

УДК 697.4:681.12.08

## ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ВОДЯНЫХ СИСТЕМ ОТОПЛЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ КАК СОСТАВНАЯ ЧАСТЬ ИНВЕСТИЦИОННОГО ПРОЕКТА

ИРОДОВ В.Ф. <sup>1\*</sup>, *д.т.н, проф.*,  
ЧЕРНОЙВАН А. А. <sup>2</sup>, *зав. лаб., асс.*

<sup>1\*</sup> Кафедра системного анализа и моделирования в теплогазоснабжение, Государственное высшее учебное заведение "Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры", ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепр, Украина, тел. +38 (056) 756-34-06, e-mail: vfirodov@i.ua, ORCID ID: 0000-0001-8772-9862

<sup>2</sup> Кафедра системного анализа и моделирования в теплогазоснабжение, Государственное высшее учебное заведение "Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры", ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепр, Украина, тел. +38 (056) 756-33-49, e-mail: chernoivan@i.ua, ORCID ID: 0000-0003-0406-0601

**Аннотация. Цель.** Предлагается определять гидравлические параметры водяных систем отопления в процессе эксплуатации путем идентификации гидравлических цепей. Математическая модель гидравлической цепи является моделью с сосредоточенными параметрами. Основными параметрами математической модели являются: расходы по участкам цепи, расходы в узлах цепи, давление в узлах цепи и разность давления по участкам цепи, гидравлические сопротивления участков цепи. Идентификация параметров гидравлической цепи осуществляется методом «математического расходомера». **Методика.** В основе метода лежит измерение расходов по участкам гидравлической и сопоставление вычисленных и экспериментальных значений. Экспериментальные значения расходов воды по участкам цепи определяются с помощью метода меток. Для измерения скорости воды в трубах предлагается использовать тепловые метки. Однако невозможно измерить расходы воды на всех участках гидравлической цепи. Так что задача идентификации гидравлических параметров цепи является некорректно поставленной. Для ее решения требуется использовать дополнительный критерий (стабилизатор). **Результаты.** Два критерия предложено использовать для идентификации гидравлической цепи системы отопления в условиях эксплуатации. Первый критерий – это расхождение между измеренными и вычисленными расходами по участкам сети. Второй критерий – это среднеквадратичное отклонение вычисленных гидравлических сопротивлений от их предварительно известных значений. Задача параметрической идентификации сводится к задаче математического программирования. Алгоритм эволюционного поиска решений используется для решения задачи идентификации с двумя критериями. Второй критерий идентификации преобразуется в ограничение в виде неравенства. **Научная новизна.** Алгоритм эволюционного поиска применяется для решения задачи идентификации с двумя критериями. Оригинальный алгоритм рассматривается как алгоритм поиска решения по бинарному отношению выбора. Не требуется условие выпуклости отношения выбора. **Практическая значимость.** Рассматривается несколько параллельных ветвей эволюционного поиска. На основании отобранных лучших решений предыдущего шага итерации находятся параметры случайного поиска для последующего шага итерации. Имеется доказательство сходимости процесса эволюционного поиска к искомому наиболее предпочтительному решению с вероятностью 1 (почти наверное). Идентификация гидравлических параметров водяной системы отопления рассматривается как стадия управления проектом..

**Ключевые слова:** идентификация гидравлической цепи, тепловая метка, водяная система отопления, расход воды, эволюционный алгоритм, управление проектами

## ІДЕНТИФІКАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ ВОДЯНИХ СИСТЕМ ОПАЛЕННЯ В УМОВАХ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЯК СКЛАДОВА ЧАСТИНА ІНВЕСТИЦІЙНОГО ПРОЕКТУ

ИРОДОВ В. Ф. <sup>1\*</sup>, *д.т.н, проф.*,  
ЧОРНОЙВАН А. А. <sup>2</sup>, *зав. лаб., асис.*

<sup>1\*</sup> Кафедра системного аналізу та моделювання у теплогазопостачанні, Державний вищий навчальний заклад "Придніпровська державна академія будівництва та архітектури", вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 756-34-06, e-mail: vfirodov@i.ua, ORCID ID: 0000-0001-8772-9862

<sup>2</sup> Кафедра системного аналізу та моделювання у теплогазопостачанні, Державний вищий навчальний заклад "Придніпровська державна академія будівництва та архітектури", вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 756-33-49, e-mail: chernoivan@i.ua, ORCID ID: 0000-0003-0406-0601

**Анотация. Мета.** Пропонується визначити гідрравлічні параметри водяних систем опалення при експлуатації шляхом ідентифікації гідрравлічних мереж. Математична модель гідрравлічної мережі це модель з зосередженими параметрами. Параметри математичної моделі це: витрати води по ділянкам мережі, витрати води в вузлах мережі, тиск в вузлах мережі та

втрата тиску по ділянкам, гідравлічні опори по ділянкам мережі. Ідентифікація параметрів гідравлічної мережі здійснюється за допомогою методу «математичного витратоміру». **Методика.** Згідно методу вимірюються витрати по ділянкам гідравлічної мережі та зіставляються обчислені та експериментальні значення. Експериментальні значення витрат води по ділянкам знаходяться методом міток. Для виміру швидкості води в трубах пропонується використовувати теплові мітки. Але неможливо виміряти витрати води по усім ділянкам гідравлічної мережі. Таким чином задача ідентифікації гідравлічних параметрів стає некоректно поставленою. Для вирішення необхідно використовувати додатковий критерій (стабілізатор). **Результати.** Два критерії запропоновано використовувати для ідентифікації гідравлічної мережі системи опалення у умовах експлуатації. Перший критерій – це розбіжність між вимірними та обчисленими витратами по ділянкам мережі. Другий критерій – це середньоквадратичне відхилення обчислених гідравлічних опорів від їх попередніх значень. Задача параметричної ідентифікації приводиться до задачі математичного програмування. Алгоритм еволюційного пошуку рішень використовується для рішення задачі ідентифікації з двома критеріями. Другий критерій ідентифікації перетворюється до обмеження у формі нерівності. **Наукова новизна.** Алгоритм еволюційного пошуку використовується для вирішення задачі ідентифікації з двома критеріями. Оригінальний алгоритм розглядається як алгоритм пошуку рішення згідно бінарного відношення вибору. Не вимагається умова опуклості відношення вибору. **Практична значимість.** Розглядається декілька паралельних гілок еволюційного пошуку. На підставі відібраних кращих рішень попереднього кроку ітерації знаходяться параметри випадкового пошуку наступного кроку ітерації. Мається доказ збіжності процесу еволюційного пошуку до шуканого найбільш переважного рішення з вірогідністю 1 (майже напевно). Ідентифікація гідравлічних параметрів водяної системи опалення розглядається як стадія управління проектом.

*Ключові слова:* ідентифікація гідравлічної мережі, тепла мітка, водяна система опалення, витрата води, еволюційний алгоритм, управління проектами

## PARAMETRIC IDENTIFICATION OF WATER HEATING SYSTEMS FOR PROJECT MANAGEMENT DURING OPERATION

IRODOV V. F. <sup>1\*</sup>, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,  
CHERNOIVAN A. A. <sup>2</sup>, *head of lab., ass.*

<sup>1\*</sup> Department of System Analysis and Modeling in Heat and Gas Supply, State Higher Education Establishment “Pridneprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-A, Chernishevskogo str., Dnipro 49600, Ukraine, phon. +38 (056) 756-34-06, e-mail: vfirodov@i.ua, ORCID ID: 0000-0001-8772-9862

<sup>2</sup> Department of System Analysis and Modeling in Heat and Gas Supply, State Higher Education Establishment “Pridneprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-A, Chernishevskogo str., Dnipro 49600, Ukraine, phon. +38 (056) 756-33-49, e-mail: chernoivan@i.ua, ORCID ID: 0000-0003-0406-0601

**Abstract. Purpose.** It is proposed to determine hydraulic parameters of water heating systems during operation to use identification of hydraulic circuit. The mathematical model of the hydraulic circuit is the model with concentrated parameters. The main parameters of the hydraulic circuit are: flow rates at circuit jets, flow rates at circuit edges of the graph, pressure at circuit jets and difference pressure at circuit edges, hydraulic resistances of circuit edges. Identification of the hydraulic circuit is performed by the method of “mathematical flowmeter”. **Methodology.** There are measuring of some parameters of the circuit in the base of the method and comparison of calculated and experimental data. Experimental flow rates are determined by the mark method. Thermal mark is proposed for velocity marking at water heating systems. It is impossible to measure flow velocity at all edges of the graph. So problem identification of hydraulic circuit is not correctly formulated. It is necessary use additional criterion (stabilization) for the solving of not correctly identification. **Findings.** Two criterions were proposed for parameter identification of the circuit. First criterion is the difference between calculated and experimental flow rates. Second criterion is standard deviation from hydraulic resistances to the previously known values. The problem of parameter identification of water heating systems transform to problem of mathematical programming. The algorithm of evolutionary search is applied to solution the problem of identification with two criterions. Second criterion is transformed to constraint in the form of inequality. **Originality.** The algorithm of evolutionary search is applied to solution the identification problem with two criterions. The original algorithm deals with search of optimal solutions for binary choice relation. The following assumptions are made for choice relation. The choice relation is relation of non-strict order. The two functions enter the evolutionary algorithm, such as generation function and choice function **Practical value.** Generation function is the special procedure deals with scalar parameters (continuous or discrete). Some parallel evolutionary processes are fulfilled, which name the branches of evolution. After every step of iterate the parameters of the evolutionary search are calculated for another iterate step. There is convergence proof with probability 1 (almost sure convergence) for non-convex binary choice relations. Identification of hydraulic resistances of water heating systems during exploitation is proposed as a stage of project management.

**Keywords:** identification of hydraulic circuit, thermal mark, water heating system, flow meter, evolution algorithm, project management

### Введение

Эксплуатация трубопроводных систем требует проведения постоянной идентификации основных параметров этих систем для качественного управления гидравлическими режимами трубопроводных систем. Известен общий подход к идентификации параметров трубопроводных систем, получивший название метода «математического расходомера» [6, 7, 9]. В основе этого метода лежит создание нескольких гидравлических режимов и решение избыточной системы уравнений стационарного распределения потоков. Применительно к газопроводным сетям с характерным для них набором измеряемых параметров задача идентификации решалась ранее в [2].

### Цель

Статья посвящена решению задачи идентификации гидравлических параметров водяной системы отопления в процессе эксплуатации. Предполагается использовать измерение расходов по участкам системы с помощью меточного метода. Наличие погрешностей измерения параметров и неполнота состава измеряемых расходов воды компенсируется постановкой задачи идентификации как некорректно поставленной.

### Методика

Для трубопроводной системы отопления в процессе эксплуатации затруднительно использовать набор измерений давления в узлах сети или перепады давления по участкам сети, что приемлемо для газопроводных сетей.

Для водяной системы отопления предложено [3] проводить в качестве измеряемых параметров – расходы по участкам сети, для чего привлекательно применять меточный метод [5] с использованием тепловых меток.

При определении расходов теплоносителя по участкам гидравлической цепи необходимо решать задачу установившегося потокораспределения, которую сформулируем в следующем виде:

$$A \cdot Y + Q = 0 \quad (1)$$

$$Y + A^T P = 0 \quad (2)$$

$$y_i = h_i = \varphi_i \cdot (v_i) \quad i=1, n \quad (3)$$

где:  $A = \{a_{ij}\}$  – матрица соединений сети,  $i=1, n$ ,  $j=1, m-1$ ;

$V = \{v_i\}$  – вектор расходов по участкам,  $i=1, n$ ;

$Y = \{y_i\}$  – вектор разностей потенциалов (давления) на  $\varphi$ -м участке сети,  $i=1, n$ ;

$Q = \{q_j\}$  вектор узловых расходов.  $j = 1, m$ ;

$\varphi_i \cdot (v_i)$  – известная нелинейная функция, зависящая от вида транспортируемой среды и от режимов течения, в число ее аргументов кроме расхода по участку  $v_i$  входят такие параметры, как внутренний диаметр участка трубопровода  $d_i$ , длина участка  $l_i$ , в общем случае, зависящая от конфигурации участка и от наличия на нем местных сопротивлений;

$A^T$  – транспонированная полная матрица соединений;

$h_i$  – потеря давления за счет трения на  $i$ -м участке сети;

$P = \{p_i\}$  – давление в  $i$ -м узле сети.

Требуется определить векторы  $V$  и  $Y$  при известном векторе  $Q$  и функциях  $\varphi_i$ . Как известно [1,7] эта задача имеет единственное решение. Это свойство можно использовать для более рациональной организации информационного обеспечения.

Точность решения задачи потокораспределения зависит от точности идентификации параметров гидравлической цепи и функции  $\varphi_i$ .

Для повышения точности идентификации  $\varphi_i$  предлагается специально решать задачу идентификации параметров.

Опишем процедуру идентификации и задачу идентификации параметров гидравлической цепи.

В системе отопления здания создается несколько независимых гидравлических режимов общим числом режимов  $R$ , для каждого из которых измеряются расходы по отдельным участкам гидравлической цепи.

$$V = \{v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iz}\} \quad (4)$$

Требуется найти вектор  $S$  гидравлических сопротивлений:

$$S = \{s_1, \dots, s_n\} \quad (5)$$

Который обеспечит минимизацию критерия:

$$E = \sum_{i=1}^z \sum_{r=1}^R |V_{uir} - V_{ir}| \quad (6)$$

где:  $v_{ir}$  – расход по  $i$ -му участку гидравлической цепи, вычисленный как решение задачи потокораспределения:

$$A \cdot V_r + Q_r = 0 \quad (7)$$

$$Y_r + A^T \cdot P_r = 0 \quad (8)$$

$$y_{i1} = S_i \cdot V_{ir}^2 \quad r=1 \dots R \quad i=1 \dots n \quad (9)$$

Для избегания некорректности решения задачи потокораспределения целесообразно, кроме критерия (6) ввести дополнительный критерий (стабилизатор) в виде:

$$\Omega = \sum_{i=1}^n (S_i - S_{i0})^2 \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (10)$$

где:  $S_{i0}$  – некоторые известные значения гидравлических сопротивлений участков. На начальном этапе они определяются расчетным путем по формулам гидравлики.

Когда требуется найти вектор гидравлических сопротивлений  $S$ , обеспечивающий минимизацию критерия (10)  $\Omega \rightarrow \min$ , при условии, что второй критерий – (6) не превышает допустимого значения:

$$E \leq \delta \quad (11)$$

где:  $\delta$  - параметр, зависящий от точности измерения расходов  $v_{ir}$ .

Задачи идентификации решаются при вводе системы в эксплуатацию, а также при периодических поверках, наладках и модернизации системы отопления.

Для оперативных расчетов предполагается не решать каждый раз задачу потокораспределения, а пользоваться таблицей решений. Так как для данного значения общего расхода теплоносителя на здание однозначно определяются расходы по всем участкам гидравлической цепи системы отопления, то, решив задачу потокораспределения при различных расходах и имеющихся (фиксированных) значениях гидравлических сопротивлений участков, получим наборы решений задачи потокораспределения. Если вычисления проведены с небольшим шагом изменения общего расхода на здание, то получим таблицу решений, обеспечивающую достаточную точность при интерполяции.

Такой метод оправдан с вычислительной точки зрения. Например, если расход варьировать по 1 проценту, то получим 100 вариантов потокораспределения.

Разработано программное обеспечение для решения задач идентификации. Алгоритм решения основан на использовании эволюционного алгоритма самоорганизации случайного поиска [4, 8] наиболее предпочтительных решений:

$$X_k = S(G(X_{k-1})) \quad k = 1, 2, 3, \dots \quad (12)$$

где:  $X_k$  - множество наиболее предпочтительных решений по отношению выбора  $R_s$   $k$ -го шага итерации;

$X_{k-1}$  - тоже для  $(k-1)$ -го шага итерации;

$G(X)$  - функция генерации, порожденная отношением генерации  $R_G$ ;

$S(X)$  - функция выбора, порожденная отношением выбора  $R_s$ .

Выбор наиболее предпочтительных решений осуществляется путем сравнения возможных решений по критериям идентификации (10) и (11).

Для двух критериев вида (10) и (11) отношение выбора имеет вид:

$$xR_s z \equiv E(x) \leq \delta \text{..} \text{"and"} \text{..} E(z) > \delta \text{..} \text{"or"}$$

$$E(x) > \delta \text{..} \text{"and"} \text{..} E(z) > \delta \text{..} \text{"and"} \text{..} E(x) \leq E(z) \text{..} \text{"or"}$$

$$E(x) \leq \delta \text{..} \text{"and"} \text{..} E(z) \leq \delta \text{..} \text{"and"} \text{..} \Omega(x) \leq \Omega(z) \quad (13)$$

Показано, что решение указанной задачи математического программирования с помощью алгоритма эволюционного поиска (12) обеспечивает сходимость решений к  $R_s$  – оптимальному решению с вероятностью 1.

## Результаты

Два критерия предложено использовать для идентификации гидравлической цепи системы отопления в условиях эксплуатации. Первый критерий – это расхождение между измеренными и вычисленными расходами по участкам сети. Второй критерий – это среднеквадратичное отклонение вычисленных гидравлических сопротивлений от их предварительно известных значений. Задача параметрической идентификации сводится к задаче математического программирования. Алгоритм эволюционного поиска решений используется для решения задачи идентификации с двумя критериями. Второй критерий идентификации преобразуется в ограничение в виде неравенства.

## Научная новизна и практическая значимость

Алгоритм эволюционного поиска применяется для решения задачи идентификации с двумя критериями. Оригинальный алгоритм рассматривается как алгоритм поиска решения по бинарному отношению выбора. Не требуется условие выпуклости отношения выбора. Рассматривается несколько параллельных ветвей эволюционного поиска. На основании отобранных лучших решений предыдущего шага итерации находятся параметры случайного поиска для последующего шага итерации. Имеется доказательство сходимости процесса эволюционного поиска к искомому наиболее предпочтительному решению с вероятностью 1 (почти наверное). Идентификация гидравлических параметров водяной системы отопления рассматривается как стадия управления проектом..

## Выводы

Разработаны принципиальные решения и алгоритмическое обеспечение для осуществления идентификации водяной системы отопления в условиях эксплуатации. Идентификация гидравлических параметров водяной системы отопления рассматривается как обязательная стадия управления инвестиционным проектом.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Евдокимов А. Г. Потокораспределение в инженерных сетях / А. Г. Евдокимов, В. В. Дубровский, А. Д. Тевяшев. – Москва : Стройиздат, 1979. – 199 с.
2. Иродов В. Ф. Идентификация гидравлических сопротивлений трубопроводных сетей методом эволюционного программирования / В. Ф. Иродов, А. Н. Казин // Изв. вузов. Нефть и газ. – 1982. – №10. – С. 64 – 68.
3. Иродов В. Ф. Математическое обеспечение идентификации параметров водяных систем отопления в условиях эксплуатации / В. Ф. Иродов, А. М. Барковский // Математичне та програмне забезпечення інтелектуальних систем : тез доп. – Днепропетровск, 2012. – С.128 – 129.
4. Иродов В. Ф. О построении и сходимости алгоритмов самоорганизации случайного поиска / В. Ф. Иродов // Автоматика. – 1987. – №4. – С. 34–43.
5. Кремлевский П. П. Расходомеры и счетчики веществ : справочник / П. П. Кремлевский. – кн. 2. – Киев : Политехника, 2004. – 412 с.
6. Меренков А. П. Методы и средства для управления эксплуатацией и развитием трубопроводных систем / А. П. Меренков, К. С. Светлов, В. Я. Хасилев // Оптимизация и управление в больших системах энергетики. – 1970. – т. 1. – С. 60 – 80.
7. Меренков А. П. Теория гидравлических цепей / А. П. Меренков, В. Я. Хасилев. – М.: Наука, 1985. – 278 с.
8. Irodov V.F. The construction and convergence of evolutionary algorithms of random search for self-organization / V. F. Irodov // Sov. J. Autom. Inf. Sci. – 1987. – issue 20, No. 4. – pp. 32-41.
9. Merenkov A. P. Direct and inverse problems of flow distribution in hydraulic circuits / A. P. Merenkov, N. N. Novitsky, V. G. Sidler // Soviet. Techno. Rev./ Sec/ Ai Energy Rev. – U.S.A., 1994. – issue 7, Part 4. – pp. 33-95.

## REFERENCES

1. Evdokimov A.G. and Dubrovskiy V.V. *Potokoraspredelenie v injenernih setyah* [Flow in engineering networks]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1979. 199 p. (in Russian).
2. Irodov V.F. and Kasin A.N. Identifikaciya gidravlicheskih soprotivleniy truboprovodnih setey metodom evolucionnogo programirovaniya [Identification of water supply systems hydraulic resistance by evolutionary programming method]. *Izv. Vuzov. Neft i gas – Proc. Higher education. Oil and gas*, 1982, no. 10, pp. 64–68. (in Russian).
3. Irodov V.F. and Barkovski A.M. Matematicheskoe obespechenie identifikacii parametrov vodyanah system otopeniya v usloviyah ekspluatatsii [Identification water heating parameters software under operating conditions]. *Matematichne ta programne zabezpechennya intelektualnih system* [Mathematical and software of intellectual systems]. Dnipropetrovsk, 2012, pp. 128–129. (in Russian).
4. Irodov V.F. *O postroenii i skhodimosti algoritmov samoorganizatsii sluchaynogo poiska* [The construction and convergence of random search algorithms for self-organization]. *Avtomatika – Automation*, 1987, issue 4, pp. 34–43. (in Russian).
5. Kremlevskii P.P. *Rashodomery i schetchiki veshestv* [Flow meters and substances counters]. Kiev, Politehnika Publ., 2004. 412 p. (in Russian).
6. Merenkov A.P., Svetlov K.S. and Hasilev V.Ya. *Metody i sredstva dlya upravleniya ekspluatatsiey i razvitiem truboprovodnih system* [Methods and resources for operation controlling and developing of pipeline systems]. *Oprimizaciya i upravlenie v bolshih systemah energetiki* [Optimization and management of large-scale power systems], 1970, pp. 60–80. (in Russian).
7. Merenkov A.P. and Hasilev V.Ya. *Teoriya gidravlicheskih cepey* [Hydraulic circuit theory]. Moscow, Nauka Publ., 1985. 279 p. (in Russian).
8. Irodov V.F. *The construction and convergence of evolutionary algorithms of random search for self-organization*. *Sov. J. Autom. Inf. Sci. Publ.*, 1987, issue 20, No. 4, pp. 32-41. (in English).
9. Merenkov A.P., Novitsky N.N. and Sidler V.G. *Direct and inverse problems of flow distribution in hydraulic*. *Soviet. Techno. Rev. Sec. Ai Energy Rev.* Harwood Academic Publishes, U.S.A., 1994, issue 7, Part 4, pp. 33–95. (in English).

Стаття надійшла в редколегію 01.09.2016