

## МЕТОД ДИНАМИЧЕСКОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ ДЛЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОВЫХ НАГРУЗОК МЕЖДУ ТУРБИНАМИ ТЭЦ

Л.А. Беляев, О.Ю. Ромашова, С.А. Шевелев, В.М. Лебедев\*

Томский политехнический университет

\*Омский государственный университет путей сообщения

E-mail: bel@tpu.ru

Разработана математическая модель оптимального распределения отопительных и производственных нагрузок между турбоагрегатами ТЭЦ с использованием метода динамического программирования. Представлены результаты реализации программного комплекса на действующей ТЭЦ в виде графика оптимальной загрузки отопительных отборов в зависимости от температуры наружного воздуха.

### Ключевые слова:

ТЭЦ с поперечными связями, распределение нагрузок, метод динамического программирования, отопительные и производственные нагрузки, программный модуль.

Распределение электрических и тепловых нагрузок между турбоагрегатами ТЭЦ относится к многомерной оптимизационной задаче, которая на сегодняшний день окончательно не решена.

На промышленно-отопительных ТЭЦ в общем случае, помимо электрической мощности, распределению подлежат производственные и отопительные нагрузки разных параметров. Размерность оптимизационной задачи равна  $(Z+Y+1)$ , где  $Z$  – число групп турбин с одинаковыми параметрами пара в производственном отборе,  $Y$  – количество присоединенных к ТЭЦ тепломагистралей, объединенных параметрами температурного графика и пропускной способностью гидравлической системы. В зависимости от структуры отпуска тепла на ТЭЦ, числа и типов теплофикационных турбин размерность задачи может достигать 5–8, что делает невозможным использование для ее решения известных методов оптимизации в прямой постановке.

Для получения глобального оптимума применяют комплексное распределение нагрузок на ТЭЦ, сочетая различные методы оптимизации [1, 2]. В таких случаях задача распределения нагрузки регулируемых отборов становится самостоятельной в рамках общей задачи оптимизации режимов ТЭЦ. При декомпозиции исходной схемы она многократно решается для групп турбин, объединенных суммарными нагрузками производственных отборов  $D_{i\pi}^Z$  с давлением  $p_{i\pi}^Z$  и отопительных –  $D_{i\pi}^Y$ , обеспечивающих тепло магистраль  $Y$  с заданными параметрами. Размерность оптимизационной задачи для отдельных групп, в основном, не превышает двух, в отдельных случаях может быть равна трем. В этом случае возможности современной компьютерной техники позволяют применить метод динамического программирования в прямой постановке без использования неопределенных множителей Лагранжа [3] для числа турбин 3–5 с шагом изменения нагрузки отборов, в среднем, 1...5 т/ч.

При распределении тепловых нагрузок в качестве целевой функции принимается минимум удельного расхода тепла на группу турбин

$$q_e = Q_{T\text{вс}} / N_{\text{эс}} \rightarrow \min, \quad (*)$$

где  $Q_{T\text{вс}}$ ,  $N_{\text{эс}}$  – суммарный расход тепла на все турбоустановки группы и суммарная электрическая мощность турбин соответственно.

Так как в соответствии с методикой основного алгоритма [4] распределение тепловых нагрузок происходит в итерационном цикле, это накладывает свои отличительные особенности на модуль оптимизации тепловых нагрузок: лишь при первом обращении к нему нагрузки распределяются при работе всех турбин по тепловому графику. Входными параметрами при этом являются суммарные паровые нагрузки  $D_{i\pi}^Z$  и  $D_{i\pi}^Y$ , а выходными – оптимальные значения расходов пара в регулируемые отборы  $D_{i\pi}^{Zopt}$  и  $D_{i\pi}^{Yopt}$  и привязанная к ним мощность на тепловом потреблении  $N_{i\pi}^Z = N_{i\pi}^Y = (D_{i\pi}^{Zopt}, D_{i\pi}^{Yopt})$ . При последующих обращениях к входным параметрам добавляются электрические нагрузки конденсационных турбин, которые остаются постоянными при расчете  $D_{i\pi}^{Zopt}$  и  $D_{i\pi}^{Yopt}$ .

Числитель и знаменатель выражения (\*) расписываются как

$$Q_{T\text{вс}} = \sum_{s=1}^S Q_i(N_{\text{эс}}^0, D_{i\pi}^Z, D_{i\pi}^Y) + \sum_{j=1}^J Q_j(N_{\text{эс}}^0, D_{i\pi}^Z) + \sum_{k=1}^K Q_k(N_{\text{эс}}^0, D_{i\pi}^Y) + \sum_{r=1}^R Q_r(D_{i\pi}^Z) + \sum_{g=1}^G Q_g(D_{i\pi}^Z, D_{i\pi}^Y);$$

$$N_{\text{эс}} = \sum_{s=1}^S N_{\text{эс}}^0 + \sum_{j=1}^J N_{\text{эс}}^0 + \sum_{k=1}^K N_{\text{эс}}^0 + \sum_{r=1}^R N_{Tr}(D_{i\pi}^Z) + \sum_{g=1}^G N_{Tg}(D_{i\pi}^Z, D_{i\pi}^Y),$$

где  $S$  – число конденсационных турбин с двумя регулируемыми (производственным и отопительным) отборами;  $J$  – число турбин с одним производственным отбором;  $K$  – число турбин с одним отопительным отбором;  $R, G$  – число противодавленческих турбин типа Р и ПТР соответственно.

Обозначим:  $n$  – общее число турбин в группе;  $n_Z$  – число турбин, отпускающих пар давлением  $p_{i\pi}^Z$ ,  $n_Y$

– количество турбин, имеющих отопительные отборы. В общем случае:  $n_z \leq n$ ;  $n_y \leq n$ ;  $n_z = S + J + R + G$ ;  $n_y = S + K + G$ .

Ограничения:

$$D_{\Pi\Sigma}^Z = \sum_{i=1}^{n_z} D_{\Pi i}^Z;$$

$$\sum_{i=1}^{n_z} D_{\Pi i}^Z + D_{\text{POY}}^{z+1} = D_{\Pi\Sigma}^Z + \sum_{j=1}^m D_{\Pi B_j} + D_{\text{POY}}^{z-1};$$

$$D_{\Pi i}^{\min Z} \leq D_{\Pi i}^Z \leq D_{\Pi i}^{\max Z};$$

$$D_{T\Sigma}^Y = \sum_{j=1}^{n_y} D_{T_j}^Y;$$

$$\sum_{j=1}^{n_y} D_{T_j}^Y + D_{\text{POY}}^{1,2} = \sum_{j=1}^l D_{B_j}^Y + D_{\text{CH}}^{1,2};$$

$$D_{T_j}^{\min Y} \leq D_{T_j}^Y \leq D_{T_j}^{\max Y};$$

$$D_{O_{B_j}}^Y + D_{\Pi B_j}^Y = D_{B_j}^Y, \quad j = 1 \dots l;$$

$$D_{T\Sigma}^Y = \sum_{j=1}^l D_{B_j}^Y,$$

где  $m$  – число пиковых бойлеров, питаемых паром из магистрали  $p_{\Pi}^z$ ;  $k$  – количество турбин, присоединенных по отопительным отборам к тепломагистрали с параметрами  $Y$ ;  $l$  – число бойлерных установок, отнесенных к тепломагистрали  $Y$ ;  $D_{\Pi}$ ,  $D_T$  – расходы пара в производственный и отопительный отборы;  $D_{\Pi}^{\min}$ ,  $D_{\Pi}^{\max}$  – минимальный и максимальный расходы пара в производственный отбор турбин типа ПТ;  $D_{\Pi}^{\min}$ ,  $D_{\Pi}^{\max}$  – ограничения по расходу пара в отопительные отборы теплофикационных турбин;  $D_{O_{B_j}}$ ,  $D_{\Pi B_j}$  – значения расхода пара на основные и пиковые бойлера;  $D_{O_{Yj}}$  – суммарный расход пара на бойлерную;  $D_{\text{POY}}^{z+1}$ ,  $D_{\text{POY}}^{z-1}$  – расходы пара от редуционно – охладительных установок (РОУ) с параметрами  $p_{z+1}/p_z$ , подключенных к паровым магистралям более высокой ступени давления и с параметрами  $p_z/p_{z-1}$  в нижестоящие коллекторы соответственно;  $D_{\text{POY}}^{1,2}$  – расход пара из коллектора  $p_{\Pi}^z$  в общестанционную магистраль с параметрами 0,1...0,25 МПа;  $D_{\text{CH}}^{1,2}$  – расход пара на общестанционные теплообменники низкого потенциала (подогреватели сырой и добавочной воды, деаэраторы подпитки теплосети и т. д.). Балансовое уравнение записывается для каждой паровой магистрали с соответствующими параметрами  $p_{\Pi}^z$ .

Приведем алгоритм метода двумерного динамического распределения тепловых нагрузок при работе станции по тепловому графику. В соответствии с методикой [5] он включает две задачи: прямую, позволяющую получить оптимальные решения на  $k$ -ом шаге при любом значении суммарных нагрузок, и обратную, в результате которой находится оптимальная загрузка отдельных агрегатов при заданных суммарных нагрузках. Прямая задача заключается в пошаговом построении функций согласно рекуррентным соотношениям Беллмана.

Используя принцип оптимальности, распределение нагрузок сводят к решению  $n$  двумерных задач.

На первом шаге многостадийного процесса строятся функции

$$f_{Q_1}(D_{\Pi}, D_T) = Q_1(D_{\Pi}, D_{T1});$$

$$f_{N_1}(D_{\Pi}, D_T) = N_1(D_{\Pi}, D_{T1}),$$

при  $D_{\Pi}^{\min} \leq D_{\Pi} \leq D_{\Pi}^{\max}$ ;  $D_{T1}^{\min} \leq D_{T1} \leq D_{T1}^{\max}$ .

На каждом последующем шаге в соответствии с рекуррентными соотношениями Беллмана находится оптимальное распределение между  $k$ -ой турбиной и группой из  $(k-1)$  турбин. Для этого рассматриваются зависимости

$$f_{Q_k}(D_{\Pi}, D_T) = Q_k(D_{\Pi k}, D_{T_k}) +$$

$$+ f_{Q_{k-1}}[(D_{\Pi\Sigma} - D_{\Pi(k-1)}), (D_{T\Sigma} - D_{T(k-1)})];$$

$$f_{N_k}(D_{\Pi}, D_T) = N_k(D_{\Pi k}, D_{T_k}) +$$

$$+ f_{N_{k-1}}[(D_{\Pi\Sigma} - D_{\Pi k}), (D_{T\Sigma} - D_{T_k})];$$

$$D_{\Pi k}^{\min} \leq D_{\Pi k} \leq D_{\Pi k}^{\max}; \quad D_{T_k}^{\min} \leq D_{T_k} \leq D_{T_k}^{\max},$$

с использованием которых решаются оптимизационные задачи

$$\gamma_k(D_{\Pi}, D_T) = \min F_k =$$

$$= \min \left[ \frac{Q_k(D_{\Pi k}, D_{T_k}) + f_{Q_{k-1}}((D_{\Pi\Sigma} - D_{\Pi k}), (D_{T\Sigma} - D_{T_k}))}{N_k(D_{\Pi k}, D_{T_k}) + f_{N_{k-1}}((D_{\Pi\Sigma} - D_{\Pi k}), (D_{T\Sigma} - D_{T_k}))} \right].$$

При  $D_{\Pi k}^{\min} \leq D_{\Pi k} \leq D_{\Pi k}^{\max}$ ;  $D_{T_k}^{\min} \leq D_{T_k} \leq D_{T_k}^{\max}$ , в результате чего определяются дискретные функции оптимальных значений  $D_{\Pi k}^{\text{opt}}(D_{\Pi}, D_T)$  и  $D_{T_k}^{\text{opt}}(D_{\Pi}, D_T)$ .

Предложенный математический аппарат двумерного динамического программирования использовался для распределения тепловых нагрузок на ТЭЦ – СХК с поперечными связями одного начального давления  $p_0=8,8$  МПа, имеющей в своем составе девять теплофикационных турбоустановок различных типов: с одним регулируемым отбором – турбины Т-25-90, К-50-90-2М и три КТ-100-90; с двумя регулируемым отборами – две установки ПТ-25-90, а также два противоаварийных агрегата Р-12-90/18. Отпуск тепла от ТЭЦ осуществляется в виде пара двух давлений – 1,6 и 1,0 МПа и в виде горячей воды от трех бойлерных БУ-1, БУ-2 и БУ-3 по своим температурным графикам.

Производственные отборы турбин ПТ-25-90 объединены коллектором 0,8...1,3 МПа, а отопительные установок ПТ-25-90, Т-25-90 и КТ-50-90 – коллектором 0,12...0,25 МПа. Производственная нагрузка в паре с давлением 1,6 МПа отпускается от противоаварийных турбин, а в паре с давлением 1,0 МПа – из производственного коллектора 0,8...1,3 МПа. Отопительная нагрузка БУ-1 и БУ-2 покрывается: в базовой части регулируемым отборами турбин ВКТ-100-90 и из коллектора 0,12...0,25 МПа, а в пиковой – из коллектора 0,8...1,3 МПа. БУ-3 не имеет пиковой части и снабжается паром из коллектора 0,12...0,25 МПа.

Для описанной выше ТЭЦ числитель и знаменатель целевой функции расписываются как

$$Q_{T\Gamma\Sigma}^g = \sum Q_i = \sum_{m=1}^{M=2} Q_m(D_{Tm}, D_{Tm}) + \sum_{k=1}^{K=5} Q_k(D_{Tk}) + \sum_{l=1}^{L=2} Q_l(D_{Tl}),$$

$$N_{\Sigma}^g = \sum N_i = \sum_{m=1}^{M=2} N_m(D_{Tm}, D_{Tm}) + \sum_{k=1}^{K=5} N_k(D_{Tk}) + \sum_{l=1}^{L=2} N_l(D_{Tl}),$$

где  $M$  – количество турбин с двумя регулируемыми (производственным и отопительным) отборами;  $K$  – количество турбин с одним отопительным отбором;  $L$  – количество противодавленческих турбин типа Р. Зависимости  $Q_i$  и  $N_i$  отдельных турбин от расходов пара в регулируемые отборы определяются на основе энергетических характеристик.

Система ограничений определяется структурой поперечных связей станции:

- по производственной 1,6 МПа

$$\sum_{i=1}^2 D_{Ti}^{1,6 \text{ МПа}} = D_{T\Sigma}^{1,6 \text{ МПа}}, D_{Ti}^{\min} \leq D_{Ti}^{1,6 \text{ МПа}} \leq D_{Ti}^{\max},$$

- по паровой нагрузке коллектора 0,8...1,3 МПа

$$\sum_{i=1}^2 D_{Ti}^{1,0 \text{ МПа}} = D_{T\Sigma}^{\text{кол}(0,8...1,3)} = D_{np \Sigma}^{1,0 \text{ МПа}} + D_{ПБ\Sigma},$$

$$D_{Ti}^{\min} \leq D_{Ti}^{1,0 \text{ МПа}} \leq D_{Ti}^{\max},$$

- по суммарной нагрузке отопительных отборов

$$\sum_{i=1}^7 D_{Ti} = D_{T\Sigma} = D_{OB1} + D_{OB2} + D_{OB3} + D_{подн.},$$

$$D_{Ti}^{\min} \leq D_{Ti} \leq D_{Ti}^{\max},$$

где  $D_{T\Sigma}^{1,0 \text{ МПа}}$ ,  $D_{T\Sigma}^{1,6 \text{ МПа}}$ ,  $D_{T\Sigma}$  – суммарная тепловая нагрузка производственных отборов с давлением 1,0 и 1,6 МПа и отопительных отборов соответственно;  $D_{Ti}^{\min}$  и  $D_{Ti}^{\max}$  – минимальное и максимальное значения расхода пара в производственный отбор;  $D_{Ti}^{\min}$  и  $D_{Ti}^{\max}$  – диапазон изменения отопительной нагрузки турбин;  $D_{np \Sigma}^{1,0 \text{ МПа}}$  – расход пара на производство с давлением 1,0 МПа;  $D_{ПБ\Sigma}$  – суммарная нагрузка пиковых бойлеров;  $D_{OB1}$ ,  $D_{OB2}$ ,  $D_{OB3}$  – паровые нагрузки основных бойлеров. В связи с тем, что часть тепловой нагрузки основных бойлеров БУ-1 и БУ-2 привязана к отборам турбин ст. № 11, 12, 14 типа КТ-100-90, а часть питается из коллектора 1,2...2,5 МПа, в систему ограничений добавляются соотношения:

$$D_{T\Sigma}^{\text{кол}(1,2...2,5)} = D_{T\Sigma} - D_{Ti}^{TA11,12,14},$$

$$D_{Ti}^{TA12,14} \leq D_{OB1}; D_{Ti}^{TA11} \leq D_{OB2},$$

где  $D_{Ti}^{TA11,12,14}$  – суммарная нагрузка отопительных отборов турбоагрегатов № 11, 12, 14.

В результате анализа состава, системы ограничений и параметров ТЭЦ предложен алгоритм последовательного итерационного расчета на основе декомпозиции исходной схемы. В среде программирования Borland Delphi 7.0 реализована программа выбора оптимального состава методом двумерного динамического программирования.

Программа состоит из модулей:

- 1) ввод исходных данных;
- 2) расчет схемы отпуска тепла с горячей водой;
- 3) определение суммарных нагрузок в паре разного потенциала;
- 4) распределение отопительной и производственной нагрузок методом двумерного динамического программирования;
- 5) определение энергетических характеристик турбоустановок;
- 6) учет ограничений на тепловые нагрузки БУ 1, 2 и 3;
- 7) распределение производственного пара между турбинами Р-12;
- 8) расчет мощности на тепловом потреблении и количества тепла, подведенного к турбоустановке;
- 9) вывод результатов распределения.

В качестве примера на рисунке приведены результаты оптимальной загрузки отопительных отборов при заданных параметрах системы горячего водоснабжения в зависимости от температуры наружного воздуха,  $t_{нв}$ .

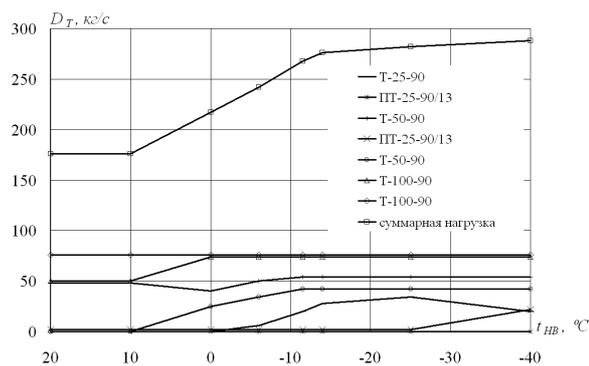


Рисунок. Оптимальная загрузка отопительных отборов турбин ТЭЦ  $p_0=8,8$  МПа в зависимости от температуры наружного воздуха

### Выводы

1. Разработан аппарат многомерного распределения тепловых нагрузок с использованием метода динамического программирования в прямой постановке.
2. В соответствии с назначением модуля оптимизации тепловых нагрузок в общей задаче распределения нагрузок на ТЭЦ за критерий эффективности принят удельный расход тепла на группу турбин. Выбранная целевая функция видоизменила рекуррентное соотношение Беллмана по сравнению с его классическим представлением.
3. Программный комплекс для оптимизации тепловых нагрузок апробирован на ТЭЦ СХК (г. Томск) при работе турбин по тепловому графику.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Качан А. Д. Оптимизация режимов и повышение эффективности работы паротурбинных установок ТЭС. – Минск: Высшая школа, 1985. – 176 с., ил.
2. Шишея П.Н. Исследование теплофикационных паротурбинных установок и разработка методов внутростанционной оптимизации режимов их работы: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Минск: Белорусский политехнический институт, 1980.
3. Шахвердян С.В., Бабаян Д.М. Приложение трехмерного динамического программирования к оптимизации режима ТЭЦ с применением ЦВМ // Теплоэнергетика. – 1969. – № 2. – С. 63–66.
4. Беляев Л.А., Ромашова О.Ю. Приложение динамического программирования к оптимизации режимов ТЭЦ на основе декомпозиции исходной структуры станции // Энергетика: Экология, надежность, безопасность: Матер. докладов X Всеросс. научно-техн. конф. – Томск, 8–10 дек. 2004. – Томск: Изд-во ТПУ, 2004. – С. 189–191.
5. Беллман Р., Дрейфус С. Прикладные задачи динамического программирования. – М.: Наука, 1968. – 458 с.

Поступила 26.09.2008 г.

УДК 621.311.22.002.5

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОТОКОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПИТАТЕЛЬНОЙ ВОДЫ НА ТЭЦ С ПОПЕРЕЧНЫМИ СВЯЗЯМИ

Л.А. Беляев, О.Ю. Ромашова, В.М. Лебедев\*

Томский политехнический университет

\*Омский государственный университет путей сообщения

E-mail: bel@tpu.ru

*На основе теории гидравлических цепей создана математическая модель распределения потока питательной воды по системе подогревателей высокого давления ТЭЦ с поперечными связями. Разработан алгоритм расчета потокораспределения с учетом напорной характеристики параллельно работающим питательным насосов. Предложенная методика пригодна для использования в инженерных расчетах энергетических характеристик турбоагрегатов, а также для выбора состава работающих питательных насосов.*

### Ключевые слова:

*Гидравлическая цепь, напор, питательный насос, потокораспределение, система подогревателей высокого давления, питательная вода, ТЭС с поперечными связями, расход пара.*

Анализ и оптимизация режимов работы ТЭЦ, а также расчет прогнозируемых нормативных удельных расходов топлива на период выполняется на базе нормативных энергетических характеристик основного оборудования с учетом поправок на отклонение основных параметров от нормативных.

Для ТЭЦ с поперечными связями значительное искажение конечного результата возможно из-за неучета отклонения расхода питательной воды  $G_{ПВД}$  через подогреватели высокого давления (ПВД) отдельных турбоустановок от расхода острого пара  $D_0$  на них [1]. Причины несоответствия  $G_{ПВД}$  и  $D_0$  на таких станциях объясняются спецификой их технологического процесса:

- 1) расход питательной воды через группы ПВД отдельных турбин не соответствует расходу острого пара на них и определяется гидравлической характеристикой питательного тракта;
- 2) работающие или находящиеся в горячем резерве редуционно-охладительные установки (РОУ) требуют дополнительного количества питательной воды котлов, распределяющейся по группам ПВД;
- 3) при отпуске тепла потребителю от РОУ острого пара суммарный расход пара на турбоустановки меньше суммарного расхода питательной воды;

- 4) на станциях с несколькими ступенями давления суммарный расход острого пара на турбины нижней ступени может превышать суммарный расход питательной воды через ПВД этих турбин.

Для расчета фактического распределения питательной воды по группам ПВД в конкретных режимах требуется математическое моделирование питательного тракта (ПТ) ТЭЦ. Математическая модель гидравлической схемы ПТ может быть включена в расчет энергетических характеристик турбин и котлов при их компьютерном моделировании либо использоваться при расчете поправок к ним.

### Математическое описание питательного тракта

Питательный тракт (ПТ) ТЭЦ, включающий питательные насосы, группы ПВД отдельных турбоагрегатов, котлоагрегаты, обводные линии и регулирующую арматуру, представляет собой сложную гидравлическую систему [2]. Как в любой гидравлической цепи (ГЦ), в ПТ различают три основные составляющие (подсистемы): 1) *источники* давления (питательные насосы) и расхода (уравнивательный коллектор за деаэраторами питательной воды), обеспечивающие притоки транспортируемой среды и привносящие энергию в систему;