

сайт общественной организации «Ассоциация СИГРЭ-Украина». – Текст. дан. – К., 2014-2015. – Режим доступа: http://sigre.org.ua/ru_co1_publicakcii_associacii_sigre-ukraina.html (24.09.2015). – Название с экрана.

4. Модульная объектно-ориентированная динамическая обучающая среда // офиц. сайт Moodle. – Режим доступа: <https://moodle.org/> (24.09.2015). – Название с экрана.

5. Аветисян Е.В., Гуреев В.А., Сангинова О.В. Моделирование режимов, обучение и тренаж персонала с использованием виртуальной объединенной энергосистемы (ВОЭС) Ураины // Энергетика и электрификация, 9/14, 2014. – С. 28-35.

6. Аветисян Е.В., Гуреев В.А., Сангинова О.В. Розробка та застосування віртуальних ієрархічних структур для моделювання режимів, навчання і тренажу персоналу ОЕС України // Вісник вінницького політехнічного інституту, 1(124), 2016. – с. 101 – 107.

7. Гуреев В.А., Сангинова О.В. Інноваційне віртуальне середовище для навчання та тренажу персоналу ОЕС України // IV Наук.-практ. конф. Сучасні методи аналізу усталених режимів електричних мереж та стійкості електроенергетичних систем. Новітні досягнення у проведенні тренажерної підготовки оперативно-диспетчерського персоналу, 22 - 26 лютого 2016 р., с. Славсько, Україна.

Поступила 3.10.2016 р.

УДК 629.7.063: 621.316.11

С.Д.Винничук, м.Київ

АВТОМАТИЗОВАНЕ ФОРМУВАННЯ ПОЧАТКОВОГО РОЗПОДІЛУ НЕВІДОМИХ ВИТРАТ, ТИСКІВ ТА ТЕМПЕРАТУР В РОЗПОДІЛЬНИХ МЕРЕЖАХ СТИСЛИВОЇ РІДИНИ З ДЕРЕВОВИДНИМ ГРАФОМ

Анотація. Запропоновано алгоритм автоматизованого формування збалансованого у вузлах початкового наближення масових витрат у гілках мереж з деревовидним графом за умов, що дані про витрати можуть бути задані: як граничні умови, як режимні дані про витрату, що підтримується регулятором витрат, як початкове значення витрати, або інформація про витрату в гілці не задається. Показано, що при такому порядку використання заданих даних про витрати можлива діагностика некоректно заданої інформації. Наведено приклади розрахунку початкового значення витрат.

Abstract. The algorithm for the automated creation of balanced at the nodes of the original approach of the mass flow in the branches network of tree graph provided that the cost data could be asked: how boundary conditions, as regime data about supported control costs as the initial value of expenditure or the information consumption of a branch is not set. It is shown that when given the order to use cost data possible diagnosis given incorrect information. Examples of calculation of the initial value of costs.

Ключові слова: мережі стисливої та нестисливої рідини, потокорозподіл, початкове наближення витрат.

Keywords: Network incompressible and compressible fluid flow distribution, the original cost approach.

Вступ. При вирішенні довільних систем рівнянь і в тому числі рівнянь, що формуються згідно постулатів Кірхгофа для мереж, необхідно мати початкове значення невідомих величин. У мережах стисливої та нестисливої рідини такими невідомими величинами є значення витрат в гілках мережі та температур на границях елементів, а у випадку стисливої рідини додатково також значення тиску на границях елементів.

При практичному вирішенні завдань розрахунку витрат в мережі початкове наближення для них можна задати вручну. Якщо у всіх гілках мережі витрати невідомі, то їх можна вважати нульовими. Тоді виконані умови балансу і ніяких даних по витратах задавати не потрібно. Найбільш бажаним для користувача програмного додатку, що реалізує розрахунок збалансованого у вузлах початкового наближення витрат у гілках мережі буде варіант, що об'єднує всі попередні, тобто коли можна задати тільки частину інформації про витрати в гілках мережі. При розробці та реалізації такого алгоритму повинні бути передбачені можливості:

- перевірки балансу витрат для множини гілок, де вони задаються та виправлення некоректно заданих значень витрат;
- інформування користувача про невідомі витрати в гілках, в яких вони повинні бути заданими за умовами розрахунку;
- визначення значень витрат в інших гілках, де вони не задані.

Розробка такого алгоритму безсумнівно актуальна. Актуальним є також завдання коректного формування даних стосовно тисків та температур на границях елементів. Дані питання розглядаються в цьому дослідженні.

Основна частина. В загальному випадку визначення параметрів потоку (витрата, тиск і температура) в довільній точці мережі замість їх одночасного розрахунку використовують ітераційний процес послідовного вирішення задач розрахунку:

А) збалансованих у вузлах значень масових витрат в гілках мережі при відомих тисках та температурах на границях елементів (закон збереження маси);

Б) тисків на границях елементів при відомих витратах в гілках мережі та температурах на границях елементів, де тиск на вході попереднього елемента співпадає з тиском на виході попереднього елемента (закон нерозривності);

В) температур на границях елементів при відомих витратах в гілках мережі та тисках на границях елементів, де в межах однієї гілки температура на вході попереднього елемента співпадає з температурою на виході попереднього елемента (закон нерозривності).

Вирішення кожної із задач А)-В) потребує виконання певних умов. Розглянемо їх.

1. Коректне формування даних стосовно поля тиску в мережі. У випадку стисливої рідини обчислення перепаду тиску (різниця тисків на вході (по напрямку потоку) та виході) для довільного з елементів мережі неможливе без відомих значень тиску та температури. При цьому, як показано в роботі [1], у випадку критичного режиму течії (швидкість потоку дорівнює швидкості звуку в потоці) перепад тиску можна обчислити тільки проти потоку. Виходячи з умови, що за наявності критичних режимів течії перепад тиску можна отримати тільки в напрямку «проти потоку», обчислення поля тисків (тиски на границях між елементами) при відомих витратах в гілках мережі та температурах на границях елементів гарантовано можна отримати на основі послідовного обчислення тиску на вході довільного елемента за його значенням на виході. Такий процес буде можливим, якщо буде відомий тиск в граничних вузлах, де потік виходить із мережі. У інших випадках може не існувати розв'язку. Якщо ж критичні режими течії на елементах мережі відсутні, то завжди можна обчислити поле тиску, маючи як мінімум одне значення тиску в граничному вузлі. Передбачаючи наявність алгоритму розрахунку параметрів потоку в довільній точці мережі, що забезпечує виявлення умов, коли розв'язок не існує, дані стосовно тиску в мережі достатньо задати в граничних умовах (ГУ), а також задати деяке (взагалі кажучи довільне додатне) значення тиску на границях між елементами. При подальших обчисленнях значення тисків на границях між елементами та в граничних вузлах, де вони невідомі, будуть обчислювати в ході ітераційного процесу при вирішенні задачі Б). Такі дані є достатніми при вирішенні задачі розрахунку потікорозподілу стосовно тиску. Алгоритм їх задання є достатньо простим та не потребує уточнення.

2. Коректне формування даних стосовно поля температур в мережі. У випадку як стисливої, так і нестисливої рідини, обчислення перепаду тиску для довільного з елементів мережі неможливе без відомого значення температури. До особливостей розрахунку температур на границях між елементами в мережі слід віднести те, що значення температури на виході елемента отримують на основі відомої температури на його вході. Тому в ГУ слід задавати значення температури в граничних вузлах, якою вона була б у випадку, коли потік входить в мережу. Тобто дані стосовно тиску в мережі достатньо задати в ГУ, а також задати деяке (взагалі кажучи довільне додатне) значення температури на границях між елементами. При подальших обчисленнях значення температур на границях між елементами та в граничних вузлах, де вони невідомі, будуть обчислювати в ході ітераційного процесу при вирішенні задачі В). Такі дані є достатніми при вирішенні задачі розрахунку потікорозподілу стосовно температур, а алгоритм їх задання є достатньо простим та не потребує уточнення.

3. Дані стосовно масових витрат у гілках мережі та алгоритм формування збалансованих у вузлах їх значень. При вирішенні завдань розрахунку масових потоків у гілках мережі найчастіше (особливо для мереж

середньої та великої розмірності) користуються методами Ньютона і методами контурних струмів (див. [2-4]), де необхідно мати збалансоване в вузлах початкове наближення витрат. При цьому дані стосовно масових витрат у гілках мережі можуть бути задані як ГУ в граничних гілках, а також як режимні дані про підтримуване значення витрати регулятором витрат (РВ), або дані про початкове їх наближення.

У випадку, коли дані про масові витрати у граничних гілках задаються як ГУ, то у відповідних їм граничних вузлах недоцільно задавати одночасно і значення тиску, оскільки відомі випадки, коли задача розрахунку потокорозподілу може не мати розв'язку, або розв'язків може бути більше одного. В кожному разі задача буде некоректно поставленою. Тому вважаємо, що при формуванні граничних умов в довільному граничному вузлі задано або значення граничного тиску (повний тиск, якщо потік входить в мережу, або статичний, якщо виходить), або значення масової витрати у граничній гілці, що суміжна граничному вузлу. При цьому ГУ повинні бути сформовані таким чином, що у кожній зв'язній частині графа мережі хоча б в одному з граничних вузлів було задано значення тиску.

Задаючи значення масових витрат в якості початкового їх наближення користувач програмного додатку з розрахунку потокорозподілу може задати його в довільній із гілок, включаючи і граничні. Це коректно у випадках, коли у граничному вузлі відомий тиск, а значення витрати у суміжній вузлу гілці слід знайти. Якщо ж початкове значення задається у граничній гілці, де аналогічне значення задано як ГУ, то виникає протиріччя: яке значення брати за основу. У цьому випадку пріоритетним вважається значення, задане як ГУ, але користувачу надається інформація про те, що виявлено протиріччя у даних та воно автоматично вирішене на користь граничних даних.

Дані початкового наближення витрат у внутрішніх гілках також можуть містити протиріччя. Наприклад, у всіх гілках, суміжних деякому вузлу, задано значення витрат, але сумарна величина витрат, що входять у вузол, не дорівнює сумарній величині витрат, що з його виходять, тобто порушується закон збереження маси. У таких випадках в одній з гілок, суміжних вузлу, початкове значення витрати додатково визначається із умови забезпечення балансу витрат, що входять у вузол та виходять із вузла.

Наведені варіанти рішень стосовно задання ГУ, їх пріоритетності перед початковими наближеннями та правило виправлення небалансу у внутрішніх вузлах мережі забезпечують перевірку балансу витрат для множини гілок, де вони задаються, та виправлення некоректно заданих значень витрат.

Вимога до алгоритму формування збалансованого у вузлах початкового наближення витрат (інформування користувача про невідомі витрати в гілках, в яких вони повинні бути заданими за умовами розрахунку) стосується мереж, у яких в якості елементів можливими є регулятори витрати. Тоді у гілці, де такий елемент встановлено, необхідно задавати підтримуване значення витрати, а серед задач розрахунку потокорозподілу виникає задача визначення перепаду тиску на РВ. Якщо виявиться, що РВ встановлено у

граничній гілці, то у граничному вузлі, суміжному цій гілці, в якості ГУ може бути задано тільки значення тиску.

Елемент РВ, по суті, ділить гілку на дві частини: до РВ та після нього. Тому може виявитися, що при такому розділенні на дві частини ділиться зв'язна частина мережі, де в кожній з них повинен бути граничний вузол, для якого в якості ГУ задано значення тиску. Перевірка виконання такої умови та умови, що в гілці, яка містить РВ, задано початкове значення витрати, вирішує друге завдання до алгоритму формування збалансованого у вузлах початкового розподілу витрат у гілках мережі.

Третя вимога - визначення значень витрат в інших гілках, де вони не задані, - потребує розробки формалізованої процедури, що визначала би порядок вибору гілок, у яких слід визначати витрату. Розглянемо спочатку випадок, коли початкове наближення не задається, а серед ГУ є хоча б один вузол, де у суміжній йому гілці задане значення витрати.

3.1. Алгоритм автоматизованого формування витрат у гілках мережі коли в граничних гілках задано витрати як ГУ. При розробці даного алгоритму важливим є аналіз структури графа мережі та використання відомого алгоритму пошуку в ширину.

Нехай граф $G(U, V)$ є деревом, де U – множина вузлів, а V – множина його гілок. Оскільки передбачається, що серед ГУ є хоча б один граничний вузол, де задано значення тиску, то виберемо його в якості початкового вузла при побудові черги вузлів методом пошуку в ширину (див. [5]). Встановимо для початкового вузла номер рівня нуль – це кореневий вузол, або просто корінь. Суміжним йому вузлам присвоїмо рівень 1. Для всіх цих вузлів гілкою – предком назвемо гілку, що з'єднує вузол рівня 0 з вузлом рівня 1. А для всіх вузлів рівня 1 вузлом предком буде початковий вузол. Кожен з вузлів рівня 1 вносимо в чергу в порядку їх розміщення у списку суміжності початкового вузла. На цьому обробка вузла рівня 0 завершена і алгоритм приступає до обробки наступного в черзі вузла.

Якщо наступний у черзі вузол u має рівень i , то формуємо множину вузлів рівня $i+1$, які суміжні u та їх рівень ще не встановлено. Для кожного з них визначаємо гілку предка, де для всіх їх вузлом-предком буде вузол u . Для прикладу розглянемо наступний приклад орієнтованого графа (рис. 1.а) типу дерева, для якого методом пошуку в ширину сформуємо чергу вузлів. Для цього будемо асоційований з ним неорієнтований граф (рис.1.б) та кореневе дерево з коренем у вузлі 8 (рис.1.в).

Методом пошуку в ширину формується черга вузлів, у якій вузли більш високого рівня слідує за вузлами нижчого рівня. Якщо вважати, що в списку суміжності для кожного з вузлів суміжні йому вузли розміщені в порядку зростання їх номерів, то при формуванні кореневого дерева буде сформована така черга вузлів (в дужках вказано рівень вузла): 8(0), 5(1), 4 (2), 9 (2), 1 (3), 6 (3), 2 (4), 3 (4), 7 (4), 10 (4), 11 (5) , 12 (5) , 13 (5), 14 (6), 15 (6).

Виключивши із цього списку граничні вузли, отримаємо послідовність внутрішніх вузлів,

$$5 (1), 4 (2), 1 (3), 6 (3), 10 (4), 12 (5). \quad (1)$$

в якій останній вузол буде висячим, тобто зв'язаним із рештою внутрішніх вузлів мережі всього однією гілкою. На прикладі даного графа мережі розглянемо три приклади визначення початкового розподілу витрат у гілках.

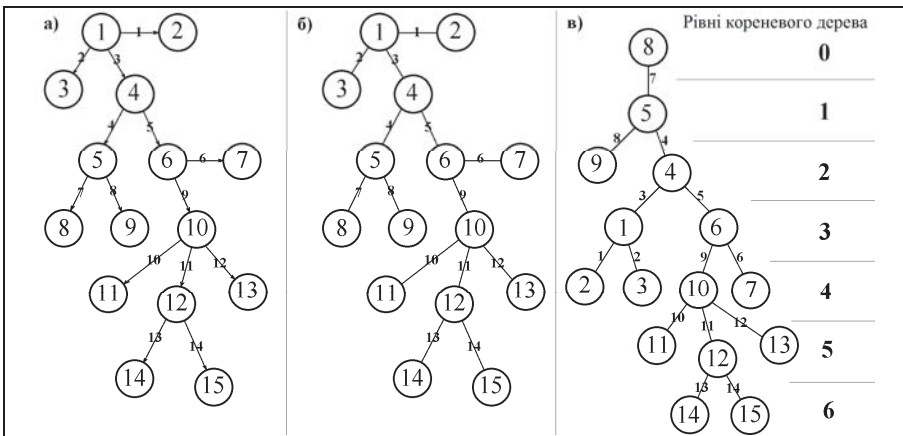


Рис. 1. Орієнтований граф типу дерева (а), асоційований з ним неорієнтований граф (б) та кореневе дерево з коренем у вузлі 8 (в): 0—5—рівні кореневого дерева

Нехай у першому варіанті задані граничні умови такі, що у вузлі 8 в якості ГУ задано значення тиску, а в інших граничних вузлах – значення витрати у гілці, суміжній граничному вузлу. На рис. 2.а, що за формою подання графа співпадає з рис. 1.в, додатково жирною лінією відмічені гілки, у яких відома витрата, а також вказано початковий додатний напрямок витрати в кожній з гілок мережі, вказаний на рис.1.а.

Простий підрахунок показує, що у випадку даних, відображених на рис. 1.а, невідомі витрати всього в 6 гілках: 3, 4, 5, 7, 9 та 11. Для їх визначення скористаємося законом збереження маси. Закон збереження маси виконується для масових витрат, згідно якого сума витрат, що входить у довільний з вузлів мережі дорівнює сумі витрат, що виходять з нього. У вузлі відсутнє накопичення маси. Тому у кожному випадку, коли у внутрішньому вузлі витрати відомі у всіх суміжних йому гілках крім однієї, невідому витрату можна знайти на основі закону збереження маси.

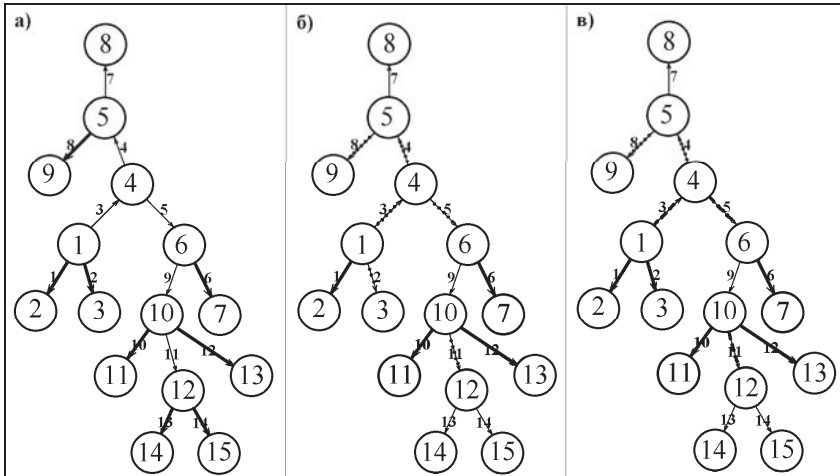


Рис. 2. Варіанти а)-в) початкових значень витрат

Для визначеності, при записі умов закону збереження маси знак витрати вважатимемо '+', якщо вузол є початковим для гілки, а в іншому разі це буде знак '-'. Отже, для всіх внутрішніх вузлів графа мережі, зображеного на рис. 2, отримаємо систему рівностей (інакше балансових співвідношень)

$$\begin{cases} (1): g_1 + g_2 + g_3 = 0 \\ (4): g_4 + g_5 - g_3 = 0 \\ (5): g_7 + g_8 - g_4 = 0 \\ (6): g_6 + g_9 - g_5 = 0 \\ (10): g_{10} + g_{11} + g_{12} - g_9 = 0 \\ (12): g_{13} + g_{14} - g_{11} = 0 \end{cases}, \quad (2)$$

де поряд з записом відповідної рівності вказано номер вузла, для якого вона записана.

Аналізуючи систему (2) можна замітити, що витрату g_{11} можна знайти із балансового рівняння, записаного для вузла 12, оскільки g_{13} та g_{14} відомі. При відомій витраті g_{11} витрату g_9 можна знайти із балансового рівняння, записаного для вузла 10. На основі відомих витрат g_6 та g_9 із балансового рівняння, записаного для вузла 6, обчислимо витрату g_5 . Втрату g_3 обчислимо на основі відомих витрат g_1 та g_2 із балансового рівняння, записаного для вузла 1. При відомих g_3 та g_5 обчислимо g_4 із балансового рівняння, записаного для вузла 4. І, нарешті, визначимо значення масової витрати g_7 із балансового рівняння, записаного для вузла 5.

Неважко помітити, що для обчислення невідомих витрат використовувалися балансові рівняння для вузлів, порядок використання яких

зворотній стосовно списку внутрішніх вузлів (1), що може бути використане для створення формалізованого алгоритму при такому варіанті даних про витрати у граничних гілках.

3.2. Алгоритм автоматизованого формування витрат у гілках мережі коли серед елементів мережі немає РВ. Нехай в даних про витрати у гілках графа мережі передбачено, що частина витрат у гілках задано як ГУ (гілка зображена жирною лінією), частина – як початкове наближення (гілка зображена пунктирною лінією), а решта гілок – тонкою лінією. Приклад такого варіанту даних подано на рис. 2.б.

Якщо вважати, що всі початкові значення витрат повинні бути без зміни використані при знаходженні інших невідомих витрат, то у системі рівнянь (2) можуть не виконуватися рівності для вузлів 1 та 4, а також для вузла 6 після обчислення g_9 із балансового рівняння, записаного для вузла 10. Крім того, не вистачає даних для знаходження витрат у гілках 13 та 14. Тому для забезпечення виконання закону збереження маси пропонується такий алгоритм.

Алгоритм А1.

1. Кожному вузлу ставимо у відповідність число суміжних йому гілок. Нехай це масив $KN[U]$.
2. Вважаємо остаточно визначеними тільки витрати у граничних гілках, де вони задані як ГУ.
3. У кожному випадку наявності граничної гілки з відомим значенням витрати, заданої як ГУ, для вузлів, що її описують в масиві число гілок, у яких ще не визначено витрату, зменшуємо на одиницю. Якщо виявиться, що для деякого вузла u $KN[u] = 1$, вносимо вузол у чергу вузлів, в яких можна визначити витрату у останній з гілок, у якій витрата ще невідома.
4. Формуємо список гілок у порядку зростання абсолютного значення витрати, заданої як її початкове наближення.
5. Якщо черга вузлів, у яких можна визначити витрату у одній гілці непуста, обробляємо вузли у порядку вузлів черги за принципом : перший зайшов – перший вийшов. При цьому для вузлів, що її описують в масиві KN , число гілок, у яких ще не визначено витрату, зменшуємо на одиницю. Якщо виявиться, що для деякого вузла u $KN[u] = 1$, вносимо вузол у чергу вузлів, в яких можна визначити витрату у останній з гілок, у якій витрата ще невідома. Якщо черга пуста, то у випадку, коли витрати знайдено в усіх гілках, алгоритм закінчує свою роботу, а інакше перейти до п.6.
6. Із списку гілок, сформованого згідно п.4, вибираємо гілку v з мінімальною витратою серед тих із них, де витрата ще не визначена. Якщо такі гілки відсутні, то переходимо до п. 7, а інакше вважаємо витрату гілці v визначеною та зменшуємо на одиницю число гілок, у яких витрата невідома, для вузлів, що її описують. Якщо виявиться,

що для деякого вузла u $KN[u] = 1$, вносимо вузол у чергу та повертаємося до п.5.

7. Автоматично додатково визначаємо початкове значення витрати рівним нулю і всіх гілках, де воно не було задане та вважаємо, що у таких гілках задано початкове значення витрати. Повернутися до п.6.

Робота алгоритму А1 при даних, відображених на рис. 2.б, представлена в табл.1, де на кроці 4 вважається, що задані початкові значення витрат зростають в згідно такого списку гілок: 11, 3, 4, 2, 5, 8, а масив КН сформовано з урахуванням виконаних кроків 1-4 алгоритму А1. В таблиці через v^* позначено номер гілки, у якій визначено витрату, а u^* - вузол, що обробляється.

Табл. 1. Визначення витрат у гілках згідно алгоритму А1.

№ п/п	Крок	Додано гілку	Черга вузлів	u^*	Масив КН						v^*
					1	4	5	6	10	12	
1	5	-	Черга пуста	-	2	3	3	2	2	3	-
2	6	11	10	-	2	3	3	2	1	2	-
3	5	-	6	10	2	3	3	1	0	2	9
4	5	-	Черга пуста	6	2	2	3	0	0	2	5
5	6	3	1, 4	-	1	1	3	0	0	2	-
6	5	-	4	1	0	1	3	0	0	2	2
7	5	-	Черга пуста	4	0	0	2	0	0	2	4
8	6	8	5	-	0	0	1	0	0	2	-
9	5	-	Черга пуста	5	0	0	0	0	0	2	7
10	7	13, 14	Черга пуста	-	0	0	0	0	0	2	-
11	6	13	12	-	0	0	0	0	0	1	-
12	5	-	Черга пуста	12	0	0	0	0	0	0	14

3.3. Алгоритм автоматизованого формування витрат у гілках мережі коли серед елементів мережі є РВ. Аналізований варіант відрізняється від раніше розглянутого в розділі 3.2 тим, що додатково передбачається ще один варіант задання інформації про витрати в гілках мережі, а саме режимні дані про витрати, що підтримуються регуляторами витрат. Приклад таких даних наведено на рис. 2.в де передбачено, що частина витрат у гілках задано як ГУ (гілка зображена жирною лінією), частина – як початкове наближення (гілка зображена пунктирною лінією), є внутрішні гілки, у яких витрати фіксуються як режимні дані (гілка зображена штриховою лінією), а решта гілок – тонкою лінією.

Наявність в мережі РВ призводить до того, що алгоритм А1 вже не може забезпечити автоматизоване формування витрат у гілках мережі за умови збалансованості витрат у вузлах, оскільки наявний додатковий спосіб задання даних про витрати, та потребує доопрацювання.

При різних варіантах задання даних про витрати в гілках для забезпечення однозначності обробки інформації слід встановити

пріоритетність таких даних. Будемо вважати, що вони розміщуються в такій послідовності:

- дані, задані як ГУ;
- дані про витрати, підтримувані РВ;
- дані, задані як початкове наближення, що дозволяє їх коригувати;
- відсутні дані про витрати, які автоматично до визначаються.

Варіант даних щодо витрат у гілках мережі, поданий на рис. 2.в є некоректним, оскільки:

- задані граничні умови у вузлах 2 та 3 однозначно визначають значення витрати як у граничних гілках 1 і 2, так і гілці 3, де наявний РВ, що не дозволить визначити перепад тиску на РВ;
- задані дані про витрати, підтримувані РВ, у гілках 5 та 11 призводять до протиріччя, оскільки при відомій витраті в гілці 11 можна однозначно визначити витрату в гілці 5 і навпаки.

Обидва випадки некоректного задання даних слід діагностувати. Тому алгоритм А1 слід доповнити кроками, розміщеними до основного кроку 5, а саме

4-5.0. Формуємо список гілок, у яких витрата підтримується РВ.

4-5.1. Якщо черга вузлів, у яких можна визначити витрату у одній гілці непушта, обробляємо вузли у порядку вузлів черги за принципом: перший зайшов – перший вийшов. При цьому для вузлів, що її описують в масиві КН, число гілок, у яких ще не визначено витрату, зменшуємо на одиницю. Якщо виявиться, що для деякого вузла u $KN[u] = 1$, вносимо вузол у чергу вузлів, в яких можна визначити витрату у останній з гілок, у якій витрата ще невідома. Якщо черга пуста, перейти до п.4-5.2.

4-5.2. Із списку гілок, витрати в яких підтримуються РВ, вибираємо наступну із них. Якщо виявиться, що витрата в ній уже раніше визначена алгоритмом, то варіант даних про витрати є некоректним, про що видається діагностична інформація та алгоритм закінчує свою роботу. Якщо такі гілки відсутні, то переходимо до п. 5, а інакше вважаємо витрату гілці v визначеною та зменшуємо на одиницю число гілок, у яких витрата невідома, для вузлів, що її описують. Якщо виявиться, що для деякого вузла u $KN[u] = 1$, вносимо вузол у чергу та повертаємося до п.4-5.1.

За наявності кроків 4-5.0 – 4-5.2 для варіанту даних про структуру витрат, представлену на рис. 2.в, спочатку буде видано першу діагностичну інформацію про те, що витрату в гілці 3 можна знайти раніше, ніж буде використано її значення, що задається як підтримуване РВ.

Допустимо надалі, що у вузлі 2 задається граничне значення тиску. Таке уточнення призведе до того, що помилка в даних про витрати, яка діагностовано в першому повідомленні, буде виправлена. Проаналізуємо тепер роботу кроків 4-5.1 – 4-5.2 за такого списку гілок, у яких витрата підтримуються РВ: 3, 5, 11. Робота кроків 4-5.0 – 4-5.2 представлена в табл.2, де спочатку остаточно визначеними є тільки витрати у гілках, задані як ГУ.

Табл. 2. Визначення витрат у гілках згідно кроків 4-5.1 – 4-5.2.

№ п/п	Крок	Додано гілку	Черга вузлів	u^*	Масив КН						v^*
					1	4	5	6	10	12	
1	4-5.1	-	Черга пуста	-	2	3	3	2	2	3	-
2	4-5.2	3	1	-	1	2	3	2	2	2	-
3	4-5.1	-	Черга пуста	3	0	2	3	2	2	2	2
4	4-5.2	5	4, 6	-	0	1	3	1	2	2	-
5	4-5.1	-	6	4	0	0	2	1	2	2	4
6	4-5.1	-	10	6	0	0	2	0	1	2	9
7	4-5.1	-	Черга пуста	10	0	0	2	0	0	2	11
8	4-5.2	11	Витрата в гілці 11 вже визначена. Помилка в даних.								

Для усунення помилки, діагностовано в ході роботи кроків 4-5.1 – 4-5.2, достатньо в даних задати в якості граничної умови значення тиску у вузлі 11. Тоді при роботі кроків 4-5.1 – 4-5.2 буде визначено витрату у гілці 10, а уточнений алгоритм А1 продовжить свою роботу до визначення всіх інших витрат в гілках, автоматично забезпечуючи виконання закону збереження маси.

Висновки. При вирішенні задач визначення поточкорозподілу у мережах стисливої та нестисливої рідини задаються граничні та початкові умови для витрат в гілках мережі, поля температур, а також тисків, де найбільш складним для аналізу є задання витрат. У випадку мереж, граф яких є деревом, можливими є чотири типи даних про витрати: дані ГУ, витрати, підтримувані РВ, витрати, задані як початкове наближення, відсутня інформація про витрати, коли вони повинні автоматично визначатися. Для цих даних, розмішених в такому порядку їх важливості, запропоновано алгоритм А1 автоматизованого формування витрат в усіх гілках мережі, доповнений кроками 4-5.0 – 4-5.2 за наявності РВ, який забезпечує також перевірку коректності заданих даних.

1. Винничук С.Д. Особенности формирования уравнений второго закона Кирхгофа для задач расчета потокораспределения в распределительных системах сжимаемой жидкости. // Электронное моделирование - №6, 2008. – С. 49-58.
2. Меренков А.П., Хасилев В.Я. Теория гидравлических цепей.– М.:Наука, 1985.- 280с.
3. Евдокимов А.Г., Тевяшев А.Д., Дубровский В.В. Моделирование и оптимизация потокораспределения в инженерных сетях. – М.: Стройиздат, 1990. – 368 с.
4. Кондращенко В.Я., Винничук С.Д., Федоров М.Ю. Моделирование газовых и жидкостных распределительных систем. – Киев: Наукова думка, 1990. –184 с.
5. Кормен Т., Лейзерсон Ч., Риверст Р., Штайн К. Алгоритмы: построение и анализ / [Кормен Т., Лейзерсон Ч., Риверст Р., Штайн К.]. – [2-е изд.]. – М. : Издательский дом “Вильямс”, 2011. – 1296 с.

Поступила 21.09.2016 р.