

УДК 681.5.015

Н. В. ФЕДОРОВ, А. М. ХРЕНОВ

СТРУКТУРНАЯ И ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ЛОКАЛЬНОЙ ПОДСИСТЕМЫ ИНЖЕНЕРНОЙ СЕТИ

Рассматривается задача определения оптимальной структуры и параметров функционирования локальной подсистемы инженерной сети, при заданных граничных условиях. Локальная подсистема состоит из активных и пассивных элементов, образующих сложную сетевую структуру. Проведена декомпозиция задачи оптимизации локальной подсистемы инженерной сети. Предложены алгоритмы определения оптимального распределения расходов целевого продукта и соответствующих им давлений на входах сети, а также выбора рациональной структуры линейной части магистрального газопровода, в основе которого лежит один вариант поиска коллективом автоматов Буша-Мостеллера.

Ключевые слова: инженерная сеть, локальная подсистема, оптимизация, магистральный газопровод, декомпозиция, рациональная структура

Розглядається задача визначення оптимальної структури та параметрів функціонування локальної підсистеми інженерної мережі, при заданих граничних умовах. Локальна підсистема складається з активних і пасивних елементів, що утворюють складну мережеву структуру. Проведена декомпозиція задачі оптимізації локальної підсистеми інженерної мережі. Запропоновано алгоритми визначення оптимального розподілу витрат цільового продукту і відповідних їм тисків на входах мережі, а також вибору раціональної структури лінійної частини магистрального газопроводу, в основі якого лежить один варіант пошуку колективом автоматів Буша-Мостеллера.

Ключові слова: інженерна мережа, локальна підсистема, оптимізація, магистральний газопровід, декомпозиція, раціональна структура

The problem of determining the optimal structure and parameters of the functioning of a local subsystem of an engineering network, under given boundary conditions, is considered. It is shown that this task has a hierarchical structure, corresponding tasks are formulated for each level of the hierarchy. The local subsystem consists of active and passive elements forming a complex network structure. The solution of the problem of finding the optimal structure and parameters of the active elements of the local subsystem can be obtained by solving the problem of determining the optimal structure of the linear part and the problem of determining the optimal structure and parameters of the compressor station for a given structure of the linear part. Determination of the optimal structure and parameters of the compressor station, in turn, reduces to solving the problem of determining the optimal distribution of gas flow through the inputs of the linear part and the problem of determining the optimal structure and control parameters of the compressor station. Decomposition of the optimization problem of the local subsystem of the engineering network is carried out. Algorithms are proposed for determining the optimal distribution of the target product costs and the corresponding pressures at the grid inputs, as well as choosing the rational structure of the linear part of the main gas pipeline, which is based on one variant of searching for the Bush-Mosteller automata.

Keywords: engineering network, local subsystem, optimization, main gas pipeline, decomposition, rational structure

Введение. Под инженерной сетью понимают различные системы энергоснабжения, к которым условно относят и системы газо- и водоснабжения, а также тепловые сети [1,2]. Некоторые из таких систем, в частности системы магистрального газоснабжения, имеют сложную структуру, компонентами которой являются локальные подсистемы [3,4]. Для успешного управления работой всей системы необходимо уметь находить оптимальные режимы работы локальных подсистем при заданных граничных условиях [5,6,7].

Цель работы. Задачу структурной и параметрической оптимизации локальной подсистемы инженерной сети рассмотрим на примере оптимизации локальной подсистемы магистрального газопровода. Такая система состоит из двух частей: активной части и пассивной части. Под активной частью понимается компрессорная станция (КС), а под пассивной – сеть магистрального газопровода, прилегающая к данной компрессорной станции.

В качестве критерия оптимизации работы локальной подсистемы магистрального газопровода целесообразно принять критерий минимума энергозатрат N [8].

Вектор управляемых переменных локальной подсистемы магистрального газопровода может быть представлен в виде

$$\bar{r} = \{P_v, \bar{q}_{vx}, \bar{b}, \bar{u}\}, \quad (1)$$

где P_v – давление на входе компрессорной станции; \bar{q}_{vx} – вектор переменных, определяющий распределение поставок газа между потребителями подсистемы;

\bar{b} – вектор переменных определяющий структуру подсистемы; \bar{u} – вектор управления активными элементами подсистемы. P_v и компоненты вектора \bar{q}_{vx} для данной задачи считаются заданными.

Таким образом целью работы является определение компоненты векторов \bar{b} и \bar{u} при которых достигается минимума энергозатрат N . Значения \bar{b} и \bar{u} должны быть определены в результате решения задачи структурной и параметрической оптимизации локальной подсистемы.

Декомпозиция задачи оптимизации локальной подсистемы инженерной сети. Конкретная структура сети устанавливается заданием положения запорных задвижек сети. Каждая задвижка может иметь два положения «открыто» - «закрыто». Компоненты вектора \bar{b} являются двоичными переменными (1 – задвижка открыта, 0 – задвижка закрыта). Представим вектор в виде совокупности двух векторов:

$$\bar{b} = \{\bar{b}_a, \bar{b}_p\} \quad (2)$$

где \bar{b}_a – вектор переменных, определяющих структуру S_1 компрессорной станции; \bar{b}_p – вектор переменных, определяющих структуру S_2 линейной части локальной подсистемы.

Активными элементами локальной подсистемы магистрального газопровода являются газоперекачивающие аппараты, установленные на компрессорной станции.

© Н. В. Федоров, А. М. Хренов. 2017

При заданных значениях P_v и \bar{q}_{vx} для структуры S_2 существует множество V_d допустимых наборов $\{S_1, \bar{u}\}$.

Множество структур линейной части, для которых при заданных условиях транспорта и распределения газа существуют непустые множества V_d называется, множеством допустимых структур T_d .

Оптимальный режим функционирования локальной подсистемы определяется как результат минимизации выбранного критерия N на множестве $\{(S_1, \bar{u}) \in V_d, S_2 \in T_d\}$ при заданных значениях P_v и \bar{q}_{vx} .

Вектор управлений $\{S_1^*, \bar{u}^*\}$, для которого выполняется равенство

$$N(S_1^*, \bar{u}^*, S_2) = \min_{\{(S_1, \bar{u}) \in V_d\}} N(S_1, \bar{u}, S_2), \quad S_2 \in T_d \quad (3)$$

будем называть вектором оптимальных управлений компрессорной станцией при структуре S_2 .

Оптимальная структура линейной части определяется в результате решения задачи вида:

$$N(S_1^{**}, \bar{u}^{**}, S_2) = \min_{S_2 \in T_d} N(S_1^*, \bar{u}^*, S_2) \quad (4)$$

Структура S_2^* называется оптимальной структурой, соответствующей заданным условиям транспорта и распределения газа.

Таким образом, решение исходной задачи отыскания оптимальной структуры и параметров активных элементов локальной подсистемы может быть получено путем решения задачи определения оптимальной структуры линейной части и задачи определения оптимальной структуры и параметров компрессорной станции при заданной структуре линейной части.

Обозначим \bar{P}_{vixs} – вектор переменных, определяющих давления на выходах компрессорной станции; \bar{q}_{vixs} – вектор переменных, определяющих расходы на выходах компрессорной станции.

Переменные определяющие значения давлений и расходов на выходах КС в то же время являются переменными, определяющими значения давлений и расходов на входах линейной части локальной подсистемы.

Для заданных значений компонент векторов \bar{q}_{vx} и \bar{q}_{vixs} и известных ограничениях на значения давлений на выходах сети можно рассчитать минимальные значения давлений на входах сети (или что то же самое – на выходах КС) при которых будут выполнены поставленные условия транспорта газа по линейной части.

Критерий оптимизации N можно представить как функцию

$$N(P_v, \bar{P}_{vixs}, \bar{q}_{vixs}, S_1, \bar{u}) \quad (5)$$

При заданных значениях P_v , \bar{P}_{vixs} , \bar{q}_{vixs} , существует множество V_d^z допустимых наборов управлений $\{S_1, \bar{u}\}$.

Вектор управлений $\{S_1^M, \bar{u}^M\}$, для которого выполняется

$$N(P_v, \bar{P}_{vixs}, \bar{q}_{vixs}, S_1^M, \bar{u}^M) = \min_{\{(S_1, \bar{u}) \in V_d^z\}} N(P_v, \bar{P}_{vixs}, \bar{q}_{vixs}, S_1, \bar{u}) \quad (6)$$

назовем вектором оптимальных управлений компрессорной станции при заданных условиях ее работы.

Q_d – область допустимых значений компонент вектора \bar{q}_{vixs} .

Пусть для вектора \bar{q}_{vixs}^* и соответствующего ему вектора минимальных давлений на входах сети \bar{P}_{vixs}^* справедливо

$$N(P_v, \bar{P}_{vixs}^*, \bar{q}_{vixs}^*, S_1^{M*}, \bar{u}^{M*}) = \min_{\bar{q}_{vixs} \in Q_d} N(P_v, \bar{P}_{vixs}, \bar{q}_{vixs}, S_1^M, \bar{u}^M), \quad (7)$$

тогда S_1^{M*} и \bar{u}^{M*} определяют оптимальную структуру, и параметры управления активными элементами компрессорной станции при заданной структуре линейной части, т.е.

$$S_1^{M*} \equiv S_1^*, \quad \bar{u}^{M*} \equiv \bar{u}^* \quad (8)$$

Таким образом, решение задачи определения оптимальной структуры и параметров компрессорной станции в свою очередь сводится к решению задачи определения оптимального распределения расходов газа по входам линейной части и задачи определения оптимальной структуры и управляющих параметров компрессорной станции при заданных значениях P_v , \bar{P}_{vixs} , \bar{q}_{vixs} .

Определение оптимального распределения расходов целевого продукта и соответствующих им давлений на входах сети. Задача определения оптимального распределения расходов целевого продукта по входам сети заключается в минимизации функции

$$N(P_v, \bar{P}_{vixs}, \bar{q}_{vixs}, S^M, \bar{U}^M) \quad (9)$$

на множестве значений $\bar{q}_{vixs} \in Q_d$.

Обозначим q_v – заданное значение расхода на входе компрессорной станции.

Так как расходы на входе компрессорной станции связаны между собой соотношением

$$\sum_i q_{vixs} = q_v, \quad (10)$$

то число независимых переменных, по которым проводится минимизация функции N на единицу меньше числа выходов КС.

Число выходов компрессорной станции соответствует числу входов линейной части локальной подсистемы, на которых мы можем варьировать расходы:

$$\bar{q}_{vs} \equiv \bar{q}_{vks} \quad (11)$$

Если линейная часть имеет два выхода, то задача определения оптимальных значений компонент вектора \bar{q}_{vs} сводится к задаче одномерной поисковой оптимизации и для ее решения можно применять эффективные методы: дихотомию, метод золотого сечения или Фибоначчи.

Рассмотрим случай, когда линейная часть имеет три входа. Для решения такой задачи предлагается алгоритм, основанный на использовании метода частичного минимума.

Сам метод основан на синтезе двух идей: идеи покоординатного спуска и идеи минимума, т.е. идеи отыскания $\min_{\bar{X} \in R_n} F(\bar{X})$, как

$$\min_{x_j \in X_1} \min_{x_j \in X_2} F(\bar{X}), \quad (12)$$

где X_1 множество «внешних» переменных; X_2 множество «внутренних» переменных.

Алгоритм определения оптимального распределения расходов состоит в следующем:

1. Расходы на одном из входов сети объявляются внешней переменной – пусть это будет q_{1vs} , и пусть расход q_{2vs} будет внутренней переменной.

2. Задаем начальное значение вектора $\bar{q}_{vs}^{(-0)}$ и запоминаем его в качестве лучшего значения $\bar{q}_{vs}^{(-M)}$.

3. Вычисляем значение функции

$$N^{(M)} = N(\bar{q}_{vs}^{(-M)}) \quad (13)$$

4. $q_{1vs} = q_{1vs} + \Delta$

5. Для нового значения внешней переменной определяем значение внутренней переменной, так чтобы вектор \bar{q}_{vs} остался в области Q_d .

6. При фиксированном значении внешней переменной производится оптимизация по внутренней переменной и определяется значение функции $N^{(m)}$:

$$N^{(m)} = N(\bar{q}_{vs}^{(-m)}),$$

где $\bar{q}_{vs}^{(-m)} = \{q_{1vs}^{(m)}, q_{2vs}^{(m)}, q_{3vs}^{(m)}\}$; $q_{2vs}^{(m)}$ – значение внутренней переменной доставляющей минимум функции N при фиксированном значении внешней переменной;

$$q_{3vs} = q_v - q_{1vs} - q_{2vs}^{(m)}.$$

7. Если $N^{(m)} < N^{(M)}$, то $N^{(M)}$ присваиваем значение $N^{(m)}$, $\bar{q}_{vs}^{(-M)}$ присваиваем значение $\bar{q}_{vs}^{(-m)}$, а Δ – значение $\gamma_1 \Delta$ ($\gamma_1 > 1$).

Если $N^{(m)} > N^{(M)}$, то значение $N^{(M)}$ и $\bar{q}_{vs}^{(-M)}$ остаются прежними, а Δ получает значение $\gamma_2 \Delta$ ($-1 < \gamma_2 < 0$).

Последовательность действий 4–7 выполняется до тех пор, пока не будет обнаружена точка минимума.

Одномерная оптимизация может быть осуществлена либо по тому же принципу, что и оптимизация по внешней переменной, либо каким-либо другим методом одномерной поисковой оптимизации.

При заданных значениях компонент векторов \bar{q}_{vs} и \bar{q}_{vx} , а также заданных ограничениях на давления на выходах сети – вектор \bar{P}_{vx} , в результате гидравлического расчета сети можно определить минимально допустимые давления на входах сети.

Для математической формулировки задачи произведем следующее кодирование сети: дерево графа выберем таким образом, чтобы фиктивные участки сети, кроме одного, который соответствует входу сети, стали хордами. При этом реальные участки частично станут хордами, а частично ветвями дерева. Ветви дерева, которая соответствует фиктивному участку, присвоим номер 1.

Таким образом, $L_1 = \{1\}$, а $K_2 = K$.

С учетом приведенного выбора дерева сети, а также того факта, что

$$h_r + \sum_{i \in M_1} b_{1ri} h_i = 0, \quad (14)$$

по любому замкнутому циклу, содержащему реальные участки сети, математическая модель линейной части магистрального газопровода примет вид

$$f_r = c_r q_r |q_r| + \sum_{i \in M_1} b_{1ri} c_i q_i |q_i| = 0 \quad (r \in M_2) \quad (15)$$

$$f_r = -P_{rk} |P_{rk}| - P_{1k} |P_{1k}| + \sum_{i \in M_1} b_{1ri} c_i q_i |q_i| = 0 \quad (r \in L_2) \quad (16)$$

$$f_r = P_{rm} |P_{rm}| - P_{1k} |P_{1k}| + \sum_{i \in M_1} b_{1ri} c_i q_i |q_i| = 0 \quad (r \in K_2) \quad (17)$$

$$q_i = \sum_{r \in M_2} b_{1ri} q_r + Q_i^+ \quad (i \in M_1 \cup L_1), \quad (18)$$

$$\text{где } Q_i^+ = \sum_{r \in L_2 \cup K_2} b_{1ri} q_r = \text{const} \quad (i \in M_1 \cup L_1) \quad (19)$$

Алгоритм решения задачи состоит в следующем:

1. Производится увязочный расчет, т.е. решаем систему нелинейных алгебраических уравнений (15)–(17) при $(v-1)$ – m линейном уравнении связи (18), используя метод Ньютона;

2. Определяем минимальные необходимые давления на входах сети. Для этого в уравнения (15)–(17) подставим полученные в результате увязочного расчета расходы и найдем значения h_r ($r \in K_2$) при условии, что вместо значения P_m подставляется значение соответствующей компоненты вектора P_{vx} , а вместо P_{lv} значение 0.

$$h_r = (P_{rx}')^2 + \sum_{i \in M_1} b_{lri} c_i q_i |q_i| \quad (r \in K_2) \quad (20)$$

Величины h_r , найденные по формуле (20), соответствуют потерям квадрата давления входа сети, соответствующего концу ветви с номером 1, плюс квадрат минимально допустимого давления на выходе сети, который соответствует началу хорды r .

Сравнивая полученные величины h_r ($r \in K_2$), определим путь с максимальной потерей квадрата давления и выберем:

$$P_{lk}^2 = \max_r \{h_r\} \quad (21)$$

Теперь, решая уравнения (16) относительно P_{rk} найдем минимально необходимые значения давлений на остальных входах сети.

Выбор рациональной структуры линейной части магистрального газопровода. Задача структурной оптимизации линейной части магистрального газопровода является задачей определения экстремума функции на множестве дискретных переменных. Обозначим левую часть равенства (4) $N_{str}(\bar{b})$, считая ее функцией структуры, которая определяется значениями компонент вектора $b_p = \{b_{p1}, \dots, b_{pw}\}$ (w – количество запорных задвижек сети). Тогда задачу поиска оптимальной структуры (4) можем записать как

$$N_{str}(\bar{b}) \rightarrow \min_{b_p} \quad (22)$$

$$b_{pi} \in \{0, 1\}.$$

Для реальных сетей величина w достигает нескольких сотен, что исключает возможность простого перебора структур. В качестве задвижек, положение которых, необходимо определить, имеет смысл рассматривать те задвижки, которые подключают потребителей к той или иной магистрали газопровода, а также задвижки, открывающие перемычки между магистралями. Положение остальных задвижек сети является очевидным еще до решения задачи. При таком подходе размерность, решаемой задачи существенно уменьшается, однако и в этом случае она остается достаточно большой.

Для решения задачи может быть использован алгоритм, в основе которого лежит один вариант поиска коллективом автоматов Буша-Мостеллера [9,10].

Пусть $\bar{\xi}(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n)$ случайный булевский вектор, и пусть $x_i = P\{\xi_i = 1\}$. Тогда задаче (22) можно

поставить в соответствие следующую задачу: определить такое значение \bar{x}^* , для которого справедливо

$$y(\bar{x}^*) = \min_{\bar{x}} N_{str}(\bar{\xi}) \quad (23)$$

$$\bar{x} = (x_1, \dots, x_w), \quad 0 \leq x_i \leq 1.$$

Зададим начальный вектор меры $\bar{x}^0 = (x_1^0, \dots, x_w^0)$, вектор шагов $\bar{h} = (h_1, \dots, h_w)$ и начальный вектор вероятностей направлений $\bar{p}^0 = (p_1^0, \dots, p_w^0)$.

Поиск состоит из последовательного построения мер \bar{x}^k , реализаций N_{str}^k , соответствующих этим мерам (по одной для каждого \bar{x}^k) и векторов \bar{p}^k по формулам:

1. $\Delta x_i = \pm h_i$, где $P\{\Delta x_i = +h_i\} = p_i$;
2. $x_i^k = x_i^{k-1} + \Delta x_i^{k-1}$, причем при выходе x_i^k за интервал $[0,1]$, x_i^k туда возвращается симметричным отражением от точки 0 или 1;
3. $\xi_i^k = 0$ или 1, где $P\{\xi_i^k = 1\} = x_i^k$;
4. $N_{str}^k = N_{str}(\bar{\xi}^k)$;
5.
$$p_i^k = \begin{cases} p_i^{k-1} \text{sign} \left[\left(\xi_i^k - \xi_i^{k-1} \right) \left(N_{str}^k - N_{str}^{k-1} \right) \right] = 0 \\ \alpha p_i^{k-1}, & \xi_i^k = 1, \quad 0 \leq \alpha \leq 1 \\ (1-\alpha) p_i^{k-1}, & \xi_i^k = 0 \end{cases}$$

Специфика рассматриваемой задачи состоит в том, что $N_{str}(\bar{b}_p)$ задана алгоритмически.

Область T_d задается условием

$$\bigcup_{j=1}^r b_p^{ij} = 1 \quad i = 1, \dots, w_1 \quad (24)$$

где b_p^{ij} задвижка, соединяющая i – го потребителя с j – ой магистралью; r – количество магистралей; w_1 – количество потребителей.

Поэтому рассматриваются только те $\bar{\xi}$, которые принадлежат области T_d .

Область распределения рациональных структур T_d^* мала по отношению к T_d . Эффективность алгоритма будет тем выше, чем более точно удастся выделить область рациональных структур T_d^* и организовать поиск \bar{x}^* только в этой области. Априорно эта область неизвестна, однако можно получить некоторую оценку этой области путем анализа фактически используемых структур за достаточно большой промежуток времени.

Пусть в процессе оперативного управления на интервале времени $[0, T]$ диспетчер использовал M вариантов структур. Представим эту информацию в виде матрицы A размерности $M \times W$, каждая строка которой представляется соответствующим вектором \bar{b}_p .

При достаточно большом M получим оценки математического ожидания S_i ($i=1, \dots, w$) состояний каждой i -ой задвижки на интервале времени $[0, T]$.

$$S_i = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M A_{ji} \quad (25)$$

Если $S_i=1$ или $S_i=0$, то осуществляем их коррекцию:

$$S_i = \begin{cases} S_{\xi \in \xi}, S & i = 0 \\ S_{\xi \in \xi}, S & i = 1 \end{cases} \quad (26)$$

где ξ – параметр расширения области.

Значения S_i используем для формирования начального вектора вероятностей направлений \bar{p}^0 . Для повышения скорости сходимости алгоритма поиск \bar{x}^* осуществляется одновременно только по некоторой части компонент вектора \bar{x} при временной фиксации остальных.

Выводы. В работе дана математическая постановка задачи оптимизации локальной подсистемы магистрального газопровода. Показано, что данная задача имеет иерархическую структуру и сформулированы задачи каждого уровня иерархии. Разработан комплекс алгоритмов, позволяющий по заданным граничным условиям функционирования локальной подсистемы проводить выбор ее структуры и параметров функционирования ее активных элементов, минимизирующих энергозатраты на компримирование газа.

Список литературы:

1. Евдокимов, А. Г. Потокораспределение в инженерных сетях [Текст] / А. Г. Евдокимов, В. В. Дубровский, А. Д. Тевяшев. – М.: Стройиздат, 1979. – 199 с.
2. Евдокимов, А. Г. Оперативное управление потокораспределением в инженерных сетях [Текст] / А. Г. Евдокимов, А. Д. Тевяшев. – Харьков: Вища школа, 1980. – 144 с.
3. Химко, М. П. Розрахунок параметрів газотранспортних систем [Текст] / М. П. Химко, В. Б. Коток, В. А. Павленко // Науково-виробничий журнал України Нафтова і газова промисловість. – 2006. – № 3. – С. 33–37.
4. Каминская, А. В. Численный анализ режимов работы газораспределительных сетей высокого давления [Текст] / А. В. Каминская, И. Г. Гусарова // Радиоэлектроника и информатика. – 2011. – № 3 (54). – С. 50–54.
5. Федоров, Н. В. Оптимизация технологических режимов работы локальных подсистем инженерной сети [Текст] / Н. В. Федоров, А. М. Хренов // Вісник НТУ «ХП». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – 2017. – № 19 (1241). – С. 107–113.
6. Тевяшев, А. Д. Об одном классе задач нестационарного неизотермического транспорта газа по ЛУ МГ [Текст] / А. Д. Тевяшев, В. Б. Коток, Е. Н. Выходцев, И. А. Пшеничник // Проблемы нефтегазовой промышленности. – 2006. – Вып. 3. – С. 302–314.
7. Гусарова, И. Г. Классы задач моделирования и численного анализа нестационарных режимов работы газотранспортной системы [Текст] / И. Г. Гусарова, Ю. В. Боярская // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2010. – Т. 3, № 6 (45). – С. 26–33. – Режим доступа: <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/2845/2649>
8. Тевяшев, А. Д. Об одной стратегии оптимизации режимов работы газотранспортных систем [Текст] / А. Д. Тевяшев, О. А. Тевяшева, В. С. Смирнова, В. А. Фролов // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2010. – Т. 4, № 3 (46). – С. 48–52. – Режим доступа: <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/2948/2751>
9. Дегтярев, Ю. И. Методы оптимизации [Текст] / Ю. И. Дегтярев. – М.: Сов. радио, 1980. – 272 с.
10. Короп, В. Ф. О рандомизации и решении оптимизационных задач с булевыми или целочисленными переменными [Текст] / В. Ф. Короп, А. Д. Тевяшев, Н. В. Федоров // Автоматизированные системы управления и приборы автоматики. – 1979. – Вып. 52. – С. 37–41.

Bibliography (transliterated):

1. Evdokimov, A. G., Dubrovskiy, V. V., Tevyashev, A. D. (1979). Potokoraspredelenie v inzhenernyh setyah. Moscow: Stroyizdat, 199.
2. Evdokimov, A. G., Tevyashev, A. D. (1980). Operativnoye upravlenie potokoraspredeleniem v inzhenernyh setyah. Kharkiv: Vishcha shkola, 144.
3. Khymko, M. P., Kotok, V. B., Pavlenko, V. A. (2006). Rozrakhunok parametriv hazotransportnykh system. Naukovovyrobnichii zhurnal Ukrainy Naftova i hazova promyslovisht, 3, 33–37.
4. Kaminskaya, A. V., Gusarova, I. G. (2011). Chislennyy analiz rezhimov raboty gazoraspredelel'nykh setey vysokogo davleniya. Radioehlektronika i informatika, 3 (54), 50–54.
5. Fedorov, N. V., Khrenov, A. M. (2017). Optimization of technological modes of operation of local subsystems of an engineering network. Bulletin of NTU "KhPI". Series: Mechanical-technological systems and complexes, 19 (1241), 107–113.
6. Tevyashev, A. D., Kotok, V. B., Vyhodcev, E. N., Pshenychnik, I. A. (2006). Ob odnom klasse zadach nestacionarnogo neizotermicheskogo transporta gaza po LU MG. Problemy neftegazovoy promyshlennosti, 3, 302–314.
7. Gusarova, I. G., Boyarskaya, Yu. V. (2010). Classes of tasks of mathematical modelling and the numerical analysis of unstationary non-isothermal operating modes of gas-transport system and methods of their decision. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 3 (45), 26–33. Available at: <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/2845/2649>
8. Tevyashev, A. D., Tevyasheva, O. A., Smirnova, V. S., Frolov, V. A. (2010). About one strategy of optimization of operating modes of gas-transport systems. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 4 (3 (46)), 48–52. Available at: <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/2948/2751>
9. Degtyarev, Yu. I. (1980). Metody optimizacii. Moscow: Sov. radio, 272.
10. Korop, V. F., Tevyashev, A. D., Fedorov, N. V. (1979). On the randomization and solution of optimization problems with Boolean or integer variables Automated Control Systems and Automation Devices, 52, 37–41.

Поступила (received) 10.07.2017

Бібліографічні описання / Bibliographic descriptions

Структурная и параметрическая оптимизация локальной подсистемы инженерной сети/ Федоров Н. В., Хренов А. М. // Вісник НТУ «ХП». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХП», 2017. – № 20(1242). – С.48–52. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Структурна і параметрична оптимізація локальної підсистеми інженерної мережі/ Федоров М. В., Хренов О. М. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 20(1242). – С.48–52. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Structural and parametric optimization of the local subsystem of the engineering network/ Fedorov N., Khrenov A. // Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2017. – № 20 (1242). – P.48–52. – Bibliogr.:10. – ISSN 2079-5459

Сведения об авторах / Відомості про авторів / About the Authors

Федоров Микола Вікторович – кандидат технічних наук, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, доцент кафедри прикладної математики та інформаційних технологій; вул. Маршала Бажанова, 17, м. Харків, Україна, 61204; e-mail: nickvief@gmail.com.

Федоров Николай Викторович, кандидат технических наук, Харьковский национальный университет городского хозяйства имени А. Н. Бекетова, доцент кафедры прикладной математики и информационных технологий; ул. Маршала Бажанова, 17, г. Харьков, Украина, 61204; e-mail: nickvief@gmail.com.

Fedorov Nikolaj – PhD, O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, associate professor of the Department of Applied Mathematics and Information Technologies; str., Marshal Bazhanov, 17, Kharkiv, Ukraine, 61204; E-mail: xrenov.aleksandr@ukr.net.

Хренов Олександр Михайлович – кандидат технічних наук, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, доцент кафедри прикладної математики та інформаційних технологій; вул. Маршала Бажанова, 17, м. Харків, Україна, e-mail: xrenov.aleksandr@ukr.net.

Хренов Александр Михайлович, кандидат технических наук, Харьковский национальный университет городского хозяйства имени А. Н. Бекетова, доцент кафедры прикладной математики и информационных технологий; ул. Маршала Бажанова, 17, г. Харьков, Украина, 61204; e-mail: xrenov.aleksandr@ukr.net.

Khrenov Alexander – PhD, O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, associate professor of the Department of Applied Mathematics and Information Technologies; str., Marshal Bazhanov, 17, Kharkiv, Ukraine, 61204; E-mail: xrenov.aleksandr@ukr.net.

УДК 621.396

В. А. РОМАНЮК, О. В. ЖУК, Д. В. ТКАЧЕНКО

УПРАВЛІННЯ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯМ В БЕЗПРОВОДОВИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖАХ

У статті проведено аналіз методів управління витратами енергоресурсу вузлів, які використовуються в безпроводових сенсорних мережах. Проведена їх класифікація та запропоновано напрямки їх подальшого вдосконалення. Проведені дослідження показали, що застосування розглянутих методів дозволяє, в середньому, збільшити тривалість роботи мережі в 1, 5 ... 2 рази і зменшити середню потужність передачі на сайт ретрансляції на 10 %.

Ключові слова: безпроводні сенсорні мережі, методи управління витратами енергоресурсу вузлів.

В статье проведен анализ методов управления расходом энергоресурса узлов, используемых в беспроводных сенсорных сетях. Проведена их классификация и предложены направления их дальнейшего совершенствования. Проведенные исследования показали, что применение рассмотренных методов позволяет в среднем увеличить продолжительность работы сети в 1, 5 ... 2 раза и снизить среднюю мощность передачи на место повторной передачи на 10 %.

Ключевые слова: беспроводные сенсорные сети, методы управления затратами энергоресурса узлов.

In the article the analysis of methods of energy resources management of nodes used in wireless sensory networks is carried out. Their classification has been carried out and directions of their further improvement are offered. The conducted studies have shown that the application of the considered methods allows, on average, to increase the duration of the network operation in 1, 5 ... 2 times and reduce the average transmission power per retransmission site by 10%. Synthesis of the optimal method for controlling the energy losses of nodes (or their aggregate) will be determined by the characteristics of a specific network and the decisions taken to implement other network management functions.

Keywords: wireless sensory networks, methods for controlling the cost of energy resources of nodes.

Вступ. Безпроводні сенсорні мережі (Wireless Sensor Network) – розподілені мережі, що складаються з маленьких вузлів (сенсорів), з інтегрованими функціями моніторингу навколишнього середовища, обробки і передачі даних. [1].

БСМ відносяться до класу радіомереж, що самоорганізуються [2]. Однак вони мають свої особливості: обмеженість ресурсів вузлів мережі (за пам'яттю, продуктивністю процесору, потужністю радіопередавача), мала

дальність та пропускна здатність каналів радіозв'язку між вузлами, концентрація трафіку навколо шлюзу тощо. Тип вузлів (стаціонарний, рухомий), кількість параметрів моніторингу, розмірність мережі, тип трафіка, організація управління (централізована, децентралізована або гібридна) залежить від призначення БСМ та її функцій.

В. А. Романюк, О. В. Жук, Д. В. Ткаченко. 2017