

УДК 697.4:681.12.08

## АЛГОРИТМЫ ЭВОЛЮЦИОННОГО ПОИСКА В ЗАДАЧАХ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ВОДЯНЫХ СИСТЕМ ОТОПЛЕНИЯ

БОГОМОЛ Д. Е.<sup>1\*</sup>, *аспир.*,  
ИРОДОВ В. Ф.<sup>2</sup>, *д.т.н, проф.*,  
ЛЕВКОВИЧ О. А.<sup>3</sup>, *к.физ-мат.н, доц.*,  
ЧЕРНОЙВАН А. А.<sup>4</sup>, *зав. лаб., ассист.*

<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: bogomol1992@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-0955-9065

<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) 756-34-06, e-mail: vfirodov@i.ua, ORCID ID: 0000-0001-8772-9862

<sup>3</sup> Кафедра высшей математики, Государственное высшее учебное заведение "Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры", ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепр, Украина, тел. +38 (067) 562-55-89, e-mail: levk.olga77@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-2303-8661

<sup>4</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.* Рассматривается решение двух задач, которые обеспечивают внутридомовой учет потребления тепловой энергии в существующих водяных системах отопления. Выделены следующие задачи: 1 – задача распределения потоков в водяной системе отопления; 2 – задача идентификации гидравлических сопротивлений системы отопления. 3 – задача распределения потоков в реальном времени. Математическая модель системы отопления представляется в виде гидравлической цепи 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 алгоритмов лежит алгоритм случайного поиска наиболее предпочтительных решений по бинарному отношению выбора. В задаче распределения потоков, используя метод контурных расходов, минимизируется один критерий – критерий рассогласования выполнения второго закона Кирхгофа для контуров сети. В задаче идентификации используются два критерия: критерий рассогласования измеренных и вычисленных параметров гидравлической цепи а также критерий отклонения найденных гидравлических сопротивлений от их предварительных оценок. Последний критерий обеспечивает стабилизацию решения некорректно поставленной обратной задачи идентификации. *Результаты.* Построены бинарные отношения выбора для решения указанных задач. Общая структура алгоритмов эволюционного поиска не меняется, эволюционный алгоритм включает две функции: функцию генерации и функцию выбора решений по бинарному отношению выбора. Здесь в виде функции выбора для обеих задач используется функция предпочтения. Задача параметрической идентификации сводится к задаче математического программирования. Второй критерий идентификации преобразуется в ограничение в виде неравенства. *Научная новизна.* Разработано алгоритмическое обеспечение для идентификации параметров водяной системы отопления. При этом используется легко доступное измерение параметров при первоначальной идентификации и при контроле параметров системы отопления в процессе эксплуатации. Для алгоритмов эволюционного поиска не требуется условие выпуклости отношения выбора. *Практическая значимость.* Разработанное алгоритмическое обеспечение предназначено для оперативного контроля основных параметров водяных систем отопления в процессе эксплуатации. Вместе с необходимым техническим обеспечением оно позволяет создавать системы автоматического контроля потребления тепла отдельными потребителями системы отопления.

**Ключевые слова:** алгоритмическое обеспечение; идентификация гидравлической цепи; водяная система отопления; эволюционный поиск

## АЛГОРИТМИ ЕВОЛЮЦІЙНОГО ПОШУКУ В ЗАДАЧАХ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ПАРАМЕТРІВ ВОДЯНИХ СИСТЕМ ОПАЛЕННЯ

БОГОМОЛ Д. Є.<sup>1\*</sup>, *аспір.*,  
ИРОДОВ В. Ф.<sup>2</sup>, *д.т.н, проф.*,  
ЛЕВКОВИЧ О. О.<sup>3</sup>, *к.физ-мат.н, доц.*,  
ЧОРНОЙВАН А. А.<sup>4</sup>, *зав. лаб., асист.*

<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: bogomol1992@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-0955-9065

<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) 756-34-06, e-mail: vfirodov@i.ua, ORCID ID: 0000-0001-8772-9862

<sup>3</sup> Кафедра вищої математики, Державний вищий навчальний заклад "Придніпровська державна академія будівництва та архітектури", вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (067) 562-55-89, e-mail: levk.olga77@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-2303-8661

<sup>4</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

**Анотація. Мета.** Розглядається рішення двох задач, які забезпечують внутрішньобудинковий облік споживання теплової енергії в існуючих водяних системах опалення. Виділено наступні задачі: 1 - задача розподілу потоків у водяній системі опалення; 2 - задача ідентифікації гідравлічних опорів системи опалення; 3 – задача розподілу потоків у водяній системі опалення у реальному часі. Математична модель системи опалення представляється у вигляді гідравлічної ланцюга з зосередженими параметрами. Основними параметрами математичної моделі є: витрати по ділянках ланцюга, витрати у вузлах ланцюга, тиск у вузлах ланцюга і різниця тиску по ділянках ланцюга, гідравлічні опору ділянок ланцюга. Ідентифікація параметрів гідравлічної ланцюга здійснюється методом «математичного витратоміра» *Методика*. В основі алгоритму лежить алгоритм випадкового пошуку найбільш бажаних рішень за бінарним відношенню вибору. У задачі розподілу потоків, використовуючи метод контурних витрат, мінімізується один критерій - критерій неузгодженості виконання другого закону Кірхгофа для контурів мережі. У задачі ідентифікації використовуються два критерії: критерій неузгодженості виміряних і обчислених параметрів гідравлічної ланцюга а також критерій відхилення знайдених гідравлічних опорів від їх попередніх оцінок. Останній критерій забезпечує стабілізацію рішення некоректно поставленої оберненої задачі ідентифікації. **Результати.** Побудовано бінарні відносини вибору для вирішення зазначених задач. Загальна структура алгоритмів еволюційного пошуку не змінюється, еволюційний алгоритм включає дві функції: функцію генерації і функцію вибору рішень за бінарним відношенню вибору. У вигляді функції вибору для обох задач використовується функція переваги. Завдання параметричної ідентифікації зводиться до задачі математичного програмування. Другий критерій ідентифікації перетворюється в обмеження у вигляді нерівності. **Наукова новизна.** Розроблено алгоритмічне забезпечення для ідентифікації параметрів водяної системи опалення. При цьому використовується легко доступне вимірювання параметрів при первісній ідентифікації та при контролі параметрів системи опалення в процесі експлуатації. Для алгоритмів еволюційного пошуку не потрібна умова опуклості відносини вибору. **Практична значимість.** Розроблено алгоритмічне забезпечення призначене для оперативного контролю основних параметрів водяних систем опалення в процесі експлуатації. Разом з необхідним технічним забезпеченням воно дозволяє створювати системи автоматичного контролю споживання тепла окремими споживачами системи опалення.

**Ключові слова:** алгоритмічне забезпечення; ідентифікація гідравлічної мережі; водяна система опалення; еволюційний пошук

## EVOLUTIONARY SEARCH ALGORITHMS OF PARAMETERS IDENTIFICATION FOR WATER HEATING SYSTEMS

BOGOMOL D. E. <sup>1\*</sup>, *Grad. Stud.*,

IRODOV V. F. <sup>2</sup>, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,

LEVKOVICH O. A. <sup>3</sup>, *Cand. Sc.(Ph.-mat.), Associate Prof.*

CHERNOIVAN A. A <sup>4</sup>, *head of lab., Assist. Prof.*

<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: : bogomol1992@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-0955-9065

<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) 756-34-06, e-mail: vfirodov@i.ua, ORCID ID: 0000-0001-8772-9862

<sup>3</sup> Department of Higher Mathematics, State Higher Education Establishment "Pridneprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-A, Chernishevskogo str., Dnipro 49600, Ukraine, phon. +38 (056) 756-34-53, e-mail: levk.olga77@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-2303-8661

<sup>4</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.** We consider the solution of two tasks that provide an intra-house accounting for the consumption of thermal energy in existing water heating systems. The following tasks are distinguished: 1 - the problem of distribution of flows in the water heating system; 2 - the problem of identifying the hydraulic resistance of the heating system. 3 - the task of distributing flows in real

time. 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.** The algorithms are based on the algorithm of random search of the most preferred solutions with respect to the binary choice relation. In the problem of distribution of flows using the method of contour expenditure, one criterion is minimized: the criterion of the mismatch of the fulfilment of Kirchhoff's second law for network contours. In the identification problem, two criteria are used: a criterion for mismatching the measured and calculated parameters of the hydraulic circuit and also a criterion for deviating the found hydraulic resistances from their preliminary estimates. The latter criterion ensures the stabilization of the solution of the ill-posed inverse identification problem. **Findings.** Binary relations of choice for solving these problems are constructed. The general structure of the algorithms of evolutionary search does not change, the evolutionary algorithm includes two functions: the generation function and the decision selection function with respect to the binary choice relation. Here, the preference function is used as a selection function for both tasks. The problem of parametric identification reduces to the problem of mathematical programming. The second identification criterion is transformed into a restriction in the form of an inequality. **Originality.** The algorithmic support for the identification of the parameters of the water heating system has been developed. At the same time, an easily accessible measurement of parameters is used for initial identification and for monitoring the parameters of the heating system during operation. For evolution search algorithms, the convexity condition of the choice relation is not required. **Practical value.** The developed algorithmic support is intended for the operational control of the main parameters of the water heating systems during operation. Together with the necessary technical support, it allows the creation of systems for automatic control of heat consumption by individual consumers of the heating system.

**Keywords:** algorithmic support; identification of the hydraulic circuit; water heating system; evolutionary search

## Введение

Ранее [6] был предложен способ определения потребляемой тепловой энергии потребителями водяной системы отопления. Этот способ основывался на использовании метода «математического расходомера» [4,5,10]. В основе этого метода лежит создание нескольких гидравлических режимов и решение избыточной системы уравнений стационарного распределения потоков. Созданию методического и технического обеспечения для реализации способа [6] посвящены наши статьи [2,8]. Данная статья посвящена разработке алгоритмического обеспечения для реализации способа [6].

## Цель

Для реализации способа [6] необходимо решать несколько задач и разрабатывать для их решения необходимое алгоритмическое обеспечение. Ставилась цель разработать алгоритмическое и программное обеспечение на единой основе, а именно, использовать эволюционные алгоритмы случайного поиска решений.

## Методика

Выделены следующие три задачи для реализации способа [6]:

1 – задача распределения потоков при известных значениях гидравлических сопротивлений всех участков гидравлической цепи;

2 – задача идентификации гидравлических сопротивлений в процессе эксплуатации;

3 – задача распределения потоков по гидравлической цепи в реальном времени.

В качестве основы использовались алгоритмы эволюционного поиска решений по бинарному

отношению выбора [2,7]. Алгоритмы основаны на использовании эволюционного алгоритма самоорганизации случайного поиска [9,10] наиболее предпочтительных решений.

Рассматривается задача поиска решения  $x_0 \in \Omega$  из элементов  $x = \{x^1, x^2, \dots, x^n\}$ , такого что  $\forall x \in \Omega, x_0 R_S x$  где  $R_S$  – известное бинарное отношение выбора, которое является отношением нестрого порядка. Следуя [9,10], эволюционный поиск имеет вид:

$$X_{jk} = S(G(X_{jk-1})), \quad j = \overline{1, N_B}, \quad k = 1, 2, \quad (1)$$

где:  $S(X)$  – функция выбора, которая имеет вид:

$$S(X) = \{x \in X | \forall y \in [X \setminus S(X)], x R_S y\}, \quad (2)$$

$G_H(X)$  – функция генерации, которая имеет вид:

$$G_H(X) = \{y \in \Omega | \exists x \in X, y R_G x, \mu_{R_G}(x, y) > 0\}, \quad (3)$$

$R_G$  – известное нечеткое отношение (генерации) с функцией принадлежности:

$$\mu_{R_G}(x, y) : \Omega \times \Omega \rightarrow [0, 1]. \quad (4)$$

Операторная схема основного алгоритма имеет следующий вид

где:  $\Omega_1$  – начало;  $W_2$  – генерация возможных решений в количестве  $N_E$  для каждой из  $N_G$  вервей эволюции;  $W_3$  – вычисление целевых функций  $F_{jk}$ ; для каждого  $j$ -го возможного решения  $k$ -ой ветви эволюции;  $W_4$  – выбор  $N_K$  предпочтительных решений из  $N_E$  для каждой ветви эволюции на основе вычисленных целевых функций  $F_{jk}$ ;  $W_5$  – вычисление параметров генерируемых новых решений для следующего шага итерации;  $P_6$  –

достигнута заданная точность эволюционного поиска? Если «ДА», то переходим на  $W_7$ , если «НЕТ», то переходим на новый шаг итерации – на  $W_2$ ;  $W_7$  – вычисление средних значений искомым параметров для всех отбираемых решений по всем вервям эволюции;  $\Omega_8$  – конец поиска решения.

Для задачи 1 математическая модель распределения потоков в гидравлической цепи с сосредоточенными параметрами [1,5,11] представляется в виде

$$A \cdot Y + Q = 0 \quad (5)$$

$$Y + A^T P = 0 \quad (6)$$

$$y_i = h_i = \varphi_i(v_i) \quad i=1, 2, \dots, n \quad (7)$$

где:  $A = \{a_{ji}\}$  – матрица соединений сети,  $i=1, 2, \dots, n, j=1, m-1$ ;

$V = \{v_i\}$  – вектор расходов по участкам,  $i=1, 2, \dots, n$ ;

$Y = \{y_i\}$  – вектор разностей потенциалов (давления) на  $\varphi$ -м участке сети,  $i=1, 2, \dots, n$ ;

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

$\varphi_i(v_i)$  – 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 давление 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 [1,5] 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.

$$V = \{v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iz}\} \quad (8)$$

Требуется найти вектор  $S$  гидравлических сопротивлений:

$$S = \{s_1, \dots, s_n\} \quad (9)$$

Который обеспечит минимизацию критерия:

$$E = \sum_{i=1}^z \sum_{r=1}^R |V_{uir} - V_{ir}| \quad (10)$$

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

$$A \cdot V_r + Q_r = 0 \quad (11)$$

$$Y_r + A^T \cdot P_r = 0 \quad (12)$$

$$y_{i1} = S_1 \cdot V_{ir}^2 \quad r=1 \dots R \quad i=1, 2, \dots, n \quad (13)$$

Для преодоления некорректности решения задачи распределения потоков целесообразно, кроме критерия (10) ввести дополнительный критерий (стабилизатор) в виде:

$$\Omega = \sum_{i=1}^n (S_i - S_{i0})^2 \quad i=1, 2, \dots, n \quad (14)$$

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

Тогда требуется найти вектор гидравлических сопротивлений  $S$ , обеспечивающий минимизацию критерия (14)  $\Omega \rightarrow \min$ , при условии, что второй критерий – (10) не превышает допустимого значения:

$$E \leq \delta \quad (15)$$

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

Выбор наиболее предпочтительных решений осуществляется путем сравнения возможных решений по критериям идентификации (10) и (14).

Для двух критериев вида (10) и (14) отношение выбора имеет вид:

$$\begin{aligned} xR_S z \equiv E(x) \leq \delta \text{..} \text{and} \text{..} E(z) > \delta \text{..} \text{or} \text{..} \\ E(x) > \delta \text{..} \text{and} \text{..} E(z) > \delta \text{..} \text{and} \text{..} E(x) \leq E(z) \text{..} \text{or} \text{..} \\ E(x) \leq \delta \text{..} \text{and} \text{..} E(z) \leq \delta \text{..} \text{and} \text{..} \Omega(x) \leq \Omega(z) \end{aligned} \quad (16)$$

Показано [9,10], что решение указанной задачи математического программирования с помощью алгоритма эволюционного поиска (1) обеспечивает сходимость решений к  $R_S$  – оптимальному решению с вероятностью 1.

**Утверждение 1.** Если  $R_S^+(x)$  – верхние сечения по отношению выбора  $R_S$  обладают свойством:

$$\forall x \neq x_0, \text{mes} R_S^+(x) > 0, \quad (17)$$

а функция генерации такова, что если  $x_H \in G_H(X)$ , то

$$\forall x \neq x_0, P\{x_H \in R_S^+(x)\} \geq \delta > 0, \quad (18)$$

то каково бы ни было  $x \in \Omega$ ,  $x \neq x_0$ , найдется такой номер  $K$ , что для всех  $k \geq K$  и для всех ветвей поиска  $j = \overline{1, N_B}$  с вероятностью 1 будет выполняться требование  $x_{jk} \subset R_S^+(x)$ , что доказывает сходимость итерационного процесса (1) с вероятностью 1 к  $R_S$ -оптимальному решению для всех ветвей эволюционного поиска  $j = \overline{1, N_B}$ .

Пусть теперь требуется определить решение  $x \in \Omega$ , такое, что  $E(x) \leq 0$ , и для всех  $y \in \Omega$  и таких, что  $E(y) \leq 0$  выполняется  $xR_S y$ . То есть требуется среди всех решений, принадлежащих  $\Omega$  и удовлетворяющих неравенству  $E(x) \leq 0$ , найти  $R_S$ -оптимальное решение. Построим новое бинарное отношение  $R_{SS}$ , которое учитывает ограничение в виде неравенства, следующим образом:

$$\begin{aligned} xR_{SS}y = & [E(x) \leq 0 \cap E(y) > 0] \cup \\ & \cup [E(x) > 0 \cap E(y) > 0 \cap E(x) \leq E(y)] \cup \\ & \cup [E(x) \leq 0 \cap E(y) \leq 0 \cap xR_S y]. \end{aligned} \quad (19)$$

**Утверждение 2.** Если верхние сечения  $R_{SS}^+(x)$  по отношению выбора  $R_{SS}$ , обладают свойством (17), а функция генерации (3) обладает свойством (18) и  $R_S$ -отношение выбора, нестрого порядка, то алгоритм (1) с отношением выбора (19) обеспечивает сходимость последовательности  $X_k$  к  $R_{SS}$ -оптимальному решению с вероятностью 1 для всех ветвей эволюционного поиска.

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

Сформулированные утверждения 1 и 2 дают достаточные условия для сходимости эволюционного поиска решения указанных выше задач 1 и 2. При этом для сходимости эволюционного поиска не требуется условие выпуклости отношения выбора. Достаточные условия сходимости оставляют широкие возможности для конкретного построения функции генерации

Для оперативных расчетов предполагается не решать каждый раз задачу распределения потоков, а пользоваться таблицей решений. Для некоторого

конкретного значения общего расхода теплоносителя на здание однозначно определяются расходы по всем участкам гидравлической цепи системы отопления. Решив задачу распределения потоков при различных расходах и имеющихся (фиксированных) значениях гидравлических сопротивлений участков, получим наборы решений задачи распределения потоков. 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 0,1 проценту, то получим 1000 вариантов распределения.

Результат решения задачи распределения потоков по гидравлической цепи в реальном времени можно представить в виде зависимости

$$V(\tau) = \{V_i(\tau)\} = Z(q_1(\tau)), \quad i=1, 2, \dots, n \quad (20)$$

где:  $q_1(\tau)$  – значение узлового расхода в момент  $\tau$  в узле источнике гидравлической цепи.

## Результаты

Выделены три задачи, решение которых обеспечивает идентификацию параметров водяных систем отопления в процессе эксплуатации: распределение потоков в гидравлической цепи; идентификация гидравлических сопротивлений участков цепи; распределение потоков в гидравлической цепи в реальном режиме времени. Для каждой задачи разработано алгоритмическое обеспечение.

## Научная новизна и практическая значимость

Разработано алгоритмическое обеспечение для идентификации параметров водяной системы отопления. При этом используется легко доступное измерение параметров при первоначальной идентификации и при контроле параметров системы отопления в процессе эксплуатации. Для алгоритмов эволюционного поиска не требуется условие выпуклости отношения выбора.

## Выводы

Разработанное алгоритмическое обеспечение предназначено для оперативного контроля основных параметров водяных систем отопления в процессе эксплуатации. Вместе с необходимым техническим обеспечением оно позволяет создавать системы автоматического контроля потребления тепла отдельными потребителями системы отопления.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

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. О построении и сходимости алгоритмов самоорганизации случайного поиска / В. Ф. Иродов // Автоматика. – 1987. – №4. – С. 34–43.
4. 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.
5. Меренков А. П. Теория гидравлических цепей / А. П. Меренков, В. Я. Хасилев. – М.: Наука, 1985. – 278 с.
6. Спосіб визначення споживаної теплової енергії споживачами водяної системи опалення: пат. 25153 А Україна: МПК G01K 17/08 / Ганенко Д.Б., Дудкін К.В., Иродов В.Ф., Колмик К.А., Міняйло В.А., Рудий А.Ю.(Україна); заявники Ганенко Д.Б., Дудкін К.В., Иродов В.Ф., Колмик К.А., Міняйло В.А., Рудий А.Ю.(Україна) - №96020796, заявл. 29.02.96; опубл.30.10.98. – 2 с.
7. Стратан Ф. И. Эволюционные алгоритмы поиска оптимальных решений / Ф. И. Стратан, В. Ф. Иродов // Методы оптимизации при проектировании систем теплогазоснабжения. – Кишинев, 1984. – С. 16–30.
8. Черноиван А.А. О возможности использования тепловой метки для оценки расходов в водяной системе отопления/ А.А.Черноиван, В.Ф.Иродов // Строительство, материаловедение, машиностроение : сб. науч. тр. / Приднeпр. гос. академии стр-ва и архитектуры; под общ. ред. В. И. Большакова. – Днепр, 2017. –Вып. 94. – С. 186–189.
9. 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.
10. Irodov V.F/ Convergence of the evolutionary algorithms for optimal solution with binary choice relations/ V.F.Irodov, Yu.V.Khatskevych// Строительство, материаловедение, машиностроение : сб. науч. тр. / Приднeпр. гос. академии стр-ва и архитектуры; под общ. ред. В. И. Большакова. – Днепр, 2017. – Вып. 98. – С. 91–96.
11. 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. *Potokoraspredeleniye v inzhenernykh setiakh* [Flow in engineering networks]. Moscow: Stroyizdat Publ., 1979, 199 p. (in Russian).
2. Irodov V.F. and Kasin A.N. *Identifikatsiya gidravlicheskiykh soprotivleniy truboprovodnykh setey metodom evoliutsionnogo programmirovaniya* [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. *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).
4. Merenkov A.P., Svetlov K.S. and Hasilev V.Ya. *Metody i sredstva dlia upravleniya ekspluatatsiyey i razvitiyem truboprovodnykh sistem* [Methods and resources for operation controlling and developing of pipeline systems]. *Oprimizatsiya i upravleniye v bolshikh sistemakh energetiki* [Optimization and management of large-scale power systems], 1970, pp. 60–80. (in Russian).
5. Merenkov A.P. and Hasilev V.Ya. *Teoriya gidravlicheskiykh tsepey* [Hydraulic circuit theory]. Moscow: Nauka Publ., 1985, 279 p. (in Russian).
6. *Sposib viznachennia spozhivanoi teplovoi enerhii spozhivachamy vodianoj systemy opalennia* [Method of determination of consumable thermal energy by the consumers of the aquatic system of heating]: pat. 25153 A Ukraina MPK G01K 17/08 / Ganenko D.B., Dudkin K.V., Irodov V.F., Kolmik K.A., Minyailo V.A. and Rudii A.Yu.(Ukraine); zaiavnyky Ganenko D.B.,Dudkin K.V.,Irodov V.F., Kolmik K.A., Minyailo V.A., Rudii A.Yu.(Ukraine) - №96020796, zayavl. 29.02.96; opubl.30.10.98.- 2 p. (in Ukrainian).
7. Stratan F.I. and Irodov V.F. *Evoliutsionnyye algoritmy poiska optimalnykh resheniy* [Evolutionary algorithms search for optimal solutions]. *Metody optimizatsii pri proyektirovanii sistem teplogazosnabzheniia* [Methods of optimizing for design of heating systems], 1984, pp. 16–30. (in Russian).
8. Chernoiivan A.A. and Irodov V.F. *O vozmozhnosti ispolzovaniia teplovoi metki dlia otsenki raskhodov v vodianoj sisteme otopleniia* [The possibility of using thermal mark for estimation flow meters in water heatig system] *Stroitel'stvo, materialovedeniye, mashinostroeniye* [Construction, Materials Science, Mechanical Engineering]. *Pridnepr. gos. akad. str-va i arkhitektury* [Prydniprov's'ka State Academy of Civil Engineering and Architecture]. Dnepr, 2017, iss. 94, pp. 186–189. (in Russian).
9. 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.
10. Irodov V.F / Convergence of the evolutionary algorithms for optimal solution with binary choice relations/ V.F.Irodov, Yu.V.Khatskevych // *Stroitel'stvo, materialovedeniye, mashinostroeniye* [Construction, Materials Science, Mechanical Engineering]. *Pridnepr. gos. akad. str-va i arkhitektury* [Prydniprov's'ka State Academy of Civil Engineering and Architecture]. Dnepr: 2017, issue 98, pp. 91–96.
11. 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.