

## ЗАДАЧИ ОЦЕНИВАНИЯ СОСТОЯНИЯ СЛОЖНЫХ ГАЗОТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ И МЕТОДЫ ИХ РЕШЕНИЯ

Адаменко В.А., Харьковский национальный университет  
радиоэлектроники

Эффективная реализация автоматизированного управления функционированием газотранспортными системами (ГТС) тесно связана с необходимостью решения целого комплекса задач потокораспределения [1, 2], в основе решения которых лежат математические модели установившегося потокораспределения (УПР). В качестве основных можно выделить следующие задачи:

- оценивание состояния ГТС (режимных параметров потокораспределения— давлений, температур, расходов, состава природного газа и др.);
- оценивание параметров ГТС;
- формирование управляющих воздействий, обеспечивающих реализацию оптимального потокораспределения.

Задача оценивания состояния ГТС является наиболее важной задачей для целей оперативного управления, а именно: для оценки степени адекватности модели УПР в ГТС, контроля выхода режимных параметров за допустимые границы, технической диагностики оборудования ГТС, оценивания запаса газа в ГТС, контроля баланса поступления и отбора газа из ГТС, обнаружения утечек и аварийных ситуаций, поддержания оптимальных или запланированных режимов и т.д. Задачи оценивания параметров ГТС (например, коэффициентов эффективности участков трубопроводов, коэффициентов аппроксимации соответствующих функций в моделях газоперекачивающих агрегатов (ГПА) и т.д.) также являются очень важными. Эти задачи связаны с тем, что характеристики оборудования ГТС в процессе их создания, развития и эксплуатации претерпевают изменения и в общем случае не совпадают с проектными, паспортными или нормативно-справочными данными. Поэтому в большинстве случаев задача оценивания параметров элементов ГТС является составной частью более общей задачи оценивания фактического состояния и параметров ГТС, характеризующегося как состоянием элементов, так и значениями режимных параметров потокораспределения. Таким образом, на

практике в основном приходится решать задачи совместного оценивания состояния и параметров ГТС. При решении вышеперечисленных задач важным обстоятельством является то, что те или иные параметры в математических моделях могут переводиться из категории заданных в оцениваемые и наоборот, и, кроме того, может изменяться объем и состав измеряемых данных. Хотя к настоящему времени накоплен большой научно-практический опыт в области решения задач оценивания состояния и параметров ГТС, при этом, однако, следует отметить отсутствие общего формализованного подхода, инвариантного к тому, что конкретно выступает в качестве:

- объекта оценивания (отдельные элементы ГТС или вся ГТС);
- математической модели ГТС;
- известных, измеряемых и оцениваемых параметров модели ГТС;
- целей (оценивание состояния, параметров, структуры модели ГТС).

Это служит обоснованием необходимости разработки обобщенной постановки задач оценивания состояния и параметров ГТС, включающей в себя метод формирования системы уравнений и неравенств по заданной математической модели УПР в ГТС и множествам известных, измеряемых и оцениваемых переменных и выражений модели, который применим для решения широкого класса задач потокораспределения. В данной работе была получена обобщенная постановка, из которой удалось получить:

- решаемые ранее задачи оценивания состояния и параметров ГТС;
- решаемую в данной работе задачу оценивания давлений, температур, расходов и состава газа;

и из обобщенной постановки можно легко получить множество других задач, возникающих при оперативном управлении потокораспределением в газотранспортных системах, которые предстоит решить в будущем.

Из изложенного можно сделать вывод, что задачи, связанные с оцениванием состояния и параметров ГТС, можно рассматривать как достаточно сложную проблему, требующую комплексного рассмотрения и самостоятельных исследований, и, следовательно, являющуюся актуальной как в научном, так и практическом плане.

Обобщенная постановка задач оценивания состояния и параметров ТС

В работе была сформулирована обобщенная постановка задач оценивания состояния и параметров ГТС, из которой можно легко получить ряд основных задач оценивания стационарного режима: решаемые ранее (например, температурный и гидравлический расчет ГТС, оценивание состояния ГТС и коэффициентов эффективности участков трубопроводов ГТС); задачу оценивания состояния ГТС (давлений, температур, расходов и состава газа), которая решается в работе; и множество других задач, которые предстоит решить в будущем. Автором также была построена алгоритмическая модель УПР в ГТС [3].

В данной работе для стационарного режима транспорта газа в ГТС математическая модель УПР в ГТС и любого ее элемента относится к классу моделей следующего вида:

$$\text{Model} = (\text{Var}, \text{Eq}, \text{F}), \quad (1)$$

где  $\text{Var} = \text{Vargas} \cup \text{Varel}$  — множество переменных модели ГТС (элемента ГТС);  $\text{Vargas}$  — множество переменных модели ГТС (элемента ГТС), характеризующих состояние и состав газа;  $\text{Varel}$  — множество переменных модели ГТС (элемента ГТС), характеризующих структуру и состояние самой ГТС (элемента ГТС);

$$\text{Eq} = \{h_i(\text{Var}) = 0, i = 1, \dots, m; \quad g_j(\text{Var}) \leq 0, j = 1, \dots, r\} —$$

множество уравнений и неравенств, связывающих переменные модели ГТС (элемента ГТС) между собой;

$$\text{F} = \{\varphi_i: X_i \rightarrow Y_i, i = 1, \dots, s\} —$$

множество функций, где  $X_i, Y_i$  — некоторые заданные множества.

Каждая математическая модель УПР в ГТС (элемента ГТС) имеет свое количество уравнений ( $m$ ), неравенств ( $r$ ) и функций ( $s$ ). В работе используются два вида замены:

$$1) \quad X \left| \begin{array}{l} \text{Replace} \\ s \in S \\ R(s), \end{array} \right. \quad 2) \quad X \left| \begin{array}{l} \text{Replace} \\ a_1 = b_1, a_2 = b_2, \dots, a_n = b_n, \end{array} \right.$$

где  $X$  — любое математическое выражение;  $S$  — множество заменяемых элементов;  $R(s)$  — выражение, на которое заменяется каждый элемент множества  $S$ ;  $a_i$  — заменяемое выражение в  $X$ ;  $b_i$  — выражение, на которое заменяется  $a_i$ .

Обобщенная постановка задач оценивания состояния и параметров ГТС состоит в следующем:

Дано:

- ГТС рассматривается в  $n$  стационарных режимах в моменты времени  $t_1, t_2, \dots, t_n$ ;
- математическая модель этой системы вида (1):  
 $\text{Model} = (\text{Var}, \text{Eq}, \text{F})$ , или способ ее построения  
 (при использовании базовой или модифицированной моделей, о которых речь шла в [3], задана структура ГТС);
- точно заданные значения  $[v]_{mi}^{ev}$  для переменных и выражений математической модели УПР в ГТС  $v \in \text{VarFExact}_i$ ,  $i = 1, \dots, n$ , где  $\text{VarFExact}_i$  — множество переменных и выражений модели на  $i$ -ом режиме работы ГТС, для которых заданы точные значения;
- предварительные оценки  $[v]_{mi}^{pe}$  для переменных и выражений математической модели УПР в ГТС  $v \in \text{VarFApp}_i$ ,  $i = 1, \dots, n$ , где  $\text{VarFApp}_i$  — множество переменных и выражений модели на  $i$ -ом режиме работы ГТС, для которых заданы предварительные оценки;
- ошибки предварительных оценок на  $n$  режимах распределены по нормальному закону с нулевыми математическими ожиданиями и известными дисперсиями, т.е.

$$[\xi_v]_{mi} \sim N(0, [\sigma_v]_{mi}^2), \quad \forall v \in \text{VarFApp}_i, \quad [\xi_{mi}] \sim N(0, \alpha_{mi}^2)$$

- множество переменных и выражений математической модели УПР в ГТС, которые не меняются при переходе от режима к режиму:

$$\mathbf{VarFnV} = \{v \mid v = [v]_{m1} = [v]_{m2} = \dots = [v]_{mn}\},$$

где  $v$  — переменная или выражение математической модели УПР в ГТС,  $[v]_{mi}$  — переменная или выражение  $v$  математической модели УПР в ГТС на  $i$ -ом режиме работы ГТС.

Найти:  $M\{\mathbf{VarFTarget} \mid \mathbf{EqTask}\}$ , где метод формирования системы уравнений и неравенств  $\mathbf{EqTask}$  состоит в следующем:

$$\mathbf{EqTask} = \mathbf{Eq1} \cup \mathbf{Eq4}, \quad \mathbf{Eq1} = \bigcup_{i=1, \dots, n} \mathbf{Rm}(i, \mathbf{Eq2}(i) \cup \mathbf{Eq3}(i)),$$

$$\mathbf{Eq2}(i) = \left( \begin{array}{l} \text{Replace} \\ \mathbf{Eq} \mid v \in \mathbf{VarFExact}_i \cap \mathbf{Var} \\ [v]_{mi}^{ev} \end{array} \right),$$

$$\mathbf{Eq3}(i) = \{v = [v]_{mi}^{ev} \mid \forall v \in \mathbf{VarFExact}_i \setminus \mathbf{Var}\},$$

$$\mathbf{Rm}(i, \mathbf{X}) = \mathbf{X} \left| \begin{array}{l} \text{Replace} \\ v \in \mathbf{Var} \setminus \mathbf{VarFnV} \\ [v]_{mi} \end{array} \right. \quad \mathbf{Eq4} = \bigcup_{i=2, \dots, n} \mathbf{Eq5}(i),$$

$$\mathbf{Eq5}(i) = \{\mathbf{Rm}(i, v) = \mathbf{Rm}(1, v) \mid \forall v \in \mathbf{VarFnV} \setminus \mathbf{Var}\}.$$

Методика решения приведенной задачи оценивания состояния и параметров ГТС предполагает проверку условий разрешимости системы уравнений и неравенств модели, и в случае переопределенной системы — использование методов максимального правдоподобия и условной оптимизации. В случае переопределенной системы модели задача оценивания сводится к задаче условной оптимизации вида:

$$\sum_{\substack{v \in \mathbf{VarFApp}_i, \\ i=1, \dots, n}} \frac{(\mathbf{Rm}(i, v) - [v]_{mi}^{pe})^2}{[\sigma_v]_{mi}^2} \rightarrow \min_{\mathbf{VarTarget} \in \Omega}, \quad (2)$$

где **VarTarget** — множество переменных математической модели УПР в ГТС, оценки которых необходимо найти; множество  $\Omega$  определяется следующим образом:

$$\Omega = \{ \mathbf{VarTarget} \in \Xi \mid \mathbf{EqTask} \}, \quad (3)$$

где  $\Xi = \Xi_1 \times \Xi_2 \times \dots \times \Xi_{|\mathbf{VarTarget}|}$ , где  $\Xi_i$  — множество значений, которые может принимать  $i$ -ая переменная, принадлежащая множеству **VarTarget**.

Задачу условной оптимизации (2), (3) при определенных условиях (например, если эта задача является задачей математического программирования) можно решать методами модифицированных функций Лагранжа (множителей), штрафных функций и двойственными методами.

В зависимости от множеств точно заданных значений переменных и выражений математической модели УПР в ГТС, заданных предварительных оценок переменных и выражений модели, множества переменных и выражений модели УПР в ГТС, которые не меняются при переходе от режима к режиму, и того, какая именно модель УПР в ГТС используется, из полученной обобщенной постановки задачи оценивания состояния и параметров ГТС можно получить целый ряд задач стационарного режима. Таким образом, из полученной обобщенной постановки задач оценивания состояния и параметров ГТС можно легко получить:

- решаемые ранее задачи оценивания состояния и параметров ГТС (например, температурный и гидравлический расчет ГТС, оценивание состояния ГТС и коэффициентов эффективности участков трубопроводов ГТС);
- решаемую в данной работе задачу оценивания давлений, температур, расходов и состава газа;
- множество других задач, возникающих при оперативном управлении потокораспределением в ГТС, которые предстоит решить в будущем (например, оценивание состояния ГТС и коэффициентов теплопередачи участков трубопроводов ГТС),

т.е. все основные вычислительные задачи стационарного режима ГТС

можно легко получить из разработанной обобщенной постановки. Однако, для каждой конкретной задачи, получаемой из обобщенной постановки, необходимо формулировать условия разрешимости системы уравнений и неравенств, которые характерны именно для этой задачи. Некоторый частный случай, полученный из обобщенной постановки, который наиболее часто встречается на практике, получен в данной работе.

Задача оценивания давлений, температур, расходов и состава газа в случае использования модифицированной математической модели УПР в ГТС

Задача оценивания давлений, температур, расходов и состава газа рассматривается на одном режиме и предполагает использование модифицированной математической модели УПР в ГТС [3]. Для задачи оценивания состояния ГТС задача условной оптимизации (2) имеет вид:

$$\begin{aligned} & \sum_{i \in M_{T_{\text{ист1}}}} \frac{(T_{ki} - T_{ki}^{\text{pe}})^2}{\sigma_{T_{ki}}^2} + \sum_{i \in M_{T_{\text{ист1}}}} \frac{(N_{\text{комп}i} - N_{\text{комп}i}^{\text{pe}})^2}{\sigma_{N_{\text{комп}i}}^2} + \sum_{j \in V_T} \frac{(T_j - T_j^{\text{pe}})^2}{\sigma_{T_j}^2} + \\ & + \sum_{i \in M_{T_{\text{н}}}} \frac{(T_{ni} - T_{ni}^{\text{pe}})^2}{\sigma_{T_{ni}}^2} + \sum_{i \in M_{T_{\text{к}}}} \frac{(T_{ki} - T_{ki}^{\text{pe}})^2}{\sigma_{T_{ki}}^2} + \sum_{j \in V_N} \frac{(N_{\text{комп}uj} - N_{\text{комп}uj}^{\text{pe}})^2}{\sigma_{N_{\text{комп}uj}}^2} + \\ & + \sum_{j \in V_P} \frac{(P_j - P_j^{\text{pe}})^2}{\sigma_{P_j}^2} + \sum_{i \in M_q} \frac{(q_i - q_i^{\text{pe}})^2}{\sigma_{q_i}^2} \rightarrow \min_{\text{Var Target} \in \Omega}, \quad (4) \end{aligned}$$

где множество ограничений  $\Omega$  определяется в соответствии с выражением (3); **EqTask** — система уравнений и неравенств модифицированной модели УПР в ГТС с учетом точно заданных значений переменных и выражений модели;  $V_T$  ( $V_N$ ,  $V_P$ ) — множество узлов графа сети, в которых заданы предварительные оценки для температур газа (компонентного состава газа, давлений газа);  $M_{T_{\text{н}}}$  ( $M_{T_{\text{к}}}$ ) — множество дуг графа сети, в которых заданы предварительные оценки для температур газа на входе (выходе);  $M_q$  — множество дуг графа сети, в которых заданы предварительные оценки для расходов газа. В работе разработаны алгоритмы выбора дерева и леса графа сети

для задачи (4) и методы решения этой задачи.

Для решения задачи (4) предлагается использовать методы множителей Лагранжа и штрафных функций. Приведенные алгоритмы учитывают специфику класса решаемых задач оценивания состояния ГТС и представляют собой модифицированный вариант стандартных алгоритмов. Эта модификация состоит в:

- усовершенствовании алгоритмов методов одномерной минимизации с целью повышения их эффективности;
- разработке критериев выхода из задач условной, безусловной и одномерной минимизации.

Разработанные модели и методы реализованы в виде комплекса программ “Оценивание состояния газотранспортных систем” (ОСГТС), который является составной частью автоматизированной системы технической диагностики ГТС и геоинформационной системы ГТС. Работа ОСГТС возможна в рамках геоинформационной системы ГТС, поскольку для того, чтобы оценить давления, температуры, расходы и качество поставляемого газа, необходимо учитывать сложную пространственную топологию ГТС, т.е. на вход ОСГТС поступает информация о топологии, структуре ГТС и параметрах моделей элементов ГТС из базы данных геоинформационной системы. Результаты решения задач оценивания состояния ГТС (оценки давлений, температур, расходов и качества газа) заносятся в базу данных и являются исходными данными для множества других задач АСУ ГТС.

#### Список источников

1. Трубопроводные системы энергетики: модели, приложения, информационные технологии/ Атавин А.А., Карасевич А.М., Сухарев М.Г., Адаменко В.А. и др.— М.: ГУП Издательство “Нефть и газ” РГУ Нефти и газа им. И.М. Губкина, 2000.— 320 с.
2. Новицкий Н.Н. Оценивание параметров гидравлических цепей.— Новосибирск: Наука, 1998.— 214 с.
3. Адаменко В.А., Адаменко А.В., Тевяшева О.А. Объектно-ориентированный подход к построению математических моделей газотранспортных систем// Радиотехника и информатика.— 2002.— № 1.
4. Евдокимов А.Г., Тевяшев А.Д. Оперативное управление потокораспределением в инженерных сетях.— Харьков: Издательство при Харьковском государственном университете издательского объединения “Вища школа”, 1980.— 144 с.