

## Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

**Дослідження впливу дестабілізуючих факторів на вимірювання еталонних базисних відстаней геодезичного полігону/ Подостроєць К. О.** / Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 19(1241). – С.103–107. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

**Исследование влияния дестабилизирующих факторов на измерения эталонных базисных расстояний геодезического полигона/ Подостроец К. А.** / Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 19(1241). – С.103–107. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

**Investigation of the influence of destabilizing factors on measurements of standard reference base lines of a geodesic polygon/ Podostroets K.** //Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2017. – № 19 (1241).– P.103–107. – Bibliogr.:10. – ISSN 2079-5459

## Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Подостроєць Кирил Олександрович** – с.н.с., кафедра стандартизації, оцінки відповідності та якості, Одеська державна академія технічного регулювання та якості; вул. Кузнечна, 13, м. Одеса, Україна, 65000; e-mail: podostroets@ukr.net

**Подостроец Кирил Александрович** – с.н.с., кафедра стандартизации, оценки соответствия и качества, Одесская государственная академия технического регулирования и качества; ул. Кузнечная, 13, г. Одесса, Украина, 65000; e-mail: podostroets@ukr.net

**Podostroets Kyryll Aleksandrovych** – senior researcher, Department of standardization, conformity assessment and quality, Odessa State Academy for Technical Regulation and Quality; Kuznechnaya st., 13, Odessa, Ukraine, 65000; e-mail: podostroets@ukr.net

УДК 681.5.015

**Н. В. ФЕДОРОВ, А. М. ХРЕНОВ****ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЛОКАЛЬНЫХ ПОДСИСТЕМ ИНЖЕНЕРНОЙ СЕТИ**

Рассматривается задача определения граничных условий функционирования локальных подсистем инженерной сети, позволяющих получить оптимальный режим работы всей сети в соответствии с выбранным критерием. В качестве локальной подсистемы рассматривается фрагмент сети, содержащий один или несколько активных элементов и прилегающий к ним участок, состоящий из пассивных элементов. Каждая локальная подсистема имеет один вход и один выход. Задача рассматривается для двух режимов: нормального и в условиях дефицита целевого продукта. Предложенные алгоритмы решения задачи основаны на использовании метода динамического программирования.

**Ключевые слова:** инженерная сеть, локальная подсистема, линейный ориентированный граф, оптимизация, динамическое программирование

Розглядається задача визначення граничних умов функціонування локальних підсистем інженерної мережі, що дозволяють отримати оптимальний режим роботи всієї мережі відповідно до обраного критерію. Як локальна підсистема розглядається фрагмент мережі, що містить один або кілька активних елементів і прилеглий до них ділянку, що складається з пасивних елементів. Кожна локальна підсистема має один вхід і один вихід. Завдання розглядається для двох режимів: нормального і в умовах дефіциту цільового продукту. Запропоновані алгоритми розв'язання задачі засновані на використанні методу динамічного програмування.

**Ключові слова:** інженерна мережа, локальна підсистема, лінійний орієнтований граф, оптимізація, динамічне програмування

The problem of determining the boundary conditions for the functionalization of local subsystems of the engineering network, which allow to obtain an optimal operating mode of the entire network in accordance with the chosen criterion, is considered. As a local subsystem, a network fragment containing one or more active elements and an adjacent section consisting of passive elements is considered. Each local subsystem has one input and one output. The problem is considered for two regimes: normal and in conditions of deficiency of the target product. The proposed algorithms for solving the problem are based on the use of the dynamic programming method.

**Keywords:** engineering network, local subsystem, linear oriented graph, optimization, dynamic programming.

**Введение.** К инженерным сетям относят трубопроводные транспортные и распределительные системы, обеспечивающие потребителей некоторым (жидким или газообразным) продуктом в виде потоков [1,2]. Примерами таких сетей являются водопроводные и газовые (городские и магистральные) сети, вентиляционные системы шахт, рудников, высотных зданий.

Инженерная сеть может быть рассмотрена как сложная система взаимодействия большого

количества подсистем (элементов) трех типов: активных элементов, линий связи и потребителей. Взаимосвязь таких подсистем, определенная каким-либо формальным способом, называется структурой инженерной сети. Если все подсистемы сети могут быть представлены двухполюсными элементами, то структура сети может быть представлена в виде линейного ориентированного графа.

© Н. В. Федоров, а. М. Хренов. 2017

Каждая подсистема инженерной сети, рассматриваемая в некоторый момент времени, характеризуется двумя переменными величинами: расходом целевого продукта и перепадом давления, а также рядом параметров. Потокораспределение в инженерной сети в любой момент времени определяется значениями переменных и является следствием текущей структуры сети и параметров ее подсистем.

Основная цель управления инженерной сетью состоит в обеспечении непрерывно изменяющихся потребностей потребителей в целевом продукте, т.е. в обеспечении наиболее полного соответствия между состояниями объекта управления и окружающей среды. Причем такое соответствие должно быть реализовано при оптимальных значениях некоторых критериев управления и выполнении технологических ограничений [5–10]. Состояние окружающей среды характеризуется в каждый момент времени требуемыми поставками целевого продукта потребителям в заданном диапазоне давлений и возможными отборами этого продукта у источников.

**Цель работы.** Режим функционирования инженерных сетей можно разделить на два основных класса: нормальный режим функционирования и функционирование в условиях дефицита целевого продукта.

Нормальный режим характеризуется возможностью системы полностью удовлетворить требования потребителей в целевом продукте, а задача планирования такого режима заключается в минимизации затрат на транспорт и распределение целевого продукта с учетом заданных ограничений на значения фазовых координат.

Задача оптимизации режима в условиях дефицита целевого продукта на этапе планирования заключается в минимизации суммарного ущерба, наносимого потребителям от недополучения ими целевого продукта и суммарных затрат на транспорт и распределение целевого продукта при заданных ограничениях на значения фазовых координат.

Целью работы является решение указанных задач.

**Алгоритм выбора оптимальных условий работы локальных подсистем.** Для уменьшения размерности решаемой задачи осуществим декомпозицию инженерной сети на ряд подсистем таким образом, чтобы в каждую подсистему входил один или несколько активных элементов и прилегающий к ним участок инженерной сети, состоящий из пассивных элементов.

Введем ряд понятий. Переменной состояния будем называть такую переменную, которая является входом для одной подсистемы и выходом предшествующей подсистемы. Переменная состояния, таким образом, характеризует связь между локальными подсистемами.

Переменной решения будем называть такую переменную, которая является независимой от переменной состояния и определяет ее значение.

Локальная оптимизация подсистемы заключается в определении оптимальных значений переменных решения для любого возможного значения переменных состояния. Если переменные решения могут быть найдены любым подходящим методом оптимизации, переменные состояния необходимо выбирать особенно тщательно, чтобы избежать просмотра оптимального решения для всей системы.

На рис.1 представлена общая схема координации решений локальных подсистем.

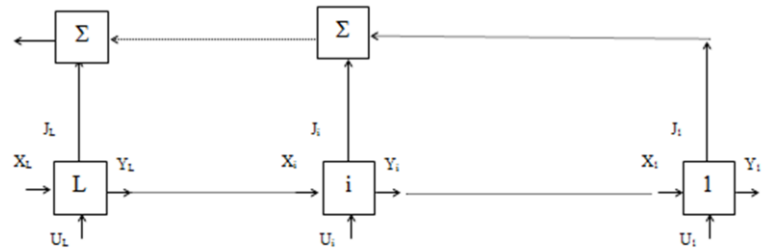


Рис.1– Общая схема координации решений отдельных подсистем

Отдельные подсистемы представлены соответствующим образом пронумерованными прямоугольниками со стрелками, используемыми для индикаций входа и выхода различных подсистем. С каждой  $i$ -ой подсистемой связано два входа  $x_i$  и  $U_i$  и два выхода  $y_i$  и  $J_i$ . Переменная  $x_i$  характеризует состояния  $i$ -ой подсистемы на входе, а переменная  $y_i$  на ее выходе. Преобразование, приводящее к состоянию  $y_i$  на выходе, носит название передаточной функции  $i$ -ой подсистемы и обозначается  $F_i$ . Все входы, которые не являются состояниями, называются решениями и обозначаются  $U_i$ . Каждой  $i$ -ой подсистеме однозначно соответствует один выход  $J_i$ , называемый весом этапа. Этот выход является функцией только входов  $x_i$  и  $U_i$  и определяет долю критерия оптимизации системы, приходящуюся на  $i$ -ую подсистему. Таким образом

$$y_i = F_i(x_i, U_i) \quad i=1, 2 \dots L \quad (1)$$

$$J_i = J(x_i, U_i) \quad i=1, 2 \dots L \quad (2)$$

Поскольку переменная состояния является обычно выходом для одной подсистемы (скажем  $i$ ), и, по крайней мере, входом хотя бы для одной последующей (скажем  $j$ ) подсистемы, то она может быть выражена более, чем через один символ, например, через  $y_i$ , или через  $x_j$ . отождествление нескольких символов друг с другом однозначно определяет взаимосвязь подсистем  $i$  и  $j$ , а такого типа взаимоотношения называются инцидентной тождественностью. Система полностью определяется ее подсистемами и инцидентной тождественностью, характеризующей структуру системы. Для последовательной системы (рис.1) инцидентная тождественность есть

$$y_i = x_{i+1} \quad i=1, \dots, L-1 \quad (3)$$

Это означает, что подсистемы пронумерованы в

направлении, противоположном потоку, показанному стрелками на рис. 1.

Пусть известно значение общего входа системы  $S_L$ . Тогда решение проблемы заключается в определении оптимальной последовательности  $U_1^*(S_L), U_2^*(S_L), \dots, U_L^*(S_L)$ , минимизирующей значение суммарного критерия (веса) системы

$$J = \sum_{i=1}^L J_i(x_i, U_i) \quad (4)$$

Покажем это. Из уравнений (1) и (2) следует, что для заданного входа  $x_i$  выбранное значение  $U_i$  определяет не только вес  $J_i$ , но и выход  $y_i$ . Поэтому решение  $U_i$ , минимизирующее вес  $i$ -ой подсистемы, может в то же время плохо сказаться на входах всех последующих подсистем и приведет к неоптимальности общего веса системы. Оптимальная последовательность  $U_1^*, \dots, U_L^*$  может быть найдена только в случае учета переходов, соединяющих подсистемы между собой.

Подставляя значения  $x_i (i=1, \dots, L-1)$  из выражений (3) и (4) с учетом соотношения (4), получим. Что общий вес системы при заданном состоянии  $x_L$  зависит от решений  $U_1, U_2, \dots, U_L$ , т.е.

$$J = J(x_L, U_1, U_2, \dots, U_L) \quad (5)$$

и, следовательно, решение задачи (4) сводится к определению

$$J^*(x_L) = \min_{U_1, \dots, U_L} J(x_L, U_1, \dots, U_L) \quad (6)$$

Специальный характер структуры последовательной системы позволяет преобразовать исходную задачу оптимизации с  $L$  решениями и одним состоянием  $x_L$  в последовательность проблем минимизации с одним решением и одним состоянием.

Пусть  $\tilde{J}_l$  - суммарный вес по всем  $l$  этапам.

$$\tilde{J}_l = \sum_{i=1}^l J_i(x_i, U_i) \quad l=1, 2, \dots, L \quad (7)$$

Очевидно, что

$$\tilde{J}_l = \tilde{J}_l(x_l, U_1, \dots, U_l) \quad l=1, 2, \dots, L \quad (8)$$

Будем трактовать состояние  $x_l$  как параметр и пусть  $\tilde{J}_l^*(x_l)$  - такая функция, что

$$\tilde{J}_l^*(x_l) \leq \tilde{J}_l(x_l, U_1, \dots, U_l) \quad (9)$$

для всех  $U_1, \dots, U_l$ .

Причем для каждой подсистемы имеется хотя бы один ряд переменных решения, который приводит к равенству, т.е.

$$\tilde{J}_l^*(x_l) = \min_{U_1, \dots, U_l} \tilde{J}_l(x_l, U_1, \dots, U_l) \quad (10)$$

Эту функцию, являющуюся минимальным суммарным весом  $l$  подсистем, можно сделать зависимой от входа и решения предыдущей  $(l+1)$ -ой подсистемы путем подстановки передаточной функции (1) вместо состояния  $x_l$ .

$$\tilde{J}_l^*(x_l) = \tilde{J}_l^*(x_{l+1}, U_{l+1}) \quad (11),$$

где состояние  $x_{l+1}$  рассматривается как параметр.

Прибавляя вес  $J_{l+1}$ , определяемый  $(l+1)$ -ой подсистемой слева и справа к неравенству (9) и учитывая соотношения (7) и (8), получим

$$J_{l+1}(x_{l+1}, U_{l+1}) + \tilde{J}_l^*(x_{l+1}, U_{l+1}) \leq \tilde{J}_{l+1}^*(x_{l+1}, U_1, \dots, U_{l+1}) \quad (12)$$

для всех  $U_1, \dots, U_l$ .

Левая часть неравенства (12) зависит только от переменной решения  $U_{l+1}$  и параметра  $x_{l+1}$ . Обозначим эту часть через  $W_{l+1}$ .

$$W_{l+1}(x_{l+1}, U_{l+1}) = J_{l+1}(x_{l+1}, U_{l+1}) + \tilde{J}_l^*(x_{l+1}, U_{l+1}) \quad (13)$$

минимум этой функции зависит только от одной переменной  $U_{l+1}$ , т.е.

$$W_{l+1}^*(x_{l+1}) = \min_{U_{l+1}} \{J_{l+1}(x_{l+1}, U_{l+1}) + \tilde{J}_l^*(x_{l+1}, U_{l+1})\} \quad (14)$$

$l=1, 2, \dots, L-1$ .

С другой стороны, из (12) следует, что

$$W_{l+1}^*(x_{l+1}) \equiv \tilde{J}_{l+1}^*(x_{l+1}) \quad (15),$$

где минимум берется по переменным решения  $U_1, \dots, U_{l+1}$ .

Таким образом, можно найти  $\tilde{J}_{l+1}^*$  по  $\tilde{J}_l^*$  путем определения одно-параметрической функции  $U_{l+1}^*(x_{l+1})$  для любого значения  $x_{l+1}$

$$\tilde{J}_{l+1}^*(x_{l+1}) = J_{l+1}(x_{l+1}, U_{l+1}^*(x_{l+1})) + \tilde{J}_l^*(x_{l+1}, U_{l+1}^*(x_{l+1})) \quad l=1, \dots, L-1 \quad (16)$$

или

$$\tilde{J}_{l+1}^*(x_{l+1}) = \min_{U_{l+1}} \{J_{l+1}(x_{l+1}, U_{l+1}(x_{l+1})) + \tilde{J}_l^*(x_{l+1}, U_{l+1}(x_{l+1}))\} \quad l=1, \dots, L-1 \quad (17)$$

Поскольку вес  $J_l(x_l, U_l)$  зависит только от одной переменной решения, определение  $\tilde{J}_l^*(x_l)$  есть задача оптимизации с одной переменной решения и одной переменной состояния. Если  $\tilde{J}_1^*(x_1)$  известна, то легко вычислить  $\tilde{J}_2^*(x_2)$  и  $U_2^*(x_2)$  путем решения другой задачи оптимизации с одним решением и одним состоянием.

После  $L$  шагов такой оптимизации можно

получить  $L$  функций решений  $U^*_1(x_1) \dots U^*_L(x_L)$  и минимальный вес системы  $J^*(x_L)$ , равный суммарному весу  $\tilde{J}^*(x_1)$ , полученному после минимизации  $L$  этапов.

Формула (17) является математическим выражением принципа оптимальности Беллмана для последовательных многоэтапных систем [3,4]. Этот принцип утверждает, что оптимальная последовательность решений  $U^*_L(x_L) \dots U^*_1(x_1)$  для системы состоящей из подсистем должна быть такой, чтобы любое подмножество функций решений  $U^*_1(x_1) \dots U^*_i(x_i)$  было оптимальным на последовательных подсистемах этой системы. Начиная с  $U^*_L(x_L)$ , рекурсивная подстановка  $U^*_L(x_L)$  в функцию перехода (1) порождает оптимальную входную функцию  $x_{L-1}(x_L)$ , которая в свою очередь подставляется в  $U^*_{L-1}(x_{L-1})$  для получения  $U_{L-1}$  и, в конце концов, генерирует всю оптимальную последовательность для рассматриваемой задачи.

Рассмотрим применение принципа динамического программирования для координации локальных подсистем магистрального газопровода. Структуры рассматриваемых типов газопроводов представлены на рис.2-5. Каждая локальная подсистема представляет собой отрезок магистрального газопровода, состоящий из компрессорной станции и прилегающего к ней линейного участка. Вначале рассмотрим нормальный режим функционирования газопровода при заданном значении давления на входе системы и значений отборов газа у потребителей. В этом случае критерием будут минимальные энергозатраты.

Для линейного газопровода (рис. 2) с фиксированными отборами в качестве переменной состояния естественно принять давление на входе подсистемы. Компонентами вектора переменных решения  $\bar{U}$  будут управляющие параметры,

определяющие режим работы газоперекачивающих аппаратов и структуру линейной части газопровода.

Два варианта управления, которые приводят к одному и тому же распределению давления по системе, могут лишь незначительно отличаться по общему количеству сжигаемого газа и распределению температуры.

Пусть  $J_l(P_l, \bar{U}_l)$  затраты на транспорт газа по подсистеме  $l$  при давлении на входе  $P_l$  и значении вектора управляющих параметров  $\bar{U}_l$ ;  $\tilde{J}_l(P_l)$  - суммарные затраты на первых  $l$  подсистемах с давлением на входе  $l$ -ой подсистемы  $P_l$  и при условии, что значения управляющих параметров выбраны оптимальными.

Принцип оптимальности Беллмана в этом случае может быть записан

$$\tilde{J}_{l+1}(P_{l+1}) = \min_{\bar{U}_{l+1}} \{ \tilde{J}_l(P_{l+1}, \bar{U}_{l+1}) + J_{l+1}(P_{l+1}, \bar{U}_{l+1}) \} \quad (18)$$

Численное решение получается дискретизацией в области значений  $[P^+_l, P^{++}_l]$ . Интервал допустимых значений  $[P^+_l, P^{++}_l]$  разбивается шкалой так, чтобы значения функций  $\tilde{J}_l(P_l)$  в точках сетки  $P_l$  давали достаточно полное представление о поведении  $\tilde{J}_l$  на всем интервале  $[P^+_l, P^{++}_l]$ .

Значения функций  $\tilde{J}_l(P_l)$  табулируются в точках сетки и служат для вычисления  $\tilde{J}_l$  в произвольной точке  $P_l$ . Функцию  $\tilde{J}_l$  при этом можно считать кусочно-постоянной или применять для нее линейную интерполяцию.

Рассмотрим газопровод со структурой, изображенной на рис.3. Такую структуру обычно называют структурой с расходящейся ветвью.

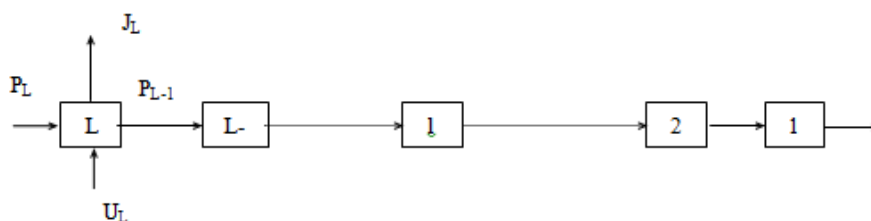


Рис. 2 – Линейный газопровод

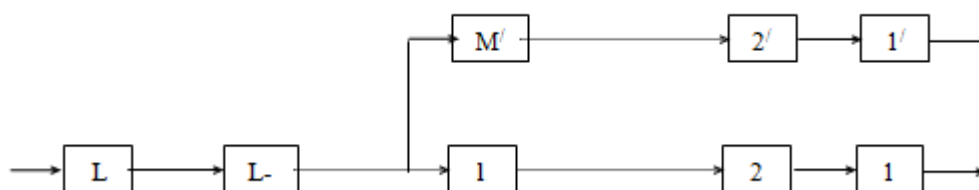


Рис. 3 – Газопровод с расходящейся ветвью.

Пусть

$$\tilde{J}_M(P_l) = \min_{\tilde{U}_1, \tilde{U}_2, \dots, \tilde{U}_M} \sum_{i=1}^M J_i \quad (19)$$

Определяет минимальные энергозатраты на перекачку газа по ветви  $I' - M'$  как функцию  $P_l$ . Соединим значение  $\tilde{J}_M$  с  $\tilde{J}_l$ :

$$\tilde{J}_{II}(P_l) = \tilde{J}_l(P_l) + \tilde{J}_M(P_l) \quad (20)$$

Эта новая функция может быть использована вместо  $\tilde{J}_l(P_l)$  в обычном оптимизационном плане для главной системы. Замена  $\tilde{J}_l(P_l)$  на  $\tilde{J}_{II}(P_l)$  называется поглощением расходящейся ветви  $I' - M'$ .

Структура изображенная на рис .4 называется структурой со сходящейся ветвью.

В этом случае задача рассматривается при заданных состояниях входов  $P_L$  и  $P_N$ . Поэтому при построении функции  $\tilde{J}_N(P_l)$  необходимо решать задачу отыскания оптимальных значений переменных решения на сходящейся ветви при заданных значениях переменных состояния на обоих концах ветви. В остальном процесс поглощения сходящейся ветви такой же, как и поглощение расходящейся ветви.

Рассмотрим задачу оптимизации режима работы газопровода со структурой изображенной на рис. 5.

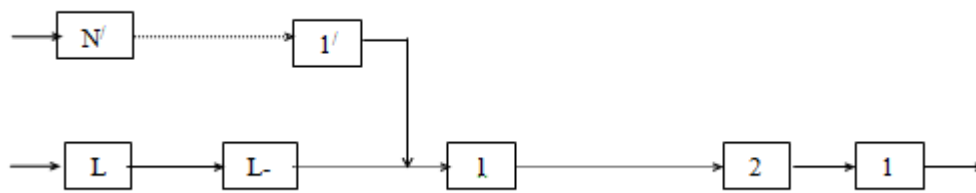


Рис. 4 – Газопровод со сходящейся ветвью

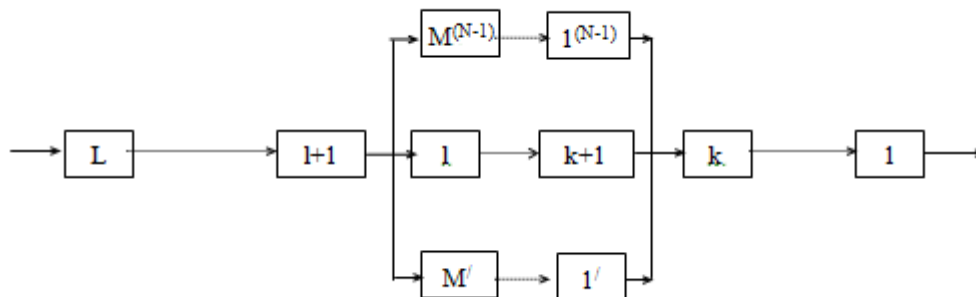


Рис. 5 – Газопровод с параллельными ветвями

Функция  $\tilde{J}_k(P_k)$  получается в результате решения последовательности задач с одним состоянием и одним решением применением соотношения (18).

Функция  $\tilde{J}_{II}(P_l)$  может быть получена как

$$\tilde{J}_{II}(P_l) = \min_{P_k} \left\{ \sum_{i=1}^N \tilde{J}_{M,i}(P_l, P_k) + \tilde{J}_k(P_k) \right\} \quad (21)$$

где

$$\tilde{J}_{M,i}(P_l, P_k) = \min_{\tilde{U}_1^{(i)}, \dots, \tilde{U}_M^{(i)}} \sum_{j=1}^M J_{j,i} \quad i=1, \dots, N-1 \quad (22)$$

$$\tilde{J}_{M,N}(P_l, P_k) = \min_{U_{k+1}, \dots, U_l} \sum_{j=k+1}^l J_j \quad (23)$$

Значения  $\tilde{J}_{M,i}$  определяются также как и в случае со сходящейся ветвью в результате решения задачи с заданными значениями переменных состояния на обоих границах последовательности подсистем.

Далее проводится обычный оптимизационный план для последовательной системы.

Функция  $\tilde{J}_{II}$  в (21) определялась в предположении, что значения расходов газа заданы по всем ветвям. Однако обычно они неизвестны и для их определения также приходится проводить перебор вариантов. Здесь статический процесс распределения расходов по ветвям искусственно разворачивается в многошаговый.

Будем рассматривать  $\tilde{J}_{M,i}$  еще и как функцию  $q_i$ – расхода газа по i–ой ветви. Для заданных значений  $P_l$  и  $P_k$  оптимальный режим участка с параллельными ветвями будет при таких значениях  $q_i$ , для которых

$$J^{**}(P_l, P_k) = \min_{q_i} \sum_{i=1}^N \tilde{J}_{M,i}(P_l, P_k, q_i) \quad (24)$$

при выполнении условия  $\sum_{i=1}^N q_i = q$ .

Введем как обычно последовательность функций  $G_i(P_l, P_k, q)$ , которые подчиняются уравнению

$$G_i(P_l, P_k, q) = \min_{i+1} \left\{ \tilde{J}_{M,i+1}(P_l, P_k, q_{i+1}) + G_i(P_l, P_k, q - q_{i+1}) \right\} \quad (25)$$

Таким образом, поставленная задача сводится к последовательности одномерных задач, решение которых позволяет вычислить  $J^{**}(P_l, P_k)$ . Функцию  $\tilde{J}_{II}(P_l)$  теперь можем записать

$$\tilde{J}_{II}(P_l, P_k) = \min_{P_k} \left\{ J^{**}(P_l, P_k) + \tilde{J}(P_k) \right\} \quad (26)$$

Для определения функций  $\tilde{J}_{M,i}(P_l, P_k, q_i)$  приходится  $R$  раз разрешать задачу динамического программирования, если разбиение  $q$  содержит  $R$  точек.

Таким образом, для табулирования функций  $\tilde{J}_{M,i}(P_l, P_k, q_i)$  надо  $NR$  раз выполнить процедуру упорядоченного перебора в одномерном пространстве давлений. Однако требования к оперативной памяти машины возрастают незначительно, так как функции  $\tilde{J}_{M,i}(P_l, P_k, q_i)$  ( $i=1, N$ ) табулируются независимо одна от другой до решения системы (25) или они определяются непосредственно перед решением  $i$ -го уравнения системы (25). Чтобы избавиться от ненужных переборов по  $q_i$  следует учитывать ограничения, например, по объемному расходу на центробежных нагнетателях.

Теперь рассмотрим функционирование магистрального газопровода в условиях дефицита газа. Задачу определения режима максимальной производительности целесообразно рассматривать как задачу определения режима, обеспечивающего минимальные энергозатраты при максимальной пропускной способности газопровода. Для решения задачи целесообразен двухэтапный метод, на первом этапе которого решается задача определения режима максимальной производительности и определяется максимальная величина  $q$ , а на втором этапе решается задача определения режима минимальных энергозатрат при найденных значениях  $q$ . Численное решение задачи определения максимальной производительности также можно осуществить по схеме динамического программирования путем итеративного повторения расчета режима при различных пробных значениях  $q^{(i)}$ . Задав приближенный интервал,  $(q_{\min}^{(1)}, q_{\max}^{(1)})$  заведомо содержащий значение  $q_{\max}$  разумно принять схему деления при переходе от  $q^{(i)}$  к  $q^{(i+1)}$ .

$$q^{(i+1)} = \frac{q^{(i)} + q_{\max}^{(i)}}{2}; \quad q_{\max}^{(i+1)} = q_{\max}^{(i)}; \quad q_{\min}^{(i+1)} = q^{(i)}, \quad (27)$$

если на итерации найден хотя бы один допустимый режим управления, и

$$q^{(i+1)} = \frac{q^{(i)} + q_{\min}^{(i)}}{2}; \quad q_{\min}^{(i+1)} = q_{\min}^{(i)}; \quad q_{\max}^{(i+1)} = q^{(i)}, \quad (28)$$

если продолжение допустимых вариантов по схеме динамического программирования на итерации  $i$  оказалось невозможным на некотором участке газопровода.

Если значения отборов газа на каждой подсистеме не заданы, то и в этом случае для решения задачи также применим метод динамического программирования. В качестве переменных состояния используются значения  $P_l$  и  $q_l$  (расход газа по подсистеме) и для табуляции функции решетки строится на двумерном множестве  $\{P, q\}$ . Ввиду значительного увеличения количества просматриваемых вариантов при появлении второй переменной состояния метод динамического программирования целесообразно применять в сочетании с последовательными приближениями на «грубой» и «точной» решетке.

#### Обсуждение результатов исследования.

Приведены алгоритмы координации локальных подсистем инженерной сети для двух основных режимов функционирования: нормального и в условиях дефицита целевого продукта.

Для нормального режима в качестве критерия оптимизации выбраны суммарные затраты на транспорт и распределение целевого продукта. При функционировании инженерной сети в условиях дефицита целевого продукта кроме затрат на транспорт и распределение учитывается также суммарный ущерб потребителей от недополучения ими целевого продукта. Рассмотрена также оптимизация по критерию максимальной подачи целевого продукта одному из потребителей при выполнении установленной подачи по остальным.

**Выводы.** Для уменьшения размерности задачи оптимизации инженерная сеть представлена в виде последовательности локальных подсистем, каждая из которых имеет один вход и один выход. Оптимизация всей системы в этом случае сводится к оптимизации локальных подсистем с последующей их координацией.

Все алгоритмы построены с использованием метода динамического программирования. Этот метод позволяет достаточно просто обойти трудности, связанные с узостью допустимого диапазона и дискретность некоторых компонент управления.

#### 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. Сорока, К. О. Основы теорії систем і системного аналізу [Текст] / К. О. Сорока. – Х.: Тимченко, 2005. – 288 с.
4. Дегтярев, Ю. И. Методы оптимизации [Текст] / Ю. И. Дегтярев. – М.: Сов. радио., 1980. – 272 с.
5. 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.
6. Тевяшев, А. Д. Информационно-аналитическая система прогнозирования процессов потребления природного газа в

- газотранспортной системе Украины [Текст] / А. Д. Тевяшев, Е. Н. Выходцев, В. Н. Щелкалин, Ю. В. Игнатова // Радиоэлектроника и информатика. – 2011. – № 3 (54). – С. 92–98.
7. 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>
  8. Тевяшев, А. Д. Об одном классе задач нестационарного неизоотермического транспорта газа по ЛУ МГ [Текст] / А. Д. Тевяшев, В. Б. Коток, Е. Н. Выходцев, И. А. Пишняник // Проблемы нефтегазовой промышленности. – 2006. – Вып. 3. – С. 302–314.
  9. 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>
  10. 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.
- 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). Operativnoe upravlenie potokoraspredeleniem v inzhenernyh setyah. Kharkiv: Vishcha shkola, 144.
  3. Soroka, K. O. (2005). Osnovy teorii system i systemnoho analizu. Kharkiv: Tymchenko, 288.
  4. Degtyarev, Yu. I. (1980). Metody optimizacii. Moscow: Sov. radio., 272.
  5. Khymko, M. P., Kotok, V. B., Pavlenko, V. A. (2006). Rozrakhunok parametriv hazotransportnykh system. Naukovo-vyrobnychii zhurnal Ukrainy Naftova i hazova promyslovist, 3, 33–37.
  6. Tevyashev, A. D., Vyhodcev, E. N., Shchelkalin, V. N., Ignatova, Yu. V. (2011). Informacionno-analiticheskaya sistema prognozirovaniya processov potrebleniya prirodnogo gaza v gazotransportnoy sisteme Ukrainy. Radioelektronika i informatika, 3 (54), 92–98.
  7. 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>
  8. Tevyashev, A. D., Kotok, V. B., Vyhodcev, E. N., Pshenyaniuk, I. A. (2006). Ob odnom klasse zadach nestacionarnogo neizotermicheskogo transporta gaza po LU MG. Problemy neftegazovoy promyshlennosti, 3, 302–314.
  9. 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 (6 (45)), 26–33. Available at: <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/2845/2649>
  10. Kaminskaya, A. V., Gusarova, I. G. (2011). Chislennyy analiz rezhimov raboty gazoraspredelitel'nyh setey vysokogo davleniya. Radioelektronika i informatika, 3 (54), 50–54.

*Поступила (received) 19.05.2017*

*Бібліографічні описання / Bibliographic descriptions*

**Оптимизация технологических режимов работы локальных подсистем инженерной сети/ Федоров Н. В., Хренов А. М. / Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 19(1241). – С.107–113. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.**

**Оптимізація технологічних режимів роботи локальних підсистем інженерної мережі/ Федоров М. В., Хренов О. М. / Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 19(1241). – С.107–113. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.**

**Optimization of technological modes of operation of local subsystems of an engineering network/ Fedorov N, Khrenov A//Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2017. – № 19 (1241). – P.107–113. – Bibliogr.:10. – ISSN 2079-5459**

*Сведения об авторах / Відомості про авторів / About the Authors*

**Федоров Никола Викторович**, кандидат технічних наук, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, доцент кафедри прикладної математики та інформаційних технологій; вул. Маршала Бажанова, 17, Харків, Україна, 61204; e-mail: [nickvicf@gmail.com](mailto:nickvicf@gmail.com).

**Федоров Николай Викторович**, кандидат технічних наук, Харківський національний університет міського господарства імені А. Н. Бекетова, доцент кафедри прикладної математики та інформаційних технологій; вул. Маршала Бажанова, 17, Харків, Україна, 61204; e-mail: [nickvicf@gmail.com](mailto:nickvicf@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](mailto: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, Харків, Україна, e-mail: [xrenov.aleksandr@ukr.net](mailto:xrenov.aleksandr@ukr.net).

**Хренов Александр Михайлович**, кандидат технічних наук, Харківський національний університет міського господарства імені А. Н. Бекетова, доцент кафедри прикладної математики та інформаційних технологій; вул. Маршала Бажанова, 17, Харків, Україна, 61204; e-mail: [xrenov.aleksandr@ukr.net](mailto: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](mailto:xrenov.aleksandr@ukr.net).