

УДК 004.72:519.2

Д.А. Перепелкин, И.Ю. Цыганов

УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫЙ АЛГОРИТМ СЕГМЕНТАЦИИ СТРУКТУР КОРПОРАТИВНЫХ СЕТЕЙ ПО КРИТЕРИЮ МИНИМАЛЬНОЙ СТОИМОСТИ

Предложен усовершенствованный алгоритм сегментации структур корпоративных сетей по критерию минимальной стоимости с учетом данных о структуре базовой сети и связности каналов связи. Проведено исследование сегментации древовидных, полносвязных и частичносвязных топологий корпоративных сетей с учетом предложенного алгоритма.

Ключевые слова: корпоративные сети, оптимальные структуры, сегментация, сегменты, базовая сеть, топология, связность, адаптивная маршрутизация.

Введение. В настоящее время на практике широко внедряют и используют услуги корпоративных сетей с несколькими зонами конфигурирования трафика. Такие услуги направлены на повышение масштабируемости решений по управлению трафиком, адаптивной маршрутизацией, сетевыми ресурсами, качеством обслуживания и производительностью в сети в целом [1-3]. К наиболее распространенным сетевым решениям в территориально-распределенных корпоративных сетях относят технологии IP (Internet Protocol) и MPLS (MultiProtocol Label Switching), которые поддерживают многоуровневые сетевые решения. Отличительной особенностью территориально-распределенных систем управления является присутствие нескольких центров управления и принятия решений, то есть расчет таблиц маршрутизации выполняется одновременно на нескольких маршрутизаторах, которые функционируют в интересах различных подсетей (автономных систем или кластеров). Эффективность функционирования распределенных корпоративных сетей определяется качеством решения задач по недопущению и устранению перегрузок сетевых ресурсов между подсетями, а именно перегрузок каналов связи между пограничными маршрутизаторами отдельных подсетей.

Применение новых перспективных подходов для решения задачи формирования оптимальных структур сегментов корпоративных сетей позволяет повысить эффективность процессов маршрутизации, надежность и безопасность передачи данных.

Цель работы – усовершенствование алгоритма сегментации структур корпоративных

сетей по критерию минимальной стоимости с учетом данных о структуре базовой сети и связности каналов связи, а также экспериментальное исследование предложенного алгоритма на различных топологиях.

Постановка задачи. В общем случае корпоративная сеть состоит из множества базовых узлов (маршрутизаторов), соединенных скоростными каналами связи. Стоимость маршрута между базовыми узлами складывается из стоимости используемых каналов связи в этом маршруте. В работе [4] проведено исследование и сравнение известных алгоритмов сегментации структур компьютерных сетей и предложен эффективный алгоритм формирования оптимальных структур сегментов с учетом данных о структуре базовой сети и связности каналов связи. В данной работе предлагается усовершенствование предложенного в [4] алгоритма за счет введения нового порядка объединения сегментов между собой, что позволит оптимизировать процесс сегментации структур корпоративных сетей. С учетом нововведений в работе алгоритма целесообразно исследовать его эффективность на различных топологиях корпоративных сетей.

Разработка алгоритма. Для повышения эффективности функционирования корпоративных сетей предлагается усовершенствованный алгоритм сегментации структур корпоративных сетей по критерию минимальной стоимости, позволяющий повысить эффективность процессов маршрутизации, надежность и безопасность передачи данных за счет использования дополнительной информации о структуре базовой сети и связности каналов связи.

Математическую модель корпоративной

сети представим в виде неориентированного взвешенного связного графа $G = (V, E, W)$, где V – множество вершин (узлов связи или маршрутизаторов), $|V| = N$, E – множество ребер (каналов или линий связи), $|E| = M$, W – множество весов ребер (стоимость каналов связи между узлами).

В соответствии с алгоритмом [4] используем следующие понятия. Обозначим через G_1 такой связный подграф графа G , для которого $G_1 = (V, E_1, W_1)$, где V – множество вершин подграфа (узлов связи или маршрутизаторов), $|V| = N$, E_1 – множество ребер подграфа (каналов или линий связи), $|E_1| = M_1$, W_1 – множество весов ребер подграфа (стоимость каналов связи между узлами). Степень узла связи $\deg(v_i)$ подграфа $G_1 \subset G$ – число неповторяющихся каналов связи $e_{ij} \in E$, инцидентных узлу v_i . Узел связи v_i называется листом дерева (подграфа G_1), если его степень $\deg(v_i) = 1$. Потомком называется часть минимального покрывающего дерева, имеющая узел-предок. Предком называется узел связи, имеющий одного и более потомков. Величиной связности сегментов Q называется отношение количества связей внутри сегмента к числу внешних связей у данного сегмента

$$Q = \frac{M_{in}}{M_{out}}.$$

На основе данной математической модели предложен усовершенствованный алгоритм сегментации структур корпоративных сетей по критерию минимальной стоимости на основе данных о структуре базовой сети и связности каналов связи. Укрупненно алгоритм имеет следующий вид.

Шаг 1. В графе G корпоративной сети найти минимальное покрывающее дерево с помощью алгоритма Прима. В качестве критерия оптимальности канала связи выбрать минимальную стоимость его использования.

На данном этапе необходимо найти такой связный подграф $G_1 \subset G$, для которого суммарный вес $w(G_1)$ входящих в него ребер минимален.

Шаг 2. Выделить в полученной структуре первичные сегменты.

Объединение в первичные сегменты происходит последовательным объединением потомков с их предками. Вначале рассматривается в качестве потомка произвольный узел связи v_i подграфа $G_1 \subset G$. Далее оценивается степень данного узла $\deg(v_i)$. Если $\deg(v_i) = 1$, то данный узел объединяется с узлом, с которым имеет связь (с предком), а если предок уже распре-

лен в сегмент, то рассматриваемый узел входит в состав этого сегмента. В случае когда степень рассматриваемого узла $\deg(v_i) > 1$, переходим к рассмотрению следующего узла связи. Данные действия производятся до тех пор, пока не будут просмотрены все узлы связи. Когда все узлы окажутся просмотренными, то будут сформированы первичные сегменты. Эти сегменты состоят из конечных узлов подграфа G_1 и предков этих узлов.

Шаг 3. Формирование вторичных сегментов.

После первого этапа могут остаться узлы связи, нераспределенные по сегментам. Их распределение следует провести по следующему принципу. Вначале рассматривается произвольный узел связи из нераспределенных. Определяются сегменты $G_i \subset G$, имеющие связь с рассматриваемым узлом. Связь должна принадлежать минимальному покрывающему дереву. Если такие сегменты найдены, то выбирается сегмент, имеющий максимальное количество связей с рассматриваемым узлом. Если такой сегмент не один, то осуществляется выбор сегмента, который связан с рассматриваемым узлом минимальным весом. Аналогичным образом просматриваются все узлы, не попавшие в первичные сегменты. Далее выбирается узел связи, который будет присоединен к выбранному для него сегменту первым. Критерием выбора первого присоединяемого узла является минимальная по отношению к другим узлам стоимость канала из подграфа $G_1 \subset G$ между ним и выбранным для него сегментом:

$$\min_{i=1..k} \{c_{r,s}^i\},$$

где $c_{r,s}$ – стоимость выбранного канала связи между узлом r и сегментом s , k – количество пар узлов и сегментов для объединения.

Вышеописанные действия производятся до тех пор, пока все узлы связи не будут распределены в сегменты.

Шаг 4. Оценка полученной структуры с помощью величины связности сегментов Q .

Заметим, что чем больше сегментов получено в результате разбиения, тем меньше величина связности. Минимальная величина связности, при которой полученные сегменты являются оптимальными, имеет значение $Q = 0,3$.

Шаг 5. Получение сегментов с минимальной или заданной величиной связности.

Выполняется поиск сегментов, которые не удовлетворяют минимальной величине связности. Для каждого такого сегмента определяются соседние сегменты, с которыми данный сегмент

имеет связь, принадлежащую подграфу $G_1 \subset G$. Из этих сегментов выбирается тот сегмент, у которого суммарная стоимость между внутренними узлами минимальна. Если таких сегментов несколько, то выбирается тот сегмент, с которым рассматриваемый сегмент имеет минимальный вес из подграфа $G_1 \subset G$. Порядок объединения сегментов между собой схож с порядком присоединения свободных узлов к сегментам. То есть когда определены сегменты, которые могут быть объединены, первыми объединяются те сегменты, у которых вес связывающего их канала из подграфа $G_1 \subset G$ минимален по отношению к минимальным весам связывающих каналов других пар сегментов:

$$\min_{i=1..k} \{c_{s_1,s_2}^i\},$$

где c_{s_1,s_2} – стоимость выбранного канала связи между сегментами s_1 и s_2 , k – количество пар сегментов для объединения.

Таким образом, усовершенствование алгоритма [4] заключается в введении нового порядка распределения свободных узлов по сегментам и объединения сегментов. Перед каждым очередным изменением структуры уже существующих сегментов просматривается весь граф, а лишь затем производится присоединение узлов или объединение сегментов. Исходный узел для расчетов требуется только для осуществления алгоритма Прима, для алгоритма сегментации такой узел не нужен. В результате удастся получить минимально возможные веса внутренних каналов сегментов по отношению к весам межсегментных каналов связи.

Пример работы алгоритма. Представим корпоративную сеть в виде взвешенного неориентированного графа $G = (V, E, W)$, приведенного на рисунке 1. Далее перейдем к нахождению минимального покрывающего дерева. В качестве начального узла выберем узел V_1 .

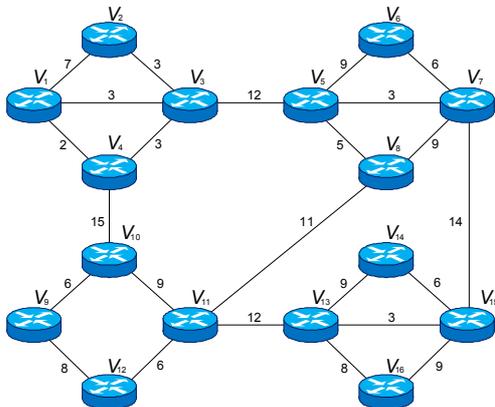


Рисунок 1 – Граф G корпоративной сети

Результат нахождения минимального покрывающего дерева изображен на рисунке 2.

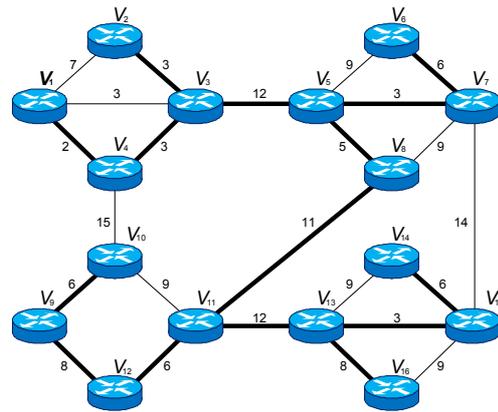


Рисунок 2 – Результат построения минимального покрывающего дерева графа G

На основе полученной структуры произведем выделение сегментов $G_i \subset G$. В результате получим сегменты $G_2, G_3, G_4, G_5, G_6, G_7$. Все эти сегменты получились путем присоединения концевых узлов минимального покрывающего дерева к их предкам. Например, степень узла V_6 $\deg(V_6) = 1$, значит, узел V_6 объединяется в сегмент со своим предком V_7 . Результат первичной сегментации графа G приведен на рисунке 3.

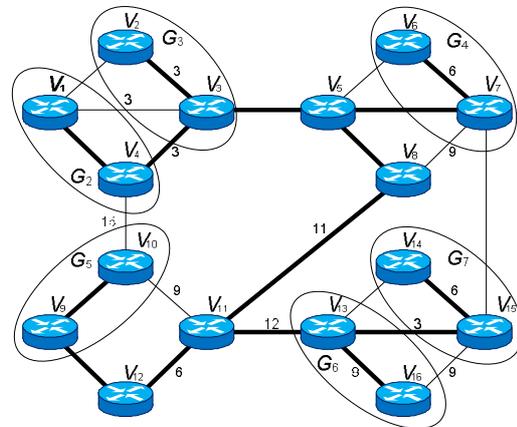


Рисунок 3 – Результат первичной сегментации графа G

После первичного распределения осталось четыре свободных узла V_5, V_8, V_{11}, V_{12} . На данном этапе узел V_5 может быть присоединен к сегментам G_3 и G_4 , но с G_4 его связывают два канала, а с G_3 – один. Следовательно, узел V_5 будет присоединен к G_4 . Осталось проанализировать еще три свободных узла. Узел V_8 на данном этапе не соединен ни с одним из сегментов по минимальному остову, так как V_5 и V_{11} еще не распределены в сегменты. Аналогично получим, что V_{11} может быть присоединен к сегменту G_6 , а V_{12} – к G_5 . Теперь все свободные узлы пройдены.

Получаем, что V_5 имеет связь с G_4 по каналу с весом 3. Это наименьший вес соединения, принадлежащий $G_1 \subset G$, из всех пар «свободный узел–присоединяемый сегмент». Таким образом, первым в свой сегмент переходит узел V_5 . Далее в тот же сегмент G_4 будет добавлен узел V_8 , поскольку будет иметь с ним минимальную связь с весом 5, в то время как остальные свободные узлы имеют связи 11 (V_{11}) и 8 (V_{12}) со своими потенциальными сегментами (рисунок 4). Следующим в сегмент G_5 войдет узел V_{12} , а за ним – узел V_{11} (рисунок 5).

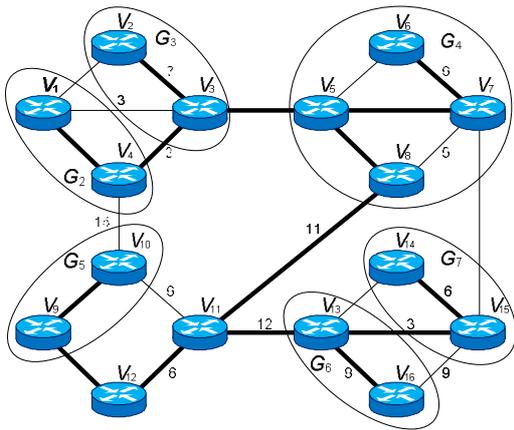


Рисунок 4 – Окончательный вариант сегмента G_4

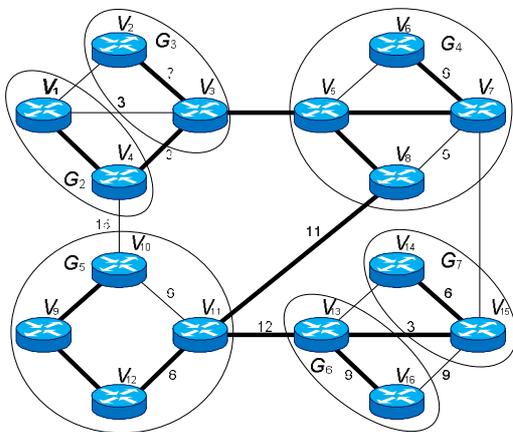


Рисунок 5 – Окончательный вариант сегмента G_5

Получены вторичные сегменты, свободных узлов не осталось. Но не все из сегментов имеют величину связности, удовлетворяющую минимально допустимой. Структуру сегментов G_2, G_3, G_6, G_7 необходимо пересмотреть. Очевидно, что G_3 присоединяется к G_2 , а G_7 – к сегменту G_6 , поскольку суммарные связи между их внутренними узлами минимальны по отношению к сегментам G_4 и G_5 . Заметим, что порядок объединения сегментов произвольный, потому что сегменты G_2 и G_3 имеют между собой канал с

весом 3, принадлежащий минимальному дереву, сегменты G_4 и G_5 соединены между собой каналом, принадлежащим $G_1 \subset G$ с таким же весом 3.

Итоговое разбиение графа G на сегменты приведено на рисунке 6.

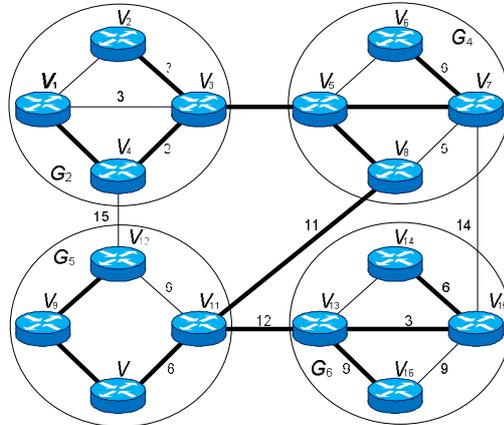


Рисунок 6 – Итоговое разбиение графа G на сегменты

Результаты моделирования. Для подтверждения правильности предложенного алгоритма разработано программное обеспечение моделирования процессов сегментации различных топологий корпоративных сетей. Приложение разработано на языке программирования C# с использованием платформы .NET Framework 4.5. Интерфейс программной системы приведен на рисунке 7.

При разработке основное внимание уделялось корректности предлагаемого алгоритма и размерности решаемой задачи. Были проведены исследования графовых моделей корпоративных сетей с полносвязными, частичносвязными и древовидными структурами, состоящими из 10, 20, 30, 50, 100, 200 и 500 узлов связи. Полученные статистические данные результатов исследования представлены в таблицах 1–3. В приведенных таблицах приняты следующие обозначения: N – число узлов в графе, M – число каналов в графе, R – число полученных сегментов, D – диаметр графа, D_{MIN} и D_{MAX} – минимальный и максимальный диаметры подграфов полученных сегментов, N_{MIN} и N_{MAX} – минимальное и максимальное число узлов связи в сегментах, M_{MIN} и M_{MAX} – минимальное и максимальное число каналов в полученных сегментах, M_{OUT} – общее число межсегментных каналов, $M_{OUT MIN}$ и $M_{OUT MAX}$ – минимальное и максимальное число межсегментных каналов в полученных сегментах, Q – величина связности. На рисунках 8 – 13 приведены примеры топологий корпоративных сетей, на которых проводились исследования предложенного в работе алгоритма.

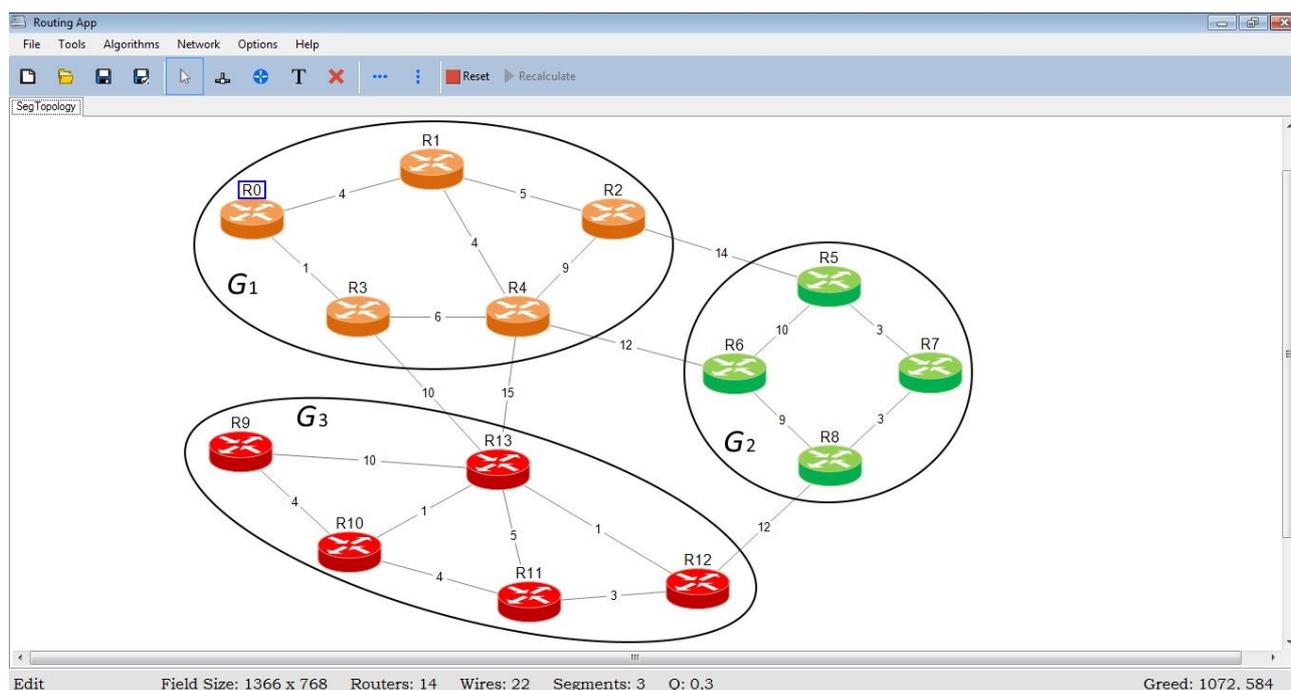


Рисунок 7 – Интерфейс программной системы

Таблица 1 – Статистические данные сегментации частично связанных топологий корпоративных сетей

№ п/п	N	M	R	D	D_{MIN}	D_{MAX}	N_{MIN}	N_{MAX}	M_{MIN}	M_{MAX}	M_{OUT}	$M_{OUT_{MIN}}$	$M_{OUT_{MAX}}$	Q
1	10	19	3	3	1	3	3	4	2	3	11	5	10	0,3
	10	19	1	3	3	3	10	10	19	19	0	0	0	0,5
	10	19	1	3	3	3	10	10	19	19	0	0	0	0,7
2	20	35	4	5	1	4	3	9	3	12	12	3	9	0,3
	20	35	4	5	1	4	3	9	3	12	12	3	9	0,5
	20	35	3	5	1	4	3	9	3	12	9	3	9	0,9
3	30	53	6	8	1	5	2	8	1	9	20	3	10	0,3
	30	53	4	8	3	5	7	8	9	10	16	5	10	0,5
	30	53	4	8	3	5	7	8	9	10	16	5	10	0,7
4	50	112	9	9	1	6	2	10	2	15	45	4	14	0,3
	50	112	7	9	1	6	2	10	2	15	37	4	15	0,5
	50	112	6	9	3	6	7	10	10	15	36	10	15	0,7
5	100	182	19	14	1	5	2	9	1	11	81	3	17	0,3
	100	182	14	14	2	6	4	16	3	24	67	4	17	0,5
	100	182	10	14	2	7	4	17	3	24	54	4	19	0,7
6	200	406	29	20	1	9	2	15	1	18	171	3	30	0,3
	200	406	25	20	1	8	3	19	3	28	159	6	27	0,5
	200	406	14	20	2	13	4	40	5	61	116	6	43	0,7
7	500	1005	64	35	1	9	2	18	1	24	423	3	30	0,3
	500	1005	53	35	2	10	4	18	3	26	388	5	30	0,5
	500	1005	39	35	2	14	4	28	5	39	338	5	36	0,7

Из таблицы 1 видно, что от величины связности Q зависит число получаемых при сегментации подсетей. Это объясняется тем, что при увеличении Q для обеспечения необходимой величины связности требуется объединять большее число сегментов. Следствием объединения сегментов является увеличение минимальной и максимальной оценки числа узлов связи и числа

каналов в сегментах. Это, в свою очередь, способствует увеличению оценки минимальной и максимальной величины диаметров подсетей. Число внешних связей зависит от количества узлов связи в сегменте. Таким образом, после объединения сегментов в результирующем сегменте увеличивается количество узлов связи, что приводит к увеличению и максимальной, и ми-

нимальной оценки числа внешних связей сегментов. Причем общее число межсегментных связей с увеличением Q уменьшается, поскольку

при объединении сегментов результирующий сегмент поглощает все межсегментные связи между ними.

Таблица 2 – Статистические данные сегментации полносвязных топологий корпоративных сетей

№ п/п	N	M	R	D	D_{MIN}	D_{MAX}	N_{MIN}	N_{MAX}	M_{MIN}	M_{MAX}	M_{OUT}	$M_{\text{OUT}_{\text{MIN}}}$	$M_{\text{OUT}_{\text{MAX}}}$	Q
1	10	45	1	1	1	1	10	10	45	45	0	0	0	0,3
	10	45	1	1	1	1	10	10	45	45	0	0	0	0,5
	10	45	1	1	1	1	10	10	45	45	0	0	0	0,7
2	20	190	2	1	1	1	9	11	36	55	99	99	99	0,3
	20	190	1	1	1	1	20	20	190	190	0	0	0	0,5
	20	190	1	1	1	1	20	20	190	190	0	0	0	0,7
3	30	813	2	1	1	1	12	18	132	273	408	408	408	0,3
	30	813	1	1	1	1	30	30	813	813	0	0	0	0,5
	30	813	1	1	1	1	30	30	813	813	0	0	0	0,7
4	50	2215	1	1	1	1	50	50	2215	2215	0	0	0	0,3
	50	2215	1	1	1	1	50	50	2215	2215	0	0	0	0,5
	50	2215	1	1	1	1	50	50	2215	2215	0	0	0	0,7
5	100	9900	1	1	1	1	100	100	9900	9900	0	0	0	0,3
	100	9900	1	1	1	1	100	100	9900	9900	0	0	0	0,5
	100	9900	1	1	1	1	100	100	9900	9900	0	0	0	0,7
6	200	39800	1	1	1	1	200	200	39800	39800	0	0	0	0,3
	200	39800	1	1	1	1	200	200	39800	39800	0	0	0	0,5
	200	39800	1	1	1	1	200	200	39800	39800	0	0	0	0,7
7	500	249500	1	1	1	1	500	500	249500	249500	0	0	0	0,3
	500	249500	1	1	1	1	500	500	249500	249500	0	0	0	0,5
	500	249500	1	1	1	1	500	500	249500	249500	0	0	0	0,7

Таблица 3 – Статистические данные сегментации древовидных топологий корпоративных сетей

№ п/п	N	M	R	D	D_{MIN}	D_{MAX}	N_{MIN}	N_{MAX}	M_{MIN}	M_{MAX}	M_{OUT}	$M_{\text{OUT}_{\text{MIN}}}$	$M_{\text{OUT}_{\text{MAX}}}$	Q
1	10	9	2	5	2	2	5	5	4	4	1	1	1	0,3
	10	9	2	5	2	2	5	5	4	4	1	1	1	0,5
	10	9	2	5	2	2	5	5	4	4	1	1	1	0,7
2	20	19	3	6	2	3	6	7	5	6	2	1	2	0,3
	20	19	3	6	2	3	6	7	5	6	2	1	2	0,5
	20	19	3	6	2	3	6	7	5	6	2	1	2	0,9
3	30	29	9	19	1	5	2	6	1	5	8	1	2	0,3
	30	29	9	19	1	5	2	6	1	5	8	1	2	0,5
	30	29	8	19	1	5	2	6	1	5	7	1	2	0,7
4	50	49	14	24	1	7	2	8	1	7	14	1	4	0,3
	50	49	13	24	1	7	2	8	1	7	13	1	4	0,5
	50	49	12	24	1	7	2	8	1	7	12	1	4	0,7
5	100	99	26	46	1	11	2	12	1	11	25	1	4	0,3
	100	99	26	46	1	11	2	12	1	11	25	1	4	0,5
	100	99	26	46	1	11	2	12	1	11	25	1	4	0,7
6	200	199	49	63	1	12	2	16	1	15	49	1	5	0,3
	200	199	49	63	1	12	2	16	1	15	49	1	5	0,5
	200	199	49	63	1	12	2	16	1	15	49	1	5	0,7
7	500	499	127	88	1	11	2	15	1	14	142	1	8	0,3
	500	499	124	88	1	11	2	15	1	14	139	1	8	0,5
	500	499	103	88	1	11	2	15	1	14	118	1	8	0,7

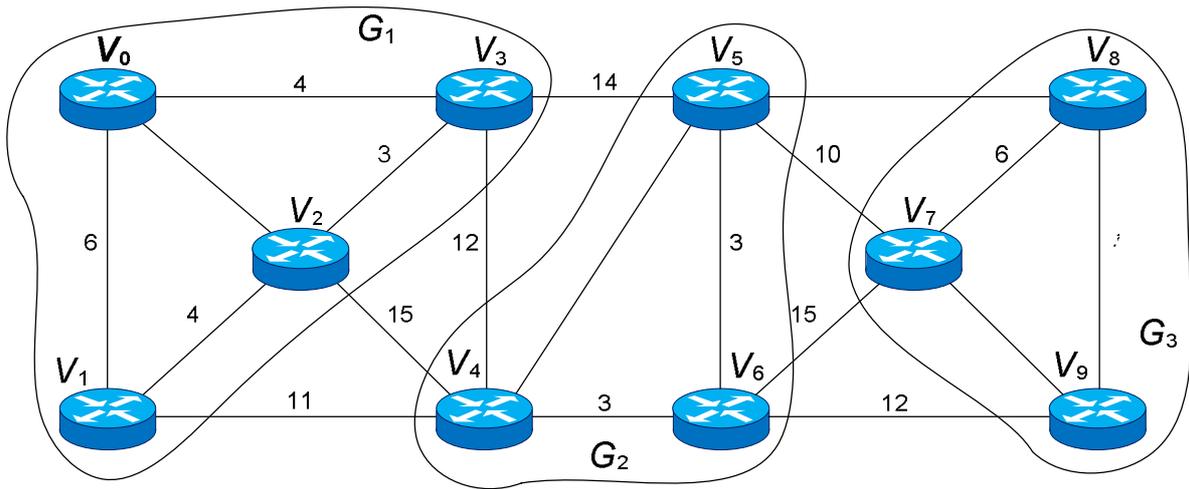


Рисунок 8 – Частичносвязная топология корпоративной сети из десяти узлов связи (таблица 1, п. 1)

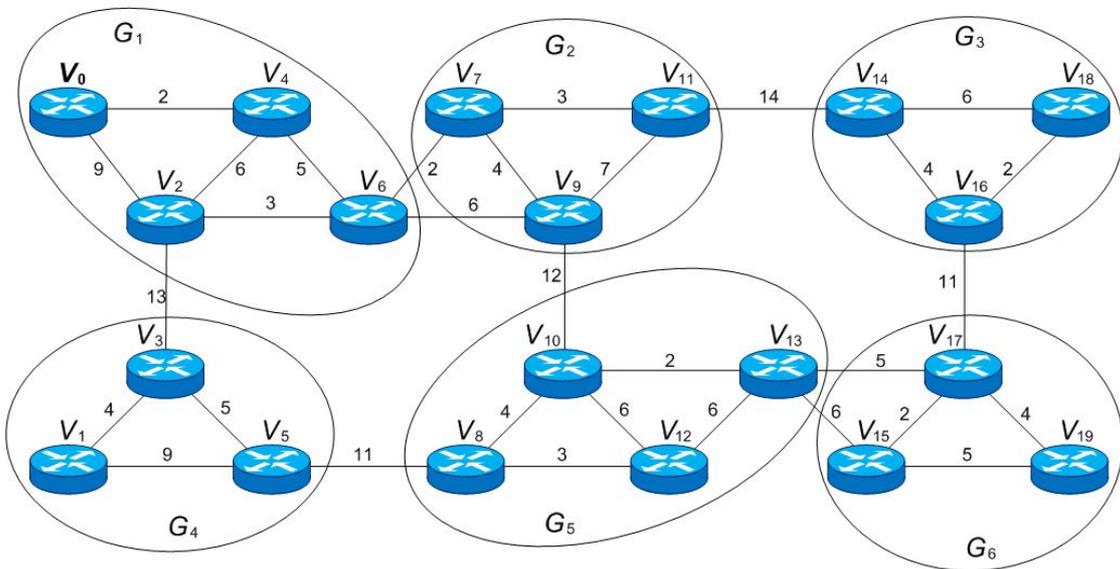


Рисунок 9 – Частичносвязная топология корпоративной сети из двадцати узлов связи (таблица 1, п. 2)

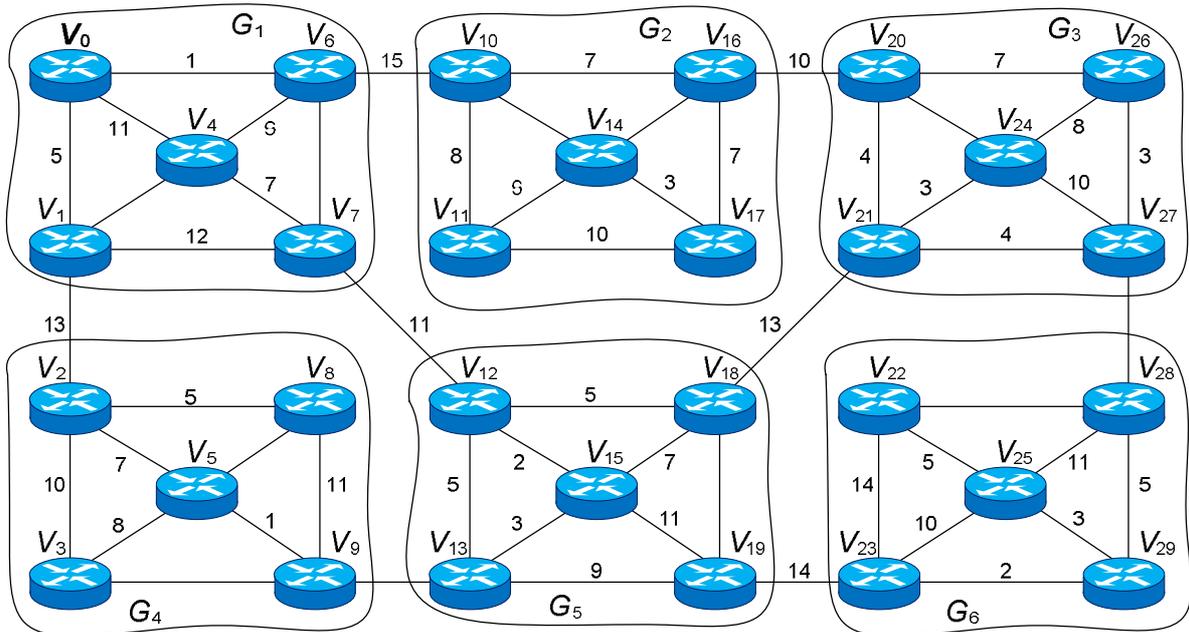


Рисунок 10 – Частичносвязная топология корпоративной сети из тридцати узлов связи (таблица 1, п. 3)

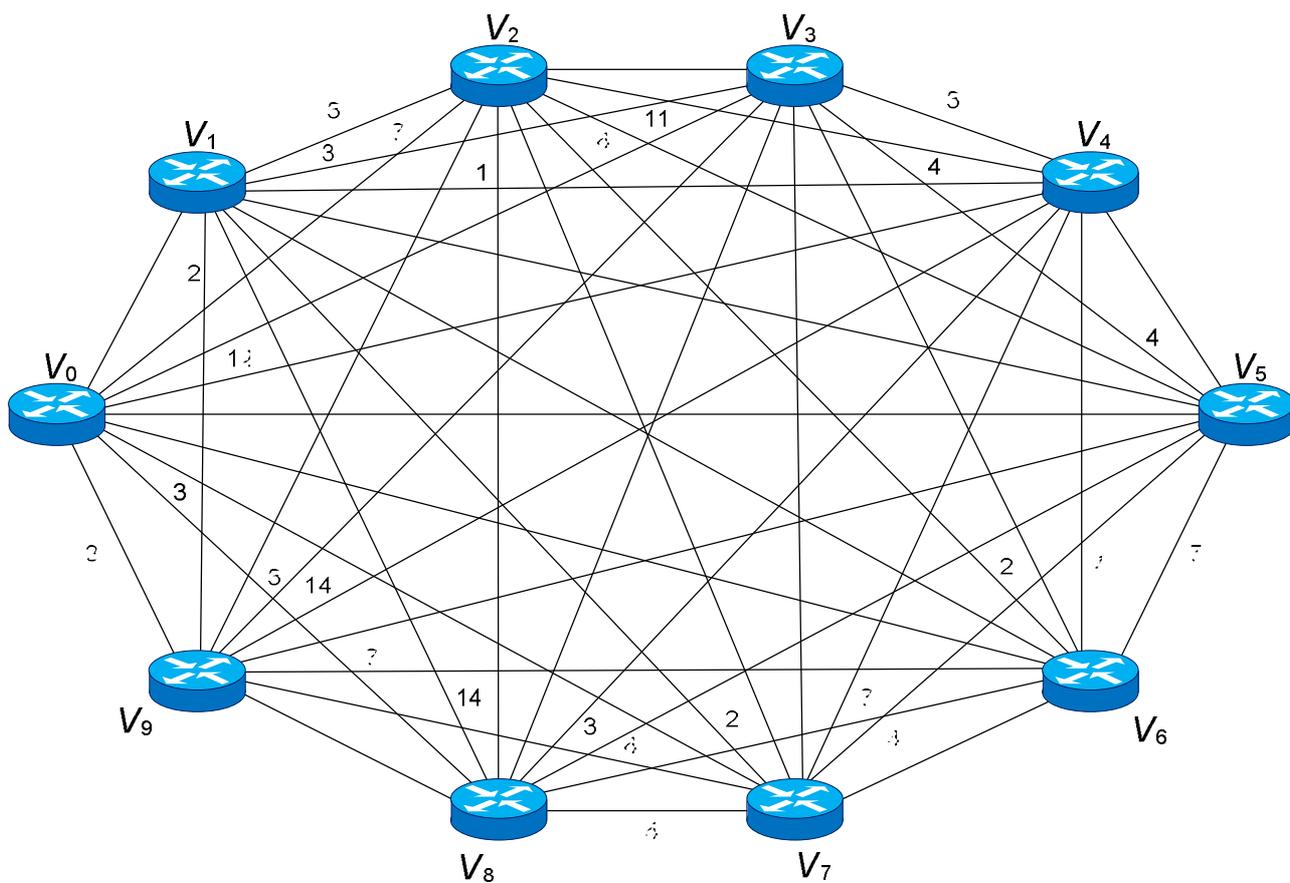


Рисунок 11 – Полносвязная топология корпоративной сети из десяти узлов связи (таблица 2, п. 1)

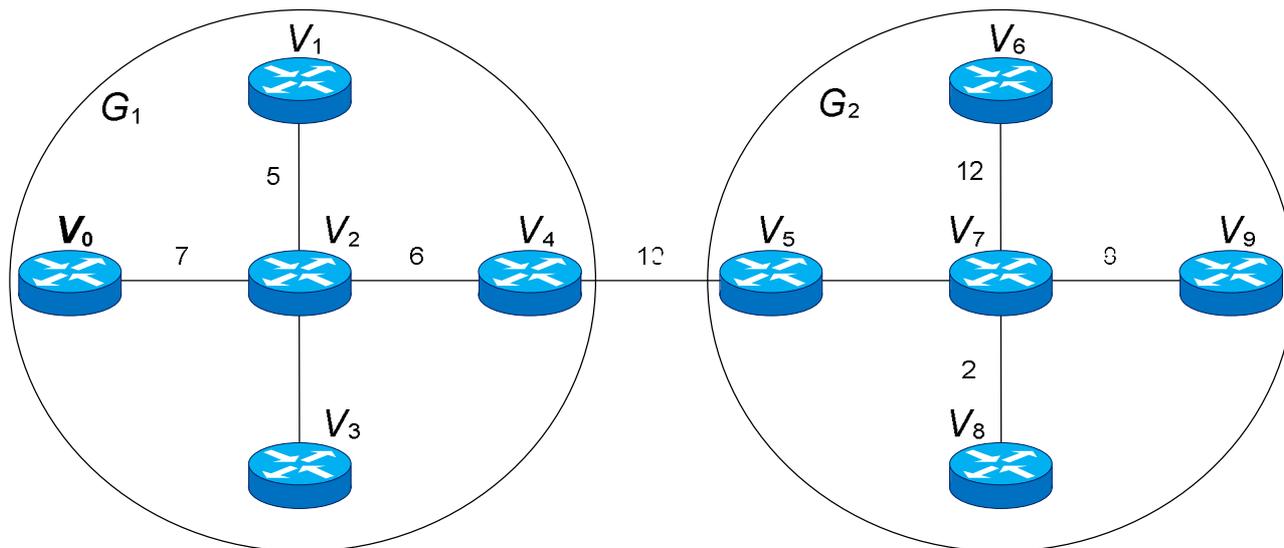


Рисунок 12 – Древоидная топология корпоративной сети из десяти узлов связи (таблица 3, п. 1)

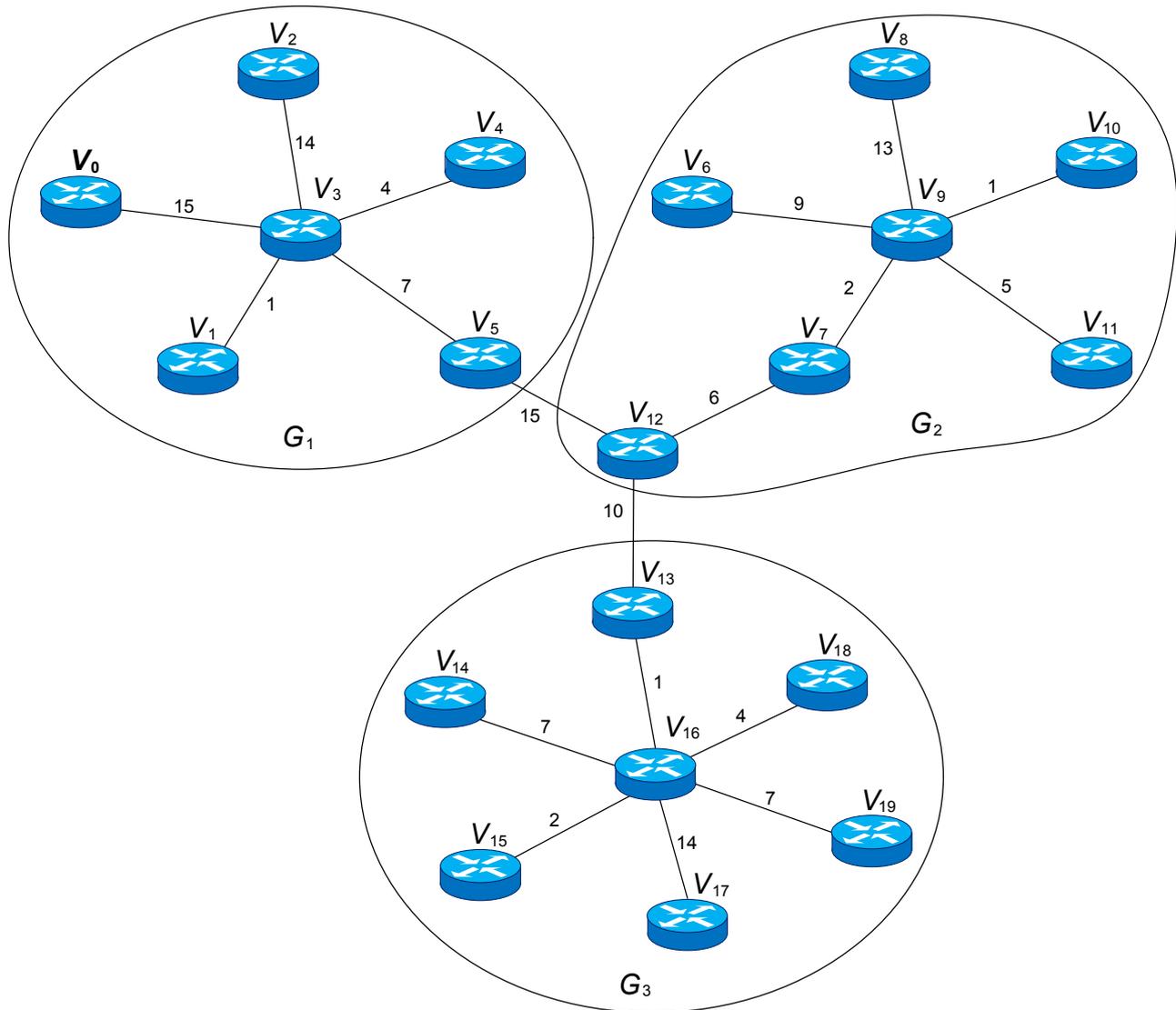


Рисунок 13 – Древоидная топология корпоративной сети из двадцати узлов связи (таблица 3, п. 2)

Вышеописанные зависимости наиболее отчетливо проявились при исследовании частичносвязных топологий корпоративных сетей, на древоидных и на полносвязных топологиях результаты работы предложенного алгоритма менее заметны. Действительно, при любых изменениях в каналах связи сети древоидной структуры минимальный остов не изменится, то есть отсутствует необходимость проведения алгоритма Прима, а в случае применения алгоритма к полносвязным топологиям, предполагающим высокий уровень связности между узлами, уменьшается вклад значения величины связности Q в результирующее разбиение сети на подсети. Таким образом, можно сделать вывод о том, что разработанный алгоритм наиболее эффективен при работе с частичносвязными топологиями корпоративных сетей.

Анализ трудоемкости предложенного алгоритма показывает его эффективность по сравне-

нию с известными алгоритмами и составляет величину $O(kN \log N)$, где k – число полученных сегментов корпоративной сети при разбиении.

Таким образом, разработанный алгоритм является эффективным при сегментации структур корпоративных сетей по критерию минимальной стоимости за счет использования дополнительной информации о структуре базовой сети и связности каналов связи.

В дальнейшем предполагается усовершенствование предложенного в работе алгоритма для решения задачи адаптивной маршрутизации [5-16].

Заключение. В работе предложен усовершенствованный алгоритм сегментации структур корпоративных сетей по критерию минимальной стоимости, позволяющий повысить эффективность процессов маршрутизации за счет использования дополнительной информации о структуре базовой сети и связности каналов связи. Про-

веденные экспериментальные исследования показывают, что предложенный алгоритм наиболее эффективен при работе с частично связными топологиями корпоративных сетей.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ для молодых ученых - кандидатов наук МК-819.2014.9.

Библиографический список

1. Вишневецкий В.М. Теоретические основы проектирования компьютерных сетей. М.: Техносфера, 2003. 512 с.
2. Корячко В.П., Перепелкин Д.А. Корпоративные сети: технологии, протоколы, алгоритмы. М.: Горячая линия – Телеком, 2011. 219 с.
3. Корячко В.П., Перепелкин Д.А. Анализ и проектирование маршрутов передачи данных в корпоративных сетях. М.: Горячая линия – Телеком, 2012. 235 с.
4. Перепелкин Д.А. Алгоритм формирования оптимальных структур сегментов корпоративных сетей с учетом данных о структуре базовой сети и связности каналов связи // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2014. № 50-1. С. 59-64.
5. Перепелкин Д.А., Перепелкин А.И. Разработка алгоритмов адаптивной маршрутизации в корпоративных вычислительных сетях // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2006. № 19. С. 114-116.
6. Перепелкин А.И., Перепелкин Д.А. Разработка алгоритма динамической маршрутизации на базе протокола OSPF в корпоративных вычислительных сетях // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2009. № 28. С. 68-72.
7. Перепелкин Д.А. Алгоритм адаптивной ускоренной маршрутизации на базе протокола OSPF при динамическом добавлении элементов корпоративной сети // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2010. № 34. С. 65-71.
8. Перепелкин Д.А. Алгоритм адаптивной ускоренной маршрутизации на базе протокола OSPF при динамическом отказе элементов корпоративной сети // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2011. № 37. С. 53-58.
9. Корячко В.П., Перепелкин Д.А., Перепелкин А.И. Алгоритм парных перестановок маршрутов в корпоративных сетях // Системы управления и информационные технологии. 2010. Т. 40. № 2. С. 51-56.
10. Корячко В.П., Перепелкин Д.А., Перепелкин А.И. Повышение эффективности функционирования корпоративных сетей при динамических изменениях в их структуре и нагрузках на линии связи // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2010. № 33. С. 49-55.
11. Перепелкин Д.А., Перепелкин А.И. Повышение качества функционирования корпоративных сетей на базе протокола OSPF // Качество. Инновации. Образование. 2010. № 12. С. 51-56.
12. Перепелкин Д.А., Перепелкин А.И. Алгоритм адаптивной ускоренной маршрутизации в условиях динамически изменяющихся нагрузок на линиях связи в корпоративной сети // Информационные технологии. 2011. № 3. С. 2-7.
13. Перепелкин Д.А. Алгоритм парных перестановок маршрутов на базе протокола OSPF при динамическом подключении узлов и линий связи корпоративной сети // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2013. № 4-1 (46). С. 67-75.
14. Перепелкин Д.А. Алгоритм парных перестановок маршрутов на базе протокола OSPF при динамическом отказе узлов и линий связи корпоративной сети // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2014. № 47. С. 84-91.
15. Перепелкин Д.А. Динамическое формирование структуры и параметров линий связи корпоративной сети на основе данных о парных перестановках маршрутов // Информационные технологии. 2014. № 4. С. 52-60.
16. Перепелкин Д.А. Динамическое формирование трафика корпоративных сетей на основе метода маршрутизации по подсетям // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2015. № 51. С. 35-41.