack позволяет с лёгкостью собирать и хранить данные об утилизации виртуальных машин, что может быть использовано стратегиями при построении плана действий. Последующая работа в данном направлении ведёт к проектированию и разработке стратегий динамической консолидации и балансировании виртуальных машин для облачной системы OpenStack, которые могли бы снизить энергопотребление в условиях цикличной и динамической нагрузки.

Список литературы

- [1]. Страница проекта OpenStack – <https://www.openstack.org/>
- [2]. Clark, C., Fraser, K., Hand, S., Hansen, J.G., Jul, E., Limpach, C., Pratt, I., Warfield, A. Live migration of virtual machines. In Proc. of the 2nd Symposium on Networked Systems Design & Implementation (NSDI'05), USENIX Association, 2005, pp. 273–286.
- [3]. Beloglazov A., Buyya R. OpenStack Neat: a framework for dynamic and energy-efficient consolidation of virtual machines in OpenStack clouds. *Concurrency and Computation: Practice & Experience*, vol. 27, issue 5, 2015, pp. 1310-1333.
- [4]. Gustafsson E. Optimizing Total Migration Time in Virtual Machine Live Migration. Master thesis, Teknisk- naturvetenskaplig fakultet, Uppsala Universitet, 2013, 38 p.
- [5]. Liguori A., Kivity A., Kamay Y. kvm: the Linux Virtual Machine Monitor. In Proc. of the 2007 Ottawa Linux Symposium, 2007, pp. 225–230.
- [6]. Akoush S., Sohan R., Rice A., Hopper A., Predicting the performance of virtual machine migration. In Proceedings of the 2010 IEEE International Symposium on Modeling, Analysis and Simulation of Computer and Telecommunication Systems (MASCOTS '10), 2010, pp. 37–46.
- [7]. Liu P., Yang Z., Song X., Zhou Y. Heterogeneous Live Migration of Virtual Machines. In Proc. of the International Workshop on Virtualization Technology (IWVT'08), 2008.
- [8]. Hines M., Deshpande U., Gopalan K. Post-Copy Live Migration of Virtual Machines. *ACM SIGOPS Operating Systems Review*, vol. 43, issue 3, 2009, pp. 14-26.
- [9]. Rybina K., Patni A., Schill A. Analysing the Migration Time of Live Migration of Multiple Virtual Machines. In Proc. of the 4th International Conference on Cloud Computing and Services Science (CLOSER 2014), 2014, pp. 590-597.

- [10]. Serhienko O. Ceilometer: Full-stack Monitoring for OpenStack, OpenStack Superuser, 2014. Режим доступа: <https://superuser.openstack.org/articles/ceilometer-full-stack-monitoring-for-openstack/>, дата обращения 10.01.2019.
- [11]. Danjou J. OpenStack Ceilometer and the Gnocchi experiment, Julien Danjou blog, 2014. Режим доступа: <https://julien.danjou.info/openstack-ceilometer-the-gnocchi-experiment/>, дата обращения 10.01.2019.
- [12]. Checconi F., Cucinotta T., Stein M.: Real-Time Issues in Live Migration of Virtual Machines. *Lecture Notes in Computer Science*, vol 6043, 2009, pp. 454-466.
- [13]. Palopoli, L., Cucinotta, T., Marzario, L., Lipari, G. AQuoSA — adaptive quality of service architecture. *Software – Practice and Experience*, vol. 39, no. 1, 2009, pp. 1–31.
- [14]. Чадин А.С. Динамическая оптимизация нагрузки на вычислительных узлах частных, публичных и гибридных облаков. *Труды ИСП РАН*, том 27, вып. 6, 2015 г., стр. 307-314. DOI: 10.15514/ISPRAS-2015-27(6)-19.
- [15]. Dorian Minarolli, Artan Mazrekaj, Bernd Freisleben. Tackling uncertainty in long-term predictions for host overload and underload detection in cloud computing. *Journal of Cloud Computing*, vol. 6, № 4, 2017, 18 p.

Determining cloud platform limits on resource migration

A.S. Chadin <alexander.chadin@icloud.com>

G.A. Biziukin <uashir@mail.ru>

MIREA – Russian Technological University,

78, Vernadskogo prospect, Moscow, 119454, Russia

Abstract. This article discusses the different types of virtual machine migration between computing resources, their logical and physical limitations. For live migration, such memory migration methods as pre-copy and post-copy, their temporary differences are considered. Chapter 2 discusses the work in which the requirements for physical and logical constraints. In chapter 2.1 for the post-copy method, the algorithm for working at the hypervisor level is described. For the pre-copy and post-copy methods a comparison of time indicators was made. Chapter 2.2 describes the physical constraints for virtual environments, which should be taken into account when drawing up a service level agreement. Logical restrictions on the migration of virtual machines are described in chapter 2.3, which should be taken into account when building a resource allocation strategy in the cloud. In conclusion, it is noted that constraints must be considered when developing resource allocation strategies.

Keywords: cloud systems; live migration; resource allocation

DOI: 10.15514/ISPRAS-2019-31(1)-4

For citation: Chadin A.S., Biziukin G.A. Determining cloud platform limits on resource migration. *Trudy ISP RAN/Proc. ISP RAS*, vol. 31, issue 1, 2019, pp. 59-68 (in Russian). DOI: 10.15514/ISPRAS-2019-31(1)-4

References

- [1]. OpenStack project page: <https://www.openstack.org/>
- [2]. Clark, C., Fraser, K., Hand, S., Hansen, J.G., Jul, E., Limpach, C., Pratt, I., Warfield, A. Live migration of virtual machines. In Proc. of the 2nd Symposium on Networked Systems Design & Implementation (NSDI'05), USENIX Association, 2005, pp. 273–286.
- [3]. Beloglazov A., Buyya R. OpenStack Neat: a framework for dynamic and energy-efficient consolidation of virtual machines in OpenStack clouds. *Concurrency and Computation: Practice & Experience*, vol. 27, issue 5, 2015, pp. 1310-1333.
- [4]. Gustafsson E. Optimizing Total Migration Time in Virtual Machine Live Migration. Master thesis, Teknisk- naturvetenskaplig fakultet, Uppsala Universitet, 2013, 38 p.
- [5]. Liguori A., Kivity A., Kamay Y. kvm: the Linux Virtual Machine Monitor. In Proc. of the 2007 Ottawa Linux Symposium, 2007, pp. 225–230.

- [6]. Akoush S., Sohan R., Rice A., Hopper A., Predicting the performance of virtual machine migration. In Proceedings of the 2010 IEEE International Symposium on Modeling, Analysis and Simulation of Computer and Telecommunication Systems (MASCOTS '10), 2010, pp. 37–46.
- [7]. Liu P., Yang Z., Song X., Zhou Y. Heterogeneous Live Migration of Virtual Machines. In Proc. of the International Workshop on Virtualization Technology (IWVT'08), 2008.
- [8]. Hines M., Deshpande U., Gopalan K. Post-Copy Live Migration of Virtual Machines. ACM SIGOPS Operating Systems Review, vol. 43, issue 3, 2009, pp. 14-26.
- [9]. Rybina K., Patni A., Schill A. Analysing the Migration Time of Live Migration of Multiple Virtual Machines. In Proc. of the 4th International Conference on Cloud Computing and Services Science (CLOSER 2014), 2014, pp. 590-597.
- [10]. Serhiienko O. Ceilometer: Full-stack Monitoring for OpenStack, OpenStack Superuser, 2014. Available at: <https://superuser.openstack.org/articles/ceilometer-full-stack-monitoring-for-openstack/>, accessed 10.01.2019.
- [11]. Danjou J. OpenStack Ceilometer and the Gnocchi experiment, Julien Danjou blog, 2014. Available at: <https://julien.danjou.info/openstack-ceilometer-the-gnocchi-experiment/>, accessed 10.01.2019.
- [12]. Checconi F., Cucinotta T., Stein M.: Real-Time Issues in Live Migration of Virtual Machines. Lecture Notes in Computer Science, vol 6043, 2009, pp. 454-466.
- [13]. Palopoli, L., Cucinotta, T., Marzario, L., Lipari, G. AQuoSA — adaptive quality of service architecture. Software – Practice and Experience, vol. 39, no. 1, 2009, pp. 1–31.
- [14]. Chadin A. Dynamic Optimization of Workload on Compute Nodes in Private, Public and Hybrid Clouds. Trudy ISP RAN/Proc. ISP RAS, vol. 27, issue 6, 2015, pp. 307- 314 (in Russian). DOI: 10.15514/ISPRAS-2015-27(6)-19
- [15]. Dorian Minarolli, Artan Mazrekaj, Bernd Freisleben. Tackling uncertainty in long-term predictions for host overload and underload detection in cloud computing. Journal of Cloud Computing, vol. 6, № 4, 2017, 18 p.