



БЪЛГАРСКА АКАДЕМИЯ НА НАУКИТЕ
ИНСТИТУТ ПО ИНФОРМАЦИОННИ И КОМУНИКАЦИОННИ
ТЕХНОЛОГИИ

Красимир Димитров Тричков

МОДЕЛИРАНЕ И УПРАВЛЕНИЕ НА ИНФОРМАЦИОННИ
ПОТОЦИ

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

НА ДИСЕРТАЦИЯ

за присъждане на образователната и научната степен „доктор“

по научна специалност 02.21.10 „Приложение на принципите и методите на
кибернетиката в различни области на науката“

Научен ръководител: проф. дтн. Тодор Стоилов

София, 2014 г.

Дисертацията е обсъдена и допусната до защита на разширено заседание на секция „Йерархични системи“ на ИИКТ-БАН, състояло се на 12.06.2014 г.

Дисертацията съдържа 115 стр., в които 92 фигури, 18 таблици и 7 стр. литература, включваща 121 заглавия.

Защитата на дисертацията ще се състои на г. от часа в зала на блок на ИИКТ-БАН на открито заседание на научно жури в състав:

1.
2.
3.
4.
5.

Материалите за защитата са на разположение на интересуващите се в стая на ИИКТ-БАН, ул. „Акад. Г. Бончев“, бл.

Автор: ***Красимир Димитров Тричков***

Заглавие: ***МОДЕЛИРАНЕ И УПРАВЛЕНИЕ НА ИНФОРМАЦИОННИ ПОТОЦИ***

Обща характеристика на дисертацията

Актуалност на темата и обзор на основните резултати в областта

Цел на дисертационния труд е посредством моделиране и управление на информационни потоци да се направи топологичен синтез и предложи оптимално решение за преминаване на съществуваща комуникационна мрежа от свързаност тип „звезда“ към двусвързана и трисвързана топология. Да се разработи модел за количествена оценка на качеството, непрекъсваемостта и отказоустойчивостта на обслужването с оглед технологично и структурно подобряване на комуникационната мрежа.

Актуалност на проблема

Компютърните комуникационни мрежи функционират в нестационарни условия на възникване на заявки за обслужване: предаване на данни, файлов обмен, дистанционно ползване на изчислителни ресурси, мултимедийни приложения. Нестационарността на натоварването е основна трудност за точността на анализа, моделирането, оптимизацията на компютърно-комуникационните мрежи [1, 2].

Топологичният синтез на избор на комуникационни канали в компютърна мрежа оказва влияние на множество задачи, свързани с експлоатацията и управлението на комуникационната мрежа. Топологичният синтез влияе на задачи като: задача за предаване на съобщение от източник до потребител [3, 4, 5, 6] при зададена топология и пропускателни способности на каналите, и обем трафик между всяка двойка източник - получател [7, 8] е необходимо да се определят информационните потоци в мрежата; определяне на маршрутът на съобщение, за всяка двойка източник - получател, при което се удовлетворяват изисквания за минимален път, времезакъснения, цена и др. Тези оптимизационни задачи имат голяма размерност и голям брой ограничения [9, 10, 11] и техните решения се влияят от топологията на комуникационната мрежа.

В ежедневната си дейност се стремим към определени цели, за постигането на които е необходимо да решаваме взаимно свързани проблеми [12, 13]. Всеки от тези проблеми обикновено има множество решения. Естествено е предпочитанието да изберем от многото възможни решения най-доброто, т.е. оптималното решение [14].

Информационните и комуникационни системи интензивно се използват в производствената и стопанска практика [15, 16, 17]. Изграждането на техническа хетерогенна структура изисква да се определи удачна топология на мрежата. Това ще позволи удачно и оптимално да се изпълняват информационните задачи на потребителите на комуникационната мрежа. Така оптимизирането на структурата на мрежата ще позволи да се оптимизират и информационните потоци в компютърни комуникационни мрежи за да се изпълняват потребителски приложения, които изискват гарантирано качество на обслужване [18, 19, 20]. Това определи обхвата на дисертационния труд, за намиране на удачна топология на мрежа, което ще влияе на управлението на информационни потоци. В дисертационната работа се извършва топологичен синтез и се определя оптимално решение за преминаване на съществуваща комуникационна мрежа от свързаност тип „звезда“ към двусвързана и трисвързана топология. Разработва се модел за количествена оценка на качеството и отказоустойчивостта на обслужването с оглед технологично и структурно подобряване на комуникационната мрежа [21].

Основната работна задача, която си поставя дисертационния труд е да дефинира и реши оптимизационна задача за определяне на свързаността на мрежа като се използват резултати от измервания на времезакъсненията и пропаданията в комуникационната мрежа и се определи решение за преминаване на съществуваща комуникационна мрежа от свързаност тип „звезда“ към двусвързана и трисвързана топология. С цел подобряване качеството, непрекъсваемостта и отказоустойчивостта на обслужването и с оглед технологично, и структурно подобряване на комуникационната мрежа да се направи количествена оценка на моделите със съответните параметрични състояния.

Целите и задачите на дисертацията са изложени в края на глава първа.

Структура на дисертацията

Дисертационният труд е разделен на увод, четири глави и заключение. Дисертацията съдържа 115 страници, 92 фигури и 18 таблици, 121 цитирани литературни източника и списък на използваните съкращения. По дисертационния труд са публикувани 8 публикации, като 4 от тях са доклади от международни конференции. Изследванията са част от получените резултати на 6 научноизследователски проекта.

В първа глава са анализирани моделите за формализиране на информационни и комуникационни потоци в мрежи чрез графи. Оценени са техните особености, предимства и недостатъци. Разгледани са проблемите за намиране на най-кратък път от един възел към всички останали възли в мрежи, за които цената на дъгата може да варира. Тези задачи имат влияние за определяне на оптимална топология на комуникационна мрежа. Направени са основни изводи на базата на проучените литературни източници и са формулирани целите и задачите на дисертацията.

Във втора глава е определена и анализирана пропускателната способност и времезакъсненията в мрежата при предаване на информационни потоци. Оценявано е пропадането на връзка между двойка възли като характеристика на отказоустойчивостта на съществуваща комуникационна мрежа със свързаност тип „звезда“. Дефиниран е алгоритъм за определяне пропускателните способности на база времезакъснението на достъпа до съответните възли. Определени са средните времеви закъснения между отделните възли при съществуващата топология. Изчислен е капацитетът на информационната мрежа.

В трета глава е синтезирана архитектура на съществуваща мрежа от свързаност тип „звезда“ с определени допълнителни алтернативни комуникационни канали за преход към двусвързана и трисвързана архитектура. Синтезиран е алгоритъм за определяне на теоретичните времезакъснения между възлите на добавените алтернативни комуникационни канали. Дефинирана е оптимизационна задача за определяне на свързаността на мрежата като са използвани резултатите от измерванията на времезакъсненията и пропаданията в комуникационната мрежа. Оптимизационната задача е решавана за определяне на структура на комуникационната мрежа като двусвързана и трисвързана. Анализирани са получаваните решения.

В четвърта глава са разгледани и анализирани три модела за определяне на оптималния вариант за подобряване на съществуваща комуникационна мрежа. Направена е количествена оценка на получените резултати. На база топологичен синтез е избран най-добрият модел със съответно параметрично състояние за преминаване от съществуваща топология „звезда“ към разпределена трисвързана мрежа между отделните възлови точки с цел постигане на непрекъсваемост на информационните потоци.

В заключението са описани различните дейности, извършени при изпълнението на отделните етапи. Включени са приносите на дисертационния труд, бъдещите насоки на работа, научните публикации по дисертацията, както и научно-изследователските проекти, по които е работено във връзка с изследванията по дисертационния труд.

Цели и задачи на дисертацията

Цел: Посредством моделиране и управление на информационни потоци да се направи топологичен синтез и предложи оптимално решение за преминаване на съществуваща комуникационна мрежа от свързаност тип „звезда“ към двусвързана и трисвързана топология. Да се разработи модел за количествена оценка на качеството, непрекъсваемостта и отказоустойчивостта на обслужването с оглед технологично и структурно подобряване на комуникационната мрежа.

Задачи:

- 1) Да се анализират моделите за формализиране на информационни и комуникационни потоци в мрежи чрез графи и да се оценят техните особености, предимства и недостатъци. Да се разгледат проблемите за намиране на най-кратък път от един възел към всички останали възли в мрежи, за които цената на дъгата може да варира.

- 2) Да се определи и анализира пропускателната способност и времезакъсненията в мрежата при предаване на информационни потоци. Да се оцени пропадането на връзка между двойка възли като характеристика на отказоустойчивостта на съществуваща комуникационна мрежа със свързаност тип „звезда“.
- 3) Да се синтезира алгоритъм за определяне на теоритичните времезакъснения между възлите на добавените алтернативни комуникационни канали. Да се дефинира оптимизационна задача за определяне на свързаността на мрежата като се използват резултатите от измерванията на времезакъсненията и пропаданията в комуникационната мрежа.
- 4) Да се реши оптимизационна задача за определяне на структура на комуникационната мрежа като двусвързана и трисвързана. Да се анализират получаваните решения. Да се направи количествен анализ на получените резултати.

Настоящата дисертация се състои от увод, четири глави, заключение и списък на цитираната литература. Основното съдържание е поместено на 115 страници, а изложението е придружено с фигури и таблици. Списъкът на цитираната литература включва 121 заглавия.

Глава 1. Анализ на проблема за намиране на най-кратък път в мрежа

В първа глава се анализират моделите за формализиране на информационни и комуникационни потоци в мрежи чрез графи, които имат отношение към темата на дисертацията. Оценяват се техните особености, предимства и недостатъци. Разглеждат се проблемите за намиране на най-кратък път от един възел към всички останали възли в мрежи, за които цената на дъгата може да варира. Също така се извършва теоретично изследване и анализиране на аспектите, свързани с моделирането и управлението на информационни потоци в мрежи.

В първа секция се представя кратък анализ на задачите, решавани в първа глава.

Във втора секция е разгледан проблема за намиране на най-кратък път. Намирането на най-кратък път има много полезни приложения. По тази причина, това е било обект на задълбочени изследвания. Дийкстра [23] е представил добре известния алгоритъм, който решава проблема за $O(n^2)$ време. Флойд [24] допуска ограничението, че всички теглови коефициенти трябва да бъдат не отрицателни. Флойд е представил алгоритъм, който решава този по-общ проблем за $O(n^3)$ време. Когато тегловете коефициенти се променят като функция на времето $w_{ij}(t)$, такива мрежи са наречени динамични мрежи. В динамична мрежа, тегловете коефициенти показват динамичен модел.

В трета секция са дефинирани основните алгоритми за намиране на най-кратък път и е описано представяне на комуникационните мрежи и системи чрез графи [78].

В четвърта секция са разгледани два метода за определяне на всички пътища между зададени два възела от граф - рекурсивен метод чрез изчисляване на поддетерминантата (ресурсоемък метод) и метод чрез обхождане в широчина (оптимизационен метод).

За структурния анализ на комуникационните мрежи (намиране на пътища, сечения и техните характеристики), представени чрез графи е целесъобразно да се използват структурни матрици, както и някои основни булеви операции с тях. Всеки път (сечение) се представя като конюнкция на ребрата, образуващи този път (сечение).

В пета секция е описано определяне на сечения посредством метод с булево инвертиране и оптимизиране на резултата.

В шеста секция са разгледани задачи за вземане на решение.

В седма секция са разгледани задачи за линейно програмиране.

- Общ вид на математически модел на задача за линейно програмиране [82] - В общ вид задачата за линейно програмиране може да се представи по следния начин:

Да се намери набор от управляеми параметри $\bar{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, които постигат най-големи (най-малки) стойности на показателя за ефективност

$$F(\bar{x}) = \sum_{j=1}^n c_j x_j \rightarrow \max(\min) \quad (7)$$

при изпълнение на определени ограничения.

Задачата за линейното програмиране се нарича разрешима, ако има дори и само едно оптимално решение. При неразрешимите задачи или е празна областта на допустимите решения, или целевата функция не е ограничена.

- Форми на задачата за линейно програмиране - В зависимост от вида на ограничението се различават три форми задачи [82] - канонична, симетрична и обща.

Глава 2. Определяне на пропускателните способности на канали чрез времеви измервания

Във втора глава е определена и анализирана пропускателната способност и времезакъсненията в мрежата при предаване на информационни потоци. Определени са средните времеви закъснения между отделните възли при съществуващата топология. Изчислен е капацитетът на информационната мрежа, като изчислението е извършено между възел ИО-София и останалите възли. Оценено е пропадането на връзката между двойка възли като характеристика на отказоустойчивостта на съществуваща комуникационна мрежа със свързаност тип „звезда“.

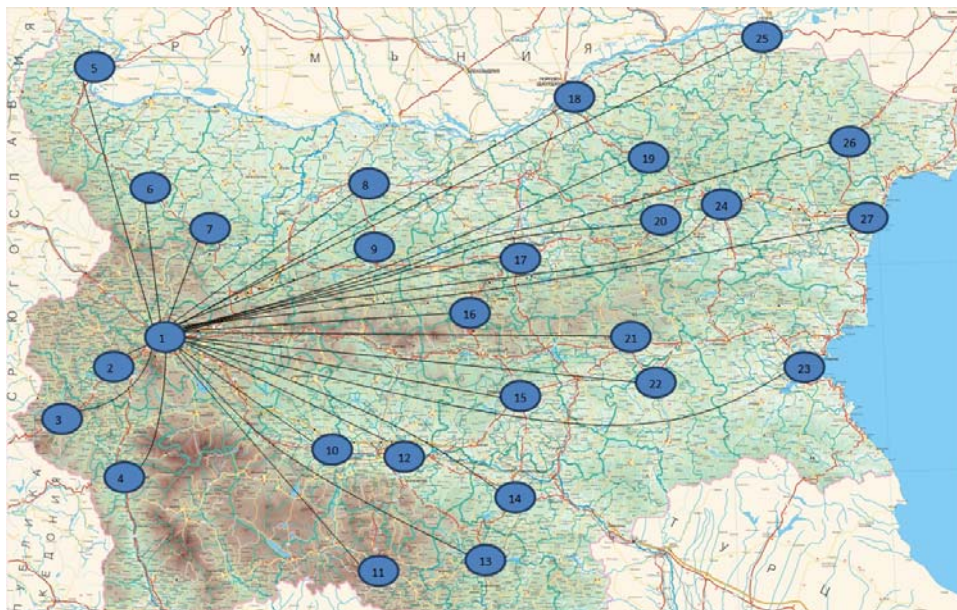
В първа секция са описани задачите и проблемите, решавани във втора глава.

Във втора секция са представени инструменти за изчисляване на пропускателна способност на база времезакъснението. Дефинирано е определение за пропускателна способност на комуникационен канал. Разгледани са три методи за измерване на времезакъсненията в комуникационна мрежа - активно измерване, пасивно измерване, хибридно измерване. За целите на дисертационния труд се използва активно мрежово измерване.

В трета секция е представен модел и е разгледана формула за изчисляване на пропускателна способност на отделни възли на база времезакъснението. С две измервания (с два различни по стойност размера на пакета) се изчислява постигнатата пропускателна способност между два хоста [105]. При изследване на времезакъснението са използвани пакети с два различни размера - 100 bytes и 1300 bytes. Представена е разглежданата комуникационна мрежа, която представлява клонова мрежа с 27 възела (таблица 2.1, фигура 2.3) и централизирано управление - топология „звезда“, като централната точка се намира в ИО-София.

Таблица 2.1

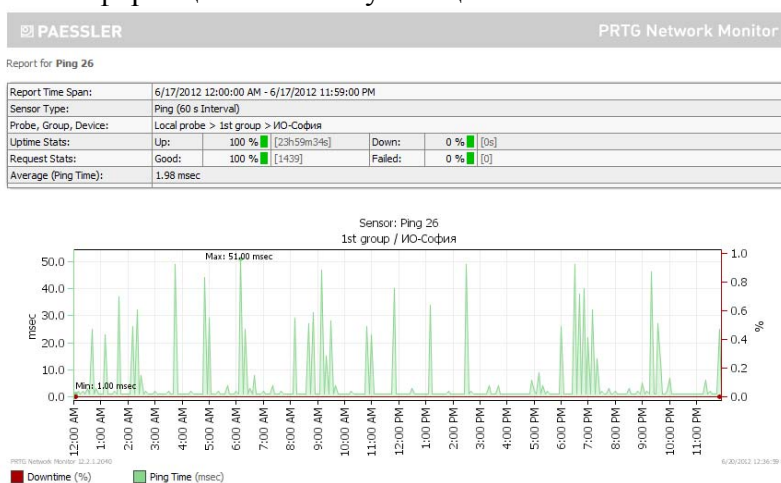
Възел / клон	Град
1	София
2	Перник
3	Кюстендил
4	Благоевград
5	Видин
6	Монтана
7	Враца
8	Плевен
9	Ловеч
10	Пазарджик
11	Смолян
12	Пловдив
13	Кърджали
14	Хасково
15	Стара Загора
16	Габрово
17	Велико Търново
18	Русе
19	Разград
20	Търговище
21	Сливен
22	Ямбол
23	Бургас
24	Шумен
25	Силистра
26	Добрич
27	Варна



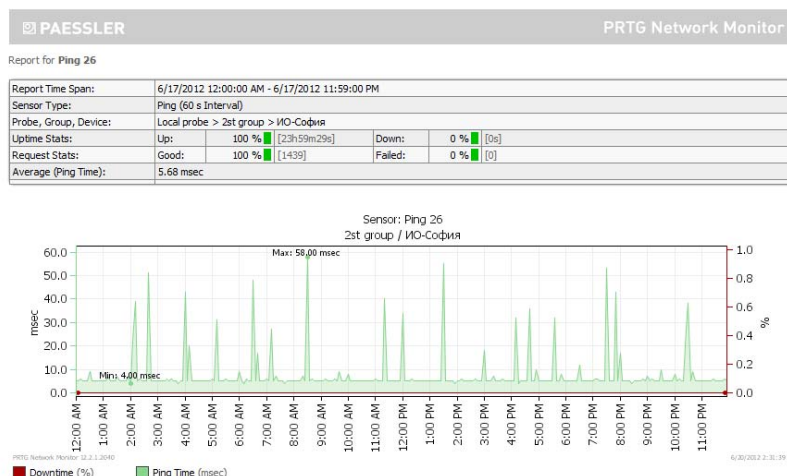
Фигура 2.3 Комуникационна клонова мрежа мрежа с 27 възела тип „звезда“

За изчисляването пропускателната способност на комуникационната мрежа до съответните възли е използван софтуерния продукт PRTG Network Monitor.

На фигура 2.6 и фигура 2.7 е показана информация за възел ИО - Варна при изследване на времезакъснението за период от 24 часа и е изобразена статистиката на получените резултати при размер на пакетите 100 bytes и 1300 bytes. При този възел не се наблюдават срывове в информационната комуникация.

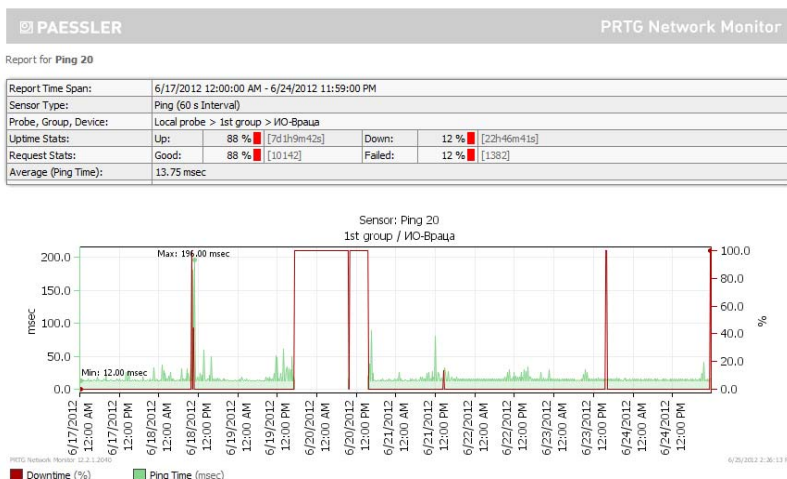


Фигура 2.6 Статистиката на резултати при размер на пакета 100 bytes

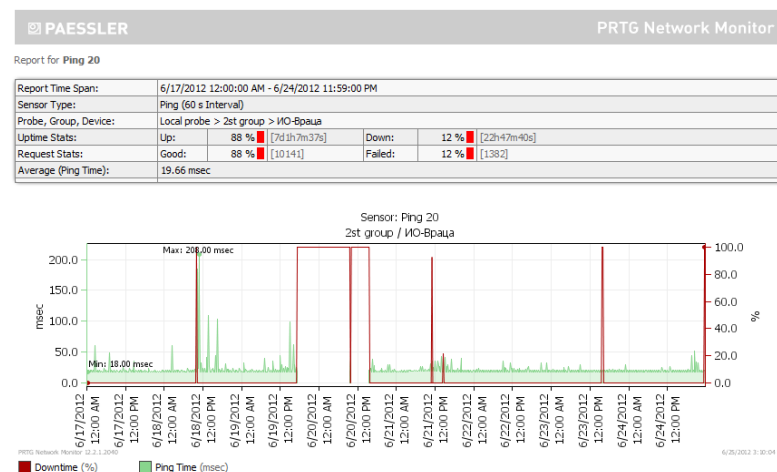


Фигура 2.7 Статистиката на резултати при размер на пакета 1300 bytes

На фигура 2.22 и фигура 2.23 е показана информация за възел ИО - Враца при изследване на времезакъснението за период от една седмица и е изобразена статистиката на получените резултати при размер на пакетите 100 bytes и 1300 bytes. При този възел се наблюдават най-големи сринове в комуникационната връзка, което довежда до проблеми с достъпа до информационните услуги и нарушена нормална свързаност.



Фигура 2.22 Статистиката на резултати при размер на пакета 100 bytes



Фигура 2.23 Статистиката на резултати при размер на пакета 1300 bytes

В таблица 2.2 са показани обобщени резултати от направените измервания.

Таблица 2.2

Възел / клон	Град	100 bytes		1300 bytes		R - пропускателна способност, M bits/s	Up, %	Down, %
1	София	0	ms	0	ms	0	100	0
2	Перник	12, 10	ms	17,74	ms	3,4	99,922	0,078
3	Кюстендил	13,71	ms	19,38	ms	3,38	99,922	0,078
4	Благоевград	14,36	ms	19,97	ms	3,42	99,913	0,087
5	Видин	14,61	ms	20,58	ms	3,22	99,905	0,095
6	Монтана	13,51	ms	19,27	ms	3,33	99,922	0,078
7	Враца	13,75	ms	19,66	ms	3,25	88	12
8	Плевен	22,10	ms	27,05	ms	3,88	98,922	1,078
9	Ловеч	19,09	ms	24,71	ms	3,42	99,375	0,625
10	Пазарджик	13,72	ms	19,09	ms	3,58	99,844	0,156
11	Смолян	11,28	ms	16,88	ms	3,43	99,922	0,078
12	Пловдив	8,86	ms	14,28	ms	3,54	99,514	0,486
13	Кърджали	9,92	ms	16,00	ms	3,16	99,828	0,172
14	Хасково	9,17	ms	15,02	ms	3,28	99,922	0,078
15	Стара Загора	14,19	ms	20,27	ms	3,16	99,922	0,078
16	Габрово	9,37	ms	13,64	ms	4,97	99,687	0,313
17	Велико Търново	11,72	ms	17,29	ms	3,45	99,749	0,251
18	Русе	5,51	ms	11,16	ms	3,4	99,913	0,087
19	Разград	6,86	ms	12,63	ms	3,33	99,905	0,095
20	Търговище	3,93	ms	9,97	ms	3,18	99,913	0,087
21	Сливен	11,42	ms	17,11	ms	3,37	99,158	0,842
22	Ямбол	5,94	ms	11,77	ms	3,29	99,905	0,095
23	Бургас	5,19	ms	9,82	ms	4,15	99,913	0,087
24	Шумен	4,08	ms	9,16	ms	3,78	99,913	0,087
25	Силистра	7,24	ms	13,48	ms	3,08	99,922	0,078
26	Добрич	3,86	ms	9,03	ms	3,71	97,665	2,335
27	Варна	1,98	ms	5,68	ms	5,19	100	0

От получените резултати може да се обобщи, че така съществуващата комуникационна мрежа с топология звезда предизвиква сризове в информационната комуникация между отделни възли, което от своя страна води до проблеми с достъпа до клоновата мрежа и нормалната свързаност. Липсата на свързаност между отделните възли на мрежата варира от 10 мин. до 23 часа, което е недопустимо. Изчислените пропускателни способности показват приблизително еднаквите капацитети на мрежата между отделните крайни точки.

Глава 3. Проектиране на трисвързана мрежа при отчитане на съществуваща топология тип звезда

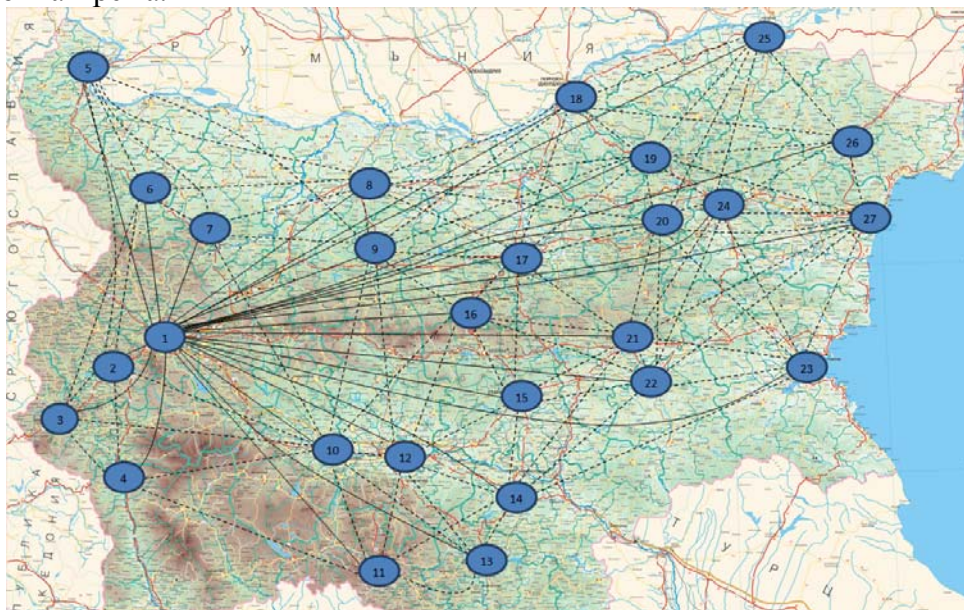
В трета глава е синтезиран алгоритъм за определяне на теоретичните времезакъснения между възлите на добавените алтернативни комуникационни канали и е дефинирана оптимизационна задача за определяне на свързаността на мрежата като са използвани резултатите от измерванията на времезакъсненията и пропаданията в комуникационната мрежа. Решена е оптимизационна задача за определяне на структура на комуникационната мрежа като двусвързана и трисвързана. Анализирани са получените решения.

В първа секция са описани задачите, свързани с проектиране на трисвързана мрежа при отчитане на съществуваща топология тип звезда.

Във втора секция е определен модела на комуникационна мрежа за получаване на трисвързаност между отделните точки. На фигура 3.1 е представена реална информационна мрежа с точно разположение на отделните точки, чиято свързаност е тип „звезда“, състояща се от 27 възела, които представляват клонове в различни градове, предоставящи информационни услуги. Поради централизираното си управление (целият информационен поток да преминава през една възлова точка), тази свързаност допуска при сризове във връзката между отделните точки да се получат загуби при работа и откъснатост между отделните възли от комуникационната мрежа.

На фигура 3.2 е представено решение за подобряване свързаността между отделните клонове като се използва многосвързана топология. На тази база се подобрява обменът на информационни потоци и се елиминира възможността при отпадане на централният комуникационен възел да се достигне до блокиране работата на всички крайни точки. По този начин се получава и взаимозаменяемост на комуникационните канали и отпада

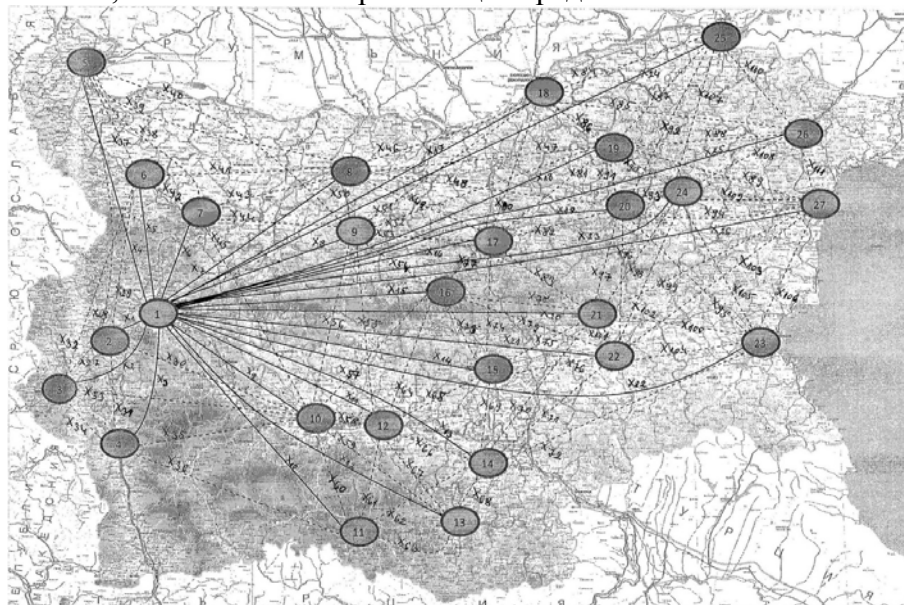
възможността за прекъсване на информационните потоци. Представени са добавените виртуални канали. При така дефинираната нова свързаност, теоретично се изчисляват времезакъсненията между отделните директно свързани възли на виртуалната мрежа, като целта е измежду всички възможни алтернативни пътища да се изберат най-добрите два и заедно със съществуващите такива да се получи трисвързана топология на разглежданата информационна мрежа.



Фигура 3.2 Реална информационна мрежа с 27 възела и добавени виртуални алтернативни канали

Допълнителните връзки между възлите са дефинирани на географски принцип, като е определено условие, всяка възлова точка да има минимум четири допълнителни пътя, в които не се включват тези от съществуващата мрежа.

На фигура 3.3 е показана дефинираната мрежа, на чиято база се извършват изчисленията за избор на алтернативни пътища, с определени виртуални теглови коефициенти за целите на изследването. В таблица 3.1 е показано съответствието между номер на възел / клон, съвместим към прилежащия град.



Фигура 3.3 Теглови коефициенти на виртуални алтернативни канали

В трета секция се извежда формула 37, която служи за основа да се определят теоретичните времезакъснения между възлите на добавени виртуални канали.

$$T_{i,j} = T_{00} + T_{Bk,i} + T_{B0,i} + \alpha_i + T_{Bk,j} + T_{B0,j} + \alpha_j \quad (37)$$

В четвърта секция, при така дефинираната нова свързаност и съгласно теоретично определения модел се изчисляват времезакъсненията на допълнителните канали между отделните крайни точки за получаване на взаимозаменяемост на каналите. Пресмятането се извършва на база изчисляването на времезакъснението между отделните възли на определената виртуална мрежа.

В таблица 3.3 са дадени всички изчислени времезакъснения между отделните крайни точки, свързани с алтернативните виртуални пътища, съгласно формула 37.

Със зелен цвят са показани теоретично изчислените времезакъснения между възлите при сега съществуващата мрежа, топология звезда. Със син цвят е въведена информацията за времезакъсненията на дефинираните алтернативни виртуални пътища между крайните точки, съгласно фигура 3.3, а останалите данни представляват времезакъсненията между останалите възли.

Таблица 3.3

Времетрайзване в милисекунди между отделните клонове.																												
Клонове		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
София	1	0,400	0,555	0,830	0,880	1,640	1,135	0,945	1,215	1,185	0,955	1,610	1,110	1,610	1,530	1,555	1,415	1,510	1,955	2,060	1,990	1,935	1,885	2,315	2,210	2,540	2,805	2,645
Перник	2	0,555	0,400	0,690	0,810	1,835	1,335	1,140	1,375	1,375	1,095	1,825	1,275	1,930	1,900	1,695	1,610	1,695	2,115	2,655	2,150	2,070	2,225	2,595	2,375	2,700	3,010	2,770
Кюстендил	3	0,830	0,690	0,400	0,745	1,760	1,605	1,380	1,650	1,650	1,370	2,105	1,550	2,205	2,175	1,970	1,885	1,975	2,420	2,780	2,460	2,345	2,440	2,885	2,655	2,975	3,250	3,045
Благоевград	4	0,880	0,810	0,745	0,400	2,140	1,625	1,430	1,700	1,705	1,420	2,080	1,620	2,200	2,040	2,025	1,905	1,990	2,435	2,835	2,475	2,395	2,495	2,925	2,705	3,025	3,300	3,100
Видин	5	1,640	1,835	1,760	2,140	0,400	0,920	1,115	1,555	1,725	2,150	2,835	2,320	3,190	2,945	2,740	2,090	2,180	2,660	2,915	2,665	2,780	2,865	3,500	2,880	3,235	3,495	3,290
Монтана	6	1,135	1,335	1,605	1,625	0,920	0,400	0,595	1,035	1,205	1,630	2,320	1,810	2,670	2,435	2,230	1,580	1,665	2,115	2,405	2,155	2,240	2,335	2,795	2,370	2,705	2,980	2,775
Враца	7	0,945	1,140	1,380	1,430	1,115	0,595	0,400	0,940	1,120	1,430	2,125	1,615	2,475	2,240	2,035	1,385	1,475	1,920	2,215	1,960	2,075	2,170	2,840	2,175	2,510	2,785	2,585
Плевен	8	1,215	1,375	1,650	1,700	1,555	1,035	0,940	0,400	0,575	1,710	2,395	1,885	1,965	1,700	1,350	0,945	1,075	1,150	1,450	1,310	1,605	1,700	2,130	1,735	1,730	2,345	2,140
Ловеч	9	1,185	1,375	1,650	1,705	1,725	1,205	1,120	0,575	0,400	1,675	2,360	1,830	1,755	1,475	1,170	0,770	0,865	1,325	1,625	1,340	1,425	1,520	1,955	1,555	1,905	2,165	1,965
Пазарджик	10	0,955	1,095	1,370	1,420	2,150	1,630	1,430	1,710	1,675	0,400	1,080	0,590	1,230	1,290	1,085	1,500	1,715	2,235	2,550	2,220	1,460	1,555	1,990	2,380	2,825	2,875	2,610
Смолян	11	1,610	1,825	2,105	2,080	2,835	2,320	2,125	2,395	2,360	1,080	0,400	0,890	1,165	1,265	1,560	1,970	2,185	2,700	3,045	2,665	1,935	2,030	2,460	2,885	3,335	3,345	3,115
Пловдив	12	1,110	1,275	1,550	1,620	2,320	1,810	1,615	1,885	1,830	0,590	0,890	0,400	1,040	0,790	0,910	1,320	1,530	2,075	2,390	2,065	1,280	1,375	1,805	2,115	2,645	2,695	2,425
Кърджали	13	1,610	1,930	2,205	2,200	3,190	2,670	2,475	1,965	1,755	1,230	1,165	1,040	0,400	0,635	0,925	1,335	1,560	2,100	2,420	2,055	1,300	1,410	1,840	2,130	3,210	2,775	2,375
Хасково	14	1,530	1,900	2,175	2,040	2,945	2,435	2,240	1,700	1,475	1,290	1,265	0,790	0,635	0,400	0,710	1,145	1,335	1,875	2,190	1,825	1,085	1,035	1,465	1,940	3,015	2,585	2,160
Стара Загора	15	1,555	1,695	1,970	2,025	2,740	2,230	2,035	1,350	1,170	1,085	1,560	0,910	0,925	0,710	0,400	0,805	1,015	1,545	1,860	1,500	0,755	0,840	1,355	1,665	2,675	2,240	1,975
Габрово	16	1,415	1,610	1,885	1,905	2,090	1,580	1,385	0,945	0,770	1,500	1,970	1,320	1,335	1,145	0,805	0,400	0,620	1,150	1,465	1,105	1,070	1,160	1,590	1,320	2,400	1,965	1,715
Велико Търново	17	1,510	1,695	1,975	1,990	2,180	1,665	1,475	1,075	0,865	1,715	2,185	1,530	1,560	1,335	1,015	0,620	0,400	0,945	1,070	0,895	0,960	1,370	1,800	1,110	2,185	1,755	1,505
Русе	18	1,955	2,115	2,420	2,435	2,660	2,115	1,920	1,150	1,325	2,235	2,700	2,075	2,100	1,875	1,545	1,150	0,945	0,400	0,730	1,065	1,835	1,685	2,020	0,965	1,005	1,570	1,370
Разград	19	2,060	2,655	2,780	2,835	2,915	2,405	2,215	1,450	1,625	2,550	3,045	2,390	2,420	2,190	1,860	1,465	1,070	0,730	0,400	0,590	1,405	1,370	1,705	0,655	1,055	1,255	1,060
Търговище	20	1,990	2,150	2,460	2,475	2,665	2,155	1,960	1,310	1,340	2,220	2,665	2,065	2,055	1,825	1,500	1,105	0,895	1,065	0,590	0,400	1,060	1,025	1,310	0,615	1,235	1,215	1,020
Сливен	21	1,935	2,070	2,345	2,395	2,780	2,240	2,075	1,605	1,425	1,460	1,935	1,280	1,300	1,085	0,755	1,070	0,960	1,835	1,405	1,060	0,400	0,545	0,975	1,295	2,270	1,840	1,595
Ямбол	22	1,885	2,225	2,440	2,495	2,865	2,335	2,170	1,700	1,520	1,555	2,030	1,375	1,410	1,035	0,840	1,160	1,370	1,685	1,370	1,025	0,545	0,400	0,860	1,230	2,235	1,820	1,480
Бургас	23	2,315	2,595	2,885	2,925	3,500	2,795	2,840	2,130	1,955	1,990	2,460	1,805	1,840	1,465	1,355	1,590	1,800	2,020	1,705	1,310	0,975	0,860	0,400	1,165	1,750	1,320	1,050
Шумен	24	2,210	2,375	2,655	2,705	2,880	2,370	2,175	1,735	1,555	2,380	2,885	2,115	2,130	1,940	1,665	1,320	1,110	0,965	0,655	0,615	1,295	1,230	1,165	0,400	0,975	1,035	0,845
Силистра	25	2,540	2,700	2,975	3,025	3,235	2,705	2,510	1,730	1,905	2,825	3,335	2,645	3,210	3,015	2,675	2,400	2,185	1,005	1,055	1,235	2,270	2,235	1,750	0,975	0,400	0,850	1,105
Добрич	26	2,805	3,010	3,250	3,300	3,495	2,980	2,785	2,345	2,165	2,875	3,345	2,695	2,775	2,585	2,240	1,965	1,755	1,570	1,255	1,215	1,840	1,820	1,320	1,035	0,850	0,400	0,660
Варна	27	2,645	2,770	3,045	3,100	3,290	2,775	2,585	2,140	1,965	2,610	3,115	2,425	2,375	2,160	1,975	1,715	1,505	1,370	1,060	1,020	1,595	1,480	1,050	0,845	1,105	0,670	0,400

В таблица 3.4 са показани реалните средни времезакъснения, както и най-големите (пикови) времезакъснения на съществуващата мрежа за период от един месец.

Таблица 3.4

Времезакъснение в ms между отделните клонове	Средно времезакъснение, ms	Най-голямо времезакъснение, ms
София		
Перник	15	2900
Кюстендил	16	2900
Благоевград	16	2900
Видин	23	2901
Монтана	17	2901
Враца	15	2901
Плевен	21	2901
Ловеч	21	2901
Пазарджик	15	2901
Смолян	17	2902
Пловдив	16	2887
Кърджали	23	2902
Хасково	23	2902
Стара Загора	20	2887
Габрово	19	2886
Велико Търново	18	2887
Русе	19	2887
Разград	6	2887
Търговище	6	2887
Сливен	21	2888
Ямбол	7	2887
Бургас	5	2887
Шумен	5	2887
Силистра	7	2887
Добрич	5	2887
Варна	3	2871

В таблица 3.5 са показани средните измерени времезакъснения на съществуващата мрежа, както и теоретични изчисленията такива.

Таблица 3.5

Времезакъснение в ms между отделните клонове	Средно времезакъснение, ms	Теоритично времезакъснение, ms
София		
Перник	15	0,555
Кюстендил	16	0,830
Благоевград	16	0,880
Видин	23	1,640
Монтана	17	1,135
Враца	15	0,945
Плевен	21	1,215
Ловеч	21	1,185
Пазарджик	15	0,955
Смолян	17	1,610
Пловдив	16	1,110
Кърджали	23	1,610
Хасково	23	1,530
Стара Загора	20	1,555
Габрово	19	1,415
Велико Търново	18	1,510
Русе	19	1,955
Разград	6	2,060
Търговище	6	1,990
Сливен	21	1,935
Ямбол	7	1,885
Бургас	5	2,315
Шумен	5	2,210
Силистра	7	2,540
Добрич	5	2,805
Варна	3	2,645

Получените резултати показват съществена разлика между тях, което е предпоставка до намалена пропускателна способност при реално измерените, което пък от своя страна предизвиква забавяне и по-голяма възможност за възникване на проблеми при комуникацията между възлите и отказоустойчивост.

В пета секция се дефинира задачата за оптимизация за определяне свързаността на мрежата.

Изследванията в дисертационната работа целят да се дефинира и реши оптимизационна задача за определяне на свързаността на мрежа като се използват резултати от измервания на времезакъсненията и пропаданията в комуникационната мрежа и се предложи решение за преминаване на съществуваща комуникационна мрежа от свързаност тип „звезда“ към

двусвързана и трисвързана топология. Като параметри на тази задача са използвани реално измерените и теоретично изчислените времезакъснения между определените възли. Тези измерени и изчислени времезакъснения са използвани като теглови коефициенти в целевата функция на дефинираната и решавана оптимизационна задача.

Оптимизационната задача е дефинирана като линейна оптимизационна задача, която определя максималния поток от информация между всички двойки възли, която може да се пренесе през мрежа, при зададена топология на мрежата. Тази задача е за определяне на максимален поток в мрежа и е дефинирана и решавана в [117, 118].

Задачата за определяне на максимален поток в мрежа се дефинира като:

- зададена е топологията на мрежата
- зададена е матрицата от обеми трафик, който трябва да се предаде между всяка двойка възли в мрежата
- зададени са теглови коефициенти по дъгите на мрежата, които определят „цената“ за прокарване на единица обем трафик по съответната дъга

Решението на задачата показва какви трябва да се пропускателните способности на каналите, така, че да може да се предаде зададената матрица от обеми трафик за предаване между отделните възли.

Задачата се дефинира като задача на линейно програмиране.

$$\min c^T x \text{ като } A \cdot x \geq b$$

където,

c - е матрицата на „цените“ за прокарване на единица трафик по съответна дъга на мрежата

b - е матрицата на обема трафик, който трябва да се предаде между всяка двойка възли в мрежата

x - е решението на задачата, където стойността на x е пропускателната способност на съответната дъга в мрежата

Тази задача е използвана и модифицирана в дисертационната работа за да синтезира топология на двусвързана и трисвързана мрежа. Модификациите се състоят в:

- Използва се начална пълносвързана топология на мрежата. Решенията на задачата определят, кои линии от пълносвързаната топология да отпаднат за да се получи желана двусвързана или трисвързана мрежа.
- Решенията x се определят да принадлежат на множеството 0 или 1. При стойност $x_i = 1$, съответната дъга остава в топологията на мрежата. В случая на $x_i = 0$, дъгата не присъства в топологията. Така изходната задача за намиране на максимален поток се модифицира до линейна задача на целочисленото програмиране.
- Матрицата на необходим обем трафик, b , който трябва да се предаде в мрежата се модифицира да приема стойности 2 или 3 за всяка двойка възли. Така се синтезира топология с двусвързана или трисвързана мрежа.

Общият вид на целевата функция на задачата за синтез на топология представлява [119]:

$$\begin{aligned} \min c(x) \\ x \in A \\ \{g_l(x) \geq b_l, l = 1, n\} \end{aligned} \quad (38)$$

където,

$c(x)$ – целева функция

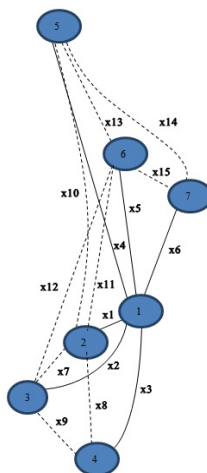
$g_l(x)$ – функция на ограниченията

x – решение

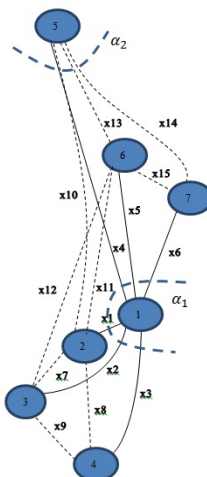
В дисертационната работа матрицата c има инженерно съдържание на закъсненията по отделните линии. Числовите стойности на закъсненията са приети от измерванията, направени в глава 2 и показани в таблица 3.4, както и от теоретично изчислените такива в текущата глава (таблица 3.3).

Решението на задачата x е ограничено в диапазона $[0 \text{ или } 1]$. Така стойността на променливата x_i определя дали има комуникационен канал ($x_i = 1$) или няма канал ($x_i = 0$). Техническа особеност е, че при дефинирането на променливите x_i се използва един индекс, вместо прилаганите в текста обяснения за x_{ij} , което се тълкува като дъга между възли i и j .

За илюстриране на дефинираната целева функция за поставената задача се използва част от определената комуникационна мрежа, съгласно фигура 3.3. На фигура 3.4 са разгледани седем възела със съответни стойности на връзките между тях, а на фигура 3.5 е показано определяне на сечение за намиране на ограниченията на оптимизационната задача.



Фигура 3.4 Теглови коефициенти между възлите



Фигура 3.5 Сечение за намиране на ограниченията

Ограниченията на задачата се дефинират, съгласно модела на [117, 118] за определяне на максимален поток в мрежи, като ограниченията се дефинират като възможни сечения от дъги, чието премахване отделя всички връзки между разглежданата двойка възли. Целевата функция за поставената задача аналитично се дефинира като:

$$\min_x \sum_i^{111} c_i x_i \quad (39)$$

При изпълнение на следните ограничения и условия за неотрицателност:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^{111} a_i x_i \geq b_j, j = 2;3 \\ x_i \text{ е бинарно число} \end{cases} \quad (40)$$

a_i - вектор на условията, определящ дали съществува или не връзка между два възела и приема стойности нула или едно.

Решенията x имат стойност или 1 или 0.

Вектора на ограниченията b_j приема две параметрични състояния:

- Параметрично състояние едно, което дефинира ограничение две на целевата функция за намиране на най-добрите два пътя между възлите (синтезиране на двусвързана мрежа).
- Параметрично състояние две, което дефинира ограничение три на целевата функция за намиране на най-добрите три пътя между възлите (синтезиране на трисвързана мрежа).

Обобщения израз за ограниченията на целевата функция приема вида:

$$a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + \dots + a_ix_i \geq b_j \quad (41)$$

При зададена топология в мрежата от 7 възела, съгласно фигура 3.5, се дефинират сеченията, през които минава потока между съответните възли. Тези сечения се дефинират по начин, че при премахване на съответните дъги, възлите ще бъдат откъснати.

За сечение α_1 : при премахване на дъги x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 и x_6 възел 1 ще се отдели от останалите. Това сечение определя ограничението:

$$\alpha_1: x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 + x_6 \geq 2$$

Дясната част, съдържащо числото 2 определя, че трябва да се предаде общо 2 единици трафик между възлите. На решението на задачата, това се отразява като се синтезират поне две връзки за всеки от разглежданата двойка възли. При промяна на дясната част на неравенството на три се синтезира трисвързана мрежа за съответната двойка възли.

За сечение α_2 : то съдържа четири дъги и при премахването им x_4, x_{10}, x_{13} и x_{14} , възел 5 ще се отдели от останалите. Това сечение определя аналитичното ограничение да има вида:

$$\alpha_2: x_4 + x_{10} + x_{13} + x_{14} \geq 2$$

За примера, даден на фигура 3.4 и след изпълнение на сеченията за всеки един възел (фигура 3.5) за ограниченията на целевата функция при параметрично състояние едно получаваме следните аналитични изрази:

- Възел 1

$$\begin{aligned} x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 + x_6 &\geq 2 \\ x_2 + x_3 + x_4 + x_5 + x_6 + x_7 + x_8 + x_{10} + x_{11} &\geq 2 \\ x_1 + x_3 + x_4 + x_5 + x_6 + x_7 + x_9 + x_{12} &\geq 2 \\ x_1 \mid x_2 \mid x_4 \mid x_5 \mid x_6 \mid x_8 \mid x_9 &\geq 2 \\ x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 + x_{10} + x_{13} + x_{14} &\geq 2 \\ x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_6 + x_{11} + x_{12} + x_{13} + x_{15} &\geq 2 \\ x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 + x_{14} + x_{15} &\geq 2 \end{aligned} \quad (42)$$

- Възел 2

$$\begin{aligned} x_1 + x_7 + x_8 + x_{10} + x_{11} &\geq 2 \\ x_2 + x_3 + x_4 + x_5 + x_6 + x_7 + x_8 + x_{10} + x_{11} &\geq 2 \\ x_1 + x_2 + x_8 + x_9 + x_{10} + x_{11} + x_{12} &\geq 2 \\ x_1 + x_3 + x_7 + x_9 + x_{10} + x_{11} &\geq 2 \\ x_1 \mid x_4 \mid x_7 \mid x_8 \mid x_{11} \mid x_{13} \mid x_{14} &\geq 2 \\ x_1 + x_5 + x_7 + x_8 + x_{10} + x_{12} + x_{13} + x_{15} &\geq 2 \end{aligned} \quad (43)$$

- Възел 3

$$\begin{aligned} x_2 + x_7 + x_9 + x_{12} &\geq 2 \\ x_1 + x_3 + x_4 + x_5 + x_6 + x_7 + x_9 + x_{12} &\geq 2 \\ x_1 + x_2 + x_8 + x_9 + x_{10} + x_{11} + x_{12} &\geq 2 \\ x_2 + x_3 + x_7 + x_8 + x_{12} &\geq 2 \\ x_2 + x_5 + x_7 + x_9 + x_{11} + x_{13} + x_{15} &\geq 2 \end{aligned} \quad (44)$$

- Възел 4

$$\begin{aligned}
 x_3 + x_8 + x_9 &\geq 2 \\
 x_1 + x_2 + x_4 + x_5 + x_6 + x_8 + x_9 &\geq 2 \\
 x_1 + x_3 + x_7 + x_9 + x_{10} + x_{11} &\geq 2 \\
 x_2 + x_3 + x_7 + x_8 + x_{12} &\geq 2
 \end{aligned} \tag{45}$$

- Възел 5

$$\begin{aligned}
 x_4 + x_{10} + x_{13} + x_{14} &\geq 2 \\
 x_1 + x_2 + x_3 + x_5 + x_6 + x_{10} + x_{13} + x_{14} &\geq 2 \\
 x_1 + x_4 + x_7 + x_8 + x_{11} + x_{13} + x_{14} &\geq 2 \\
 x_4 + x_5 + x_{10} + x_{11} + x_{13} + x_{14} + x_{15} &\geq 2 \\
 x_4 \mid x_6 \mid x_{10} \mid x_{13} \mid x_{15} &\geq 2
 \end{aligned} \tag{46}$$

- Възел 6

$$\begin{aligned}
 x_5 + x_{11} + x_{12} + x_{13} + x_{15} &\geq 2 \\
 x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_6 + x_{11} + x_{12} + x_{13} + x_{15} &\geq 2 \\
 x_1 + x_5 + x_7 + x_8 + x_{10} + x_{12} + x_{13} + x_{15} &\geq 2 \\
 x_2 + x_5 + x_7 + x_9 + x_{11} + x_{13} + x_{15} &\geq 2 \\
 x_4 + x_5 + x_{10} + x_{11} + x_{12} + x_{14} + x_{15} &\geq 2 \\
 x_5 + x_6 + x_{11} + x_{12} + x_{13} + x_{14} &\geq 2
 \end{aligned} \tag{47}$$

- Възел 7

$$\begin{aligned}
 x_6 + x_{14} + x_{15} &\geq 2 \\
 x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 + x_{14} + x_{15} &\geq 2 \\
 x_4 \mid x_6 \mid x_{10} \mid x_{13} \mid x_{15} &\geq 2 \\
 x_5 + x_6 + x_{11} + x_{12} + x_{13} + x_{14} &\geq 2
 \end{aligned} \tag{48}$$

За конкретен пример, параметър i приема стойност 15.

За получаване на двусвързана (трисвързана) мрежа е необходимо да се запишат сеченията на всяка двойка възли от мрежата. Така броят на ограниченията на задачата рязко се увеличава.

Общият аналитичен вид на дефинираната задача за оптимизация приема вида:

$$\min_x c_i^T x \begin{cases} A \cdot x_i \geq b \\ x \text{ е бинарно число} \end{cases} \tag{49}$$

където,

c_i – измерени реални и теоретично изчислени времезакъснения между възлите

Решението x определя топологията на синтезируемата комуникационна мрежа.

Ограниченията на задачата отчитат свързаността между отделните възли, съгласно поставените условия за синтезиране на двусвързана и трисвързана мрежа.

Решенията на оптимизационната задача определят нова топология на двусвързана или трисвързана мрежа. Получаваното решение може да се интерпретира и като потенциал за подобряване свързаността на дефинираната комуникационна мрежа [120].

Разбирането за оптималността се състои в определяне на топологията на синтезируемата мрежа при минимална цена, като е изпълнено условието за надеждност. Надеждността количествено се определя от свързаността на мрежата.

Оптимизационната задача е решена с програмен продукт Матлаб чрез неговата функция `bintprog`. Тази функция има следния вид:

$$\min_x c^T x \begin{cases} A \cdot x_i \geq b \\ x \text{ е бинарно число} \end{cases} \tag{50}$$

където,

c , и b са вектори, A е матрица, и решението x се определя като целочислено бинарно векторно число - това означава, че стойностите на x могат да бъдат 0 или 1.

Задача (50) съгласно формата на Матлаб се представя във вида:

$$x = \text{bintprog}(c, A, b) \tag{51}$$

Този синтаксис решава задачите, дефинирани като бинарно целочислено програмиране, откъдето следва, че за разглеждания случай задача (50) добива вида:

$$\min_x c^T x \text{ като } A \cdot x_i \geq b_j \quad (52)$$

където, x приема стойности 0 или 1.

За примера, даден на фигура 3.4, на база получените аналитични изрази (42 - 48) и след премахване на повтарящите се редове, за матрицата на условията A се получава (таблица 3.6):

Таблица 3.6

x1	x2	x3	x4	x5	x6	x7	x8	x9	x10	x11	x12	x13	x14	x15
1	1	1	1	1	1									
	1	1	1	1	1	1	1		1	1				
1		1	1	1	1	1		1			1			
1	1		1	1	1		1	1						
1	1	1		1	1				1			1	1	
1	1	1	1		1					1	1	1		1
1	1	1	1	1									1	1
1						1	1		1	1				
1	1						1	1	1	1	1			
1		1				1	1	1	1	1			1	
1			1			1	1		1	1		1	1	
1				1		1	1	1	1		1	1		1
	1					1	1				1	1		
	1	1				1	1	1			1			
	1			1		1		1		1		1		1
		1					1	1				1		
			1						1			1	1	
			1	1					1	1		1	1	1
				1	1						1	1	1	1
					1						1	1	1	1
												1	1	1

За вектора на ограниченията при използване на зададените две параметрични състояния се получава:

$$b = \begin{bmatrix} 2 \\ 2 \\ 2 \\ 2 \\ 2 \\ . \\ . \\ . \\ . \\ 2 \end{bmatrix} \text{ при синтезиране на двусвързана мрежа}$$

$$b = \begin{bmatrix} 3 \\ 3 \\ 3 \\ 3 \\ 3 \\ . \\ . \\ . \\ . \\ 3 \end{bmatrix} \text{ при синтезиране на трисвързана мрежа}$$

За получаване на точни и коректни данни, параметрите на матрицата A се инвертират, като същото действие се извършва и за ограничението b . Следователно, за окончателната функция, използвана в дисертационния труд се получава [121]:

$$\min_x c^T x \text{ като } -A \cdot x_i \geq -b_j \quad (53)$$

където, x приема стойности 0 или 1.

В дисертационната работа е дефинирана задача с 27 възела. Съответствието на номера на променливата към съответната двойка въли е представено в таблица 3.7, а съответствието между номер на възел / клон, съвместим към прилежащия град е дадено в таблица 3.1.

Таблица 3.7

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	A	
1		x1	x2	x3	x4	x5	x6	x7	x8	x9	x10	x11	x12	x13	x14	x15	x16	x17	x18	x19	x20	x21	x22	x23	x24	x25	x26	26	
2	x1		x27	x31	x28	x29				x30				x13	x14	x15	x16	x17	x18	x19	x20	x21	x22	x23	x24	x25	x26	5	
3	x2	x27		x34		x32				x33																		3	
4	x3	x31	x34							x35	x36																	2	
5	x4	x28				x37	x38	x39	x40																			4	
6	x5	x29	x32		x37	x42	x41																					2	
7	x6				x38	x42	x43	x44	x45																			3	
8	x7				x39	x41	x43	x50									x49	x46	x47	x48								5	
9	x8				x40		x44	x50		x56		x55				x54	x53	x51	x52									6	
10	x9	x30	x33	x35		x45		x56		x60	x58	x59					x57											4	
11	x10			x36				x56		x60	x61	x63	x62															3	
12	x11							x55	x58	x61	x67	x66	x65	x64														4	
13	x12							x59	x63	x67	x68																	1	
14	x13							x62	x66	x68		x69	x69	x73	x74						x70	x71	x72					4	
15	x14										x65										x75	x76						4	
16	x15								x54	x57		x64					x73	x77			x78	x79						3	
17	x16						x49	x53							x74	x77			x80	x81	x82	x83						4	
18	x17							x46	x51								x80	x86										5	
19	x18							x47	x52									x86		x91								3	
20	x19							x48											x91		x97	x96	x95					6	
21	x20													x70	x75	x78	x83				x97	x101	x100	x98			x94	4	
22	x21													x72	x76	x79					x96	x101	x104	x102			x103	3	
23	x22																				x95	x100	x104	x105			x106	2	
24	x23																			x90	x93	x98	x102	x105		x107	x108	x109	3
25	x24																		x84	x87	x92			x107		x110		1	
26	x25																		x85	x88				x108		x110	x111	1	
27	x26																			x89	x94	x99	x103	x106				111	

Матрицата A има правоъгълна форма с над 360 ограничения, определени съгласно уравненията за максимален поток в мрежата. В този брой ограничения има повтарящи се неравенства независимо, че те се отнасят за различни двойки възли. Причината за повторенията са, че съответната компонента от матрица b е едно и също число, 2 или 3. Затова при дефинирането на оптимизационната задача в дисертационния труд еднаквите неравенства са редуцирани до едно неравенство, което се прилага в оптимизационната задача. При премахване на повторенията в задачата за оптимизация са включени 141 неравенства. Съответно матрицата A се свежда до 111 колони и 141 реда. Така дефинираната и решавана задача в дисертационната работа има 111 променливи. Задачата за оптимизация е решавана със 111 неизвестни и 141 ограничения.

Задачата е модифицирана за получаване на решения за двусвързана и трисвързана мрежа.

Получените решения са представени графично за по лесно интерпретиране на резултатите.

Решенията на оптимизационната задача се разглеждат в следващата глава посредством представени и анализирани три модела със съответни параметрични състояния.

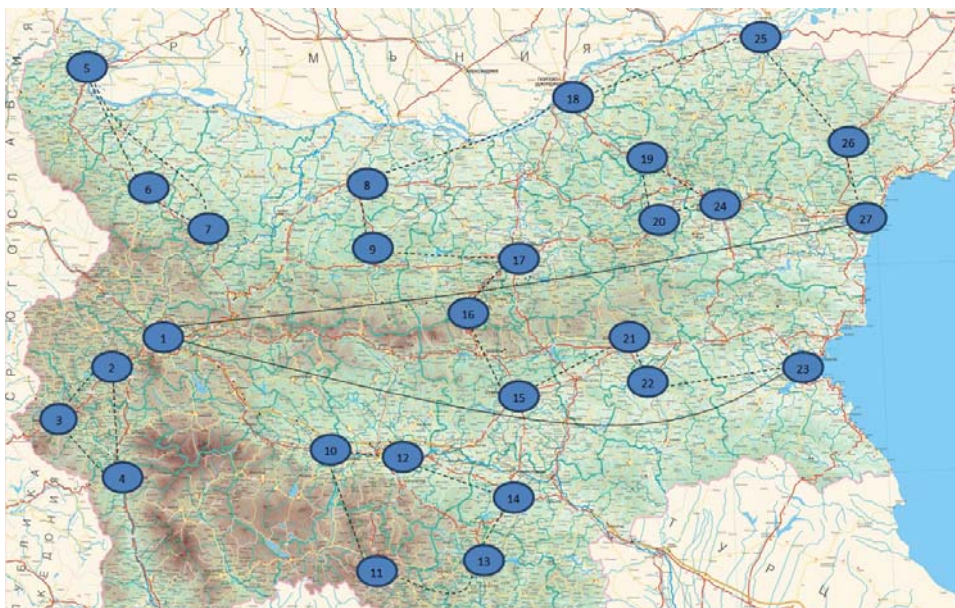
Глава 4. Анализ на резултатите от проектирането на комуникационната мрежа

В четвърта глава са разгледани и анализирани три модела за определяне на оптималния вариант за подобряване на съществуващата комуникационна мрежа. Направен е количествен анализ на получените резултати с цел постигане на непрекъсваемост на информационните потоци. На база топологичен синтез е избран най-добрият модел със съответно параметрично състояние за преминаване от съществуващата топология „звезда“ към разпределена трисвързана мрежа между отделните възлови точки.

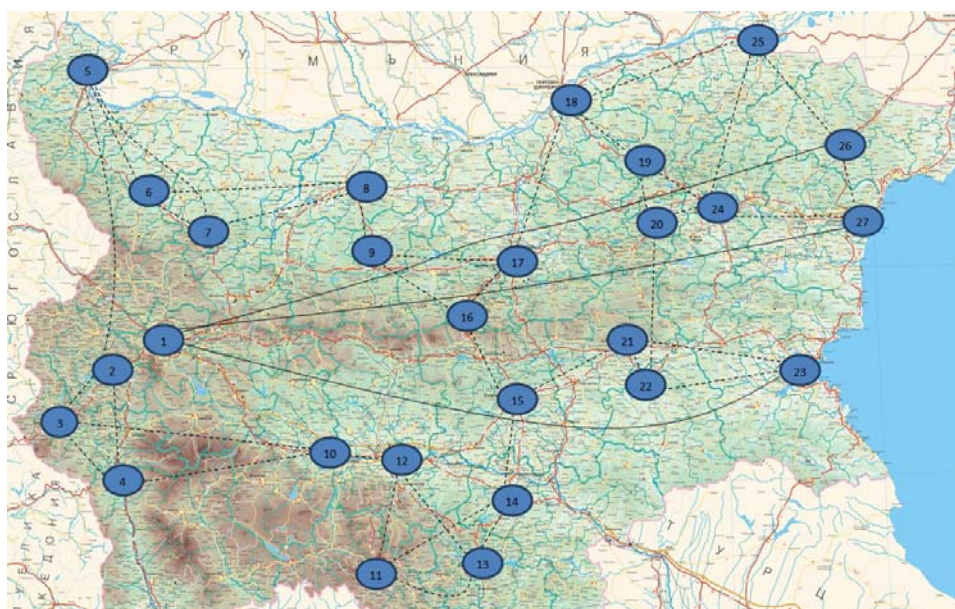
В първа секция се разглеждат основните задачи, изпълнени в четвърта глава.

Във втора секция се разглежда първи модел за количествен анализ на получените резултати. Тегловите коефициенти на съществуващата мрежа се взимат съгласно таблица 3.4 от предходната глава. Останалите теглови коефициенти се взимат съгласно таблица 3.3, които представляват теоретично изчислените стойности.

На фигура 4.1 е показан резултата от параметрично състояние едно за топологичен синтез на двата най-добри пътя, а на фигура 4.2, параметрични състояние две за топологичен синтез на трите най-добри пътя.



Фигура 4.1 Модел с параметрично състояние едно за топологичен синтез на двата най-добри пътя



Фигура 4.2 Модел с параметрично състояние две за топологичен синтез на трите най-добри пътя

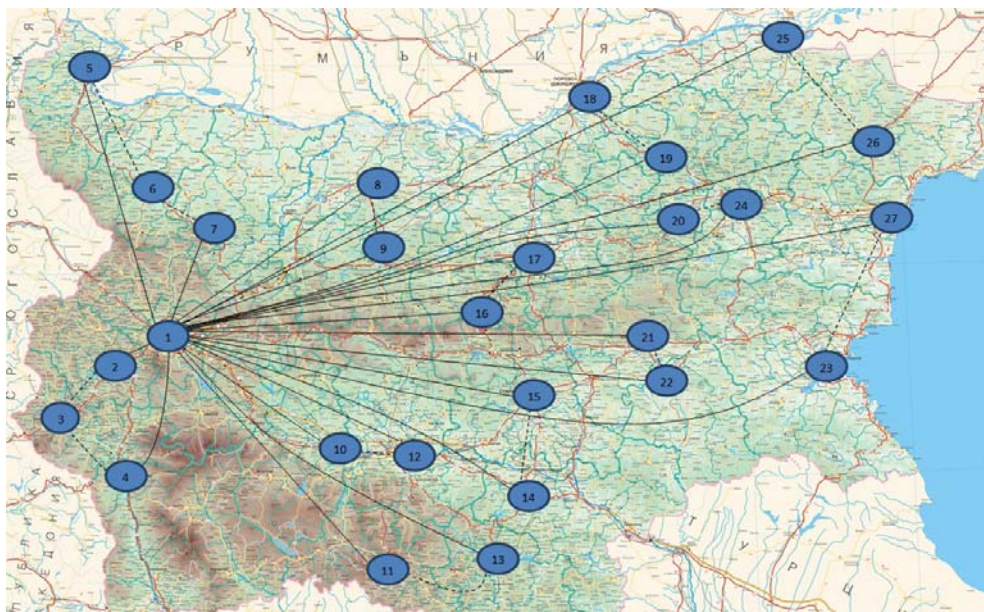
На първата фигура се вижда, че от настоящата мрежа тип „звезда“ остават само две връзки. Също така се забелязва, че се получава откъснатост на няколко групи възли от основната мрежа и поради тази причина, това параметрично състояние е неприложимо за целите на дисертационния труд.

На следващата фигура, от вече съществуващата мрежа остават три връзки. Няма откъснати възли от основната идея на мрежата (както се случва при предишното параметрично състояние), но се получава несиметричност, тъй като възел 1 няма връзка със съседните си точки, а е свързан с крайните такива - 23, 26, 27. Това параметрично състояние е приемливо с оглед цялостното разпределение на алтернативните пътища и тяхната взаимозаменяемост.

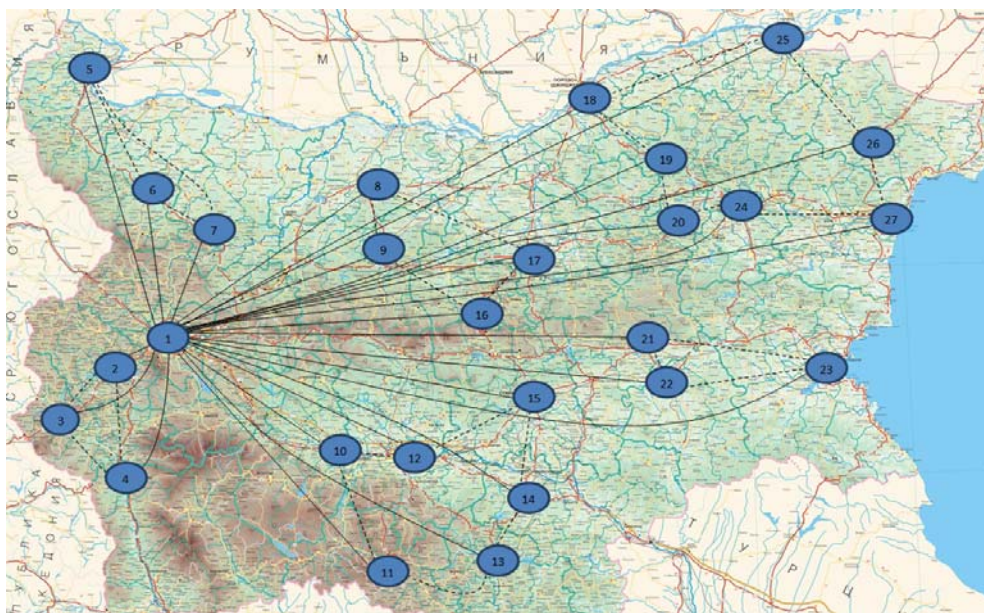
На база получените резултати, може да се направи извода, че параметрично състояние две е приемлив вариант в някаква степен, като възможен за подобряване на съществуващата комуникационна мрежа.

В трета секция се разглежда втори модел за количествен анализ на получените резултати. Тегловите коефициенти на съществуващата мрежа се взимат с минимална стойност, за конкретния случай се използва коефициент нула, което изразява, че вече изградената мрежа има твърда връзка с останалите крайни точки. Останалите теглови коефициенти се взимат съгласно таблица 3.3, които представляват теоретично изчислените стойности.

На фигура 4.3 е показан резултата от параметрично състояние едно за топологичен синтез на двата най-добри пътя, а на фигура 4.4, параметрични състояние две за топологичен синтез на трите най-добри пътя.



Фигура 4.3 Модел с параметрично състояние едно за топологичен синтез на двата най-добри пътя



Фигура 4.4 Модел с параметрично състояние две за топологичен синтез на трите най-добри пътя

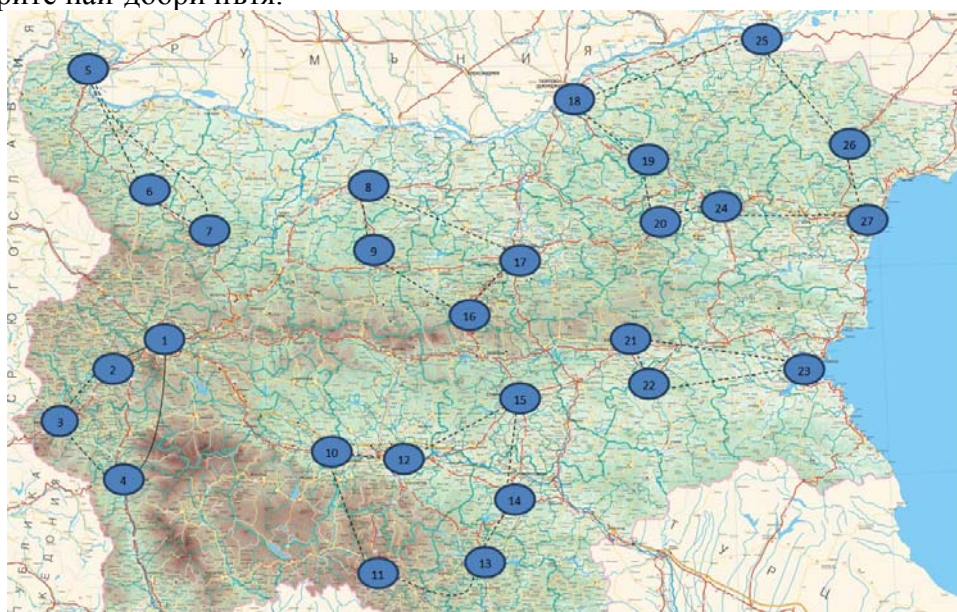
На първата фигура се вижда, че при параметрично състояние едно за този модел, въпреки зададени нулеви стойности на съществуващата мрежа, с цел запазване на всички налични връзки, на база получените резултати се премахват връзките между възли 1 и 3, както и между 1 и 6. Така получената мрежа не е приемлива, тъй като при прекъсване на централния възел, отново ще има срыв във връзките между отделните клонове.

На втората фигура, при параметрично състояние две за модела и зададено топологично решение за минимум три алтернативни пътища, се запазват всички връзки на съществуващата мрежа. Така получената топология отново е неприемлива, тъй като при получаване на прекъсване в централния възел, ще се загуби комуникацията между отделните клонове, което ще породи срыв и загуба на информационни ресурси.

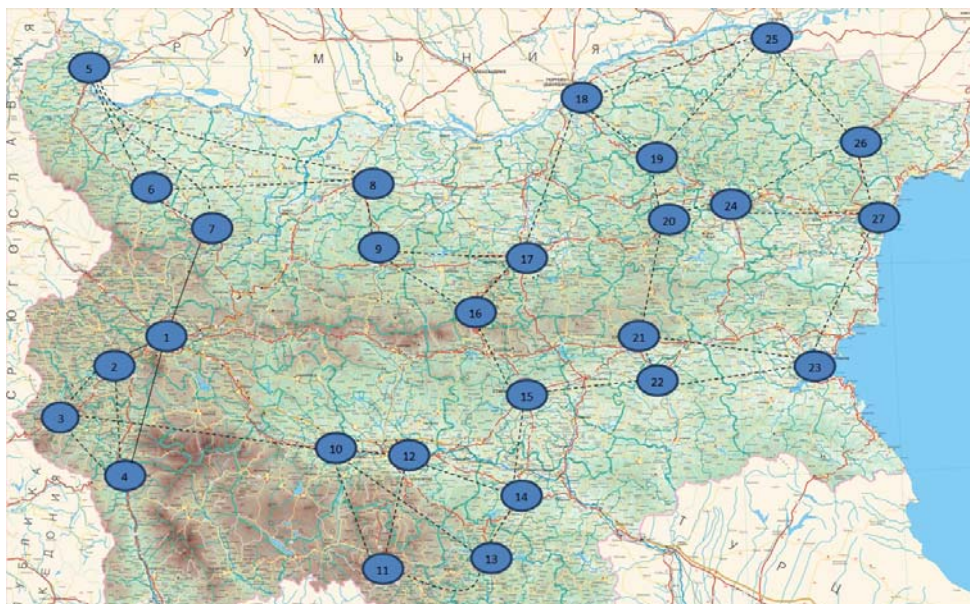
От получените резултати за този модел може да се направи извод, че той не е приложим да целите на дисертационния труд, тъй като не води до подобряване непрекъсваемостта на обслужването на информационните ресурси, както и не подобрява структурата на комуникационната мрежа с цел определяне на взаимнозаменяеми алтернативни маршрути.

В четвърта секция се разглежда трети модел за количествен анализ на получените резултати. Тегловите коефициенти на съществуващата мрежа се взимат съгласно таблица 3.3 от предходната глава, където са показани теоретично изчислените времезакъснения на всички определени възли.

На фигура 4.5 е показан резултата от параметрично състояние едно за топологичен синтез на двата най-добри пътя, а на фигура 4.6, параметрични състояние две за топологичен синтез на трите най-добри пътя.



Фигура 4.5 Модел с параметрично състояние едно за топологичен синтез на двата най-добри пътя



Фигура 4.6 Модел с параметрично състояние две за топологичен синтез на трите най-добри пътя

На първата фигура се вижда, че при параметрично състояние едно за този модел, се получава разпокъсаност на мрежата, като полученият резултат води до шест, напълно самостоятелно обособени групи възли. Поради тази причина, получената топология на мрежа не води до подобряване на сегашната комуникационна структура и не може да се използва като алтернатива за осигуряване непрекъснатост на информационните потоци и услуги.

На втората фигура, при параметрично състояние две за модела, се постига достатъчно добър резултат, като няма откъснати възли, както се получава при предишното състояние. Възникват няколко критични възлови точки (между 1 и 7, 8 и 9, 3 и 10, 14 и 15 възли), но чрез подходящо планиране е възможно премахването им, посредством добавяне на допълнителни резервни канали за връзка. Това параметрично състояние е приемливо с оглед цялостното разпределение на алтернативните пътища и тяхната взаимозаменяемост.

На база получените резултати, параметрично състояние две за модела се явява подходящ за подобряване на съществуващата комуникационна мрежа.

В пета секция се извършва количествен анализ на получените резултати.

Сега съществуващата комуникационна мрежа тип „звезда“ води до прекъсване, пропадане и нестабилност за поддържане на постоянна връзка между отделните клонове и тяхната връзка един с друг.

След разработване на трите възможни модела със съответните им параметрични състояния, преминаваме към графично им изобразяване. За тази цел представяме 27-те възли в квадратна матрица (27 x 27), като всеки ред и колона отговаря на един възел (от 1 до 27). Максималният брой на възможните комбинации може да се изчисли по формула 54.

От общия възможен брой комбинации (351) са избрани само 111, означени по-горе с елементите от x_1 до x_{111} (таблица 4.1).

В таблица 4.2 са показани критериите, които се използват при оценка на трите сценария.

Таблица 4.2

А	Сума на връзките на даден възел с другите възли
Б	Сума на времезакъсненията на връзките на даден възел с останалите
В	Зависимост на системата от един възел
Г	Брой групи възли

Критерий А е сума на броя на връзките на даден възел, като не се включват съответните симетрични стойности, а само стойностите на връзките, надясно от главния диагонал. Критерий Б включва сума на времезакъсненията по връзките на даден възел,

представен на съответния ред с останалите възли. За получаване на сумата на времезакъсненията по критерий Б също не са включени съответните симетрични стойности, а само времезакъсненията по връзките, надясно от главния диагонал. В две последователни колони след всяка таблица са сумирани броя на връзките на дадения възел, представен на съответния ред, както и времезакъсненията (Сума А и сума Б). Двете суми А и Б не включват съответните симетрични стойности, а само стойностите на връзките, надясно от главния диагонал.

Към така определените два критерия добавяме допълнително критерий В (зависимост на системата от един възел) и критерий Г (брой групи възли).

В таблици 4.3 и 4.4 са показани получените резултати от двете параметрични състояния на първи модел. В първата таблица се получава обособяване на 5 групи на свързаност между възли, оцветени в пет различни цвята. Във втората таблица всички възли са свързани помежду си в една група, оцветена в един цвят.

При този модел, използвайки реално измерените времезакъснения за теглови коефициенти, за параметрично състояние едно, се получава откъснатост на отделни групи възли и по тази причина не може да бъде използвано за подобряване свързаността на мрежата. За параметрично състояние две на този модел се получава приемлив резултат, но недостатъкът е получаването на несиметричност, тъй като възел едно няма връзка със своите съседни точки, базирани на географски принцип. При това състояние се наблюдават и критични точки на достъп.

В таблици 4.5 и 4.6 са показани получените резултати от двете параметрични състояния на втори модел. И в двете таблици, всички възли са свързани помежду си в една група, оцветена в един цвят. Налице е пълна зависимост от възел 1, който е свързан с всички останали.

Освен свързаността между възлите, в таблиците са включени стойностите по двата избрани критерия А и Б. Както бе споменато по-горе, на всеки ред в колонка А са посочени броя на връзките на всеки възел с другите възли (без техните симетрични стойности). На всеки ред в колонка Б е посочена съответната сума от времезакъсненията на даден възел. Впоследствие резултатите от тези критерии ще бъдат използвани за сравнение на различните варианти и оценка.

Например, ако разгледаме първи ред, възел 1 е свързан с останалите 24 възела, без възел 3 и възел 6. Сумата на времезакъсненията е 0. На втори ред, възел 2 е свързан с възел 3 със стойност на времезакъснението 0,69. Тези резултати са отразени в последните две колонки (А, Б) на втори ред - съответно 1 и 0,69. Последователно разглеждаме трети ред и свързаността на възел 3 - съответно с възел 2 и 4. Но както посочихме, симетричните стойности се изключват от сумарните резултати в таблицата. По тази причина на трети ред, в колонка А е изписано само 1 (свързаността с възел 4) и съответното времезакъснение - 0,745. За всеки следващ ред по един и същи начин се получават стойностите за всеки възел, а на последния ред - техните сумарни стойности.

Съгласно получените резултати за двете параметрични състояния от втори модел, може да се заключи, че той не е подходящ за използване, поради запазване на настоящата структура и несиметричност на добавените нови връзки. Това би довело отново до липса на сигурна и надеждна връзка между клоновата мрежа в разглежданата структура.

В таблици 4.7 и 4.8 са показани получените резултати от двете параметрични състояния на трети модел. В първата таблица са обособени 6 групи на свързаност между възлите, оцветени в шест различни цвята. Във втората таблица, всички възли са свързани помежду си в една група, оцветена в един цвят.

Разглеждайки последния модел, параметрично състояние едно води до постоянна откъснатост между отделни групи възли и тази топология не е приложима, както останалите досега споменати състояния. При параметрично състояние две за този модел се постига най-оптимално топологично разположение на получените алтернативни пътища, въпреки някои критични точки.

Таблица 4.8

[illegible]

Количественият анализ на трите модела със съответните параметрични състояния е представен в таблица 4.9 и представлява сравнение между стойностите на получените суми по двата критерия А и Б.

Таблица 4.9

Таблица	Модел	Параметрично състояние	А	Б	В	Г
4.3	Първи модел	Параметрично състояние едно	27	27,695	ниска	5
4.4	Първи модел	Параметрично състояние две	41	46,445	ниска	1
4.5	Втори модел	Параметрично състояние едно	38	10,400	висока	1
4.6	Втори модел	Параметрично състояние две	52	20,690	висока	1
4.7	Трети модел	Параметрично състояние едно	27	21,315	ниска	6
4.8	Трети модел	Параметрично състояние две	41	34,705	ниска	1

Съгласно получените резултати, таблици 4.5 и 4.6, които изобразяват втори модел с параметрични състояния едно и две, имат най-ниски стойности по критерий Б (сума на времезакъсненията) и липсват прекъсвания между възлите, но са силно зависими от един възел (възел 1).

Таблицы 4.3 (първи модел с параметрично състояние едно) и 4.7 (трети модел с параметрично състояние едно) са следващите две стойности по критерий Б (сума на времезакъсненията), но при тях са налице прекъсвания между възлите (съответно 5 и 6 обособени независими групи).

Таблицы 4.4 (първи модел с параметрично състояние две) и 4.8 (трети модел с параметрично състояние две) имат най-високи стойности по критерий Б, но липсват прекъсвания между възлите и зависимост от един възел. Следователно, най-добрият вариант за избор на разпределена мрежа се явява трети модел с параметрично състояние две, тъй като е с по-ниска стойност на сумата от времезакъсненията.

На база разгледаните три модела за подобряване непрекъсваемостта на комуникационното и информационно обслужване, както и качеството на доставяните услуги, може да се направи извода, че последния разгледан модел (трети модел с параметрично състояние две) е оптимален за получаване на приемливо ниво на алтернативни пътища, което ще доведе до непрекъсваемост и сигурност на информационния ресурс.

Приносът на дисертационния труд се състои в подобряване на комуникационната структура на разглежданата мрежа посредством направен топологичен синтез, което да доведе до осезателно намаляване на пропаданията и загуба на връзка между отделните крайни точки. Това води до оптимална свързаност и намаляване загубите на информационни ресурси вследствие подобряване отказоустойчивостта на предложената комуникационна мрежа.

Заклучение

За нуждите на дисертацията са анализирани 121 литературни източника, свързани с основните положения, методи, модели и алгоритми за формализиране на информационни и комуникационни потоци в мрежи чрез графи, необходими за преминаване на информационната мрежа от свързаност тип „звезда“ към двусвързана и трисвързана топология. Оценени са техните особености, предимства и недостатъци. Разгледани са проблемите за намиране на най-кратък път от един възел към всички останали възли в мрежи, за които цената на дъгата може да варира. Тези задачи имат влияние за определяне на оптимална топология на комуникационна мрежа. Направени са основни изводи на базата на проучените литературни източници.

Определени са чрез измервания и са анализирани пропускателната способност и времезакъсненията в мрежата при предаване на информационни потоци, като е оценено пропадането на връзка между двойка възли като характеристика на отказоустойчивостта на съществуваща комуникационна мрежа със свързаност тип „звезда“.

На базата на специализирана литература по този въпрос е синтезиран алгоритъм за определяне на теоретичните времезакъснения между възлите на добавените алтернативни

комуникационни канали и е дефинирана оптимизационна задача за определяне на свързаността на мрежата като са използвани резултатите от измерванията на времезакъсненията и пропаданията в комуникационната мрежа.

Решена е оптимизационна задача за определяне на структура на комуникационната мрежа като двусвързана и трисвързана. Анализирани са получаваните решения и е направен количествен анализ на получените резултати с цел постигане на непрекъсваемост на информационните потоци.

Посредством получените резултати от оптимизационната задача са разгледани и анализирани три модела за определяне на оптималния вариант за подобряване на съществуваща комуникационна мрежа. Направена е количествена оценка на получените резултати. На база топологичен синтез е избран най-добрият модел със съответно параметрично състояние за преминаване от съществуваща топология „звезда“ към разпределена трисвързана мрежа между отделните възлови точки с цел постигане на непрекъсваемост на информационните потоци.

Данните и измерванията в дисертацията са направени на реално съществуващата комуникационна мрежа, която се използва в практиката на фирма Информационно обслужване АД.

Приноси на дисертационния труд

Основните резултати имат научно приложен и приложен характер.

1. Анализирани са моделите за формализиране на информационни и комуникационни потоци в мрежи чрез графи и влиянието на топологията на мрежата. Оценени са техните особености, предимства и недостатъци. Разгледани са проблемите за намиране на най-кратък път от един възел към всички останали възли в мрежи, за които цената на дъгата може да варира.
2. Определени са чрез измервания и са анализирани пропускателната способност и времезакъсненията в мрежата при предаване на информационни потоци. Оценявано е пропадането на връзка между двойка възли като характеристика на отказоустойчивостта на съществуваща комуникационна мрежа със свързаност тип „звезда“.
3. Синтезиран е алгоритъм за определяне на теоритичните времезакъснения между възлите на добавените алтернативни комуникационни канали. Измерените и теоритично изчислени времезакъснения са използвани при дефинирането на задача за оптимален синтез на топология на мрежата.
4. Дефинирана е и е решавана оптимизационна задача за определяне на структура на комуникационната мрежа с 27 възела като двусвързана и трисвързана. Анализирани са получаваните решения. Направен е количествен анализ на получените резултати с цел постигане на непрекъсваемост на информационните потоци.

Бъдещи насоки за работа

На основание получения резултат от определената оптимална комуникационна мрежа, бъдещата работа ще продължи в няколко насоки:

- Следене състоянието и надеждността на мрежата за възникване на критични точки.
- Повишаване качеството на обслужване с оглед недопускане пропадания на връзката между възлите.
- Повишаване на продуктивността на мрежата с цел намаляване времезакъсненията.
- Повишаване на пропускателната способност на комуникационните канали.
- Анализирание на необходимостта от добавяне или промяна на определените алтернативни пътища на мрежата.
- Подобряване точността на алгоритъма за определяне на времезакъсненията при въвеждане на взаимнозаменими комуникационни връзки.

Публикации, свързани с дисертацията

1. Krasimir Trichkov, Elisaveta Trichkova, Elena Ivanova. Application Aspects of Web Services. E-learning Conference'07, Istanbul, Turkey, 27-28 August, 2007, ISBN: 978-975-6437-75-9, p. 167-171.
2. Krasimir Trichkov, Elisaveta Trichkova, Elena Ivanova. Integrated Information System Based on Web Services. International Conference on Computer Systems and Technologies - CompSysTech'2007, Rousse, Bulgaria, 14-15 June, 2007, ISBN: 978-954-9641-50-9, IIIA.16-1 – IIIA.16.5.
3. Trichkov Kr. Distributed Searching in Global Network. Preprints of the International IFAC Workshop DECOM-TT 2004, Automatic Systems for Building the Infrastructure in Developing Countries, Regional and Global Aspects, October 3-5, 2004, Bansko, Bulgaria, p.235-238, ISBN 954-9641-41-4
4. Trichkov Kr. Standardization Approach for Information Retrieval in WAN. Proceedings of the International Conference of Computer Systems and Technologies (e-learning), CompSysTech, 2004, Rousse, Bulgaria, 17-18 June, p.IIB.6-1-IIB.6-6
5. Trichkova E., K.Trichkov, Network management systems and security management in web services. Международна научна конференция "Информатика в научното познание 2008", 26-28 юни 2008 г., Варна, България, ISSN 1313-4345, p.194-204.
6. Trichkov K., Elisaveta Trichkova, Modeling and Execution on Web Services in the Web Information Systems, National Scientific Conference "Mathematics, Informatics and Computer Sciences"- St. Cyril and St. Methodius University of Veliko Tarnovo, Veliko Tarnovo, Bulgaria, 12-13 May, 2006, 184-189.
7. Елена Иванова, Тодор Стоилов, Красимир Тричков, Елисавета Тричкова. Защита на Web услуги в глобални мрежи. Конференция Автоматика и Информатика'07, 3-6 Октомври 2007, ISSN 1313-1850, стр. VI-35 – VI-38.
8. Елена Иванова, Тодор Стоилов, Красимир Тричков, Елисавета Тричкова, Съвременни информационни решения на Web услуги в глобални мрежи в интерес на сигурността. Научна поддръжка на трансформацията на сектора за сигурност, Академично издателство „проф. Марин Дринов” - БАН, 2006, София, ст. 172-183. ISBN-10: 954-322-175-8, ISBN-13: 978-954-322-175-2, ISBN-10: 954-91827-2-X, ISBN-13: 978-954-91827-2-9.

Научноизследователски проекти

Изследванията в дисертационния труд са част от получените резултати на следните научноизследователски проекти:

1. Международен проект по 6-та Рамкова програма на Европейската комисия, Информационно общество. Project EC FP6, program IST No. 027178 “Virtual Internet Service Provider VISP”
2. Договор за отпускане на финансова подкрепа за проект за мобилност по секторна програма „Леонардо да Винчи”. Програма „Учене през целия живот”. 2008-1-BG1-LEO03-00374. Тема „Обмяна на опит за иновационни приложения на решения за електронно обучение”.
3. Международен проект по програма „Обучение през целия живот” - ERASMUS. Договор с Европейската комисия: 142399-LLP-1-2008-1-BG-ERASMUS-ENW на тема: „ETN Teaching, Research, Innovation in Computing Education”.
4. The thematic Network Teaching, Research and Innovation in Computing Education - TRICE is established in accordance with the ERASMUS Programme of the EUROPEAN COMMISSION.
5. Европейски Социален Фонд 2007-2013 Г. Програма "Развитие На Човешките Ресурси" . Подкрепа на творческото развитие на докторанти, пост-докторанти и млади учени в областта на компютърните науки, BG 051PO001-3.3.04/13.

6. Проект 4ИФ-02-87/7.3.2008 „Интегриране на GPS функционалности в информационна система за оптимизиране на междуправителни управленски дейности с приложение за координиране на специализирани служби” към Изпълнителна агенция за насърчване на малките и средни предприятия - Министерство на промишлеността.

Библиография

1. Стоилов Т. Експериментална WAN и LAN мрежа за моделиране и оптимизация на трафик. Сборник доклади, Национална конференция с международно участие "Компютърни системи и технологии КомпСисТех'2000", 22-23 юни 2000, София. стр. IV-4.1-IV-4.5.
2. Deo N., Pang C.Y., "Shortest Path Algorithms: Taxonomy and Annotation," Networks 14 pp., 275-323 (1984).
3. Carlos J., M.Papageorgiou, C.Schaffner. Integrated Optimal routing and congestion control in packet-switched network. IFAC Symposium Large Scale Systems: Theory and Applications, Aug.23-25, 1992, Beijing China, Vol.1, p.59-64.
4. Стоилов Т. Оптимизация на достъпа до общ комуникационен канал. Национална конференция по Автоматика и информатика'98. Сборник доклади. Симпозиум "Проблеми на информационните технологии", Том 1, София, 20-23 октомври 1998, стр. 9-12.
5. Наков О., Р. Трифонов, Г. Попов, П. Вачков, С. Манолов, Р. Йошинов. Мрежова и информационна сигурност. София, Изд. "Авангард Прима" – 2013, 367 стр. ISBN 978-619-160-183-7.
6. Castro J., N.Nabona. Nonlinear multicommodity network flows through primal partitioning and comparison with alternative methods. IFIP Conference on Systems Modeling and Optimization, Compiègne, France 5-9 July 1993, p.875-887.
7. Kirov G., Soft computing models for network routing, International Conference "Automatics and Informatics'2002", Sofia, Bulgaria, November 5-7.
8. Chen Z., T. Berger. Performance analysis of random routing algorithm for n-D connected networks. , TENCON'93 , Beijing, China, october 19-21 1993, p.233-236.
9. Huitema Chr. Routing in the Internet. Prentice Hall, New Jersey, 1995, 319 p.
10. Pitsillides A., J.F.Lambert, R.E.Warfield. A hierarchical control approach for broadband ISDN Communication networks. 13 IFAC Congress 1993, Sidney, Australia, vol.7, p.223-226.
11. Woo, S. H., Yang S.B., An improved network clustering method for I/O-efficient query processing. In ACM-GIS, pages 62–68, 2000.
12. Shekhar S., Liu D.R., CCAM: A connectivity-clustered access method for networks and network computations. IEEE Trans. Knowl. Data Eng., 9(1):102–119, 1997.
13. Jiang B., I/O-efficiency of shortest path algorithms: An analysis. In ICDE, pages 12–19, 1992.
14. Tipper D., M. Sundareshan. Numerical Methods for Modeling Computer Networks under Nonstationary Conditions. IEEE Journal on selected area in communications, vol.8, N9, 1990, p.1682-1695.
15. Jing N., Huang Y.W., Rundensteiner E. A., Hierarchical optimization of optimal path finding for transportation applications. In CIKM, pages 261–268, 1996.
16. Kimura T. Approximations for the waiting time in the GI/G/S queue. Journal of the O.R.Society of Japan, 34, 1992, 2(June), p.173-186.
17. G. Spasov, "Future Internet Technology", Journal Automatics & Informatics, Year XLIII, № 3/2009, pp. 11-15, ISSN 0861-7562.
18. Стоилов Т. Проблеми при експериментирането в компютърни WAN и LAN мрежи. Международна Конференция "Автоматика и информатика '2000", 24-26 октомври 2000, Сборник доклади, т.1, Симпозиум Компютърни и комуникационни системи в

- приложения с повишена отговорност. Симпозиум Информационни технологии. София, стр.5-7.
19. Наков О., Р. Трифонов, Г. Попов, П. Вачков, С. Манолов, Р. Йошинов. Мрежова и информационна сигурност. София, Изд. "Авангард Прима" – 2013, 367 стр. ISBN 978-619-160-183-7.
 20. Ling S.T., Furuno K., Tezuka Y., Optimal Path in Networks with Time-Varying Traverse Time and Expenses Branches, Technological Reports of Osaka University, Japan (1972).
 21. Dochev, D., Yoshinov, R. Pavlov. (2000) An Open Distributed Computer Environment for Educational Telematics, in Proceedings of the EDEN Fourth Open Classroom Conference, Barcelona, Spain, November 19-21, pp.247-252.
 23. E.W. Dijkstra, A note on two papers in connection with graphs, Numeriske Mathematics 1 (1959) 269–271.
 24. R.W. Floyd, Algorithm 97: Shortest paths, Communications of the ACM 5 (1962) 345.
 78. Even S., Graph Algorithms, Computer Science Press, New York (1979).
 82. Громницкий В.С. Методы оптимизации, Курс лекций, Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского», Экономический факультет, Кафедра экономической информатики, УДК 65.012.122 (075.8) ББК Увб73 Г 87
 105. N. Kakanakov, E. Kostadinova, G. Spasov, "Using SNMP for Remote Measurement and Automation", Proc. Conf. Electronics ET'07, 20-22 Sept 2007, Book 2, pp. 85-90, ISBN: 1313-1842.
 117. Л. Р. Форд, Д. Р. Фалкерсон, Потоки с сетях, Издательство „Мир“, Москва, 1966.
 118. Л. С. Лэсдон, Оптимизация больших систем, Издательство „Наука“, Москва, 1975.
 119. Стоилов Т. Неитеративна координация в йерархични системи. Академично издателство на БАН, "Проф.М.Дринов", София, 1998, стр.272
 120. Д. Младенов, К. Стоилова, Т.Стоилов. Теория и практика на йерархичните системи. Издателство на Българската академия на науките, София, 1989.
 121. Stoilova K., T. Stoilov, R. Yoshinov. Predictive Coordination in Two Level Hierarchical Systems. WSEAS Transaction of Mathematics. Issue 3, Volume 3, July 2004. p.631-636.