

интервала над другим и их размеров. Необходимо отметить, что при постановке двухкритериальной задачи важное значение имеет адекватный выбор рангов (коэффициентов относительной важности) соответствующих частных критериев.

4.2. Базовая методика нечеткой оптимизации совместной работы энергоагрегатов, использующих комбинированное топливо

Рассмотрим задачу оптимизации совместной работы двух энергоагрегатов, выделенных в блочную структуру. Такая задача является типичной при оптимизации режимов работы энергосистем, и может, в определенной степени, рассматриваться как модельная [111].

Положим, что каждый из энергоблоков может работать на газе, жидком топливе или в любом их сочетании. Суммарная мощность, развиваемая обоими энергоблоками, должна быть постоянной величиной. На потребление газа накладываются ограничения внешнего характера. Требуется найти режимы работы каждого энергоблока такие, чтобы минимизировать потребление жидкого топлива.

Задача оптимизации ставится для реальных функционирующих энергоблоков. Полагается, что исходные данные формируются как на основе сбора статистической информации о работе агрегатов, так и путем проведения натуральных испытаний. Такие исходные данные характеризуются существенными неопределенностями: неточным значением параметров агрегатов и режимов работы, недостаточностью информации о протекающих процессах, случайным характером поведения системы. В этих условиях математические модели функционирования энергоагрегатов строятся на основе статистической обработки исходной информации в виде регрессионных полиномов второй степени. Известно, что в параметры таких моделей определяются с точностью до интервала [100].

В качестве выходных переменных моделей выберем расходы газа и жидкого топлива энергоблоков. При этом входными переменными будут мощности энергоустановок. Мощности энергоблоков будем полагать нечетко определенными величинами.

Для реальных энергоблоков с суммарной мощностью 50 МТВт затраты жидкого топлива w_1 и газа w_2 в тоннах условного топлива в час на первый энергоблок описываются следующими регрессионными зависимостями:

$$w_1(x_1) = 1.4609 + 0.15186 * x_1 + 0.00145 * x_1^2, \quad (4.14)$$

$$w_2(x_1) = 1.5742 + 0.1631 * x_1 + 0.001358 * x_1^2, \quad (4.15)$$

где x_1 — выходная мощность первого энергоблока в Мвт.

Аналогично для второго энергоблока затраты жидкого топлива y_1 и газа y_2 при мощности x_2 составляют

$$y_1(x_2) = 0.8008 + 0.2031 * x_2 + 0.000916 * x_2^2, \quad (4.16)$$

$$y_2(x_2) = 0.7266 + 0.2256 * x_2 + 0.000778 * x_2^2, \quad (4.17)$$

где x_2 — выходная мощность второго энергоблока в Мвт.

В соответствии с эксплуатационными характеристиками энергоблоков, x_1 и x_2 могут изменяться в диапазонах

$$18 \leq x_1 \leq 30, \quad (4.18)$$

$$14 \leq x_2 \leq 25. \quad (4.19)$$

Результаты режимно-наладочных испытаний показали, что разные виды топлива с некоторой степенью приближения могут комбинироваться аддитивным образом, т.е. для любого значения выходной мощности x_I^* любая линейная комбинация топливных компонент

$$\lambda_1 \cdot w_1(x_I^*) + (1 - \lambda_1) \cdot w_2(x_I^*),$$

где $0 \leq \lambda_1 \leq 1$, также дает мощность, равную x_I^* .

Подобное утверждение верно и для энергоблока 2.

Задачу оптимизации теперь сформулируем следующим образом: требуется определить мощности каждого энергоблока x_1 и x_2 и доли использования разных видов топлива λ_1 и λ_2 такие, чтобы минимизировать общее потребление жидкого топлива:

$$\xi(x_1, x_2, \lambda_1, \lambda_2) = \lambda_1 * w_1(x_1) + \lambda_2 * y_1(x_2) \rightarrow \min \quad (4.20)$$

при ограничениях:

на использование газа

$$G(x_1, x_2, \lambda_1, \lambda_2) = (1-\lambda_1)*w_2(x_1) + (1-\lambda_2)*y_2(x_2) \leq 10, \quad (4.21)$$

на суммарную мощность

$$x_1 + x_2 = 50, \quad (4.22)$$

а также на относительные расходы топлива

$$0 \leq \lambda_1 \leq 1, \quad 0 \leq \lambda_2 \leq 1. \quad (4.23)$$

Используя равенство (4.22), исключим переменную x_2 и объединяя ограничения (4.18), (4.19), (4.22), сводим исходную постановку к задаче оптимизации, содержащей только три переменные.

В новой постановке требуется найти значения $x_1, \lambda_1, \lambda_2$, минимизирующие целевую функцию, отражающую потребление жидкого топлива:

$$f(x_1, \lambda_1, \lambda_2) = \lambda_1 * w_1(x_1) + \lambda_2 * y_1(50 - x_1) \rightarrow \min, \quad (4.24)$$

при ограничениях

$$25 \leq x_1 \leq 30, \quad 0 \leq \lambda_1 \cdot \lambda_2 \leq 1 \quad (4.25)$$

Зависимости $w_1(x_1)$ и $y_1(x_2)$ построены на основе статистического анализа и обработки данных, полученных при натурных испытаниях энергоагрегатов. Для учета неопределенностей, связанных со статистическим характером коэффициентов регрессионных зависимостей, последние представим в интервальном виде. Будем использовать доверительные интервалы для всех коэффициентов регрессионных полиномов.

Используя общую методологию интервального анализа, рассмотренную в главе 1, представим интервальное расширение выражения (4.14) в виде:

$$\begin{aligned}
w_1(x_1) = [\underline{w_I(x_I)}, \overline{w_I(x_I)}] = [1.4609 - 1.4609\alpha, 1.4609 + 1.4609\alpha] + \\
+ [0.15186 - 0.15186\alpha, 0.15186 + 0.15186\alpha] x_1 + \\
+ [0.00145 - 0.00145\alpha, 0.00145 + 0.00145\alpha] x_1^2. \quad (4.26)
\end{aligned}$$

где α - оценка среднеквадратического отклонения коэффициентов в долях единицы.

Величина α может быть определена как в результате анализа статистических данных, так и методом экспертных оценок.

Минимизируемая функция (4.24) для интервального расширения запишется в следующем виде:

$$\begin{aligned}
F(x_1, \lambda_1, \lambda_2) = [\underline{F(x_I, \lambda_I, \lambda_2)}, \overline{F(x_I, \lambda_I, \lambda_2)}] = \\
= \lambda_1 \cdot [\underline{w_I(x_I)}, \overline{w_I(x_I)}] + \lambda_2 \cdot [\underline{y_I(50 - x_I)}, \overline{y_I(50 - x_I)}]. \quad (4.27)
\end{aligned}$$

Аналогично преобразовываются ограничения (4.25).

Результаты решения задачи (4.27) с соответствующими ограничениями приведены в табл. 4.4.

Для поиска минимума использовался рассмотренный выше метод случайного поиска «прямые выборочные процедуры с уменьшением интервала поиска», модифицированный применительно к интервальным данным. В процессе реализации алгоритма сравнения интервалов при проверке ограничений полагали, что один интервал больше другого, если вероятность этого события больше либо равна 95%.

Таблица 4.4. Результаты оптимизации с учетом интервальной неопределенности

	Среднеквадратичное отклонение α			
	0	0.005	0.01	0.05
Стартовая точка задачи оптимизации: $x_I^{onm}=27.5$, $\lambda_1^{onm}=0.5$, $\lambda_2^{onm}=0.5$.				
$[\underline{F}_{нач}; \overline{F}_{нач}]$	6.284	[6.253, 6.315]	[6.221, 6.347]	[5.97, 6.598]
Среднее значение интервала: $(\underline{F}_{нач} + \overline{F}_{нач}) / 2$	6.284	6.284	6.284	6.284
Ширина исходного интервала: $(\overline{F}_{нач} - \underline{F}_{нач})$	0	0.063	0.126	0.628
Оптимальное решение				
$[\underline{F}_{min}; \overline{F}_{min}]$	3.052	[3.084, 3.115]	[3.114, 3.177]	[3.326, 3.676]
Среднее значение интервала: $(\underline{F}_{min} + \overline{F}_{min}) / 2$	3.052	3.0995	3.145	3.501
Ширина оптимального интервала: $(\overline{F}_{min} - \underline{F}_{min})$	0	0.031	0.063	0.35
x_I^{onm}	29.997	29.997	30	29.999
λ_1^{onm}	0	0.001	0	0
λ_2^{onm}	0.583	0.592	0.601	0.661

Для наглядности полученное оптимальное решение и исходная стартовая точка задачи оптимизации графически представлены на рис. 4.3.

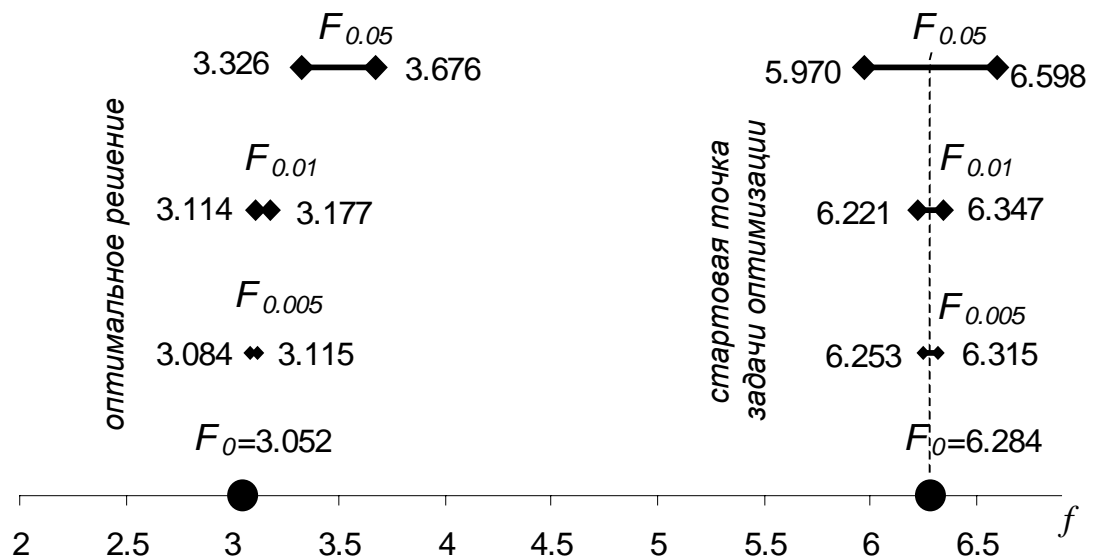


Рис. 4.3. Целевая функция в стартовой точке алгоритма поиска оптимума и в точке оптимума: $F_0 = f$ – оптимальное решение при $\alpha=0$ (неинтервальный вариант); $F_{0.005}$ – оптимальное решение при $\alpha=0.005$; $F_{0.01}$ – оптимальное решение при $\alpha=0.01$; $F_{0.05}$ – оптимальное решение при $\alpha=0.05$.

Видно, что происходит сдвиг оптимального интервала в сторону ухудшения оптимума (увеличения F) по мере увеличения α . В результате оптимальное интервальное решение является несимметричным и не охватывает значение оптимума в неинтервальном варианте, в то время как стартовые точки задачи оптимизации для интервальных вариантов симметричны относительно неинтервального варианта (рис. 4.3). Полученный результат можно объяснить следующим образом.

Для решения неинтервальной задачи ($\alpha=0$) оптимальным решением является расход газа $G_0=10$. В реальных условиях параметры выражения (4.21), используемого для расчета G_0 , характеризуются некоторой неопределенностью, и могут быть представлены интервалами. Если в точке оптимума неинтервальной задачи подставить в выражение (4.21) интервальные коэффициенты, например, при $\alpha=0.05$, то в результате получим интервальную оценку $G'_{0.05}=[9.5, 10.5]$. Это оценка означает, что существует ненулевая вероятность того, что в результате влияния неопределенных факторов расход газа превысит 10 ед. Таким образом использование результатов решения неинтервальной задачи оптимизации приводит к нарушению ограничения (4.21).

В интервальном варианте задачи оптимизации для $\alpha=0.05$ получаем оптимальный интервальный расход газа $G_{0.05}=[9.091, 10.048]$, естественно отличающийся от оцененного на основе неинтервального варианта $G'_{0.05}$. Интервал $G_{0.05}$ с вероятностью 0.95 меньше 10. Следовательно, при применении интервального подхода к учету неопределенности исходных данных с вероятностью 0.95 гарантируется выполнение ограничения (4.21) посредством уменьшения расхода газа (рис. 4.4), которое достигается за счет увеличения доли потребления жидкого топлива вторым агрегатом λ_2^{opt} с 0.583 до 0.661, что и приводит в итоге к некоторому увеличению среднеинтервальных значений целевой функции в точке оптимума для интервальных формулировок задачи оптимизации. Ясно, что это увеличение растёт с возрастанием неопределенности (ширины интервалов) исходных данных.

Таким образом, если не учитывать интервальный характер исходных данных, то полученного при $\alpha=0$ количества жидкого топлива 3.052 ед. скорее всего не хватит для обеспечения бесперебойной работы энергоблоков в течение часа (не будут удовлетворены

ограничения). Учет интервального характера данных (например, $\alpha=0.05$) позволяет определить необходимое оптимальное количество жидкого топлива для бесперебойной работы энергоблоков (3.676 ед.). Это дает возможность прогнозировать, в каких реальных пределах должен быть оптимальный расход топлива (от 3.326 до 3.676 ед.).

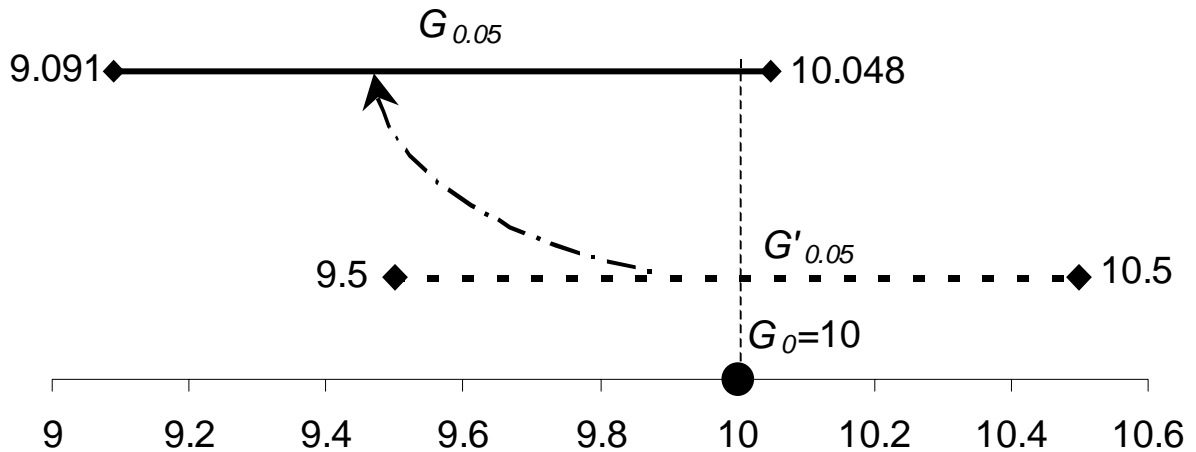


Рис. 4.4. Интервальные ограничения при решении задачи с учетом интервальной неопределенности

Разработанная методика математического моделирования и оптимизации в условиях интервальной неопределенности параметров моделей позволяет при решении задачи оптимизации совместной работы энергоагрегатов получать более отвечающие реальной ситуации результаты, чем при использовании традиционных подходов.

В случаях, когда имеется достаточно информации для описания неопределенных параметров моделей в виде нечетких чисел, описанная выше методика модифицируется применительно к нечетко-интервальным данным.

В этом случае регрессионные зависимости типа (4.14) принимают следующий вид:

$$F(x) = [F_1(x), F_2(x), F_3(x), F_4(x)] = [a_{01}, a_{02}, a_{03}, a_{04}] + [a_{11}, a_{12}, a_{13}, a_{14}] \cdot x + [a_{21}, a_{22}, a_{23}, a_{24}] \cdot x^2, \quad (4.28)$$

где F_1 и F_4 , a_{j1} и a_{j4} , $j=0..2$ - интервал возможных значений; F_2 и F_3 , a_{j2} и a_{j3} , $j=0..2$ - интервал наиболее вероятных значений.

Выражение (4.28) соответствует нечеткому расширению с результирующими трапецидальными нечеткими интервалами, описанными в главе 1. $F_1(x)$, $F_2(x)$, $F_3(x)$, $F_4(x)$ -

реперные точки трапецеидального нечеткого интервала. Аналогично ($t \rightarrow [t_1, t_2, t_3, t_4]$) преобразуются целевая функция и ограничения. Таким образом, задача сводится к минимизации нечетко-интервальной целевой функции при наличии нечетко-интервальных ограничений.

Данные, полученные в результате решения задачи с учетом нечетко-интервальной неопределенности исходных данных, представлены в табл. 4.5. Значения начального и оптимального решений и расхода газа для четкого и нечеткого (при $\alpha_{верх}=0.025$ и $\alpha_{ниж}=0.05$) вариантов представлены на рис. 4.5 и рис. 4.6.

Анализ результатов оптимизации с учетом нечетко-интервальной неопределенности приводит к тем же качественным выводам, что и при анализе интервального варианта. Так, при представлении выражения (4.21), используемого для расчета G_0 в нечетко-интервальном виде (например, при $\alpha_{верх} = 0.025$, $\alpha_{ниж} = 0.05$), для расхода газа в точке оптимума неинтервальной задачи получим нечетко-интервальную оценку $G'_{0.05}=[9.5, 9.75, 10.25, 10.5]$. Последнее, аналогично интервальному варианту, свидетельствует, что при применении результатов решения неинтервальной задачи оптимизации существует вероятность того, что в результате влияния неопределенных факторов расход газа превысит 10 ед., что приведет к невыполнению ограничения (4.21).

В нечетко-интервальном варианте задачи оптимизации для $\alpha_{верх} = 0.025$, $\alpha_{ниж} = 0.05$ получаем оптимальный нечетко-интервальный расход газа $G_{0.05}=[9.257, 9.501, 9.988, 10.231]$, естественно отличающийся от оцененного на основе неинтервального варианта $G'_{0.05}$. Нечеткий интервал $G_{0.05}$ с вероятностью 0.95 меньше 10. Таким образом, при применении нечетко-интервального подхода к учету неопределенности исходных данных с вероятностью 0.95 гарантируется выполнение ограничения (4.21) посредством уменьшения расхода газа (рис. 4.6), которое достигается за счет увеличения доли потребления жидкого топлива вторым агрегатом λ_2^{opt} от 0.583 до 0.63, что и приводит в итоге к некоторому увеличению среднеинтервальных значений целевой функции в точке оптимума для нечетко-интервальных формулировок задачи оптимизации. Ясно, что это увеличение растет с возрастанием неопределенности (ширины нечетких интервалов) исходных данных.

Таблица 4.5. Результаты оптимизации с учетом нечетко-интервальной неопределенности

	$\alpha_{\text{верх}} = 0$ $\alpha_{\text{ниж}} = 0$	$\alpha_{\text{верх}} = 0.0025$ $\alpha_{\text{ниж}} = 0.005$	$\alpha_{\text{верх}} = 0.005$ $\alpha_{\text{ниж}} = 0.01$	$\alpha_{\text{верх}} = 0.025$ $\alpha_{\text{ниж}} = 0.05$
Стартовая точка задачи оптимизации: $x_1^{\text{onm}}=27.5$, $\lambda_1^{\text{onm}}=0.5$, $\lambda_2^{\text{onm}}=0.5$.				
$[F_1^{\text{нач}}, F_2^{\text{нач}}, F_3^{\text{нач}}, F_4^{\text{нач}}]$	6.284	[6.253, 6.268, 6.3, 6.315]	[6.221, 6.253, 6.315, 6.347]	[5.97, 6.127, 6.441, 6.598]
Среднее значение интервала	6.284	6.284	6.284	6.284
Ширина начального интервала	0	0.037	0.073	0.367
Оптимальное решение				
$[F_1^{\text{min}}, F_2^{\text{min}}, F_3^{\text{min}}, F_4^{\text{min}}]$	3.052	[3.072, 3.08, 3.095, 3.103]	[3.091, 3.107, 3.138, 3.153]	[3.128, 3.211, 3.375, 3.458]
Среднее значение	3.052	3.087	3.122	3.293
Ширина интервала	0	0.018	0.036	0.192
x_1^{onm}	29.999	29.999	30	30
λ_1^{onm}	0	0	0	0
λ_2^{onm}	0.583	0.590	0.597	0.630

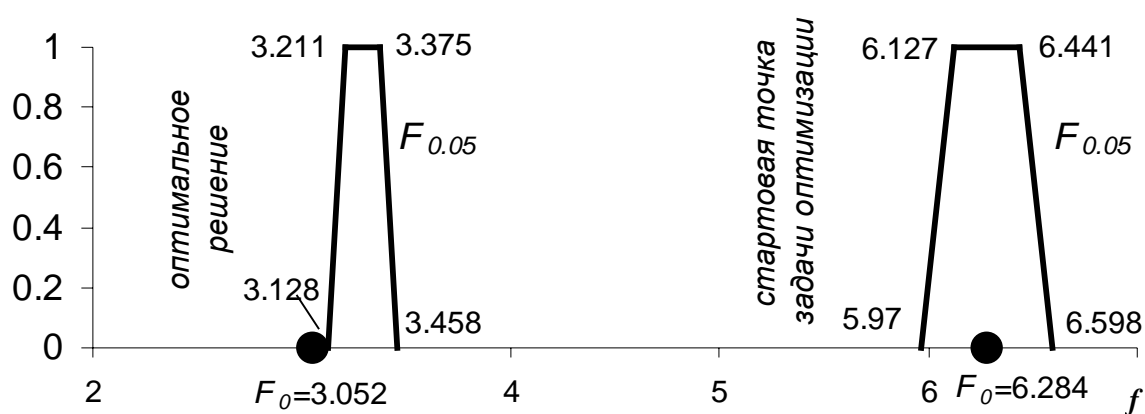


Рис. 4.5. Начальное и оптимальное решения задачи с учетом нечетко-интервальной неопределенности

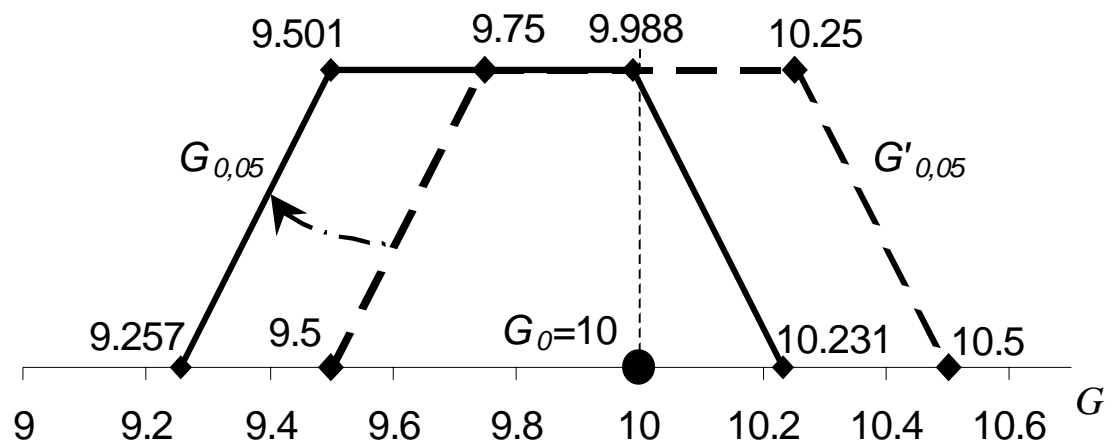


Рис. 4.6. Проверка ограничений при решении задачи с учетом нечетко-интервальной неопределенности

Таким образом, учет нечетко-интервального характера данных (например, при $\alpha_{\text{верх}} = 0.025$, $\alpha_{\text{ниж}} = 0.05$) позволяет определить необходимое количество жидкого топлива для бесперебойной работы энергоблоков (3.458 ед.) и таким образом обеспечить возможность их надежного функционирования. Это дает возможность определить пределы (интервалы), в которых будет израсходовано топливо [3.128, 3.458], и заранее планировать определенное увеличение предстоящих финансовых расходов. Использование нечетких интервалов, в отличие от четких, позволяет не только узнать возможные пределы искомой величины, но также определить наиболее вероятный интервал значений [3.211, 3.375], что дает более реалистичное представление об исследуемой проблеме.

4.3. Постановка задачи оптимизации работы совокупности энергоагрегатов в условиях неопределенности

Проблема энергосбережения в настоящее время представляет собой стратегическое направление деятельности не только отдельных предприятий, но и экономической политики государства в целом. Одним из основных важнейших направлений энергосбережения является снижение затрат топливных ресурсов на производство энергии

Рассмотрим задачу оптимизации работы группы котлоагрегатов: определение оптимального состава, паровых нагрузок и доли использования различных видов топлива каждым из них. В качестве критериев оптимизации режимов работы энергоагрегатов будем принимать следующие: максимум КПД теплоисточника; минимум расхода условного топлива; минимум материальных затрат на используемое топливо. Косвенно при этом

учитываются критерии экологического характера, поскольку они непосредственно связаны с критерием минимизации расхода топлива.

Исходными данными для задачи оптимизации являются: энергетические характеристики и параметры, полученные при режимно-наладочных испытаниях, статистические показатели работы энергоагрегатов, экономические факторы, а также характеристики используемого топлива, условия эксплуатации и другие необходимые для расчетов параметры. Для получения конкретных значений требуемых исходных данных необходимо собрать и обработать эту разноплановую информацию.

Схема информационных потоков, формирующих состав данных, необходимый для задачи оптимизации, представлена на рис. 4.7.

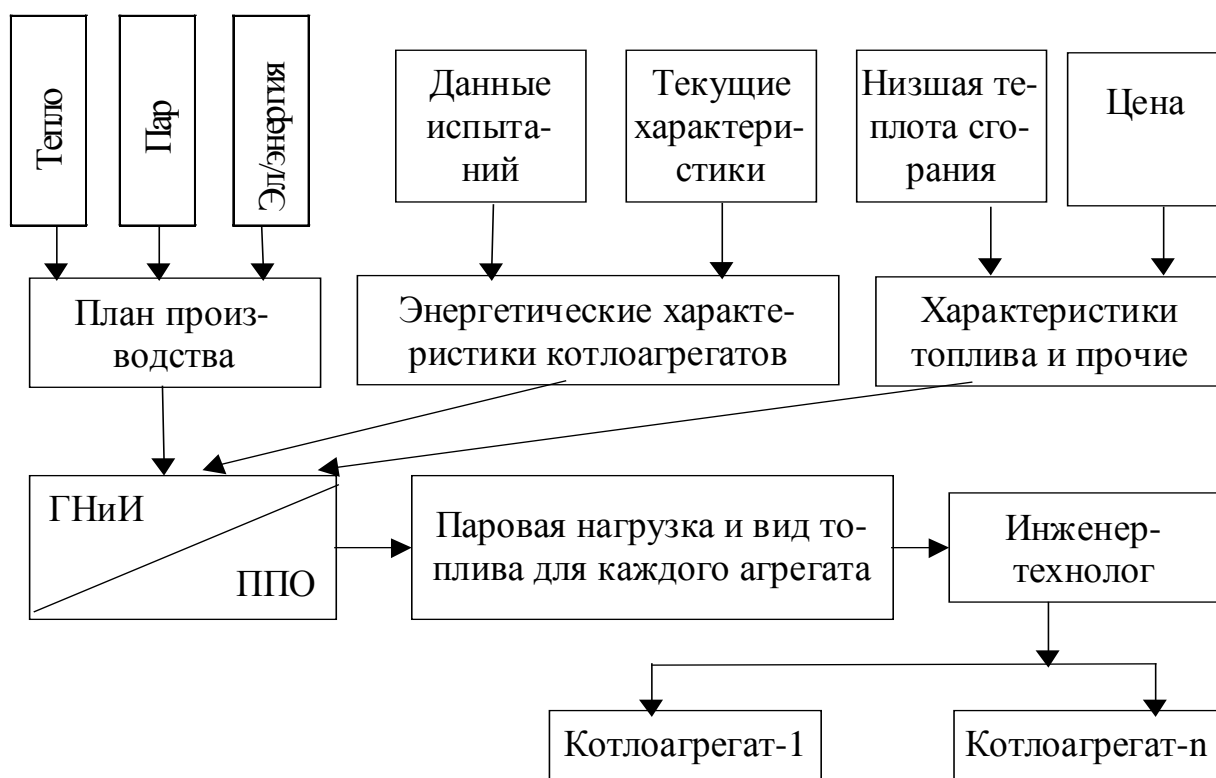


Рис. 4.7. Схема потоков информации при осуществлении процесса оптимизации режимов работы энергоагрегатов: ГНиИ – группа наладки и испытаний; ППО – прикладное программное обеспечение

В соответствии со структурой представленной на рис. 4.7 определяется суммарный план производства пара на основе заявок потребителей с учетом потерь при передаче энергии от производителя к потребителю. План включает:

- 1) объем производства тепла (пара) для технологических нужд предприятий;

- 2) объем производства пара для производства электроэнергии;
- 3) объем производства тепла для отопления и вентиляции;
- 4) объем производства тепла на горячее водоснабжение.

Группа наладки и испытаний (ГниИ) анализирует данные о практической работоспособности котлоагрегатов, их энергетические характеристики (КПД, расход топлива) и др. и определяет оптимальные режимы работы энергоагрегатов: находит оптимальный состав, распределяет заданную паровую нагрузку между отдельными агрегатами и определяет оптимальную долю (вид) топлива для каждого агрегата. Инженеры-технологи, используя разработанные режимные карты, настраивают агрегаты на обеспечение заданной паровой нагрузки в соответствии с полученным режимом работы. Экономисты определяют цену и другие показатели рентабельности работы энергопредприятия.

Используемые далее конкретные данные относятся к условиям функционирования Могилевской ТЭЦ-2, которая служила базой внедрения описанных ниже методик оптимизации. Могилевская ТЭЦ-2 является типичным энергетическим предприятием, и полученные результаты справедливы для других ТЭЦ и при некоторой модификации для котельных.

Для данной задачи, как и для большинства других реальных прикладных задач, существует проблема учета неопределенности исходных данных. Причинами неопределенности являются статистический характер исходных данных, полученных в результате натурных испытаний котлоагрегатов, нестабильность характеристик, погрешность приборов и другие, в том числе, субъективные факторы.

Рассмотрим постановку задачи применительно к теплоэлектроцентралю, в которой установлено n котлов, k из которых способны работать на жидком топливе или газе, а также на комбинированном топливе в любом сочетании жидкого топлива и газа ($k \leq n$) [60]. Учтем, что текущая суммарная паропроизводительность котлов D_K (тонн/час) ограничивается снизу планом работы потребителей.

Выделим следующие параметры, которые должны быть учтены в математической модели расчета энергетических характеристик котлов в зависимости от конструкции оборудования, сжигаемого топлива, условий эксплуатации:

- 1) вид, марка и характеристики сжигаемого топлива: низшая теплота сгорания Q_n^P , ккал/кг (кДж/кг) или ккал/м³ (кДж/м³); влажность на рабочую массу W_p , %; температура мазута, подаваемого в топку котла $t_{мл}$, °С; цена единицы топлива, уд.е./т или уд.е./тыс. м³;

2) параметры, определяемые при тепловом расчете котельных агрегатов: теоретический объем сухого воздуха, необходимый для полного сгорания топлива V^0 , н.м³/кг; нормативная температура холодного воздуха $t_{х.в.}$, °С; нормативные присосы воздуха в газовый тракт $\Delta\alpha_H$ и в топку $\Delta\alpha_H^T$; нормативные потери тепла корпусом котла в окружающую среду при номинальной часовой паропроизводительности q_5^H ; теплосодержание перегретого i_{ne} пара и питательной воды i_{ne} , ккал/кг (кДж/кг);

3) нормативные характеристики и параметры, определяемые при режимно-наладочных испытаниях энергоагрегатов: теплосодержание котловой воды $i_{кв}$, ккал/кг (кДж/кг); температура воздуха после воздухоподогревателей $t_{кф}^{//}$, °С; температура уходящих газов t_{yx} , °С; коэффициент избытка воздуха в режимном сечении α_{pc} ; потери тепла с химическим недожогом топлива q_3 , %;

4) корректирующие параметры, замеряемые в процессе эксплуатации при текущем режиме работы: теплосодержание котловой воды $i_{кв}$, ккал/кг (кДж/кг); температура воздуха после воздухоподогревателей $t_{кф}^{//}$, °С; температура уходящих газов t_{yx} , °С; коэффициент избытка воздуха в режимном сечении α_{pc} ; потери тепла с химическим недожогом топлива q_3 , %; присосы воздуха в газовый тракт $\Delta\alpha$ и в топку $\Delta\alpha^T$; температура холодного воздуха $t_{х.в.}$, °С.

5) входные управляемые переменные: состав загружаемых агрегатов; паровая нагрузка для каждого агрегата; доли использования различных видов топлива.

6) выходные параметры: оптимальный состав загружаемых агрегатов; оптимальная паровая нагрузка для каждого агрегата; оптимальные доли использования различных видов топлива каждым агрегатом;

7) Критерии эффективности функционирования системы: оптимальный КПД котельной установки; оптимальный расход условного топлива; оптимальные финансовые затраты на обеспечение заданной паровой нагрузки;

8) Другие факторы, характеризующие индивидуальные особенности установок и влияющие на экономичность работы котла.

Для выделенных характеристик методами регрессионного анализа были установлены их функциональные зависимости от текущей паровой нагрузки котлоагрегатов. В ходе

анализа было выявлено, что по критерию остаточной дисперсии наиболее удовлетворительным видом функциональных зависимостей являются регрессионные полиномы третьей степени:

$$f_i(D_{Ki}) = a_0^i + a_1^i \cdot D_{Ki} + a_2^i \cdot D_{Ki}^2 + a_3^i \cdot D_{Ki}^3. \quad (4.29)$$

Сформулируем целевую функцию критерия максимума КПД. Коэффициент полезного действия группы котлоагрегатов $\eta_{KY}^{\bar{op}}$ определим как средневзвешенную величину КПД всех агрегатов:

$$\eta_{KY}^{\bar{op}}(\{D_K\}) = \frac{\sum_{i=1}^n \eta_{Ki}^{\bar{op}}(D_{Ki}) \cdot Q_{Ki}^{\bar{op}}(D_{Ki})}{\sum_{i=1}^n Q_{Ki}^{\bar{op}}(D_{Ki})}, \quad (4.30)$$

где $\{D_K\} = \{D_{K1}, D_{K2}, \dots, D_{Kn}\}$ – вектор паропроизводительностей всех n агрегатов; $\eta_{Ki}^{\bar{op}}(D_{Ki})$ – КПД i -го агрегата (независимо от используемого топлива); $Q_{Ki}^{\bar{op}}(D_{Ki})$ – теплопроизводительность i -го агрегата.

Теплопроизводительность в (4.30) определяется на основе и паропроизводительности следующим соотношением:

$$Q_K^{\bar{op}}(D_K) = D_K \cdot (i_{ne} - i_{ng}) + G_{n,np} \cdot (i_{kv} - i_{ng}),$$

где $G_{n,np} = 0.01 D_K$ (тонн/час) – расход воды на непрерывную продувку; i_{ne} – энтальпия (теплосодержание) перегретого пара (при давлении $P_{ne} = 110$ кгс/см² и температуре $t_{ne} = 535$ °С имеем $i_{ne} = 825.05$ ккал/кг); i_{ng} – энтальпия питательной воды (при давлении $P_{ng} = 180$ кгс/см² и температуре $t_{ng} = 230$ °С имеем $i_{ng} = 237.4$ ккал/кг); i_{kv} – энтальпия котловой воды, ккал/кг.

Энтальпия перегретого пара и питательной воды определяется по таблицам теплофизических свойств воды и водяного пара в зависимости от давления и температуры пара (воды). Последние находятся из теплового расчета и для обеспечения на выходе заданных параметров пара в процессе работы энергоагрегатов поддерживаются на требуемом уровне. Энтальпия котловой воды определяется ее зависимостью от давления и температуры воды в барабане, которые измеряются при режимно-наладочных испытаниях.

Целевую функцию критерия минимума расхода условного топлива построим в виде:

$$B^{ysl}(\{D_K\}) = \sum_{i=1}^n B_i^{ysl}(D_{Ki}) = \sum_{i=1}^n \mathfrak{E} \cdot B_i(D_{Ki}), \quad (4.31)$$

где $B_i^{ysl}(D_{Ki})$ - расход условного топлива для обеспечения текущей паропроизводительности D_{Ki} i -ым парогенератором; $B_i(D_{Ki})$ - затраты натурального топлива на обеспечение заданной паропроизводительности i -ым парогенератором; \mathfrak{E} – топливный эквивалент, показывающий, какому количеству условного топлива равноценна единица массы (или объема) того или иного вида натурального топлива.

Топливный эквивалент в (4.31) находится как отношение низшей теплоты сгорания Q_n^p данного топлива к теплоте сгорания условного топлива:

$$\mathfrak{E} = \frac{Q_n^p}{7000}$$

Целевую функцию критерия минимума материальных затрат на используемое топливо определим следующим образом:

$$f_{M3}(\{D_K\}) = \sum_{i=1}^n B_i(D_{Ki}) \cdot p, \quad (4.32)$$

где p - цена используемого данным агрегатом вида топлива.

При постановке задачи учтем ограничения на суммарную паропроизводительность:

$$\sum_{i=1}^n D_{Ki} = D_K \quad (4.33)$$

и диапазоны рабочей паропроизводительности для каждого котла:

$$D_{Ki}^{min} \leq D_{Ki} \leq D_{Ki}^{max}, \quad i=1..n. \quad (4.34)$$

Выражения (4.30), (4.31), (4.32) справедливы для работы энергоагрегатов на одном виде топлива. Для решения поставленной задачи необходима модель, описывающая работу энергоагрегатов на комбинированном топливе. Однако в достаточной мере формализованы лишь методики для расчета теплоэнергетических параметров работы энергоагрегатов при

использовании одного вида топлива. В связи с этим был проведен анализ данных режимно-наладочных испытаний котлов при совместном сжигании природного газа и мазута [85]. Проведенный анализ показал, что разные виды топлива с достаточной для практики точностью могут комбинироваться аддитивным образом, т.е. для любого значения паровой нагрузки D_{Ki}^* любая линейная комбинация топливных компонент для i -го котла

$$B_{mi}^* = \lambda_i \cdot B_{mi}(D_{Ki}^*), \quad B_{gi}^* = (1-\lambda_i) \cdot B_{gi}(D_{Ki}^*),$$

также дает мощность, равную D_{Ki}^* .

В приведенных выше выражениях B_{mi}^* , B_{gi}^* - расходы жидкого топлива (тонн/час) и газа (тыс.м³/час), соответственно, обеспечивающие требуемую паропроизводительность D_{Ki}^* тонн/час.

Величины $B_{mi}(D_{Ki}^*)$, $B_{gi}(D_{Ki}^*)$ являются расходами жидкого топлива (тонн/час) и газа (тыс.м³/час), соответственно, при раздельном сжигании топлива для обеспечения паропроизводительности в D_{Ki}^* тонн/час. Параметр λ_i характеризует доли использования разных видов топлива i котлом. В данном случае λ_i - доля жидкого топлива, а $(1-\lambda_i)$ - доля газообразного топлива и

$$0 \leq \lambda_i \leq 1, \quad (4.35)$$

Следует отметить, что линейная комбинация топливных компонент справедлива для определения и других энергетических характеристик, в том числе и КПД. С учетом этого, целевую функцию (4.30) представим в следующем виде:

$$\eta_{KY}^{\bar{op}}(\{D_K\}, \{\lambda\}) = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\lambda_i \cdot \eta_{Ki/m}^{\bar{op}}(D_{Ki}) + (1-\lambda_i) \cdot \eta_{Ki/g}^{\bar{op}}(D_{Ki}) \right) \cdot Q_{Ki}^{\bar{op}}(D_{Ki})}{\sum_{i=1}^n Q_{Ki}^{\bar{op}}(D_{Ki})}, \quad (4.36)$$

где $\{\lambda\} = \{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n\}$ – вектор, характеризующий доли использования разных видов топлива всеми n агрегатами; $\eta_{Ki/m}^{\bar{op}}(D_{Ki})$, $\eta_{Ki/g}^{\bar{op}}(D_{Ki})$ - КПД i -го агрегата при работе на мазуте и на газе, соответственно.

Целевую функцию критерия минимума расхода условного топлива (4.31) представим в виде:

$$B^{ysl}(\{D_K\}, \{\lambda\}) = \sum_{i=1}^n (\lambda_i \cdot \mathcal{E}_m \cdot B_{mi}(D_{Ki}) + (1 - \lambda_i) \cdot \mathcal{E}_g \cdot B_{gi}(D_{Ki})), \quad (4.37)$$

где - \mathcal{E}_m , \mathcal{E}_g – топливные эквиваленты, показывающие какому количеству условного топлива равноценна единица массы (или объема) мазута и газа соответственно.

Целевая функция критерия минимума финансовых затрат на используемое топливо (4.32) принимает вид:

$$f_{M3}(\{D_K\}, \{\lambda\}) = \sum_{i=1}^n (\lambda_i \cdot B_{mi}(D_{Ki}) \cdot p_m + (1 - \lambda_i) \cdot B_{gi}(D_{Ki}) \cdot p_g), \quad (4.38)$$

где p_m , p_g - цены на жидкое топливо и газ соответственно.

Таким образом, сформулирована задача оптимизации режимов работы энергоагрегатов по одному из критериев(4.36)-(4.38) при совокупности ограничений (4.33), (4.34) и (4.35). В процессе оптимизации необходимо определить $(n-1+k)$ переменных: k переменных - λ_i , $i=1..k$; $(n-1)$ переменных - D_{Ki} , $i=1,..,(n-1)$.

Значения D_{Kn} определяются из следующего соотношения:

$$D_{Kn} = D_K - \sum_{i=1}^{n-1} D_{Ki}. \quad (4.39)$$

В следствие большого объема исходных данных и сложности аналитических выражений для расчета теплоэнергетических характеристик, представим модель расчета расхода топлива одним котлоагрегатом в виде иерархической структуры (дерева). Узлами данной структуры являются энергетические характеристики и исходные данные, требуемые для расчета (рис. 4.8).

Учитывая разнокачественный характер неопределенностей в описании исходных данных, для математической формализации неопределенностей выберем методы нечетко-интервальной математики.

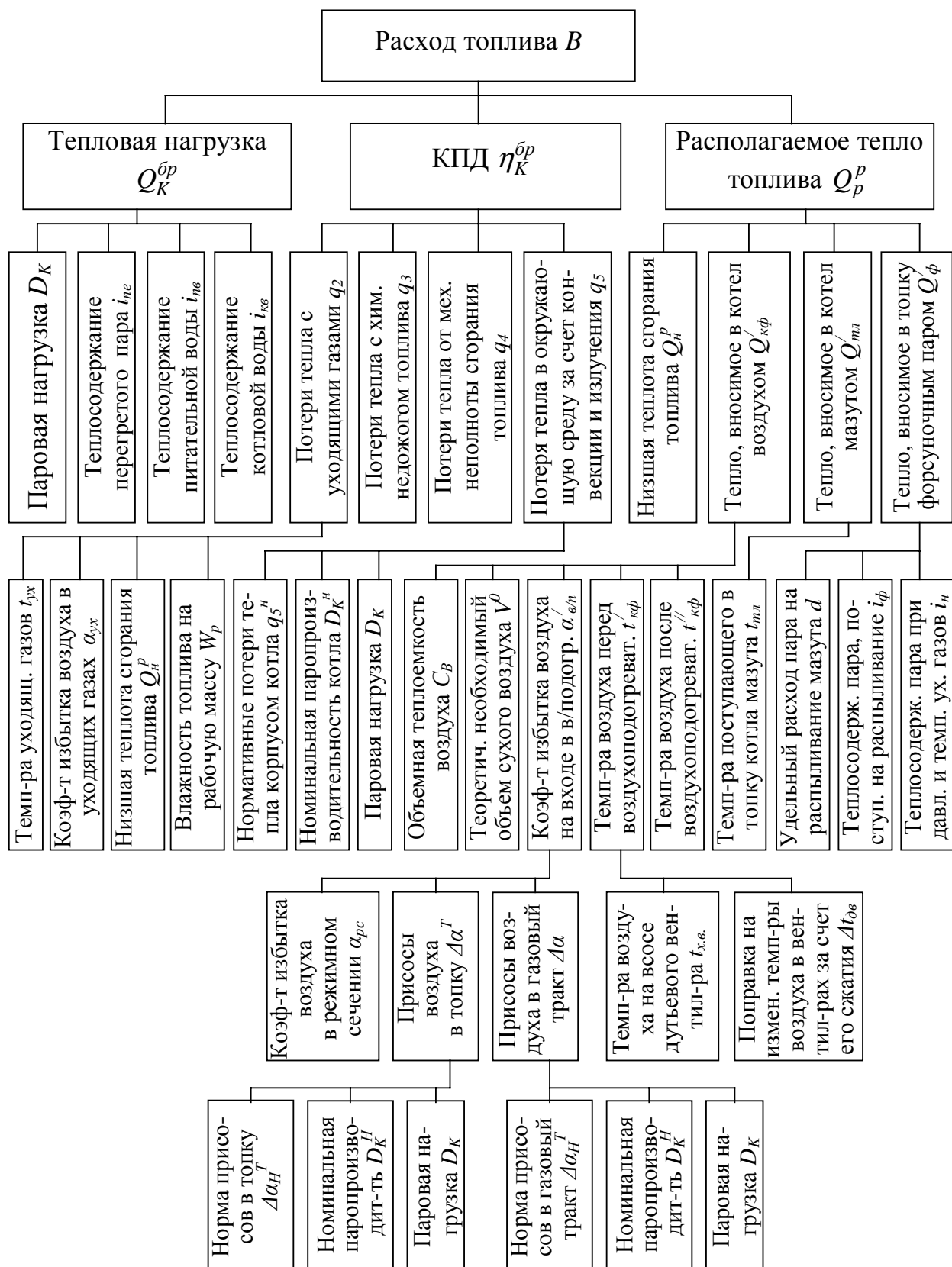


Рис. 4.8. Структура модели для расчета расхода топлива

4.4. Математическая модель функционирования энергоагрегатов

Построим базовую математическую модель функционирования энергоагрегатов, которую используем для моделирования и оптимизации задач энергетики. Модель построим на основе типовых методик расчета энергетических характеристик котлоагрегатов [48, 81,82].

Целевую функцию расхода топлива сформулируем в виде:

$$B = \frac{Q_K^{\text{бp}} \cdot 10^5}{Q_p^p \cdot \eta_K^{\text{бp}}} \quad (4.40)$$

где B - количество потребляемого топлива (т.н.т./час), необходимого для обеспечения тепловой нагрузки $Q_K^{\text{бp}}$ Гкал/час; Q_p^p - располагаемое тепло, ккал/кг; $\eta_K^{\text{бp}}$ - КПД котла брутто, %.

Тепловая нагрузка $Q_K^{\text{бp}}$ является заданной, плановой величиной.

Располагаемое тепло Q_p^p , входящая в целевую функцию (4.40), определяется соотношением:

$$Q_p^p = Q_n^p + Q_{\text{кф}}' + Q_{\text{мл}}' + Q_{\text{ф}}', \quad (4.41)$$

где Q_n^p - низшая теплота сгорания топлива, ккал/кг; $Q_{\text{кф}}'$ - тепло, вносимое в котел воздухом, ккал/кг; $Q_{\text{мл}}'$ — тепло, вносимое в котел мазутом, ккал/кг; $Q_{\text{ф}}'$ — тепло, внесенное в топку форсуночным паром, ккал/кг.

Величина $Q_{\text{кф}}'$ в (4.41) вычисляется по формуле:

$$Q_{\text{кф}}' = C_B \cdot V^0 \cdot \alpha_{\text{в/н}}' \cdot (t_{\text{кф}}'' - t_{\text{кф}}'), \quad (4.42)$$

где C_B - объемная теплоемкость воздуха - $C_B = 0.317$ ккал/(м³·°C); V^0 - теоретический объем сухого воздуха, необходимый для полного сгорания топлива - $V^0 = 10.42$ н.м³/кг; $\alpha_{\text{в/н}}'$ -

коэффициент избытка воздуха на входе в воздухоподогреватель; $t_{кф}^{//}$ — температура воздуха после воздухоподогревателей (калориферов); $t_{кф}'$ — температура перед калориферами.

Коэффициент избытка воздуха на входе в воздухоподогреватель рассчитывался по соотношению:

$$\alpha_{в/н}' = \alpha_{pc} - \Delta\alpha^T + 0.85 \Delta\alpha,$$

где α_{pc} - коэффициент избытка воздуха в режимном сечении, определяемый по данным режимно-наладочных испытаний; $\Delta\alpha^T$ - нормативное значение присосов воздуха в топку; $\Delta\alpha$ — нормативная величина присосов воздуха в газовый тракт.

Нормативное значение присосов воздуха в топку определяется по следующей формуле:

$$\Delta\alpha^T = \Delta\alpha_H^T \cdot \frac{D_K^H}{D_K},$$

где $\Delta\alpha_H^T$ - норма присосов в топку, определяемая в процентах от теоретически необходимого количества воздуха для номинальной нагрузки котлов - $\Delta\alpha_H^T = 0.05$ (согласно [108, §4.31]); D_K^H - номинальная паропроизводительность данного котла, тонн/час; D_K - паровая нагрузка.

Нормативное значение присосов воздуха в газовый тракт $\Delta\alpha$ определяется по следующей формуле:

$$\Delta\alpha = \Delta\alpha_H \sqrt{\frac{D_K^H}{D_K}},$$

где $\Delta\alpha_H$ - норма присосов в газовый тракт, которая определяется в процентах от теоретически необходимого количества воздуха для номинальной нагрузки котлов. Для котлов с паропроизводительностью до 210 тонн/час (БКЗ-210-140ф) $\Delta\alpha_H = 0.1$, а для котлов с паропроизводительностью до 420 тонн/час (ТГМ-84Б) $\Delta\alpha_H = 0.25$ [234, §4.31].

Температура воздуха после воздухоподогревателей (калориферов) - $t_{кф}^{//}$, входящая в (4.42), определяется по данным режимно-наладочных испытаний.

Температура воздуха перед калориферами - $t_{кф}'$ °С, определяющая $Q_{кф}'$ (4.42) рассчитывается из соотношения

$$t'_{кф} = t_{х.в.} + \Delta t_{\partial в},$$

где $t_{х.в.}$ - температура холодного воздуха на всосе дутьевого вентилятора, °C; $\Delta t_{\partial в}$ - поправка на изменение температуры воздуха в дутьевых вентиляторах за счет его сжатия, °C, определяемая по результатам испытаний.

Совокупность записанных соотношений для $\alpha'_{в/п}$, $\Delta \alpha^T$, $\Delta \alpha$, $t'_{кф}$ определяет количество тепла, вносимого в котел воздухом $Q'_{кф}$ (4.42). При работе на газе $Q'_{кф}$ незначительно и принимается равным нулю.

Тепло, вносимое в котел мазутом - $Q'_{мл}$, ккал/кг, входящее в (4.41), определяется зависимостью

$$Q'_{мл} = C_{мл} \cdot t_{мл} = (0.415 + 0.0006 \cdot t_{мл}) \cdot t_{мл},$$

где $C_{мл}$ - удельная теплоемкость мазута при температуре его поступления в топку, ккал/(кг·°C); $t_{мл}$ - температура поступающего в топку котла мазута, нагретого вне его, °C;

Тепло $Q'_{ф}$, внесенное в топку форсуночным паром являющееся последним слагаемым в (4.41), определяется для котлов с паромеханическими форсунками (ТГМ-84Б), работающими на мазуте по формуле

$$Q'_{ф} = d \cdot (i_{ф} - i_{н}),$$

где d - удельный расход пара на распыливание 1 кг мазута, кг пара / кг мазута. $d = 0.02$ (кг пара / кг мазута); $i_{ф}$ - энтальпия пара, поступающего на распыливание мазута, ккал/кг. $i_{ф} = 699.1$ (ккал/кг); $i_{н}$ - энтальпия пара при давлении и температуре уходящих газов, ккал/кг. $i_{н} = 600$ (ккал/кг).

Расчет нормативного КПД брутто $\eta_K^{бp}$, определяющего целевую функцию (4.40), производился по следующему соотношению:

$$\eta_K^{бp} = 100 - q_2 - q_3 - q_4 - q_5, \quad (4.43)$$

где q_2 - потери тепла с уходящими газами, %; q_3 - потери тепла с химическим недожогом топлива, %, определяемые по результатам режимно-наладочных испытаний; q_4 - потери тепла от механической неполноты сгорания топлива, % (для котлов, сжигающих газ и мазут, потери тепла от механической неполноты сгорания топлива принимаются равными нулю); q_5 - потеря тепла в окружающую среду за счет конвекции и излучения наружными поверхностями, %.

Составляющая q_2 определяется зависимостью:

$$q_2 = (K \cdot \alpha_{yx} + C) \cdot (t_{yx} - \frac{\alpha_{yx}}{\alpha_{yx} + b} \cdot t_{yx}) \cdot A_t \cdot K_Q \cdot 10^{-2}, \quad (4.44)$$

где K, C, b, A_t - коэффициенты, зависящие от сорта и приведенной влажности топлива; α_{yx} - коэффициент избытка воздуха в уходящих газах; t_{yx} - температура уходящих газов; K_Q - поправочный коэффициент, учитывающий внесенное в топку котла тепло с паром, подогретым воздухом и топливом. Коэффициенты K, C, b определяются либо аналитически, либо эмпирически экспериментальным путем.

Для мазута справедливы следующие соотношения:

$$K = 3.494 + 0.02 \cdot \frac{W_p}{Q_H^p} \cdot 10^3; \quad C = 0.437 + 0.04 \cdot \frac{W_p}{Q_H^p} \cdot 10^3; \quad b = 0.13.$$

где W_p - влажность топлива на рабочую массу, %.

Для газа имеем: $K = 3.53$; $C = 0.6$; $b = 0.18$;

Коэффициент A_t находится из зависимости:

$$A_t = 1 + (t_{yx} - 150) \cdot 13 \cdot 10^{-5}$$

Величина α_{yx} - коэффициент избытка воздуха в уходящих газах – определяется по соотношению

$$\alpha_{yx} = \alpha_{pc} + \Delta\alpha;$$

Температура t_{yx} уходящих газов определяется по результатам режимно-наладочных испытаний.

Поправочный коэффициент K_Q учитывает внесенное в топку котла тепло с паром, подогретым воздухом и топливом:

$$K_Q = \frac{Q_H^p}{Q_p^p}.$$

Величина q_5 определяется соотношением:

$$q_5 = q_5^H \cdot \frac{D_K^H}{D_K}, \quad (4.45)$$

где q_5^H - нормативные потери тепла котлом (корпусом котла) в окружающую среду при номинальной часовой паропроизводительности, определяемые по расчету завода-изготовителя или по данным [134]. В нашем случае $q_5^H = 0.52$.

Полученная система выражений (4.40)-(4.45) представляет собой базовую математическую модель теплоэнергетических процессов при совместной работе теплоэнергетических агрегатов.

Отметим, что важной проблемой при моделировании работы энергоагрегатов является относительно быстрое изменение их состояний и характеристик в процессе эксплуатации. В то же время испытания, в процессе которых определяются требуемые величины, являются трудоемкими и дорогостоящими. Решение этой проблемы осуществляется в два этапа. Периодически, относительно редко проводятся испытания, в которых определяются базовые характеристики: изменение теплосодержания котловой воды ($i_{кв}$, ккал/кг (кДж/кг)), температуры воздуха после воздухоподогревателей ($t_{кф}^{//}$, °C), температуры уходящих газов (t_{yx} , °C) и коэффициента избытка воздуха в режимном сечении (α_{pc}) в зависимости от изменений паропроизводительностей котлоагрегатов. Данные зависимости принимаются в качестве нормативных, и они являются базовыми при построении модели. В последней они представлены в виде регрессионных полиномов 3-ей степени типа (4.29), полученных в результате статистической обработки данных испытаний.

Далее в процессе эксплуатации указанные параметры измеряются при текущей нагрузке, определяется их отклонение от нормативных величин и, исходя из этого, делается поправка их значений во всем диапазоне рабочих нагрузок. При эксплуатации также измеряются и другие указанные выше характеристики. Это дает возможность путем периодической корректировки модели добиваться максимально возможного ее соответствия реальному объекту (энергоагрегату), что и было реализовано в разработанной модели.

§ 4.5. Оптимизация совместной работы энергоагрегатов в условиях неопределенности

Важной проблемой при практической реализации описанной методики оптимизации является выбор оптимального состава энергоагрегатов. Необходимо учитывать, что реальный диапазон рабочей паропроизводительности агрегатов, в отличие от описанного соотношением (4.34), может иметь разрывы, а паропроизводительности некоторых котлов, в зависимости от заданной суммарной паровой нагрузки теплоисточника, могут быть равными нулю ($D_{Ki} = 0$). Последнее означает, что возможны ситуации, когда для улучшения целевой функции из n работоспособных в данный момент котлов целесообразно остановить один (или несколько) из них.

Для решения этой проблемы, исходная задача разбивается на подзадачи, в каждой из которых методом перебора всех возможных вариантов задается определенная комбинация работающих и неработающих котлов. Всего таких комбинаций 2^n . Затем проверяется, может ли данный вариант обеспечить выполнение заданной суммарной паропроизводительности:

$$\sum_{i=1}^m D_{Ki}^{min} \leq D_K \leq \sum_{i=1}^m D_{Ki}^{max}, \quad (4.46)$$

где m – количество работающих котлов в данной комбинации.

При выполнении условия (4.46) осуществляется процесс оптимизации режимов работы энергоагрегатов, состоящий в максимизации КПД котельной установки (4.36), минимизации расхода условного топлива (4.37) либо минимизации финансовых затрат на обеспечение заданной паровой нагрузки (4.38) при ограничениях (4.33)-(4.35) с использованием метода случайного поиска «прямые выборочные процедуры с уменьшением интервала поиска» (описан в п.п. 4.1).

В соответствии с изложенным, процедура оптимизации разбивается на два этапа, каждый из которых схематически представлен на рис. 4.9 и рис. 4.10.

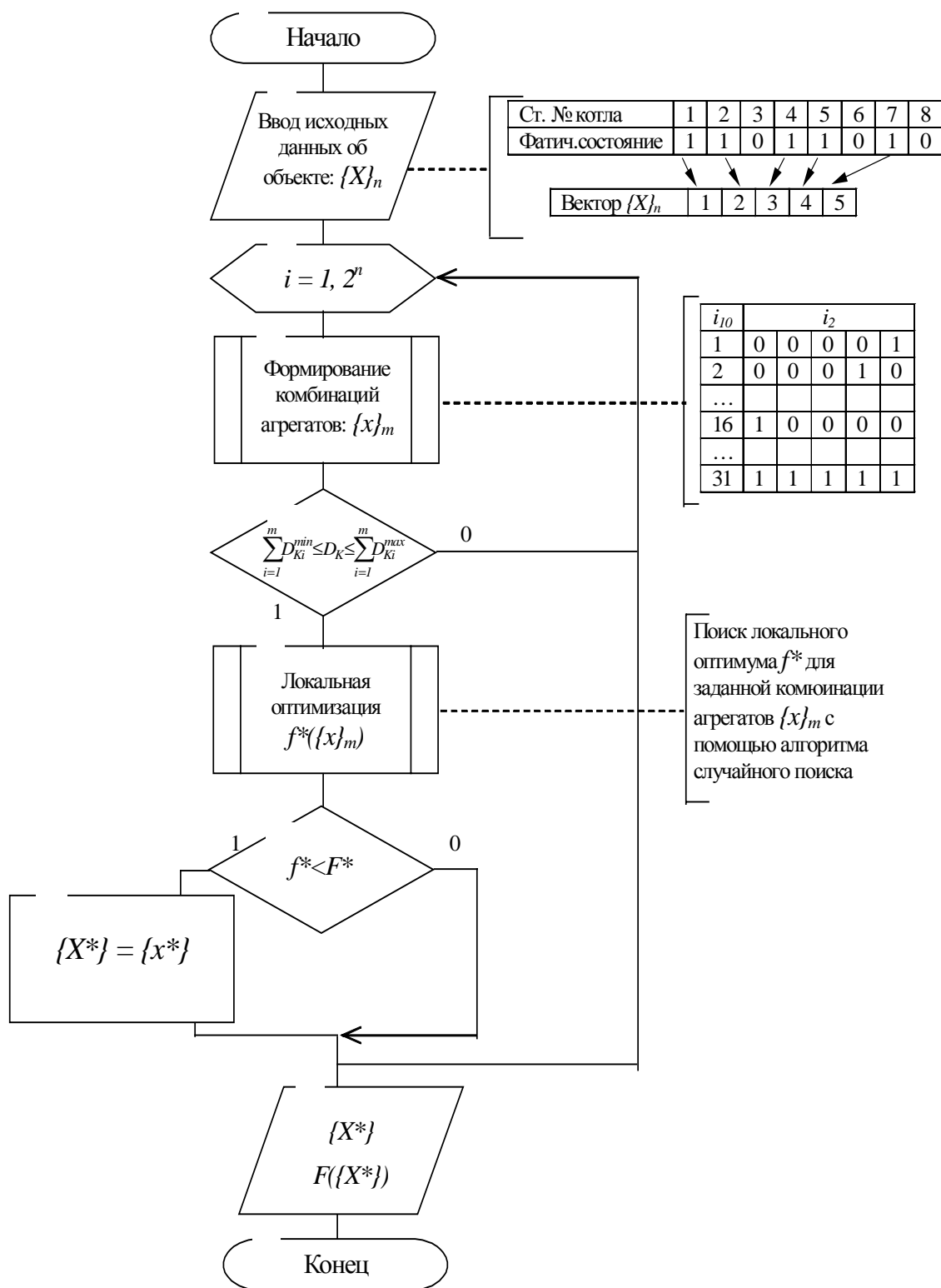


Рис. 4.9. Поиск оптимальной комбинации работающих агрегатов

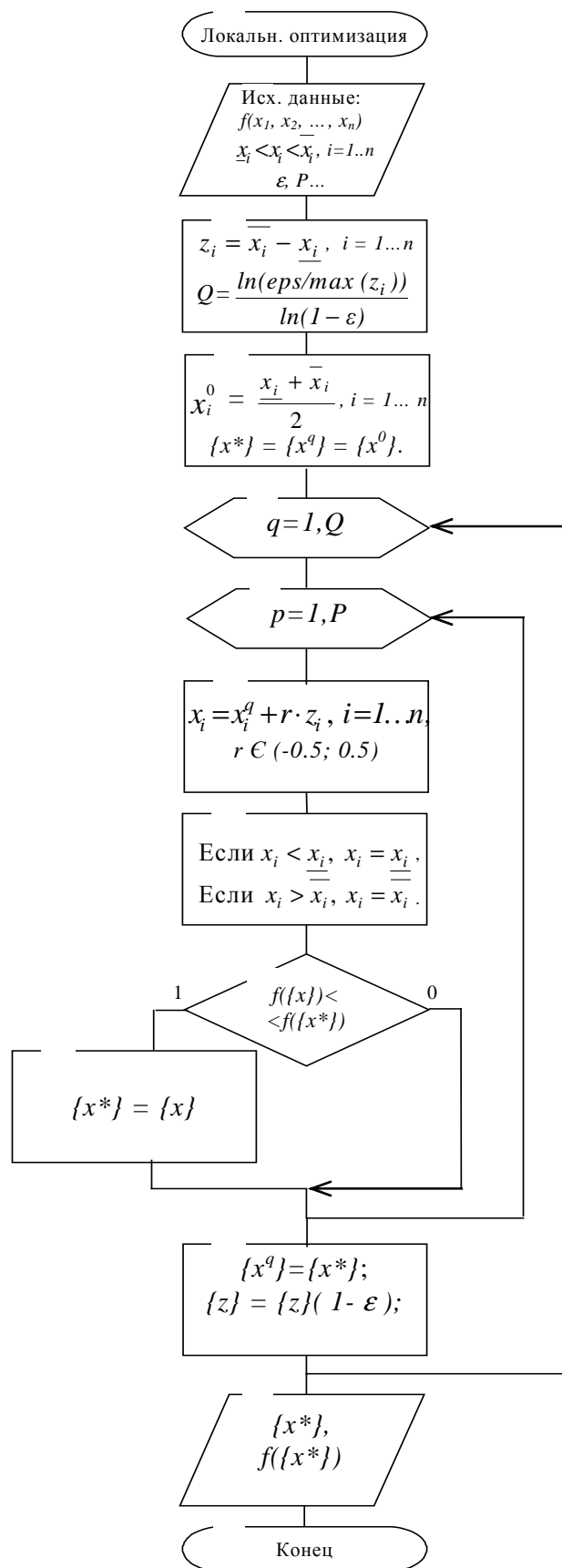


Рис 4.10. Алгоритм локальной оптимизации