

# ОПТИМИЗАЦИЯ НАГРУЗКИ ПАРАЛЛЕЛЬНО РАБОТАЮЩИХ ТУРБОАГРЕГАТОВ ПО ДАННЫМ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПРИ НЕПОЛНЫХ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ

*Л.С. Казаринов, Т.А. Игнатова, О.В. Колесникова*

Рассматриваются проблемы оптимизации нагрузки параллельно работающим турбоагрегатов по данным эксплуатации при неполных исходных данных и пути ее решения. Приводятся математический алгоритм решения задачи оптимизации нагрузки, программа «ТГ-ПАР» и результаты оптимизации при помощи программы «ТГ-ПАР» нагрузки параллельно работающим турбоагрегатов ТЭС ОАО «ММК».

*Ключевые слова: турбоагрегаты, оптимизация нагрузки турбоагрегатов.*

Одно из главных направлений повышения эффективности топливоиспользования на ТЭС - внутростанционная оптимизация режимов паротурбинных установок и, в частности, оптимальное распределение нагрузок между агрегатами. Оптимизация режимов ТЭС весьма эффективна, так как в этом случае достигается экономия топлива практически без дополнительных капитальных вложений и эксплуатационных затрат [1].

Особенностью рассмотренной постановки задачи оптимизации нагрузки станций с общим коллектором является то, что по технологическим условиям технически сложно измерить количество тепла отбираемого от каждой турбины в отдельности. Это происходит потому, что пар из отдельных турбин поступает на общий коллектор, в котором трудно выделить индивидуальный вклад конкретной турбины. Измерению доступно только общее количество тепла по отдельным турбинам. С другой стороны, для рационального распределения нагрузки по турбинам необходимо знание индивидуальных энергетических характеристик каждой турбины. Таким образом, рассматриваемая задача решается при неполных исходных данных.

## 1. Постановка задачи оптимизации

Для эффективного управления режимами параллельно работающих турбоагрегатов необходимо знать их энергетические характеристики, которые представляют собой зависимости объемов потребления пара от объемов выработки электрической и тепловой энергии, а также режимных факторов.

Казаринов Лев Сергеевич - д.т.н., профессор, декан приборостроительного факультета ЮУрГУ, заведующий кафедрой автоматики и управления ЮУрГУ; [kazarinov@ait.susu.ac.ru](mailto:kazarinov@ait.susu.ac.ru).

Игнатова Татьяна Александровна - инженер кафедры автоматики и управления ЮУрГУ; [tanva\\_ignatova@mail.ru](mailto:tanva_ignatova@mail.ru).

Колесникова Ольга Валерьевна - к.т.н., доцент кафедры автоматики и управления ЮУрГУ; [popova\\_ov@ait.susu.ac.ru](mailto:popova_ov@ait.susu.ac.ru).

Постановку задачи оптимизации сформулируем для нормированных величин. Целью задачи оптимизации является минимизация потребления пара

$$\min d_0 = (n-1)D_{cp} / (D_{max} - D_{cp}) + \sum_{i=1}^n d_i^p, \quad (1)$$

где  $D_{cp}$ ,  $D_{max}$  - соответственно средняя и максимальная величина пара, потребляемого турбинами;  $d_0$  - общее расчетное потребление пара блоком турбин;  $d_i^p$  - расчетное значение потребления пара  $i$ -й турбиной, которое определяется на основе следующего соотношения

$$d_i^p = a_{0i} + a_{1i}w_{zi}^T + a_{2i}d_{Ti}^T, \quad (2)$$

где  $a_{ji}$  - неизвестные коэффициенты зависимости;  $w_{zi}^T$  - текущее значение электрической энергии, вырабатываемое  $i$ -й турбиной;  $d_{Ti}^T$  - текущее значение расхода пара на теплофикацию для  $i$ -й турбины.

Для записи (1) использовалось правило суммирования нормированных величин. Если для абсолютных величин  $y = \sum_{i=1}^n x_i$ , то для нормированных

$\eta = (n-1) \frac{x_{cp}}{x_{max} - x_{cp}} + \sum_{i=1}^n \xi_i$ , где  $\eta$  - нормированная величина  $y$ ;  $\xi_i$  - нормированная величина  $x_i$ .

## 2. Решение задачи оптимизации

Для указанной задачи существуют следующие ограничения.

1. На потребление пара турбиной, исходя из следующих областей границы нормативной паровой характеристики

- первая граница (режим с нулевым теплофикационным отбором)

$$d_0 \geq g_{1i} + h_{1i}w_3; \quad (3)$$

- вторая граница (ограничение на максимальный расход в конденсатор)

$$d_0 \geq g_{2i} + h_{2i}w_3, \quad (4)$$

где  $g_{1i}$ ,  $h_{1i}$ ,  $g_{2i}$ ,  $h_{2i}$  – коэффициенты, определяющие границы. С учетом (2) ограничения (3), (4) на потребление пара турбиной выражаются следующими соотношениями:

- первая граница

$$a_{0i} + (a_{1i} - h_{1i})w_{3i}^T + a_{2i}d_{Ti}^T \geq g_{1i};$$

- вторая граница

$$a_{0i} + (a_{1i} - h_{2i})w_{3i}^T + a_{2i}d_{Ti}^T \geq g_{2i}.$$

2. На выработку электрической энергии

$$w_3^P = w_{30},$$

где  $w_{30}$  – заданное значение электрической энергии, которое необходимо выработать блоком турбин;  $w_3^P$  – общая выработка электрической энергии блоком турбин, которая определяется из следующего соотношения

$$w_3^P = (n-1) \frac{w_3^{cp}}{w_3^{max} - w_3^{cp}} + \sum_{i=1}^n w_{3i}^T,$$

где  $w_{3i}^T \leq w_{3i}^{max}$ , где  $w_{3i}^{max}$  – максимально возможная выработка электроэнергии  $i$ -й турбиной, которая определяется по нормативной паровой характеристике.

3. На расход пара теплофикационного отбора

$$d_{Ti}^{min} \leq d_{Ti}^T \leq d_{Ti}^{max},$$

где  $d_{Ti}^{max}$ ,  $d_{Ti}^{min}$  – соответственно максимально и минимально возможные расходы пара теплофикационного отбора.

4. На тепловую нагрузку

$$q_T^P = q_{T0},$$

где  $q_{T0}$  – общая тепловая нагрузка блока турбин, которую необходимо выработать;  $q_T^P$  – расчетная тепловая нагрузка блока турбин, которая определяется из соотношения  $q_T^P = c_0 + \sum_{i=1}^n c_i u_i$ , где  $c_i$  – неизвестные коэффициенты зависимости;  $u_i$  – расчетная величина, определяемая по соотношению

$$u_i = a_{2i} d_{Ti}^T.$$

Данную задачу также можно решать с учетом поправок. В этом случае соотношения (2)–(4) соответственно будут иметь вид

$$d_i^P = a_{0i} + a_{1i} w_{3i}^T + a_{2i} d_{Ti}^T + b_1 \Delta p_{0i} + b_2 \Delta t_{0i} + b_3 \Delta p_{Ti} + b_4 \Delta p_{ki};$$

$$a_{0i} + (a_{1i} - h_{1i}) w_{3i}^T + a_{2i} d_{Ti}^T + b_1 \Delta p_{0i} + b_2 \Delta t_{0i} + b_3 \Delta p_{Ti} + b_4 \Delta p_{ki} \geq g_{1i};$$

$$a_{0i} + (a_{1i} - h_{2i}) w_{3i}^T + a_{2i} d_{Ti}^T + b_1 \Delta p_{0i} + b_2 \Delta t_{0i} + b_3 \Delta p_{Ti} + b_4 \Delta p_{ki} \geq g_{2i},$$

где  $\Delta p_{0i}$  – нормированная величина отклонения давления свежего пара от его нормативного значения;  $\Delta t_{0i}$  – нормированная величина отклонения температуры свежего пара от его нормативного

значения;  $\Delta p_{Ti}$  – нормированная величина отклонения давления пара в теплофикационном отборе от его нормативного значения;  $\Delta p_{ki}$  – нормированная величина отклонения давления пара в конденсационном отборе от его нормативного значения.

На вводимые поправки существуют следующие ограничения

$$\Delta p_{0i}^{min} \leq \Delta p_{0i} \leq \Delta p_{0i}^{max},$$

где  $\Delta p_{0i}^{max}$ ,  $\Delta p_{0i}^{min}$  – соответственно максимальная и минимальная нормированная величина отклонения давления свежего пара от его нормативного значения;

$$\Delta t_{0i}^{min} \leq \Delta t_{0i} \leq \Delta t_{0i}^{max},$$

где  $\Delta t_{0i}^{max}$ ,  $\Delta t_{0i}^{min}$  – соответственно максимальная и минимальная нормированная величина отклонения температуры свежего пара от его нормативного значения;

$$\Delta p_{Ti}^{min} \leq \Delta p_{Ti} \leq \Delta p_{Ti}^{max},$$

где  $\Delta p_{Ti}^{max}$ ,  $\Delta p_{Ti}^{min}$  – соответственно максимальная и минимальная нормированная величина отклонения давления пара в теплофикационном отборе от его нормативного значения;

$$\Delta p_{ki}^{min} \leq \Delta p_{ki} \leq \Delta p_{ki}^{max},$$

где  $\Delta p_{ki}^{max}$ ,  $\Delta p_{ki}^{min}$  – соответственно максимальная и минимальная нормированная величина отклонения давления пара в конденсационном отборе от его нормативного значения.

На основе приведенных соотношений была разработана программа оптимальной нагрузки параллельно работающих турбоагрегатов по данным эксплуатации по критерию минимума потребления пара блоком турбин.

### 3. Программа «ТГ-ПАР»

Моделирование оптимизации нагрузки параллельно работающих турбоагрегатов по данным эксплуатации турбин осуществляется при помощи разработанной программы «ТГ-ПАР». Эта программа рассчитывает необходимые значения параметров для построения энергетических характеристик по заданным параметрам турбогенератора. При постоянной выработке электрической и тепловой мощности, изменяя давление в отборах и температуру свежего пара, можно рассчитать изменения расхода свежего пара и тепла на турбину. Использование программы упрощает расчет режимов турбины по нормативным энергетическим характеристикам.

Искомые параметры рассчитываются на основе нормативных диаграмм для каждой турбины. Так как турбины находятся в эксплуатации длительное время, реальные параметры турбин отличаются от номинальных. Для этого в программе введены расчеты поправок на условия эксплуатации.

Рассмотрим пример расчета коэффициентов влияния режимных параметров турбины на объе-

мы потребления пара и тепла. В качестве расчетного объекта рассмотрим блок турбогенераторов ТЭЦ ОАО «ММК». На первом шаге расчетов задаем приращение отклонению давления пара на входе турбины, при неизменной электрической и тепловой нагрузке турбин приведенной в табл. 1.

Таблица 1

Значения электрической и тепловой нагрузок турбин

№ ТГ	Электрическая нагрузка $W_e$ , МВт	Теплофикационный отбор $D_{тв}$ , т/ч
1	52,00	90,09
2	51,00	84,98
3	49,00	119,30
4	60,00	129,62
5	62,00	118,43
6	57,00	131,46

С помощью программы «ТГ-ПАР» рассчитываются значения расхода свежего пара  $D_0^{пар}$ , т/ч на турбину. Далее рассчитывается потребление тепла на турбину  $Q_0^{пар}$ , Гкал/ч, по формуле

$$Q_0^{пар} = D_0^{пар} (i_{пар} - i_{пв}),$$

где  $i_{пар}$  – энтальпия пара, ккал/кг;  $i_{пв}$  – энтальпия питательной воды, ккал/кг.

После этого с помощью программы «Регрессия» надстройки «Пакет анализа» в Excel определяются зависимости

$$Q_0^{пар} = Q_0 + K_{P_0} (P_0 - P_0^{ном}),$$

где  $K_{P_0}$  – коэффициент влияния по давлению свежего пара, Гкал/(ч·атм);  $P_0$  – фактическое значение давления свежего пара, атм;  $P_0^{ном}$  – номинальное значение давления свежего пара, атм.

В расчетном примере значения  $K_{P_0}$  для каждой турбины приведено в табл. 2.

Таблица 2

Значения  $K_{P_0}$  для каждой турбины

ТГ1	ТГ2	ТГ3	ТГ4	ТГ5	ТГ6
-0,057	-0,056	-0,054	-0,166	-0,059	-0,054

Аналогично для нахождения коэффициента влияния по температуре свежего пара задаются различные значения отклонения температуры свежего пара от номинального значения. С использованием программы «ТГ-ПАР» определяются  $D_0^{пар}$  и  $Q_0^{пар}$ . После этого с помощью программы «Регрессия» надстройки «Пакет анализа» в Excel определяются зависимости

$$Q_0^{пар} = Q_0 + K_{t_0} (t_0 - t_0^{ном}).$$

где  $K_{t_0}$  – коэффициент влияния по температуре свежего пара, Гкал/(ч·°C);  $t_0$  – фактическое значение

температуры свежего пара, °C;  $t_0^{ном}$  – номинальное значение температуры свежего пара, °C.

Повторяя указанную процедуру для всех параметров, в результате будет построена расчетная зависимость потребления тепла турбиной

$$Q_0^{пар(расч)} = Q_0^{пар(ном)} + (K_{P_0} \Delta P_0 + K_{t_0} \Delta t_0 + K_{P_T} \Delta P_T + K_{P_k} \Delta P_k).$$

Значения  $K_{P_0}$ ,  $K_{t_0}$ ,  $K_{P_T}$ ,  $K_{P_k}$  для каждой турбины приведены в табл. 3.

Таблица 3

Значения коэффициентов влияния для каждой турбины

	$K_{P_0}$	$K_{t_0}$	$K_{P_T}$	$K_{P_k}$
ТГ1	-0,057	-0,18	3,56	-122,59
ТГ2	-0,056	-0,17	3,32	-121,21
ТГ3	-0,054	-0,16	4,66	-122,18
ТГ4	-0,166	-0,20	15,04	-72,83
ТГ5	-0,059	-0,13	5,44	-76,17
ТГ6	-0,054	-0,12	7,34	-66,23

Фактическую зависимость потребления тепла турбиной по данным эксплуатации представим как

$$Q_0^{пар(ф)} = Q_0^{пар(ф)} + (K_{P_0} \Delta P_0 + K_{t_0} \Delta t_0 + K_{P_T} \Delta P_T + K_{P_k} \Delta P_k),$$

где неизвестная величина  $Q_0^{пар(ф)}$  – фактическое потребление тепла в номинальном режиме, Гкал/ч.

$$Q_{0,s}^{пар(ф)} = Q_s^{пар(ф)} + (K_{P_0} \Delta P_{0,s} + K_{t_0} \Delta t_{0,s} + K_{P_T} \Delta P_{T,s} + K_{P_k} \Delta P_{k,s}),$$

где  $s$  – номер наблюдения за турбиной. Отсюда следует, что в номинальном режиме фактическое наблюдение тепла определяется формулой

$$\Delta Q_{0,s}^{пар(ф)} = Q_{0,s}^{пар(ф)} - Q_0^{пар(ном)},$$

далее значение отклонения усредняется

$$\Delta Q_0^{пар(ф)} = \frac{1}{N} \sum_{s=1}^N \Delta Q_{0,s}^{пар(ф)}.$$

В среднем величина  $\Delta Q_0^{пар(ф)}$  – прочие резервы, составила 21 тонну, что говорит о значительном отклонении параметров режимов работы турбин ТЭЦ от нормативных значений. В этой связи представляет интерес определить величину отклонений потребления тепла за счет отклонения режимных параметров

$$\delta = K_{P_0} \Delta P_{0,s} + K_{t_0} \Delta t_{0,s} + K_{P_T} \Delta P_{T,s} + K_{P_k} \Delta P_{k,s}.$$

Отклонения представлены в табл. 4.

Таблица 4

Величина отклонения  $\delta$  потребления тепла за счет отклонения режимных параметров

ТГ1	ТГ2	ТГ3	ТГ4	ТГ5	ТГ6
-6,03	-3,04	-7,00	-4,28	6,02	8,59

Приведенный пример показывает, что с использованием разработанной программы «ТГ-ПАР»,

Расчет потребления свежего пара турбогенераторами, $D_0$ т/ч																	
№ ТГ	Электрическая нагрузка $W_э$ , МВт	Теплофикационный отбор, $D_t$ , т/ч	Поправка электрической мощности на $\Delta P_0$ , атм			Поправка электрической мощности на $\Delta t_0$ , °С			Поправка электрической мощности на $P_t$ , атм			Поправка электрической мощности на $P_2$ , атм			Тепловая энергия, Q Гкал	Потребление свежего пара $D_0$ , т/ч	
			Номинальное $P_0$	Отклонение $\Delta P_0$	$\Delta W_{P_0}$ , МВт	Номинальная $t_0$	Отклонение $\Delta t_0$	$\Delta W_{t_0}$ , МВт	Номинальное $P_t$	Отклонение $\Delta P_t$	$\Delta W_{P_t}$ , МВт	Номинальное $P_2$	Отклонение $\Delta P_2$	$\Delta W_{P_2}$ , МВт			
1	52	83,17	90	0	0,00	500	14	-1,09	2,00	-0,84	-1,27	0,05	0,00	0,00	91,19	290,00	
2	51	83,56	90	4	0,04	500	0	0,00	2,00	-0,78	-1,19	0,05	0,01	-0,24		275,00	
3	49	126,66	90	-1	0,04	500	4	-0,29	2,00	-0,60	-1,38	0,05	0,02	-1,06	138,37	280,00	
4	61	124,84	90	-1	0,07	500	3	-0,28	1,20	-0,15	-1,20	0,04	0,02	-0,58		304,00	
5	62	123,54	127	-2	0,07	540	-10	0,57	0,50	1,00	4,45	0,05	0,02	-0,71	135,00	276,00	
6	57	122,39	127	-1	0,03	540	-7	0,42	0,50	1,50	7,34	0,05	0,00	0,00		276,00	
Пересчет									Данные								

Очистить

Рис. 1. Интерфейс программы «ТГ-ПАР»

можно без особых сложностей выполнить расчеты необходимых значений для таблиц отчета по тепловой экономичности турбин электрических станций.

#### 4. Пример работы программы

Программа расчета оптимального использования пара представлена на рис. 1. В этой программе могут использоваться как новые, так и архивные данные турбоагрегатов. При нажатии кнопки «Данные» всплывает окно (рис. 2).

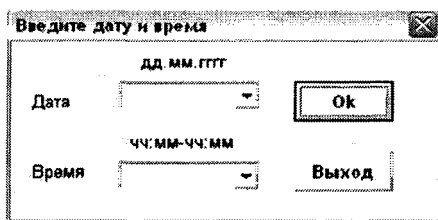


Рис. 2. Окно ввода даты и времени

В это окно вводим дату в формате «01.02.2005» и время, «01:00-02:00», если дата и время совпадают с уже введенными и сохраненными в базе данных то таблице «Расчет потребления свежего пара турбогенераторами,  $D_0$ , т/ч» выводятся значения за этот промежуток времени. Если же такие данные не были введены, то нужно записать их вручную (рис. 3).

При этом данные записываются в ту же основную таблицу. Если необходимо исправить значение, это можно сделать в самой таблице и нажать кнопку «Пересчет». Расчетные значения исправит сама программа

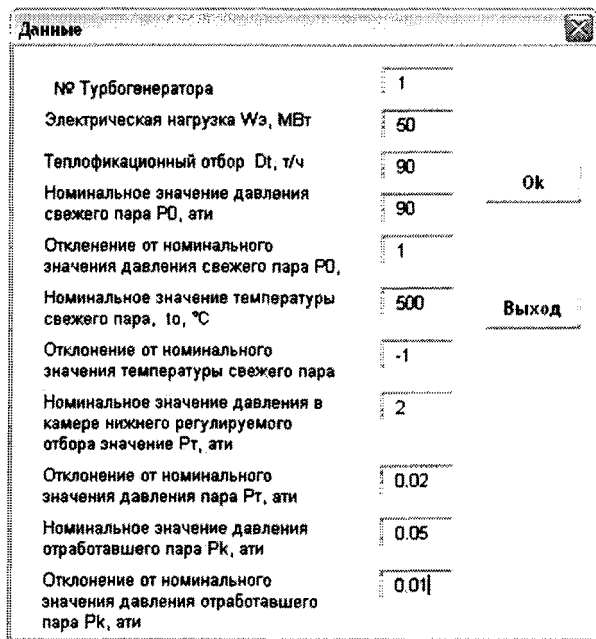


Рис. 3. Окно ввода данных

Далее нужно записать ограничения на параметры режимов турбогенераторов, либо оставить значения в таблице такими, какие они были. Нажимаем кнопку «Оптимизация» (рис. 4).

В окно на рис. 5 нужно внести необходимые значения электрической мощности, тепловой энергии отданной на правый берег и на левый, а также значение перетока. После нажатия «Ок» появляется окно приведенное на рис. 6.

Ограничения на параметры режимов турбогенераторов					
№ ТГ	Максимальный теплотехнический отбор $Dt_{max}$ , т/ч	Минимальный теплотехнический отбор $Dt_{min}$ , т/ч	Максимальная электрическая нагрузка $W_{э, max}$ , МВт	Минимальная электрическая нагрузка $W_{э, min}$ , МВт	Максимально возможное потребление свежего пара, $Do_{max}$ , т/ч
1	175,00	0,00	58,00	0,00	270,00
2	175,00	0,00	58,00	0,00	270,00
3	175,00	0,00	58,00	0,00	270,00
4	160,00	0,00	62,00	0,00	300,00
5	165,00	0,00	57,40	0,00	215,00
6	165,00	0,00	57,40	0,00	215,00

**Оптимизация**

Расчет потребления пара	
До исходное	До оптимальное
1701,00	?

Рис. 4. Интерфейс ограничения на параметры режимов турбогенераторов

Рис. 5. Окно ввода ограничений по выработке тепловой и электрической энергии

В выводимой таблице «Решение задачи оптимизации» (рис. 7) выдаются оптимальные параметры турбоагрегата. А в таблице «Расчет потребления пара» показываются исходное и оптимальное суммарные значения потребления свежего пара.

Рис. 6. Окно подтверждения нахождения решения

	Заданная	Оптимизированная
Wэ	330,00	335,00
Qп/б	225,00	224,10
Qл/б	133,00	135,44
Q12		10,00

Решение задачи оптимизации							
ТГ	Wэ	Dt	Pо	To	Pт	Pк	Do
1	58	26,8	90	505	1,10	0,04	246,07
2	58	83,7	93	500	1,21	0,04	270,00
3	58	80,8	89	500	1,40	0,07	263,41
4	62	160,0	88,5	504	1,02	0,04	297,55
5	47,7	165,0	125	530	1,58	0,06	215,00
6	46	134,6	126	534	2,02	0,06	215,00

Расчет потребления пара	
До исходное	До оптимальное
1701,00	?

Рис. 7. Интерфейс решения задачи оптимизации

**Заключение**

1. Особенность приведенного алгоритма решения задачи оптимизации заключается в том, что на его основе можно решить задачу оптимизации нагрузки параллельно работающих турбоагрегатов при неполных исходных данных эксплуатации с учетом нормативных энергетических характеристик турбин.

2. Практическое применение разработанной программы оптимизации нагрузки параллельно работающих турбоагрегатов «ТГ-ПАР» показало на конкретном примере, что с ее помощью можно снизить потребление свежего пара до 11 %.

**Литература**

1. Качан, А. Д. Оптимизация режимов и повышение эффективности работы паротурбинных установок ТЭС / А. Д. Качан. - Минск.: Высшая школа, 1985. - 176 с.
2. Равич, М. Б. Топливо и эффективность его использования / М. Б. Равич. — М.: Наука, 1971. — 358 с.
3. РД 34.08.552-95. Методические указания по составлению отчета электростанции и акционерного общества энергетики и электрификации о тепловой экономичности оборудования. - 1995.
4. Соловьев, Ю. П. Тепловые расчеты промышленных паротурбинных электрических станций ИО. П. Соловьев. — М.: Государственное энергетическое издание, 1962. — 190 с.

Поступила в редакцию 28 апреля 2008 г.