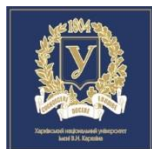


УДК 621.391

## РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ УПРАВЛЕНИЯ РЕСУРСАМИ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ МНОГОАГЕНТНОГО ПОДХОДА



[К.М. РУККАС](#), [М.В. МИЩЕНКО](#)

Харьковский национальный  
университет им. В.Н. Каразина



[К.А. ОВЧИННИКОВ](#)

Харьковский национальный  
университет радиоэлектроники

**Abstract** – The article considers the main approaches to the design of multi-agent systems for network management. According to the conventional method designed system consists of two types of agents: link agents and virtual transmission path agents. Using the JAVA language and JADE environment the simulation of developed multi-agent network management system was performed. The results show that the efficiency of the MAS architecture highly depends on the rate of change of the traffic intensity: for smooth variation the centralized architecture is preferred and in case of fast intensity changes the decentralized approach is much more effective. It was also shown that for a large rate of traffic intensity variation the call blocking percentage (CBP) will decrease with decreasing the critical level of available resource. It was also shown that if the magnitude of traffic intensity is close to the total network bandwidth the management efficiency sharply decreases, due to the lack of available resources. It was noted that the high rate of change of traffic increases the amount of service information exchanged between system agents.

**Анотація** – Розроблено багатоагентну систему управління пропускною спроможністю, що дозволяє підтримувати заданий рівень зарезервованого ресурсу. Проведена оцінка порогових значень зарезервованого обсягу ресурсів. Показано, що ефективність централізованої і децентралізованої архітектур залежить від швидкості зміни інтенсивності трафіка, що обслуговується мережею.

**Анотация** – Разработана многоагентная система управления пропускной способностью, позволяющая поддерживать заданный уровень резервируемого ресурса. Проведена оценка пороговых значений резервируемого объема ресурсов. Показано, что эффективность централизованной и децентрализованной архитектур зависит от скорости изменения интенсивности обслуживаемого трафика.

### Введение

Главной целью компаний, предоставляющих телекоммуникационные услуги, является получение прибыли, что в условиях жесткой конкуренции возможно при снижении себестоимости услуг и повышении их качества. С технической точки зрения это означает, что телекоммуникационная система (ТКС) должна обеспечивать заданное качество передачи (выраженное в таких терминах, как требуемая пропускная способность, допустимая задержка передачи, процент отказов и др.). Простейшим способом обеспечить качество обслуживания является резервирование ресурсов, однако, с учетом большой стоимости линейных сооружений, только крупные национальные провайдеры могут себе это позволить. В то же время себестоимость

предоставления услуг напрямую связана с эффективностью использования всех доступных ресурсов, или же с максимумом производительности, что вступает в противоречие с требованием надежности. Таким образом, задача обеспечения качества при снижении себестоимости услуг является актуальной.

Для эффективного управления ресурсами телекоммуникационной системы необходима система автоматического управления, которая решает задачи управления отказами (вызванными неполадками оборудования) и адаптацию распределения ресурсов к текущим потребностям пользователей. Существующие системы управления функционируют на основе централизованной архитектуры, которая неоднократно подвергалась критике в связи с низкой надежностью, большими объемами служебного трафика и высокими задержками при принятии решений. Наиболее рациональной альтернативой представляется децентрализация архитектуры управления, однако единого мнения по средству реализации этого подхода не существует. Наиболее динамично развивающимся является подход, основанный на многоагентных системах (МАС).

## **I. Анализ известных решений**

Технология МАС в настоящее время является одним из перспективных направлений искусственного интеллекта [1, 2]. Это обусловлено именно сложностью и многообразием компонентов каждого отдельного агента, многообразием математических и программных средств, используемых при его описании и разработке, сложностью структуры и разнообразием вариантов взаимодействия агентов между собой, сложностью и разнообразием компонент внешней среды, в которой функционируют агенты и т.д. Также МАС обладают способностью к самовосстановлению и устойчивостью к сбоям, благодаря достаточному запасу компонентов и самоорганизации.

Известны некоторые варианты построения МАС для других предметных областей [2-5]. Однако конструктивной общей методики разработки таких систем сегодня не существует. В каждом индивидуальном случае МАС разрабатывается, исходя из особенностей предметной области [2].

Первым этапом разработки МАС является определение характеристик среды, в которой ей предстоит функционировать. В [6] показано, что ТКС представляет собой стохастическую, частично наблюдаемую среду, в которой текущее состояние определяется комбинацией предыдущего управляющего воздействия и случайных факторов. Иначе говоря, ТКС относится к одному из самых сложных видов среды функционирования МАС.

Следует отметить, что эффективность централизованной и децентрализованной архитектур МАС зависит от количества и скорости изменения параметров среды и объекта управления [7], что указывает на необходимость реализации адаптирующейся архитектуры и определения граничных условий перехода между ними.

В большинстве случаев исследования МАС управления ТКС рассматривают эффективность распределения пропускной способности [6-9], при этом максималь-

ная эффективность может быть достигнута при обработке каждого запроса отдельно, однако этот подход может оказаться неэффективным при большом количестве запросов.

Активное внедрение технологии MPLS способствовало появлению исследований, посвященных разработке кооперации между агентами при совместном использовании полосы пропускания, в т.ч. и для резервирования. При выборе количества и типов агентов МАС большинство исследователей сходится в том, что необходимо использовать минимум две различные зоны ответственности: канал передачи (link) и путь передачи (path).

Основываясь на общепринятом подходе деления агентов по зонам ответственности (канал и путь передачи), необходимо разработать МАС управления ресурсами ТКС, сравнить эффективность централизованной и децентрализованной архитектур для различных профилей трафика, оценить величину пороговых значений объема доступных ресурсов при принятии решения.

## II. Модель многоагентной системы динамического управления ТКС

При организации системы динамического управления ресурсами ТКС на основе многоагентного подхода, структуру МАС можно представить как совокупность агентов, имеющих общую цель ( $C$ ). Тогда модель МАС можно представить в следующем виде:

$$M_{(MAC)} = \langle C, A, \mathcal{E}, F \rangle,$$

где  $A$  – совокупность агентов;  $\mathcal{E}$  – критерий качества функционирования МАС;  $F$  – механизм взаимодействия.

Модель агента  $A_i$  можно представить в виде:

$$M_{(A_i)} = \langle C_i, I_i, U_i, \mathcal{E}_{y_{A_i}}, Z_i \rangle,$$

где  $C_i$  – цель функционирования  $i$ -ого агента;  $I_i$  – информация, которую воспринимает агент  $A_i$ ;  $U_i$  – управляющие воздействия, которые агент  $A_i$  может выполнить;  $\mathcal{E}_{y_{A_i}}$  – критерий управления, которым руководствуется агент  $A_i$  при выборе управляющего воздействия;  $Z_i$  – знания агента о среде, в которой он находится.

Технической базой системы динамического управления являются центры (узлы) коммутации (ЦК). Поэтому элементы МАС – агенты – должны располагаться на центрах коммутации и участвовать в управлении соответствующими ресурсами и элементами сети. В сущности, задача агентов состоит не в том, чтобы они заменили существующие алгоритмы распределения ресурсов сети, а в том, что они должны управлять этими алгоритмами с целью повышения их эффективности, то есть осуществлять такие функции, которые в настоящий момент в системах динамического управления существующих сетей не реализованы.

На каждом центре коммутации кроме управляющего агента располагаются другие агенты. Они решают частные задачи и участвуют в управлении распределением отдельных видов ресурсов. Функции агента, управляющего ЦК, по сути, аналогичны функциям агента, управляющего сетью, но только распространяются в масштабах узла. Таким образом, на каждом центре коммутации располагается совокупность взаимосвязанных агентов, образующих многоагентную систему динамического управления центром коммутации – МАС ЦК. Многоагентные системы отдельных ЦК являются подсистемами многоагентной системы динамического управления всей сети.

Таким образом, одним из способов повышения эффективности управления в ТКС является использование адаптивной многоагентной системы динамического управления с элементами искусственного интеллекта. В этом случае общая задача динамического управления разбивается на отдельные подзадачи управления ресурсами сети, для решения которых можно использовать оптимальные адаптивные алгоритмы. Каждая подзадача характеризуется своей моделью.

Разработанная многоагентная система состоит из агентов двух видов:

- Link-Agent (агент, управляющий каналом, отвечающий за канал связи между двумя узлами сети);
- Path-Agent (агент, управляющий виртуальными каналами, отвечающий за все логические пути между двумя узлами сети).

Каждый агент, управляющий виртуальным каналом, взаимодействует с агентами, управляющими каналами связи, из которых состоят логические пути между двумя его узлами (рис. 1).

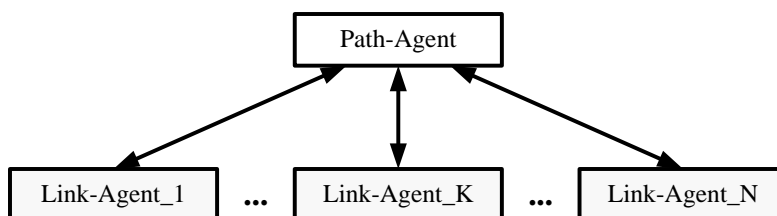


Рис. 1. Взаимодействие между агентами

Агент, управляющий виртуальными каналами, решает задачу распределения поступающего трафика между возможными маршрутами и резервирования необходимого объема ресурсов.

Для принятия решений об уровне резервной пропускной способности ( $C$ ) агент, управляющий виртуальными каналами, использует следующую шкалу уровней (рис. 2): критичный ( $C_{cr}$ ), недостаточный ( $C_{sh}$ ), нормальный ( $C_{nor}$ ) и избыточный ( $C_{ex}$ ) уровень свободного ресурса, принадлежность к которым определяется по 3 величинам, зависящим от текущей нагрузки (*normalLevel*, *shortageLevel* и *criticalLevel*).

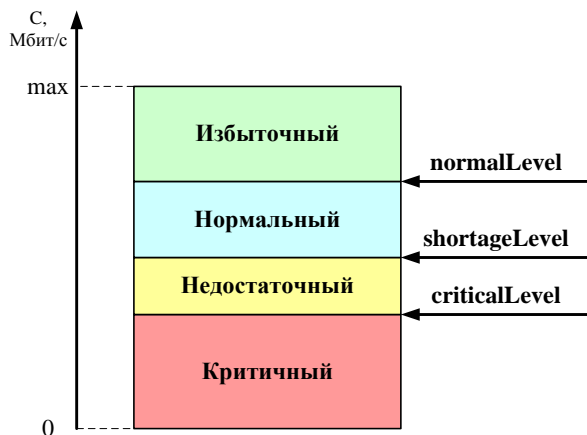


Рис. 2. Уровни резервной пропускной способности

В зависимости от величины доступной резервной пропускной способности пути агент, управляющий виртуальными каналами, может обращаться к агентам, управляющим каналом, с целью зарезервировать для своих целей часть свободной пропускной способности канала. Величина запрашиваемой ПС ( $C_d$ ) равна:

$$C_d = \frac{C_{cr} + C_{sh}}{2} - C_r,$$

где  $C_r$  – величина доступной резервной пропускной способности.

Алгоритм функционирования агента, управляющего виртуальными каналами, может быть описан схемой, представленной на рис. 3.

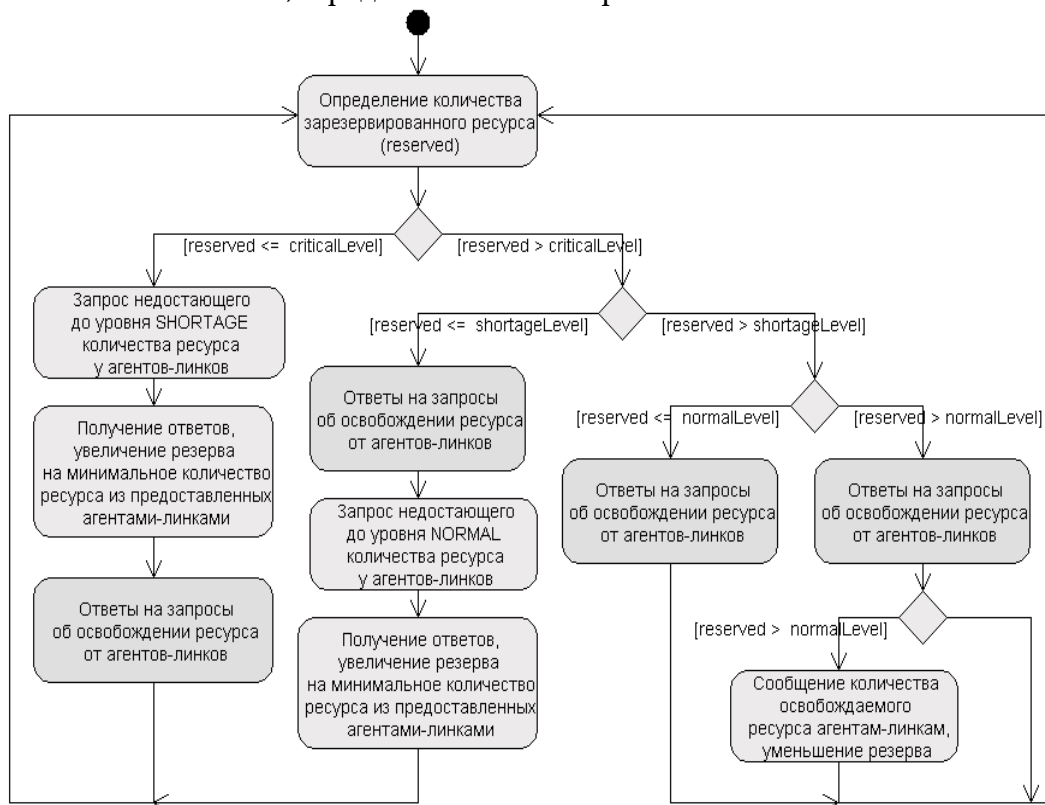


Рис. 3. Алгоритм функционирования агента, управляющего виртуальными каналами

Каждый агент, управляющий виртуальными каналами, периодически вычисляет количество свободного ресурса  $C_r$  и сравнивает его с заданными значениями критичного уровня резерва (*criticalLevel*), уровня нехватки (*shortageLevel*) и нормального уровня резерва (*normalLevel*) для определения, необходимо увеличить резерв или уменьшить его. Если количество свободных резервных ресурсов определяется как критичное или недостаточное (т.е.  $C_r < C_{cr}$  или  $C_r < C_{sh}$ ), то агент, управляющий виртуальными каналами, в таком случае отправляет запрос ресурса агентам канала, из линий связи которых состоят логические пути между двумя его узлами. Если же количество свободных резервных ресурсов определяется как избыточное (т.е.  $C_r > C_{nor}$ ), агент, управляющий виртуальными каналами отправляет сообщение об освобождении ресурса агентам канала, отвечающим за линии связи, из которых состоят логические пути между двумя его узлами. Таким образом, все агенты, управляющие виртуальными каналами, пытаются поддерживать уровень резервного ресурса между *shortageLevel* и *normalLevel* ( $C_{sh} < C_r < C_{nor}$ ). Агенты канала обеспечивают контроль текущего использования ресурса и обрабатывают запросы и сообщения агентов, управляющих виртуальными каналами.

На рис. 4 представлен алгоритм функционирования агента, управляющего каналом связи.

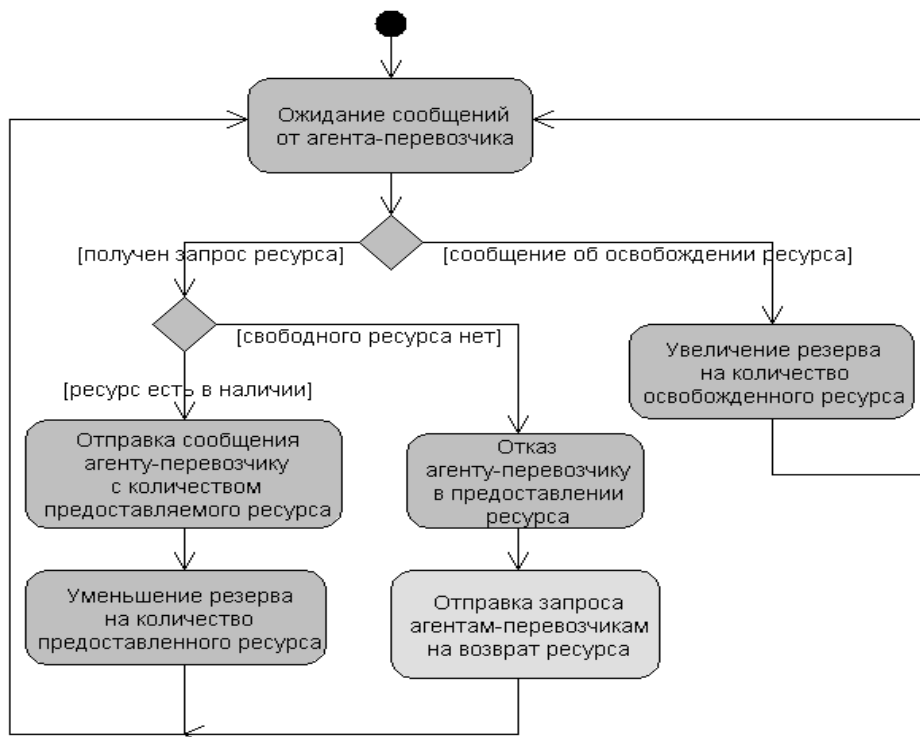


Рис. 4. Алгоритм функционирования агента, управляющего каналом связи

### III. Имитационная модель многоагентной системы динамического управления ТКС

Для реализации многоагентной системы были использованы язык программирования Java и программная среда для разработки агентов JADE (Java Agent DEvelopment).

Топология ТКС изображена на рис. 5. Она состоит из 5 узлов и 6 двунаправленных линий связи. Для каждой линии связи задана пропускная способность (от 600 до 650 Мбит/с). Для данной архитектуры сети согласно разработанной методике MAC состоит из 20 агентов, управляющих виртуальными каналами, и 12 агентов, управляющих каналами связи. Величина передаваемого трафика была выбрана в таких диапазонах: от 70 до 150 Мбит/с, от 70 до 180 Мбит/с, от 70 до 210 Мбит/с, от 70 до 255 Мбит/с, от 70 до 300 Мбит/с между каждой парой узлов.

Были оценены следующие пороговые значения уровня свободного ресурса для идентификации недостачи и избытка резервной пропускной способности:

1.  $criticalLevel = 0,1$ ,  $shortageLevel = 0,2$ ,  $normalLevel = 0,3$ .
2.  $criticalLevel = 0,05$ ,  $shortageLevel = 0,1$ ,  $normalLevel = 0,15$ .
3.  $criticalLevel = 0,05$ ,  $shortageLevel = 0,15$ ,  $normalLevel = 0,25$ .

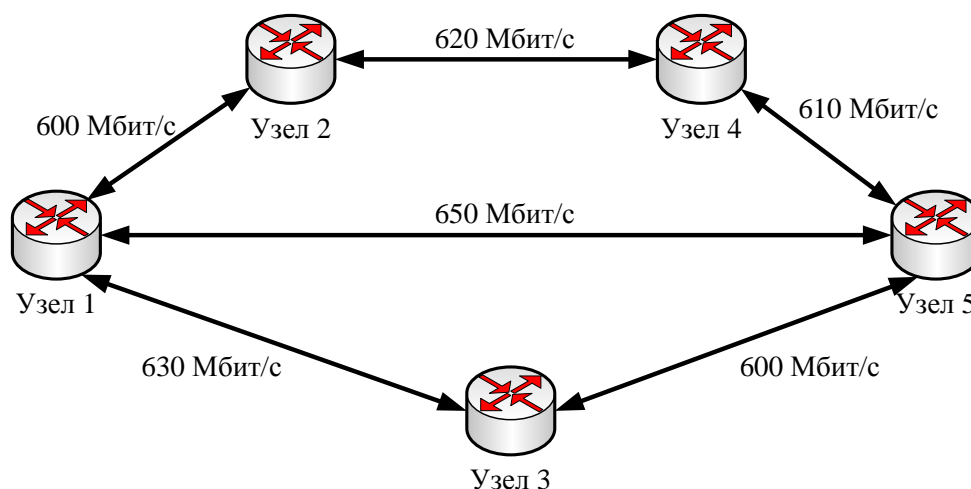
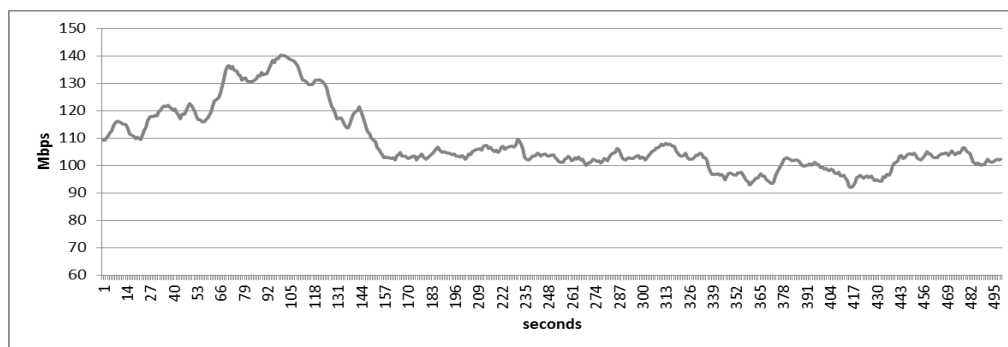


Рис. 5. Моделируемая сеть

Кроме того, использовались два профиля трафика: с плавным (рис. 6, а) и с быстрым (рис. 6, б) изменением объема передаваемых данных. Генерация трафика была реализована с использованием случайных величин.



а)



б)

Рис. 6. Плавное а) и быстрое б) изменение интенсивности трафика

Было проверено 5 скоростей изменения интенсивности, задаваемых дисперсией величины изменения нагрузки: 0,5, 1,0, 2,0, 4,0 и 8,0. Дисперсия 0,5 соответствует плавному изменению моделируемого трафика (рис. 6, а), в то время как дисперсия 8,0 соответствует быстрому изменению моделируемого сетевого трафика (рис. 6, б).

#### IV. Анализ результатов моделирования

Время моделирования одного эксперимента составляло 6 минут 45 секунд, что соответствовало одному часу работы сети. Для каждого случая было проведено по десять экспериментов.

Для оценки результатов были определены параметры сети, состоящей из двадцати пар начальных и конечных пунктов доставки:

- общий процент отказов соединения (Call Blocking Percentage, *CBP*);
- общее количество сообщений о запросе ресурса (*num\_requests*);
- общее количество сообщений об освобождении ресурса (*num\_releases*);
- общее количество сообщений об отказе в предоставлении ресурса (*num\_refuses*);
- общее количество сообщений о предоставлении ресурса (*num\_Supplies*);
- общее количество сообщений (*num\_TotalMessages*).

Общий процент отказов (*CBP*) может быть определен через:



$$CBP = \frac{1}{nE} \sum_{k=1}^{nE} CBP_k,$$

где:  $nE$  – количество экспериментов;

$$CBP_k = \left( \frac{\sum_{i=1}^{nPath} R_i}{\sum_{i=1}^{nPath} o_i} \right) \times 100\% ;$$

$nPath$  – количество агентов виртуальных каналов;  $R$  – количество отказов соединения;  $o$  – количество инициированных соединений.

На рис. 7 приведены зависимости общего процента отказа соединения от дисперсии величины изменения трафика для случая, когда нагрузка изменяется в диапазоне от 70 до 300 Мбит/с.

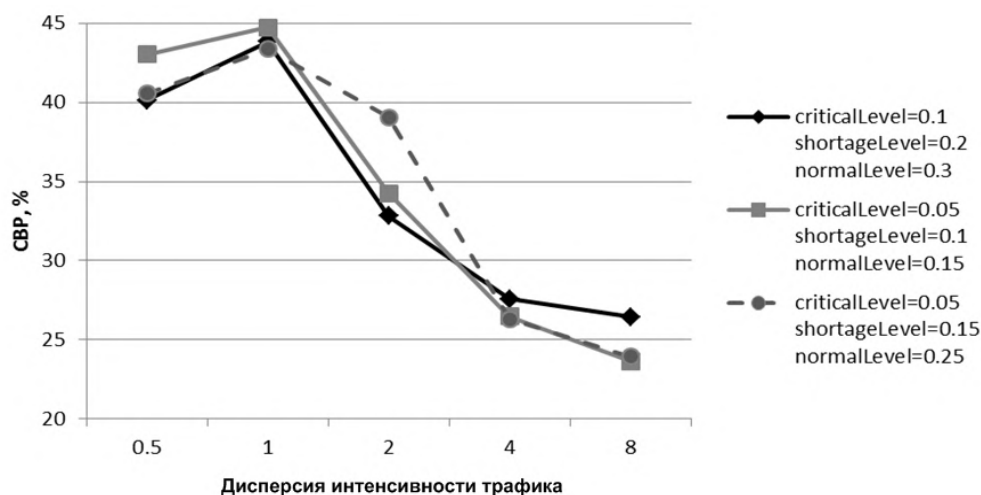


Рис. 7.  $CBP$  (общий процент отказов соединения) для трех вариантов механизма идентификации избытка и недостатчи резерва пропускной способности (нагрузка в диапазоне от 70 до 300 Мбит/с)

Согласно рис. 7, процент отказов падает с увеличением скорости изменения нагрузки на сеть. Это объясняется тем фактом, что агенты в данной модели MAC выполняют действия в зависимости от колебаний трафика. В результате при медленном изменении трафика агенты гораздо реже освобождают ресурсы, что приводит к стабильным отказам у тех агентов, которые не успели с самого начала зарезервировать достаточное количество пропускной способности.

Рассмотрим количество и процентное соотношение различных видов сообщений для агентов с заданными порогом недостатчи – 10%, порогом нормы – 20% и порогом избытка – 30% (рис. 8-9).

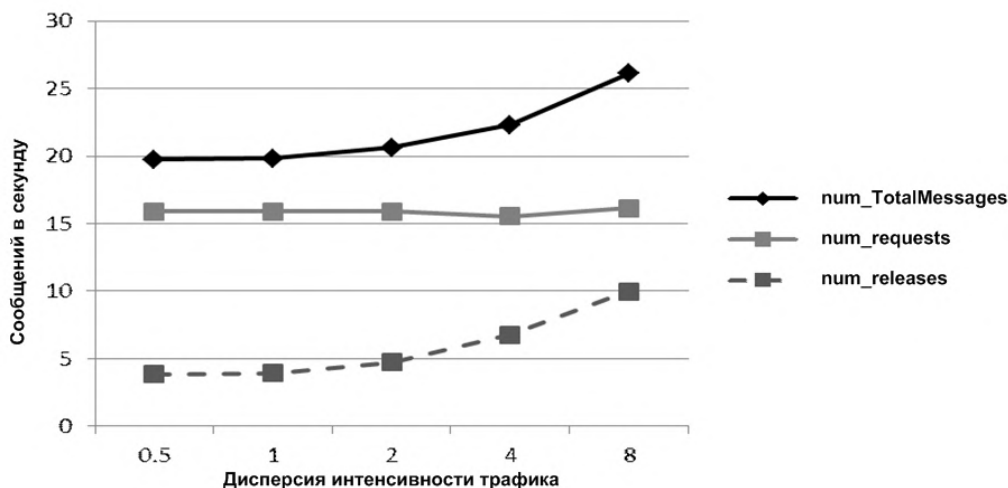


Рис. 8. Общее количество сообщений (сообщения о запросе и освобождения ресурса), количество сообщений о запросе и освобождении ресурса для агентов с параметрами  $criticalLevel = 0,1$ ,  $shortageLevel = 0,2$ ,  $normalLevel = 0,3$

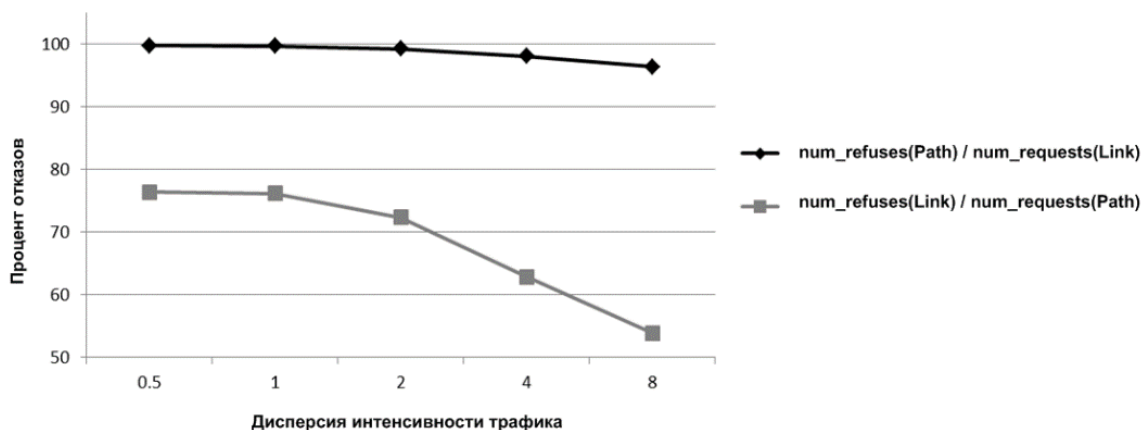


Рис. 9. Процент сообщений об отказе в предоставлении (возврате ресурса) от количества сообщений о запросе ресурса для агентов виртуального канала (агентов канала связи)

Из рис. 8 и рис. 9 видно, что с ростом скорости изменения нагрузки агенты, управляющие виртуальными каналами, начинают чаще возвращать ресурсы агентам канала. Следовательно, у агентов канала становится больше ресурса, и они быстрее предоставляют его тем, кто в нем нуждается (процент отказов в предоставлении ресурса значительно падает).

Далее рассмотрим результаты расчетов *CBP* для агентов с параметрами  $criticalLevel = 0,1$ ,  $shortageLevel = 0,2$ ,  $normalLevel = 0,3$  в зависимости от диапазона нагрузки (рис. 10).

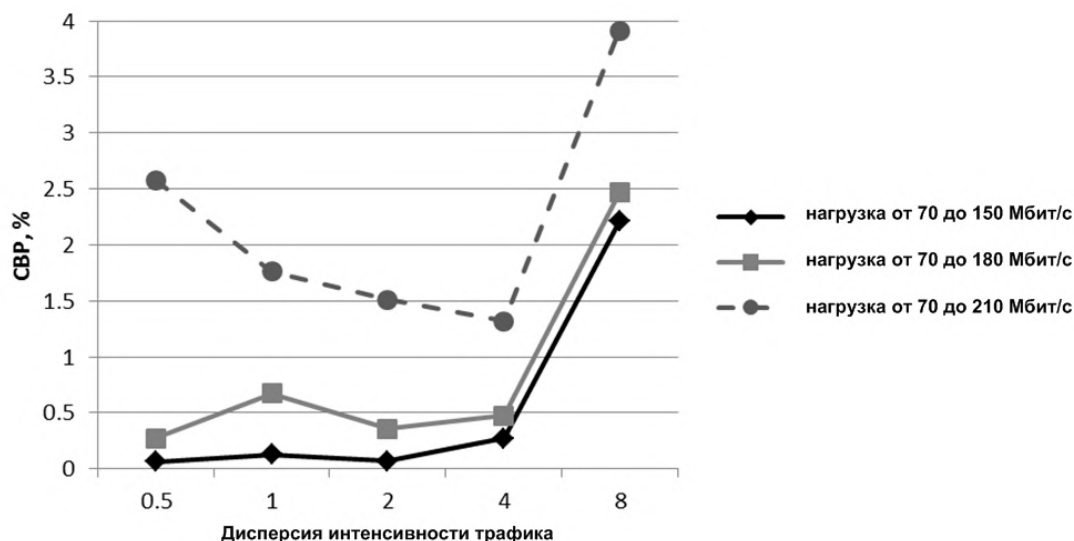


Рис. 10. *CBP* (общий процент отказов соединения) для агентов с параметрами *criticalLevel* = 0.1, *shortageLevel* = 0.2, *normalLevel* = 0.3 (нагрузка в диапазонах от 70 до 150 Мбит/с; от 70 до 180 Мбит/с; от 70 до 210 Мбит/с)

На рис. 10 видно, что с понижением максимального уровня нагрузки процент отказов перестает падать с повышением скорости изменения сетевого трафика. Следовательно, децентрализованное управление при подходе, основанном только на выполнении действий в случае изменения величины трафика, снижает свою эффективность с ростом скорости изменения сетевого трафика.

Также был выполнен сравнительный анализ количества отказов соединения одного из механизмов для определения недостатчи, избытка резервного ресурса и варианта централизованного управления сетью.

В качестве централизованного управления был выбран вариант, для которого в основании принятия решений о критичности, недостаточности и избыточности резервного ресурса использованы те же принципы, которыми руководствуются агенты виртуальных каналов в децентрализованном варианте. Управляющий агент использует тот факт, что у него есть информация обо всей сети и распределяет ресурсы таким образом, чтоб ликвидировать критичный (недостаточный) уровень запаса ресурса между каждыми двумя узлами. В таком случае, в системе появляется центр управления, а агенты виртуальных каналов служат датчиками, которые сообщают центру об изменении нагрузки.

На рис. 11 изображены графики изменения *CBP* для выбранного варианта централизованного управления и одного варианта динамического управления с коэффициентами *criticalLevel* = 0,1, *shortageLevel* = 0,2, *normalLevel* = 0,3.

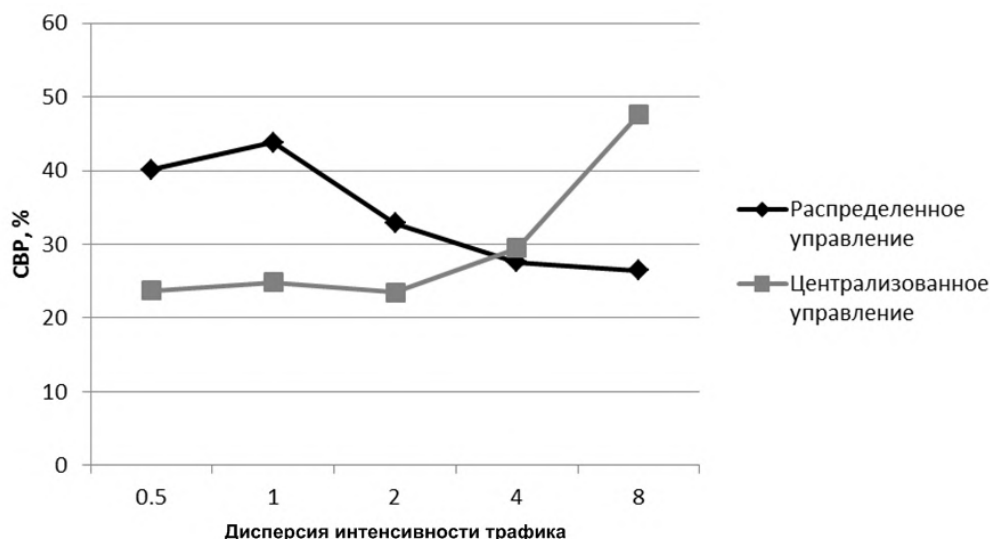


Рис. 11. Сравнение распределенного и централизованного управления сетью (агенты с параметрами  $criticalLevel = 0.1$ ,  $shortageLevel = 0.2$ ,  $normalLevel = 0.3$ )

Можно заметить, что в случае централизованного управления при быстром изменении трафика управляющий агент перестает успевать перераспределять ресурсы. Централизованное управление действительно работает намного хуже распределенного при резких скачках трафика в сети. Из этого можно сделать вывод, что следует комбинировать централизованное и децентрализованное управление сети с учетом скорости изменения сетевого трафика.

## Выводы

Были проведены экспериментальные исследования трех реализаций механизма идентификации уровней недостачи и избытка резервного ресурса, а также сравнительный анализ количества отказов соединения для одного из этих механизмов и варианта централизованного управления сетью.

В ходе анализа результатов было показано, что в случае централизованного управления при быстром изменении трафика управляющий агент перестает успевать перераспределять ресурсы. Также было выявлено, что централизованный метод управления работает заметно хуже распределенного при резких скачках трафика в сети.

На основании полученных результатов были сделаны следующие выводы:

– децентрализованное управление при подходе, основанном на выполнении действий только в случае изменения трафика, не имеет возможности распределять ресурсы динамически при медленных изменениях нагрузки в условиях глобальной нехватки пропускной способности;

–следует комбинировать централизованное и распределенное управление сетью с учетом скорости изменения сетевого трафика.

Полученные выводы имеют как теоретическую, так и практическую ценность, т.к. могут быть использованы для дальнейших исследований с целью повышения эффективности работы данной многоагентной системы и разработки системы динамического управления сетью.

### Список литературы:

1. Гаврилова Т.А., Хорошевский В.Ф. Базы знаний интеллектуальных систем. – СПб.: Питер, 2001. – 384 с.
2. *Jenning N., Sycara K., Wooldridge M.* Roadmap of Agent Research and Development // *Autonomous Agent and Multi-Agent Systems.* – 1998. – Vol. 1, Issue 1. – P. 7-38.
3. *Parunak H.* Practical and Industrial Applications of Agent-Based System. – Industrial Technology Institute, 1998. – 41p.
4. Скобелев П.О. Виртуальные миры и интеллектуальные агенты для моделирования деятельности компаний // Сборник научных трудов VI конференции по искусственному интеллекту. – Тверь, 1998. – С. 114-123.
5. *Bradshaw J.* Software Agents // The MIT Press: Cambridge, MA, 1997. – P. 3-46.
6. *Mitra D., Wang Q.* Stochastic Traffic Engineering for Demand Uncertainty and Risk-Aware Network Revenue Management // *IEEE/ACM Tr. Networking.* - 2005. – Vol. 13, No.2. - P. 221-233.
7. Рассел С., Норвиг П. Искусственный интеллект: современный подход, 2-е изд. – Пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2006. – 1408 с.
8. *Winstein K., Balakrishnan H.* End-to-End Transmission Control by Modeling Uncertainty about the Network State // *HotNets-X*, Cambridge, MA, 2011. – P. 1-6.
9. *Yang S., Kuipers F.A.* Traffic Uncertainty Models in Network Planning // *IEEE Communications Magazine.* - 2014. – Vol.52, Issue 2. – P.172-177.