Оптимальное проектирование сложных объектов энергетики

Лаптин Ю. П., Журбенко Н.Г., Коваленко Д.А. – ИК НАН Украины,
Левин М.М., Волковицкая П.И. – Харьковское ЦКБ ЭНЕРГОПРОГРЕСС

Более 40% тепловой и электрической энергии производится на тепловых электростанциях.

Производительность энергоблоков (котлоагрегатов) – до 3970 т/ч пара.

Давление – до 255 атм., температура – 545 C^{o}.

Количество сжигаемого топлива – до 310 т/ч.

Стоимость одного энергоблока - $2 - $30 млн.

Энергоблоки большинства электростанций исчерпали свой технический ресурс и работают с низким КПД.

В настоящее время в ремонте и реконструкции нуждаются более 100 энергоблоков.

Задачи оптимального проектирования (выбора рациональных значений конструктивных характеристик) энергетического котлоагрегата формулируются как задачи математического программирования.

Число переменных и ограничений в таких задачах может достигать нескольких тысяч.

Система ограничений включает линейные и нелинейные уравнения и неравенства.

Схемы функциональных элементов (блоков)

Функциональный блок: $y = f(x)$, $x \in S$.

Блок агрегирования: ациклическая сеть взаимосвязанных функциональных блоков.

Блок системы уравнений.

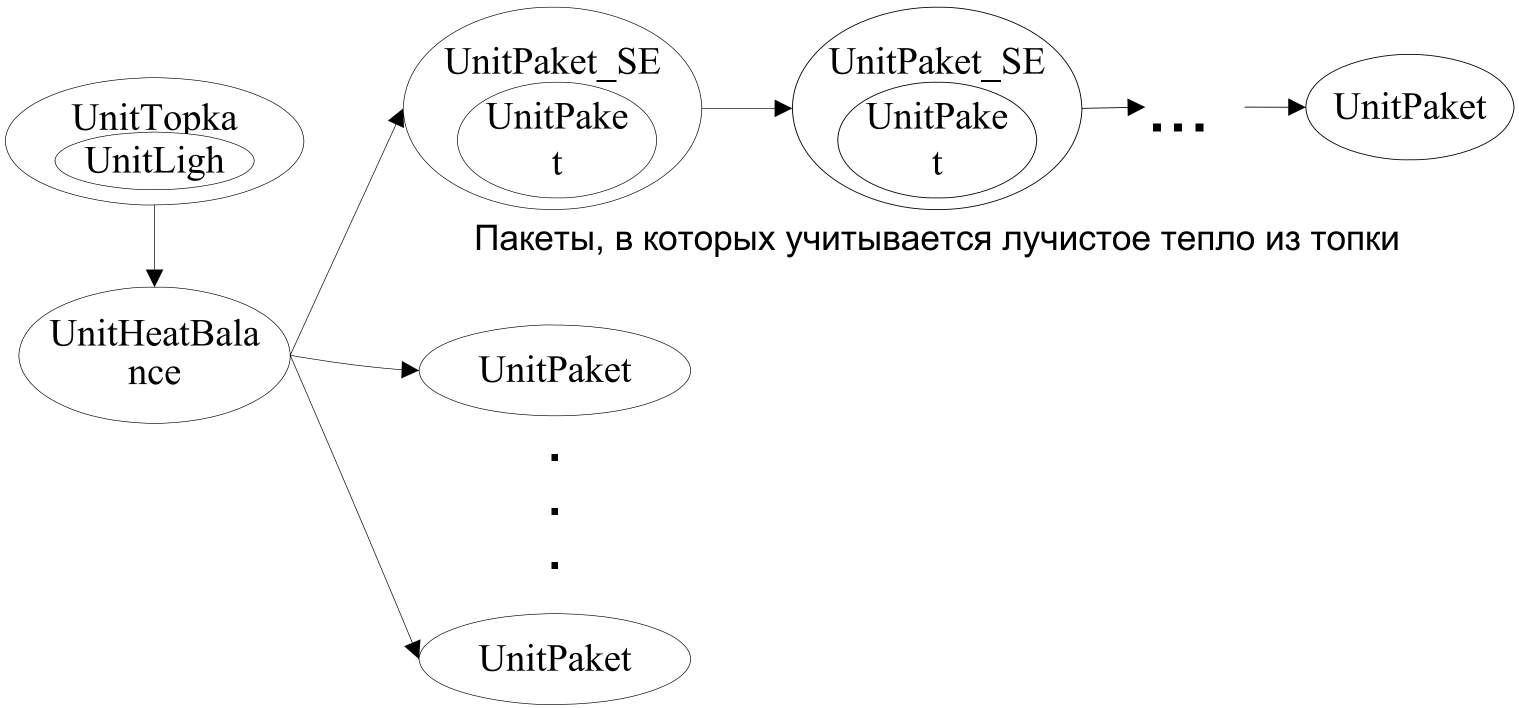

Рис. 1. Структура агрегированного модуля UnitHeatAgregate

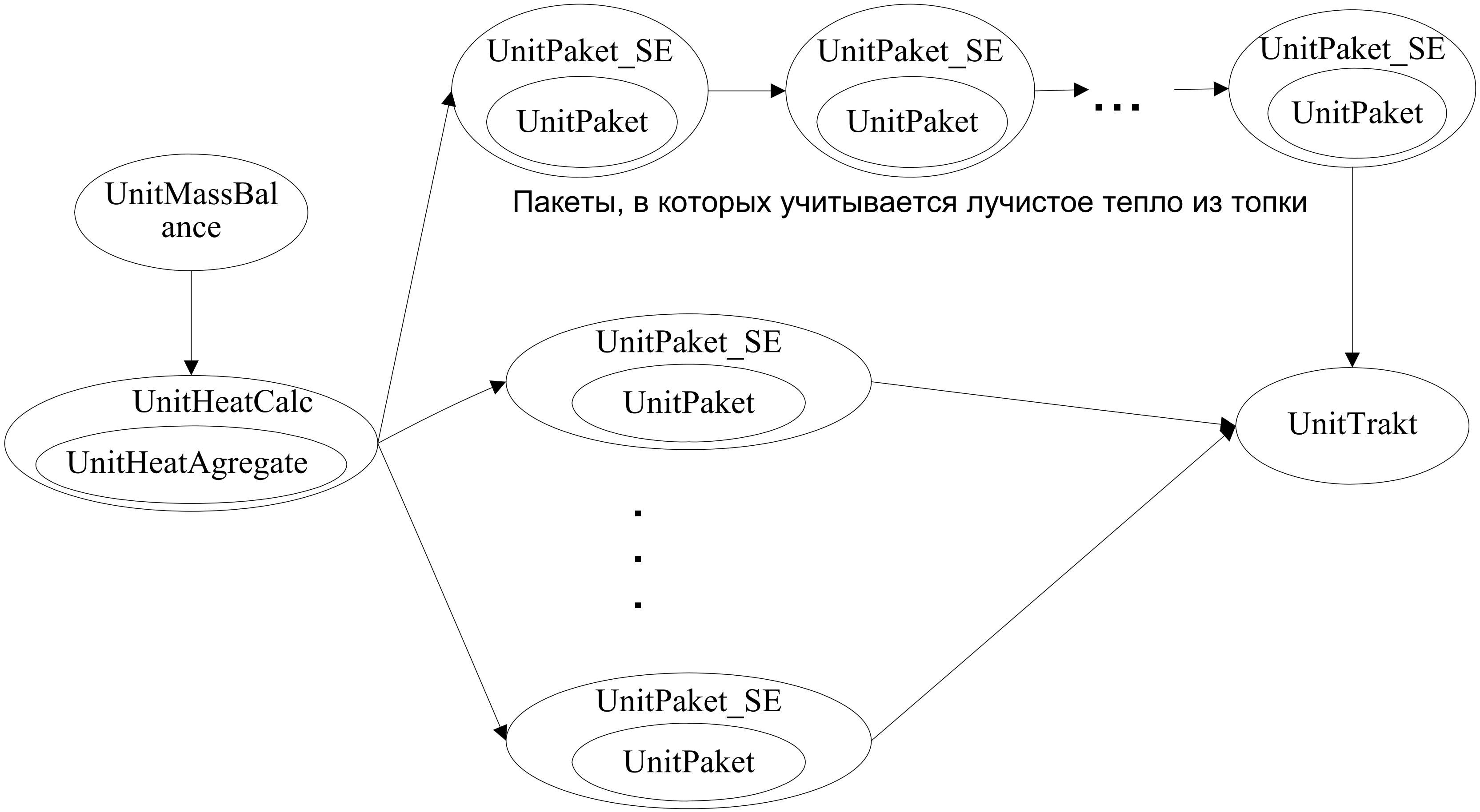

Рис. 2. Структура расчета функциональных зависимостей задачи оптимального проектирования энергетического котлоагрегата (агрегированный модуль UnitBoiler)

Особенности структуры выполняемых расчетов:

элементарными объектами вычислительной схемы, являются относительно простые функциональные блоки;

функциональные зависимости блоков определены в ограниченных областях ;

новые более сложные блоки порождаются с помощью формирования систем уравнений и операций агрегирования;

возникающие системы уравнений имеют небольшую размерность ~ 2÷3;

операции агрегирования и формирования систем уравнений применяются рекуррентно.

Структура выполняемых расчетов позволяет выполнить редукцию исходной задачи к оптимизационной задаче меньшей размерности. Размерность редуцированной задачи многократно сокращается, число переменных становится равным 50÷200 при таком же порядке числа ограничений.

Один подход к решению нелинейных задач оптимизации с ограничениями

Рассматривается задача: найти

$$f^* = \min\ f(x), \tag{1}$$

при ограничениях

$$h(x) \le 0, \tag{2}$$

где $x \in R^n$, $f, h : R^n \to R$ - выпуклые функции, принимающие конечные значения при любых x.

Пусть $S = \left\{x \in R^n :\ h(x) \le 0\right\}$. Предполагается заданной $x^0 \in S$, $h(x^0) < 0$.

Для $x \in R^n$ определим отображение на множество S:

$$\pi_S(x) = (1-\alpha)x^0 + \alpha x,\ \text{ где } \alpha = \max\left\{\tilde{\alpha} :\ (1-\tilde{\alpha})x^0 + \tilde{\alpha}x \in S,\ 0 \le \tilde{\alpha} \le 1\right\}.$$

Положим $\varphi(x) = f(\pi_S(x))$, $d(x) = \left\|x - \pi_S(x)\right\|$,

$$\psi_\varepsilon(x) = \varphi(x) + \gamma_\varepsilon(x) d(x), \tag{3}$$

где $\gamma_\varepsilon(x) = \dfrac{f(\pi_S(x)) - f(x^0) + \varepsilon}{\left\|\pi_S(x) - x^0\right\|}$, $\varepsilon > 0$ – некоторое число.

Рассмотрим задачу

$$\psi_\varepsilon^* = \inf\left\{\psi_\varepsilon(x) : x \in R^n\right\}. \tag{4}$$

Если $\gamma_\varepsilon(x) \geq 0$ для всех $x \notin S$, то $\psi_\varepsilon^* = f^*$. Если найдется точка $x \notin S$ такая, что $\gamma_\varepsilon(x) < 0$, то $\psi_\varepsilon^* = -\infty$.

Сведение задачи (1), (2) к задаче (4) имеет смысл, если функция $\psi_\varepsilon(x)$ обладает хорошими свойствами.

$\varphi(x)$ – негладкая и невыпуклая функция. Тем не менее, если множество S ограничено, то при достаточно больших ε функция $\psi_\varepsilon(x)$ выпукла.

Лаптин Ю.П. Один подход к решению нелинейных задач оптимизации с ограничениями. – Кибернетика и системный анализ. 2009, № 3.- С. 182 – 187.

Оптимизационные задачи с блочной системой нелинейных ограничений-равенств

Рассматривается задача: найти

$$\min f_0(x, y^1, ..., y^Q) \tag{5}$$

при ограничениях

$$f_k(x, y^1, ..., y^Q) \le 0,\ k = 1, ..., K. \tag{6}$$

$$g^q(x, y^q) = 0,\ q = 1, ..., Q, \tag{7}$$

$$A_x^q x + A_y^q y^q \le b^q,\ q = 1, ..., Q, \tag{8}$$

функции g^q, f_k непрерывны и непрерывно дифференцируемы.

Обозначим S^q множество точек x, для которых подсистема (7), (8) для данного q имеет решение, $y^q(x)$ - решение подсистемы (7) в точке $x \in S^q$.

Очевидно, что следующая задача эквивалентна исходной (5)-(8): найти

$$f_0^* = \min f_0(x, y^1(x), ..., y^Q(x)) \tag{9}$$

при ограничениях

$$f_k(x, y^1(x), ..., y^Q(x)) \le 0,\ k = 1, ..., K. \tag{10}$$

$$x \in S^q,\ q = 1,\ldots, Q. \tag{11}$$

Множества S^q, $q = 1,\ldots, Q$ заданы неявно. Рассмотрим функции

$p_{S^q}(x)$ - проекция точки x на множество S^q,

$d_q(x) = \left\| x - p_{S^q}(x) \right\|$ - расстояние от точки x до множества S^q, $q = 1,\ldots, Q$.

Положим $\tilde{y}^q(x) = y^q(p_{S^q}(x))$, $\varphi_k(x) = f_k(x, \tilde{y}^1(x),\ldots, \tilde{y}^Q(x))$, $k = 0,\ldots, K$.

Рассмотрим задачу: найти

$$\varphi_0^* = \min_x \left\{ \varphi_0(x) : \varphi_k(x) \le 0,\ d_q(x) \le 0,\ k = 1,\ldots,K,\ q = 1,\ldots,Q \right\}. \tag{12}$$

Задачи (9)-(11) и (12) эквивалентны. Функции $\varphi_k(x)$, $d_q(x)$ определены при любых значениях аргументов.

Вычисление $d_q(x)$ и $\tilde{y}^q(x)$:

$$d_q(x) = \min_{z,y} \left\{ \left\| x - z^q \right\| : g^q(z^q, y^q) = 0,\ A_x^q z^q + A_y^q y^q \le b^q \right\}, \tag{13}$$

где $z^q \in E^L$ – вспомогательные переменные. Пусть (z^{*q}, y^{*q}) решение задачи (13) при заданном x. Тогда $p_{S^q}(x) = z^{*q}$, $\tilde{y}^q(x) = y^{*q}$.

Для решения задачи (13) предлагается использовать модификацию метода линеаризации Б.Н.Пшеничного, в которой на каждой итерации обеспечивается выполнение ограничений $A_x^q z^q + A_y^q y^q \le b^q$.

Для решения задачи (12) предлагается применять метод негладких штрафных функций и алгоритм растяжением пространства Н.З.Шора для минимизации почти-дифференцируемых функций.

Лаптин Ю.П. Оптимизационные задачи с блочной системой нелинейных ограничений-равенств // Теорія оптимальних рішень. – К.: Ін-т кібернетики ім. В.М.Глушкова НАН України, 2008, № 7. – с. 117 – 124.

Ациклические сети функциональных блоков.

Функциональный блок B^q : $y^q = f^q(x^q)$, $x^q \in S^q$, $f^q(x^q): R^{n^q} \to R^{k^q}$, $q \in V$,

$$S^q = \left\{x^q : A^q x^q \le b^q\right\}. \qquad (14)$$

I^q (J^q) – множество индексов переменных входов (выходов) блока B^q.

Для каждой пары блоков p, q задано $M(p,q) = \left\{(i, j) : i \in I^q,\ j \in J^p\right\}$, определяющее выходы блока B^p, которые являются входами блока B^q, т.е.

$$x_i^q = f_j^p(x^p),\ \ (i, j) \in M(p,q). \qquad (15)$$

Блоки p, q связаны дугой (p,q), если $M(p,q) \ne \varnothing$, E – множество всех дуг.

Сеть (V,E) – ациклическая.

В совокупности функций f_j^q, $j \in J^q$, $q \in V$ выделено подмножество $R \subseteq \left\{(j,q) : j \in J^q,\ q \in V\right\}$, которое определяет ограничения, и выделена функция $f_{j^0}^{q^0}$, которая является целевой функцией оптимизационной задачи.

Рассматривается задача: найти

$$\min f_{j^0}^{q^0}(x^{q^0}), \tag{16}$$

при ограничениях

$$f_j^q(x^q) \le 0, \quad (j,q) \in R, \tag{17}$$

$$x_i^q = f_j^p(x^p), \quad (i,j) \in M(p,q), (p,q) \in E, \tag{18}$$

$$x^q \in S^q, \; q \in V. \tag{19}$$

Если в соотношении (18) $x^p \notin S^p$, то выходы блока B^p не определены, а значит, не определены ни переменные x_i^q, ни выходы блока B^q.

Для решения задачи (16)–(19) используется доопределение функций блоков на все пространство.

Обозначим: $p_{S^q}(x^q)$ – проекция точки $x^q \in R^{n^q}$ на множество S^q, $d_{S^q}(x^q) = \left\| x^q - p_{S^q}(x^q) \right\|$ – расстояние от точки x^q до множества S^q, $\overline{f}^q(x^q) = f^q(p_{S^q}(x^q)), \; q \in V$.

Перейдем к эквивалентной задаче: найти

$$\min \overline{f}^{q^0}_{j^0}(x^{q^0}), \tag{20}$$

при ограничениях

$$\overline{f}^{q}_{j}(x^{q}) \le 0, \quad (j,q) \in R, \tag{21}$$

$$x_i^q = \overline{f}^{p}_{j}(x^{p}), \quad (i,j) \in M(p,q), (p,q) \in E, \tag{22}$$

$$d^q(x^q) = 0,\ q \in V. \tag{23}$$

Используя (22), выразим любой выход сети (V,E) в виде функции от входов сети. Обозначим $x^q(x)$ значения входов блока B^q при заданном входе x сети блоков (V,E), $\varphi^q(x) = \overline{f}^{q}(x^q(x))$, $\delta^q(x) = d_{S^q}(x^q(x))$. Задачу (20)–(23) представим в виде: найти

$$\min\left\{\varphi^{q^0}_{j^0}(x):\ \varphi^q_j(x) \le 0,\ \delta^q(x) \le 0,\ (j,q) \in R,\ q \in V\right\}, \tag{24}$$

Функции $\varphi^q(x)$, $\delta^q(x)$ определены при любых x. Для решения задачи (24) предлагается использовать метод негладких штрафов и алгоритм с растяжением пространства для минимизации почти-дифференцируемых функций.

Программная реализация алгоритмов решения рассматриваемой задачи написана на языке Python и включена в состав оптимизационного программного обеспечения OpenOpt (http://www.openopt.org), разрабатываемого как свободная альтернатива коммерческим средам AMPL, GAMS, TOMLAB/TOMNET, Lindo/Lingo, …

Для сравнения эффективности различных программных средств, включенных в OpenOpt, проводились вычислительные эксперименты на тестовых задачах.

Лаптин Ю.П., Крошко Д.Л. Некоторые нелинейные оптимизационные задачи сетевой структуры // Теорія оптимальних рішень. – К.: Ін-т кібернетики ім. В.М.Глушкова НАН України, 2009, № 8.

Результаты апробации программных средств оптимального проектирования

Апробация программных средств проводилась при выработке альтернативных проектных решений для котла ТП-80 (производительность – 500т пара/ч, давление – 150 атм., температура пара – 545 град.С). В качестве базового рассматривался проект, разработанный в Харьковском ЦКБ «ЭНЕРГОПРОГРЕСС».

В таблице приведены результаты по следующим вариантам расчета:

базовый вариант - все конструктивные параметры зафиксированы (выполняются все теплотехнические расчеты);

вариант 1 – варьируются тепловосприятия поверхностей нагрева;

вариант 2 - варьируются: тепловосприятия поверхностей нагрева, угол потолка первого участка газохода;

вариант 3 – варьируются: тепловосприятия поверхностей нагрева; угол потолка первого участков газохода; поперечный шаг, толщина стенки, диаметр трубы ширмы; заходность, поперечный шаг, толщина стенки, диаметр трубы конвективных перегревателей.

Таблица. Результаты вычислительных экспериментов

Задача	Стоимость, $	Сокращение стоимости, %	Материалоемкость, т
Базовый вариант	1745600	0	335.28
Вариант 1	1490100	14,6	293.99
Вариант 2	1452400	16,8	287.16
Вариант 3	1085100	37,8	214.4