

**І. М. РЯБЧЕНКО**

**О. В. ГРЕЧУХІН**

Харківський інститут МАУП

**С. О. СВИРИДОВ**

Харківська національна академія міського господарства

## **ТЕОРЕТИЧНІ ЗАСАДИ АВАРІЙНОГО УПРАВЛІННЯ СИСТЕМАМИ ПОДАЧІ Й РОЗПОДІЛУ ВОДИ**

Наукові праці МАУП, 2007, вип. 2(16), с. 37–40

*Розглядаються теоретичні основи проблеми аварійного управління поточкорозподілом систем подачі й розподілу води (СПРВ). Показано, що розміщення запірної арматури у водорозподільній мережі однозначно визначає розподіл графа мережі на дві підмножини — підмножину локалізуючих компонент і підмножину замикаючих компонент. Теоретично доведено, що розміщення запірної арматури на мережі однозначно визначає структуру гіперграфа, за яким проводиться моніторинг вибору оптимальної стратегії аварійного оперативного управління режимами роботи СПРВ.*

Актуальність проблеми аварійної експлуатації систем подачі й розподілу води зростає з кожним роком. Це пов'язано зі зношеністю водорозподільних мереж, з одного боку, і з відсутністю грошових коштів на їх реконструкцію — з іншого.

При вирішенні задачі аварійної експлуатації СПРВ важливе місце належить рішенням задачі швидкої та якісної локалізації аварійної зони (ділянки або водоводу). При цьому оптимізується низка критеріїв: мінімум часу, що витрачається на локалізацію; мінімальна кількість відключених абонентів мережі; мінімальна кількість перекриттів запірної арматури (засувки) та ін.

Проте на сьогодні проблема можливості, єдності і кінцевості топологічних перетворень графа мережі теоретично не вивчена. Без проведення строгих теоретичних досліджень проблеми топологічної локалізації неможлива розробка ефективного алгоритмічного і програмного інструментарію.

Ця проблема досліджується в межах тематичного плану науково-дослідних робіт МАУП з напрямку І.1 01.05 “Інформатика та кібернетика”, код завдання І.1.01.05.02, І.1.01.05.04 “Розвиток методів та програмного забезпечення для

розв'язання задач математичного моделювання та оптимального управління” і пов'язана з практичними задачами виробничих управлінь водопровідно-каналізаційних господарств (ВУВКГ) України.

На сьогодні проблема топологічної локалізації теоретично не вивчена. Практично проблема відсікання аварійної ділянки від діючої мережі розв'язується шляхом перекриття запірної арматури на магістральному водоводі в точці відгалуження квартальних мереж, що призводить до “збезводнення” цілого кварталу. Якщо пошкоджений водовід має дві засувки (що вкрай рідкісне явище), то перекривають обидві засувки, що веде до збезводнення аварійної ділянки. Інші випадки на практиці приводять до серйозних технологічних проблем і спричиняють істотні економічні збитки.

Спробуємо в цій статті дослідити теоретичні і алгоритмічні аспекти проблеми топологічної локалізації аварійної зони (ділянки або водоводу) шляхом перекриття запірної арматури і розробити теоретичний та алгоритмічний інструментарій. У межах досліджуваних теоретичних аспектів проблеми слід виокремити дослідження можли-

вості, єдиності і кінцевості топологічних перетворень графа мережі, що приводять до локалізації аварійної зони.

При локалізації аварії на водорозподільній мережі необхідно відсікти аварійний водовід від системи подачі й розподілу води шляхом перекриття запірної арматури на водоводах, що подають воду в аварійну зону. Щоб мінімізувати втрати, необхідно вибрати оптимальне за низкою критеріїв рішення, яке припускає оптимальний вибір безлічі засувок, достатньої для локалізації аварійного ребра графа водопровідної мережі. Для вирішення такої задачі виникає необхідність у топологічному дослідженні графа мережі. Оскільки в результаті виникнення аварійної ситуації і дій щодо її локалізації змінюється поточкорозподіл у мережі, на окремих ділянках, що примикають до аварійної зони, можлива зміна напрямку руху води. У принципі, такі зміни можна було б розрахувати, вирішивши пряму задачу аналізу<sup>1</sup>, проте, по-перше, вона описує поточкорозподіл без урахування динамічної реакції мережі на зміну її параметрів, по-друге, потребує витрат часу на проведення розрахунків, орієнтованих на поточні дані, що є недоцільним в ситуації дефіциту часу. Тому в такій ситуації доцільно розглядати мережу як неорієнтований граф, а напрями потоків урахувати на пізніших етапах при оцінюванні можливих стратегій усунення аварії.

Термінологія та основні поняття, що використовуються при подальшому викладенні матеріалу, наведені у праці І. М. Рябченка<sup>2</sup>. В цій задачі локалізації істотну роль відіграє неоднорідність множин  $E$ , а також ребер і вершин графа мережі  $G$ .

Нехай на ребрі  $u$  графа  $G$  відбулася аварія, засувки на цьому ребрі відсутні, тобто  $u \in E'$ .

Підграф  $G'$  графа  $G$  назвемо локалізуючим підграфом щодо ребра  $u$ , якщо він має такі властивості:

- а)  $G'$  містить ребро  $u$ ;
- б)  $G'$  — зв'язний підграф;
- в) будь-яке ребро  $u'$  графа  $G$ , що сполучає вершину графа  $G'$  з вершиною  $G \setminus G'$ , містить засувку, тобто  $u' \in E''$ .

Тоді алгоритмом локалізації аварії є алгоритм, який описує перекриття засувки на ребрах, що сполучають вершини  $G'$  і  $G \setminus G'$ .

Задачею топологічної локалізації аварії називатимемо задачу побудови локалізуючого підграфа, відмінного від початкового графа  $G$ .

Сімейство всіх локалізуючих підграфів щодо ребра  $u$  позначимо  $\Gamma(u)$ . Очевидно, що оптимізація процедури локалізації аварії за якимось критерієм проводиться на сімействі  $\Gamma(u)$ . Зокрема, задоволення вимоги відключення мінімальної кількості абонентів від мережі відповідає вибору мінімального елемента  $G'(u)$  сімейства  $\Gamma(u)$ , тобто такого, яке міститься в будь-якому локалізуючому підграфі. Назвемо такий елемент максимально локалізуючим підграфом локалізуючою компонентою (ЛК).

Справедлива наступна теорема.

**Теорема 1.** *Якщо задача локалізації, що не містить засувок ребра  $u$  щодо графа  $G$  вирішувана, то максимально локалізуючий підграф існує та єдиний.*

**Доведення.** Через умову твердження безліч  $\Gamma(u)$ , локалізуючих підграфів не порожньо. Якщо воно складається з єдиного елемента, то він є і максимальним. Хай воно складається більш ніж з одного елемента. Маємо  $G' \cap G'' \in \Gamma(u)$ .

Дійсно, виконання умов а) і б) для  $G' \cap G''$  очевидно. Для перевірки умови в) припустимо, що ребро  $u'$  сполучає  $G' \cap G''$  з  $G' \cap G''$ , тобто  $G \setminus (G' \cap G'') = (G \setminus G') \cup (G \setminus G'')$ , тоді вершина ребра  $u'$ , звідси  $u'$  не належить  $G' \cap G''$ . Покладемо

$$G'(u) = \bigcap \{G' : G' \in \Gamma(u)\}.$$

Граф  $G'(u)$  за побудовою є єдиним максимальним локалізуючим підграфом, що доводить теорему.

Тепер розглянемо випадок, коли на аварійному ребрі є тільки одна засувка. Хай засувка знаходиться біля вершини  $v_1$  ребра  $u$ . У цьому випадку визначення локалізуючого підграфа видозмінюється таким чином: властивість в) замінюється такою властивістю:

- в') будь-яке ребро графа  $G$ , що сполучає вершину графа  $G'$  з вершиною  $G'$ , містить засувку.

Алгоритмом локалізації такої аварії є алгоритм, який описує перекриття засувки на ребрах, що поєднують вершини  $G' - v_1$  і  $G \setminus G' - v_1$ , а також на ребрі  $u$ .

Для цієї ситуації також справедлива теорема існування і єдиності максимально локалізуючого підграфа.

**Теорема 2.** *Якщо задача локалізації ребра  $u$  з однією засувкою щодо графа  $G$  вирішувана, то максимально локалізуючий підграф існує та єдиний.*

<sup>1</sup> Рябченко І. Н. Моделирование процессов потокораспределения в системах подачи и распределения воды с использованием ПЭВМ. — Харьков: ДСВ "Основа" при Харьков. ун-те, 1998. — 188 с.

<sup>2</sup> Там само.

**Доведення.** Перший випадок: існує ребро  $u' \in E'$  (без засувки), однією з вершин якого є  $v_1$ .

Другий випадок: усі ребра  $G$  з вершиною в  $v_2$  мають засувки, тоді  $G'(u) = \{u\}$ . Теорема доведена.

*Випадок аварії на ребрі з двома засувками тривіальний:*  $G'(u) = \{u\}$ .

Задача локалізації аварії водорозподільних мереж зводиться до побудови локалізуючого підграфа відносно заданого ребра. Розглянемо задачу побудови максимально локалізуючого підграфа.

Ребра  $u$  і  $w$  графа  $G$  називатимемо еквівалентними, якщо їх максимально локалізуючі підграфи збігаються. Тим самим задача максимальної локалізації може бути вирішена побудовою розбиття безлічі всіх ребер графа  $G$  на відповідні класи еквівалентності.

Розглянемо граф  $G' = (V, E')$ , всі ребра які не мають засувки. Він є сукупністю зв'язаних компонент, причому будь-які два ребра однієї компоненти еквівалентні, а ребра з різних компонент еквівалентними не є. Вершини ребра  $e \in E'$  зараховуватимемо до тієї ж компоненти, що і ребро  $e$ . Вершина, що не увійшла до жодної з компонент, утворює нову (одновершинну) компоненту.

Хай ребро  $u = (v_1, v_2)$  початкового графа  $G$  має засувку біля вершини  $v_1$ . Говоритимемо, що  $u$  приєднане до компоненти  $K$ , якщо вершина  $v_2$  належить цій компоненті. Будь-яке таке ребро може бути приєднане лише до однієї компоненти. Замиканням компоненти назвемо її об'єднання зі всіма приєднаними до неї ребрами. У подальшому оперуватимемо тільки поняттям “замикання компонент” а скорочено будемо їх називати компонентами. Ребра, що належать  $E''$ , не приєднані до жодної компоненти, обов'язково мають дві засувки, кожне таке ребро є власним максимально локалізуючим підграфом (безвершинною компонентою).

Таким чином, доведена наступна теорема.

**Теорема 3.** *Існує та єдиний поділ графа мережі на максимально локалізуючі підграфи.*

Відзначимо, що оскільки кожна вершина графа належить деякій локалізуючій компоненті, то теорема 3 одночасно вирішує і задачу локалізації аварії у вузлі мережі.

Видалення компонент зв'язності графа  $G'$  та аналіз їх впливу на функціонування всієї мережі виконується за допомогою модифікованого алгоритму пошуку в глибину.

У процесі роботи такого алгоритму повинні бути визначені всі локалізуючі компоненти графа мережі; для будь-якої локалізуючої компоненти визначається безліч відсікаючих її ребер графа, що містять засувки; для будь-якої локалізуючої компоненти визначається її чинник-зв'язність; для будь-якої компоненти визначається її рівень значущості.

Якщо кожна компонента графа, отриманого з початкового видалення локалізуючої компоненти, містить активне джерело, то вважатимемо, що така компонента фактор-зв'язна.

Якщо видалення локалізуючої компоненти приводить до коректного вирішення, то вважатимемо, що компонента має мінімальний рівень значущості, якщо рішення граничне, то компонента має проміжний рівень значущості, а якщо рішення тривіальне, то компонента має максимальний рівень значущості.

Крім цього, аналіз наслідків відсікання локалізуючої компоненти має враховувати наслідки цього відсікання на суміжні компоненти і за допомогою цих даних мінімізувати безліч ребер графа, що видаляються (тобто мінімізувати кількість засувки, що перекриваються).

Таким чином, теоретично досліджена проблема топологічної локалізації аварійної ділянки, яка є дугою неорієнтованого графа, що описує схему з'єднань системи подачі і розподілу води. Доведена можливість, єдиність і кінцевість топологічних перетворень, що сприяють локалізації аварійної ділянки мережі. Показана можливість модифікації алгоритму “пошуку в глибину” для поділу його на безліч локалізуючих компонент.

Доведено, що такий поділ дуг графа мережі на безліч локалізуючих компонент є єдиним, що визначено як місцерозташування запірної арматури на мережі. Охарактеризований теоретичний та алгоритмічний інструментарій проблеми топологічної локалізації аварійної ділянки (аварійної зони).

*Рассматриваются теоретические основы проблемы аварийного управления по-  
токораспределением систем подачи и распределения воды (СПРВ). Показано, что  
размещение запорной арматуры в водораспределительной сети однозначно опреде-  
ляет разбиение графа сети на два подмножества — подмножество локализующих  
компонент и подмножество замыкающих компонент.*

*Теоретически доказано, что размещение запорной арматуры на сети однознач-  
но определяет структуру гиперграфа, по которому проводится мониторинг выбо-  
ра оптимальной стратегии аварийного оперативного управления режимами рабо-  
ты СПРВ.*

*In the article the theoretical bases of problem of emergency management of water  
distribution the system of water feeding and distributor (SWFD). It is shown, that placing  
of constipation armature in a water-distributor network simply determines breaking up of  
count of network of localizing a component and of locking a component.*

*In work it is proved in a theory, that placing of constipation armature on a network  
simply determines the structure of gipergraf which monitoring of choice of optimum  
strategy of emergency operative management by the modes of the SWFD operations is  
produced on.*

Надійшла 22 травня 2007 р.