УДК 519.17:681.32

І. М. РЯБЧЕНКО

Н. В. МОІСЄЄНКО

О. Ю. ДОЗОРОВА

Харківський інститут МАУП

АВТОМАТИЗОВАНЕ УПРАВЛІННЯ ФІЗИЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ, ЩО ПРОТІКАЮТЬ У СИСТЕМАХ ПОДАЧІ Й РОЗПОДІЛУ ВОДИ В АВАРІЙНИХ СИТУАЦІЯХ (математична модель)

Наукові праці МАУП, 2007, вип. 1(15), с. 24–27

Запропоновано модель, що адекватно відображає фізичні процеси, які протікають у системах подачі й розподілу води при виникненні аварійної ситуації, з урахуванням топологічних та управлінських перетворень як структури мережі, так і режимів її функціонування. Цю модель автори використали при розробці діалогової системи автоматизованого управління системою подачі й розподілу води.

При розробці автоматизованої системи управління (АСУ) системою подачі й розподілу води (СПРВ) в аварійних ситуаціях величезне значення має процедура розробки коректної математичної моделі, адекватної тій, яка відображає технологічні та фізичні процеси, що протікають у водорозподільній мережі. Модель повинна враховувати такі післяаварійні чинники, як можливість топологічної трансформації графа мережі, або управління запірною арматурою, або зміна режимів роботи активних елементів мережі (насосних станцій), які запобігають подачі води в аварійну зону (ділянка водоводу).

Ця проблема досліджується в рамках тематичного плану науково-дослідних робіт МАУП з напряму І.1.01.05 Інформатика та кібернетика. Код завдання І.1.01.05.02, І.1.01.05.04 “Розвиток методів і програмного забезпечення для розв’язання задач математичного моделювання та оптимального управління” і пов’язана з практичною діяльністю виробничих управлінь водопровідно-каналізаційних господарств (ВУВКГ) України.

На сьогодні вже виконані теоретичні й алгоритмічні дослідження проблеми топологічних перетворень графа мережі СПРВ, які дають змогу локалізувати аварійну зону і не допустити потрапляння в неї цільового продукту (води). Проте комплексних досліджень, що давали б можливість створити адекватну математичну модель аварійної ситуації і формалізувати оптимальну стратегію оперативного управління в цій ситуації, поки що не проведено.

У зв’язку з викладеним спробуємо розробити модель, подібну тій, що відображає технологічні й фізичні процеси, що протікають у СПРВ при виникненні аварійної ситуації, з урахуванням топологічних і управлінських перетворень як структури мережі, так і режимів функціонування.

При локалізації аварії на водорозподільній мережі необхідно відключити аварійний водовід від системи подачі і розподілу води шляхом перекриття запірної арматури на водоводах, які подають воду в аварійну зону. Щоб мінімізувати втрати, необхідно вибрати оптимальний критерій вирішення, що припускає оптимальний вибір однієї засувки з безлічі інших, достатньої для локалізації аварійного ребра графа водопровідної мережі. Для вирішення цього завдання необхідно дослідити в топологічні перетворення графа мережі. Оскільки в результаті виникнення аварійної ситуації і дій щодо її локалізації змінюється розподіл потоку води в мережі, на окремих ділянках, що межують з аварійною зоною, можливо зміна напряму руху води. Такі зміни можна було б розрахувати, розв'язавши пряму задачу аналізу[1], проте, по-перше, вона описує потокорозподіл без урахування динамічної реакції мережі на зміну її параметрів, по-друге, потребує значних витрат часу на виконання численних розрахунків, що недоцільно в ситуації дефіциту часу. Тому в такій ситуації варто розглядати мережу як неорієнтований граф, а напрями потоків води враховувати на пізніших етапах при оцінюванні можливих стратегій усунення аварії.

Термінологія та основні поняття, що використовуються при подальшому викладенні матеріалу, вже відомі[2]. У даній задачі локалізації істотну роль грає неоднорідність множин E і V ребер і вершин графа мережі G. У нашій ситуації $V' = V \setminus V''$.

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 поєднує 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 поєднують 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 $\Gamma(u)$. Вочевидь, 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 сімейства $\Gamma(u)$, тобто такого, яке міститься в будь-якому локалізуючому підграфі. Назвемо такий елемент максимально локалізуючим підграфом (або локалізуючою компонентою — (ЛК)).

Справедлива наступна теорема. Її доказ наведений у праці І. М. Рябченка[3].

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

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

в′) будь-яке ребро u графа G, що поєднує вершину графа G' з вершиною $G \setminus G'$, 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 єдності максимально локалізуючого підграфа.

Теорема 2. *Якщо задача локалізації ребра и з однією засувкою щодо графа G вирішувана, то максимально локалізуючий підграф існує та є єдиним.*

Доведення цієї теореми наведено у згаданій вище праці І. М. Рябченка.

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

Задача локалізації аварії водорозподільних мереж зводиться тут 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 шляхом поділу безлічі всіх ребер графа G на відповідні класи еквівалентності.

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

[1] *Рябченко И. Н.* Моделирование процессов потокораспределения в системах подачи и распределения воды с использованием ПЭВМ. — Харьков: ДСВ "Основа" при Харьковском ун-те, 1998. — 188 с.

[2] Там само.

[3] Там само.

Хай ребро *u* = (v_1, v_2) початкового графа *G* має засувку біля вершини v_1. Вважатимемо, 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 ні до якої компоненти, обов'язково мають дві засувки, кожне таке ребро є власним максимально локалізуючим підграфом (безвершинною компонентою).

Таким чином, доведена наступна теорема.

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

Відзначимо тут, 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′* і 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 видаленням 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 поділу на суміжні компоненти і за допомогою цих даних мінімізувати безліч ребер графа, що видаляються (тобто мінімізувати кількість засувок, що перекриваються).

Процес побудови математичної моделі ухвалення рішень в аварійній ситуації відбувається в кілька етапів:

- висунення мети;
- пошук альтернативних способів досягнення мети;
- визначення логіки вибору альтернативного рішення і обґрунтування механізму вибору;
- аналіз отриманого рішення.

Отже, визначимо мету: усунення аварії на водорозподільній мережі в найкоротші терміни з мінімальними втратами.

Способи досягнення поставленої мети визначаються передусім типом аварії, який звужує безліч способів усунення аварії.

Досягти поставленої мети можна великою кількістю способів, що розрізняються як у технологічному, так і організаційному погляді. На основі формування безлічі допустимих рішень, що розглядаються як способи досягнення поставленої мети, використовуємо безліч усіх можливих варіантів зміни параметрів об'єкта, що дають можливість забезпечити максимально допустиму витрату в аварійній зоні.

Розглянемо деякі способи формування підмножин цієї множини: автоматичне визначення безлічі засувок, повне перекриття яких приведе до збезводнення аварійної зони. Ця множина формується з використанням даних, отриманих у процесі розробки алгоритму побудови максимально локалізуючого підграфа, який дає можливість:

- для будь-якого елемента мережі однозначно визначити вказану множину;
- вирішити завдання пошуку альтернативного варіанту засувок, що повністю перекриваються, експертом, обізнаним в особливостях функціонування керованого об'єкта;
- визначити ступінь перекриття засувок, що дає змогу забезпечити максимально допустиму витрату в аварійній зоні;
- змінити режим роботи насосної станції з використанням резервного устаткування, що дає змогу забезпечити максимально допустиму витрату в аварійній зоні;
- формувати безліч рішень комбінованим способом, що припускає винайдення оптимальної комбінації з використанням викладених вище підходів.

З технічної точки зору ця множина охоплює найпоширеніші способи аварійного регулювання параметрів об'єкта.

При цьому зауважимо, що додавання всіх можливих способів проведення аварійно-відновних робіт з урахуванням поточного стану технічної бази розширює можливу кількість стратегій, тобто збільшує безліч рішень задачі.

Укрупнена структура вектора-рішення x має вигляд

$$x = (x_1, x_2) \in \Pi \cup \Phi,$$

де Π — безліч регульованих параметрів мережі; Φ — безліч ресурсів для проведення аварійно-відновних робіт, тобто $x_1 \in \Pi$.

Обмеженням на безліч можливих рішень є наступні вимоги: вибрані параметри функціонування об'єкта не повинні виходити за встановлені рамки основних показників функціонування об'єкта; наявність в аварійній зоні особливо важливих об'єктів, повне відключення яких від мережі неприпустимо, обмежує безліч можливих рішень щодо локалізації аварійної зони.

Виходячи із змістовної постановки задачі можна сформувати такі можливі критерії якості рішення поставленої задачі: $K_1(x)$ — витрати на проведення ремонтних робіт; $K_2(x)$ — втрати води, які можна уявити як складовий критерій, що містить додаткові підкритерії: $K_{21}(x)$ — сумарні недопоставки води споживачам; $K_{22}(x)$ — відсоток відключених великих споживачів цільового продукту; $K_3(x)$ — витрату часу на проведення ремонтних робіт.

При використанні засувок зменшення їх кількості бажано з погляду зменшення витрат на проведення ремонтних робіт, тобто зменшення величини $K_1(x)$. При цьому необхідно враховувати, що мінімізація за цією множиною має бути виконана не на шкоду якості рішення. Якщо при формуванні безлічі засувок, що закриваються, враховувати дані, отримані при формуванні найважливіших компонентів розглядуваної мережі, то витрати, пов'язані із закриттям засувок, будуть мінімізовані.

Таким чином, за основу механізму вибору якнайкращого рішення можна взяти мінімізацію вибраних критеріїв, що відповідають таким основним вимогам, як повнота, операціональність, розкладність, ненадмірність, декомпозиційність, вимірність, мінімальність.

Задачу вибору кращої стратегії в аварійній ситуації можна сформулювати у математичному вигляді.

Хай дана мережа має певну конфігурацію із заданими характеристиками її елементів і певним розташуванням запірно-регулюючої арматури. Хай також задані стан технічної бази водопровідно-каналізаційного господарства і певні трудові ресурси.

Хай G — безліч усіх можливих способів усунення всіх можливих аварій на розглядуваній мережі, а $X \subset G$ — пред'явлення.

Необхідно знайти величину $x^* \in X$, оптимальну за векторним критерієм *До*, що належить безлічі допустимих рішень

$$X_{adm} = \{x \in X : Q_i(x) < l_i,\ \ i = 1, ..., n;\\ P_k(x), k = 1, ..., m\},$$

де $x = (x_1, x_2)$ — вектор регульованих параметрів задачі; $K(x) = (K_1(x), K_2(x), K_{21}(x), K_{22}(x), K_3(x))$ — векторна функція, що відображає вартісні і кількісні характеристики вибраного рішення; $Q_i(x)$ — скалярні функції — технологічні обмеження, які накладаються на рішення задачі вибору найкращого рішення, тобто певні обмеження на допустимі витрати, пониження тиску, зменшення подачі цільового продукту споживачам та ін.; l_i — задані константи; $P_k(x)$ — формули, які описують обмеження, що накладаються на можливі рішення, змістовного характеру.

У такій постановці наведена задача належить до задач узагальненого математичного програмування. У даному разі вона вирішується у два етапи. На першому етапі, використовуючи задану функцію вибору $\{x_1, x_2, ..., x_n\} = З(X) \subset X$, здійснюють оптимізацію *До(x)* за бінарним відношенням R. Потім ЛПР, оцінюючи вектори *До*(x_1), *До*(x_2), ..., $K(x_n)$ показників ефективності (критеріїв якості $K_1(x)$, $K_2(x)$, $K_{21}(x)$, $K_{22}(x)$, $K_3(x)$) альтернатив $x_1, x_2, ..., x_n$, вибирає з рішень, що задовольняють умовам задачі, рішення x^* з кращим за перевагою R_0 (переваги ЛПР) вектором характеристик *До(x)*.

Предложена математическая модель, адекватно отражающая физические процессы, протекающие в СПРВ при возникновении аварийной ситуации, с учетом топологических и управленческих преобразований как структуры сети, так и режимов функционирования. Эта модель использована при создании программного инструментария "Диалоговая автоматизированная система поддержки принятия решений".

A mathematical model is offered, it is adequate reflecting physical processes, flowing in SPRV in case of beginning of emergency situation, taking into account topology and administrative transformations, both network structure and modes of functioning. This model is used for creation of program tool — the "Interactive automated system of support of acceptance of decisions".

Надійшла 2 березня 2007 р.