МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН

ТАШКЕНТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ АБУ РАЙХАНА БЕРУНИ

ТЕОРИЯ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ РЕЖИМАМИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ

Методическое пособие

к выполнению курсового проекта

Ташкент - 2016

УДК 621.311: 621.316.925

Теория оптимального управления режимами электрических станций: Методическое пособие к выполнению курсового проекта. Сост.: Сытдыков Р.А., Радионова О.В. - Ташкент: ТашГТУ, 2016. - 74 с.

Методическое пособие включает краткие теоретические сведения, задания и пример выполнения курсового проекта по курсу «Теория оптимального управления режимами электрических станций».

Приведенные в методическом пособии задания охватывают комплекс вопросов управления и оптимизации режимов электрических станций как с позиций однокритериальной, так и многокритериальной (векторной) оптимизации.

Данное методическое пособие разработано для студентов магистратуры специальности 5А310203 - «Электрические станции». Состав и содержание курсового проекта полностью соответствует программе данного курса.

Печатается по решению научно-методического совета ТашГТУ

Рецензенты: д.т.н., акад. АН РУз, проф. Насиров Т.Х. (Энергоцентр Узбекистана); д.т.н., проф. Гайибов Т.Ш. (ТашГТУ)

Задание на курсовое проектирование

В курсовом проекте для заданного варианта агрегатов ТЭС (табл.1), их расходных характеристик (табл.2-4) и суточного графика нагрузки станции (табл.5):

1. Определить полиномиальные зависимости расходных характеристик энергоблоков ТЭС с помощью интерполяционной формулы Лагранжа;
2. Провести оптимизацию распределения активной нагрузки ТЭС между энергоблоками при заданном составе работающих агрегатов;
3. Выбрать оптимальный состав работающих агрегатов ТЭС во время прохождения ночного провала графика нагрузки;
4. Для выбранного состава работающих агрегатов и рассчитанных суточных графиков активной нагрузки энергоблоков провести оптимизацию распределения реактивной нагрузки ТЭС между агрегатами;
5. Составить многокритериальную модель оптимизации суточного графика нагрузки ТЭС с учетом экономического и надежностного критерия; провести оптимизацию распределения активной нагрузки станции между энергоблоками методом главного критерия и методом приоритетов.

Графическая часть проекта:

Лист 1. Графическое решение оптимизации распределения активной и реактивной нагрузки между энергоблоками ТЭС.

Лист 2. Круговые диаграммы режимов работы генераторов ТЭС, расходные характеристики и характеристики вероятности отказов энергоблоков.

Таблица 1. Варианты исходных данных по энергоблокам ТЭС.

№ вар	№ блока	№ расходной характеристики			Мощность блока	
		Блок 300 МВт	Блок 200 МВт	Блок 160 МВт	Рмин, МВт	Рмах, МВт
1	1		5		80	190
	2		4		90	200
	3	2			100	280
2	1		1		100	200
	2		2		95	200
	3	4			90	290
3	1	2			100	280
	2	3			90	300
	3		4		100	200
4	1			2	80	160
	2			3	75	150
	3		5		90	190
5	1		1		100	200
	2		3		90	180
	3	5			100	300
6	1			4	90	160
	2			5	100	160
	3		3		90	190
7	1			2	80	160
	2	1			100	300
	3	4			105	300
8	1			1	85	160
	2			3	90	160
	3	5			110	300
9	1	1			100	300
	2	3			90	300
	3		2		80	190
10	1			5	85	160
	2			3	80	150
	3		4		90	200

Таблица 2. Расходные характеристики энергоблоков 300 МВт

№ 1		№ 2		№ 3		№ 4		№ 5	
P, МВт	**B, т.у.т./ч**	**P, МВт**	**B, т.у.т./ч**	**P, МВт**	**B, т.у.т./ч**	**P, МВт**	**B, т.у.т./ч**	**P, МВт**	**B, т.у.т./ч**
100	38	100	40	90	35	105	40	110	43
200	72	180	70	200	74	200	75	200	72
300	115	280	110	300	120	280	112	300	118

№ 6		№ 7		№ 8		№ 9		№ 10	
P, МВт	**B, т.у.т./ч**	**P, МВт**	**B, т.у.т./ч**	**P, МВт**	**B, т.у.т./ч**	**P, МВт**	**B, т.у.т./ч**	**P, МВт**	**B, т.у.т./ч**
100	39	110	44	90	38	105	39	95	38
200	72	200	73	190	72	205	72	190	70
300	116	300	120	290	115	300	116	290	115

Таблица 3. Расходные характеристики энергоблоков 200 МВт

№ 1		№ 2		№ 3		№ 4		№ 5	
P, МВт	**B, т.у.т./ч**	**P, МВт**	**B, т.у.т./ч**	**P, МВт**	**B, т.у.т./ч**	**P, МВт**	**B, т.у.т./ч**	**P, МВт**	**B, т.у.т./ч**
100	40	100	43	90	35	110	45	105	43
150	64	150	64	140	62	140	60	150	65
200	95	200	90	180	84	200	93	190	88

№ 6		№ 7		№ 8		№ 9		№ 10	
P, МВт	**B, т.у.т./ч**	**P, МВт**	**B, т.у.т./ч**	**P, МВт**	**B, т.у.т./ч**	**P, МВт**	**B, т.у.т./ч**	**P, МВт**	**B, т.у.т./ч**
95	35	100	44	90	33	95	40	105	43
145	60	150	66	140	60	145	62	150	65
200	90	195	90	180	85	200	93	195	90

Таблица 4. Расходные характеристики энергоблоков 150-160 МВт

№ 1		№ 2		№ 3		№ 4		№ 5	
P, МВт	**B, т.у.т./ч**	**P, МВт**	**B, т.у.т./ч**	**P, МВт**	**B, т.у.т./ч**	**P, МВт**	**B, т.у.т./ч**	**P, МВт**	**B, т.у.т./ч**
90	36	80	30	90	35	90	35	105	43
110	45	120	46	120	48	130	52	140	58
150	65	160	66	150	64	160	68	160	67

Таблица 5. Суточные графики активной нагрузки ТЭС.

Вариант						
Вариант 1	**Интервал суток, ч**	0 - 6	6 - 14	14 - 20	20 - 22	22 - 24
	P_C, МВт	330	520	580	540	420
Вариант 2	**Интервал суток, ч**	0 - 6	6 - 11	11 - 18	18 - 21	21 - 24
	P_C, МВт	360	500	590	610	410
Вариант 3	**Интервал суток, ч**	0 - 4	4 - 10	10 - 18	18 - 22	22 - 24
	P_C, МВт	350	480	670	700	460
Вариант 4	**Интервал суток, ч**	0 - 6	6 - 10	10 - 19	19 - 22	22 - 24
	P_C, МВт	300	460	480	430	320
Вариант 5	**Интервал суток, ч**	0 - 8	8 - 16	16 - 18	18 - 22	22 - 24
	P_C, МВт	320	580	600	570	440
Вариант 6	**Интервал суток, ч**	0 - 6	6 - 12	12 - 20	20 - 22	22 - 24
	P_C, МВт	330	420	480	440	350
Вариант 7	**Интервал суток, ч**	0 - 6	6 - 11	11 - 18	18 - 21	21 - 24
	P_C, МВт	320	500	660	690	380
Вариант 8	**Интервал суток, ч**	0 - 4	4 - 10	10 - 19	19 - 22	22 - 24
	P_C, МВт	310	460	540	570	340
Вариант 9	**Интервал суток, ч**	0 - 5	5 - 10	10 - 18	18 - 22	22 - 24
	P_C, МВт	340	480	600	630	420
Вариант 10	**Интервал суток, ч**	0 - 7	7 - 15	15 - 18	18 - 21	21 - 24
	P_C, МВт	320	380	440	470	400

Суточный график реактивной нагрузки ТЭС задается преподавателем.

Значения коэффициентов полиномов $\boldsymbol{a_i}$ в функции потерь $\Delta \boldsymbol{P_i}\,(\boldsymbol{\beta_i}, \boldsymbol{Q_i})$ в зависимости от мощности блоков приводятся в таблице 6:

Таблица 6. Коэффициенты полиномов в функции потерь.

$P_{ном}$, МВт	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7
160	0,26	1,07	2,10	-	0,06	0,018	-0,12	-0,0028
200	0,35	1,19	2,23	-	-	0,021	-0,15	-0,0034
300	0,48	1,31	2,36	0,32	-	0,029	-0,19	-0,0045

Коэффициенты полиномов $\boldsymbol{d_i}$ характеристик вероятности отказов энергоблоков в зависимости от их мощности приводятся в таблице 7, где представлены два варианта коэффициентов соответствующих полиномов:

Таблица 7. Коэффициенты полиномов характеристик вероятности отказов энергоблоков в зависимости от их мощности.

Мощность блока	d_0	d_1	d_2
300 МВт	0,605	-0,003575	0,00000525
300 МВт	0,604	-0,003574	0,00000524
200МВт	0,7663	-0,00649	0,000014544
200МВт	0,7664	-0,0065	0,000014546
160 МВт	1,16	-0,0146	0,0000475
160 МВт	1,17	-0,0147	0,0000477

КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

1. ИНТЕРПОЛЯЦИОННАЯ ФОРМУЛА ЛАГРАНЖА

Формула Лагранжа является наиболее общей интерполяционной формулой и может применяться к таким узлам интерполяции, когда расстояние между соседними узлами не постоянная величина.

Обычно интерполирующую функцию ищут в виде полинома n степени:

$$L(x) = a_n \cdot x^n + a_{n-1} \cdot x^{n-1} + a_{n-2} \cdot x^{n-2} + \ldots + a_2 \cdot x^2 + a_1 \cdot x^1 + a_0 . \qquad (1.1)$$

Интерполяционная формула Лагранжа записывается следующим образом:

$$\begin{aligned} L(x) = {} & \frac{(x-x_1)(x-x_2)\ldots(x-x_n)}{(x_0-x_1)(x_0-x_2)\ldots(x_0-x_n)} \cdot y_0 + \frac{(x-x_0)(x-x_2)\ldots(x-x_n)}{(x_1-x_0)(x_1-x_2)\ldots(x_1-x_n)} \cdot y_1 + \\ & + \frac{(x-x_0)(x-x_1)(x-x_3)\ldots(x-x_n)}{(x_2-x_0)(x_2-x_1)(x_2-x_3)\ldots(x_2-x_n)} \cdot y_2 + \ldots + \frac{(x-x_0)(x-x_1)\ldots(x-x_{n-1})}{(x_n-x_0)(x_n-x_1)\ldots(x_n-x_{n-1})} \cdot y_n \end{aligned} \qquad (1.2)$$

С помощью формулы Лагранжа можно аппроксимировать практически любую кривую. Для аппроксимации расходных характеристик энергоблоков достаточно воспользоваться полиномом не n-ой степени, а 2-ой степени, получив при этом достаточную точность:

$$B(P) = \frac{(P-P_2)(P-P_3)}{(P_1-P_2)(P_1-P_3)} \cdot B_1 + \frac{(P-P_1)(P-P_3)}{(P_2-P_1)(P_2-P_3)} \cdot B_2 + \frac{(P-P_1)(P-P_2)}{(P_3-P_1)(P_3-P_2)} \cdot B_3 ; \qquad (1.3)$$

$$B_i\,(P_i\,) = a_{0i} + a_{1i}\,P_i + a_{2i}\,P_i^2 \qquad (1.4)$$

2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОПТИМИЗАЦИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАГРУЗКИ МЕЖДУ АГРЕГАТАМИ ТЭС

Задача оптимального распределения мощности между энергоблоками ТЭС заключается в поиске минимума расхода топлива станции.

Целевая функция модели оптимизации представляется в виде:

$$F = B_C = \sum_{i=1}^{n} B_i(P_i) = B_1(P_1) + B_2(P_2) + \ldots + B_n(P_n) \to \min . \qquad (2.1)$$

Уравнения-связи (зависимость расхода топлива от выдаваемой мощности)***:***

$$B_i(P_i) = a_{0i} + a_{1i}P_i + a_{2i}P_i^2$$

Ограничения:

- *автономные ограничения* (ограничения-неравенства) на допустимые пределы изменения мощности станций (блоков) вида:

$$P_i^{\min} \le P_i \le P_i^{\max}; \tag{2.2}$$

- *ограничения-связи* (ограничения-равенства) на суммарную активную нагрузку энергоблоков, которая должна быть равна заданной P_C, вида:

$$P_C = \sum_{i=1}^{n} P_i = P_1 + P_2 + ... + P_n \quad . \tag{2.3}$$

Уравнение оптимального управления.

3. МЕТОД НЕОПРЕДЕЛЕННЫХ МНОЖИТЕЛЕЙ ЛАГРАНЖА

Методы распределения нагрузки в ЭЭС используют математический оптимизационный аппарат множителей Лагранжа, который пригоден не ко всем случаям, встречающимся на практике. В частности, он позволяет решать задачу при сепарабельной функции и при ограничениях в форме неравенств только на независимые переменные (например, предельные мощности энергоблоков, электростанций) и не позволяет учитывать ограничения в форме неравенств на зависимые переменные (например, пропускные способности ВЛ).

Рассмотрим основные положения метода неопределенных множителей Лагранжа. Пусть имеется целевая функция $F(X_1, X_2,..., X_n)$, экстремум которой определяется. Переменные $(X_1, X_2,..., X_n)$ связаны между собой K уравнениями связи:

$$\left.\begin{array}{l} W_1(X_1,...,X_n) = 0; \\ W_2(X_1,...,X_n) = 0; \\ \dots\dots\dots\dots\dots\dots \end{array}\right\}$$

При использовании метода множителей Лагранжа вместо экстремума функции $F(X_1,... ,X_n)$ находятся условия экстремума специально составленной функции (функции Лагранжа), которая включает и целевую функцию, и уравнения-ограничения связи. Функция Лагранжа при этом имеет вид

$$\Phi = F + \sum_{i=1}^{i=k} \lambda_i W_i \; , \tag{3.1}$$

а постоянные множители λ_i - называются неопределенными множителями Лагранжа. Дифференцируя функцию по независимым переменным $(X_1,..., X_n)$ и приравнивая нулю частные производные, находим экстремум.

4. ОПТИМАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ АКТИВНОЙ НАГРУЗКИ МЕЖДУ АГРЕГАТАМИ ТЭС

Для тепловой электрической станции, на которой работают m энергоблоков, суммарный расход топлива составит:

$$B = \sum_{i=1}^{m} B_i(P_i)\,. \tag{4.1}$$

Здесь B_i – расход топлива на генерацию мощности P_i на i-том энергоблоке.

Ограничение по балансу активных мощностей на ТЭС запишется в виде :

$$W = \sum_{i=1}^{m} P_i - P_H\ , \tag{4.2}$$

где P_i – мощность, генерируемая i-тым энергоблоком;
P_H – нагрузка станции;
m – количество энергоблоков.

Для получения минимального расхода топлива B на ТЭС с учётом соблюдения баланса мощностей воспользуемся методом Лагранжа с функцией:

$$L = B + \mu W, \tag{4.3}$$

где μ - некоторый постоянный коэффициент, называемый множителем Лагранжа.

Минимум L можно определить, взяв частные производные от L по P_i и приравняв их нулю:

$$\frac{\partial L}{\partial P_i} = 0\,.$$

$$\frac{\partial L}{\partial P_1} = \frac{\partial B}{\partial P_1} + \mu = 0\,;$$

$$\frac{\partial L}{\partial P_2} = \frac{\partial B}{\partial P_2} + \mu = 0\,;$$

$$\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots$$

$$\frac{\partial L}{\partial P_m} = \frac{\partial B}{\partial P_m} + \mu = 0\,.$$

Отсюда

$$-\mu = \frac{\partial B}{\partial P_1} = \frac{\partial B}{\partial P_2} = \ldots = \frac{\partial B}{\partial P_m}\,.$$

Но производная $\frac{\partial B}{\partial P_i} = b_i$ - это относительный прирост расхода топлива на i -ом энергоблоке ТЭС.

Тогда критерием оптимального распределения нагрузки между агрегатами ТЭС является

$$b_1 = b_2 = \ldots = b_m = idem, \qquad (4.4)$$

то есть равенство относительных приростов расхода топлива всех энергоблоков станции.

Практическое решение задачи получения минимального расхода топлива на ТЭС можно осуществить по следующей схеме:

1. По заданным характеристикам ОПРТ энергоблоков станции $b_i=f(P_i)$ произвести их суммирование и получить эквивалентную характеристику ОПРТ ТЭС $b_c = f(P_c)$.
2. Для рассматриваемой нагрузки электростанции на эквивалентной характеристике ОПРТ ТЭС определяется b_c по значению P_c.
3. На характеристике ОПРТ каждого энергоблока на основании принципа равенства относительных приростов расхода топлива (4.4) отыскиваются мощности $P_1, P_2, \ldots, P_m$, соответствующие значению P_c и обеспечивающие оптимальное покрытие заданной нагрузки.

Пункт 1 выполняется следующим образом (см. рис. 4.1).

Первая точка суммарной характеристики – это точка с координатами: $[P_{Cmin} = P_{1min} + P_{2min} + P_{3min};\ b_{Cmin}]$, где b_{Cmin} – наименьшее значение относительного прироста расхода топлива из всех блоков. Далее задаются значением $b_c^{(1)}$ и проводят прямую, параллельную оси абсцисс, по всем трём графикам до пересечения с ними. Полученные значения $P_1^{(1)}$, $P_2^{(1)}$, и $P_3^{(1)}$ суммируются, в результате чего определяется $P_c^{(1)}$:

$$P_c^{(1)} = P_1^{(1)} + P_2^{(1)} + P_3^{(1)} .$$

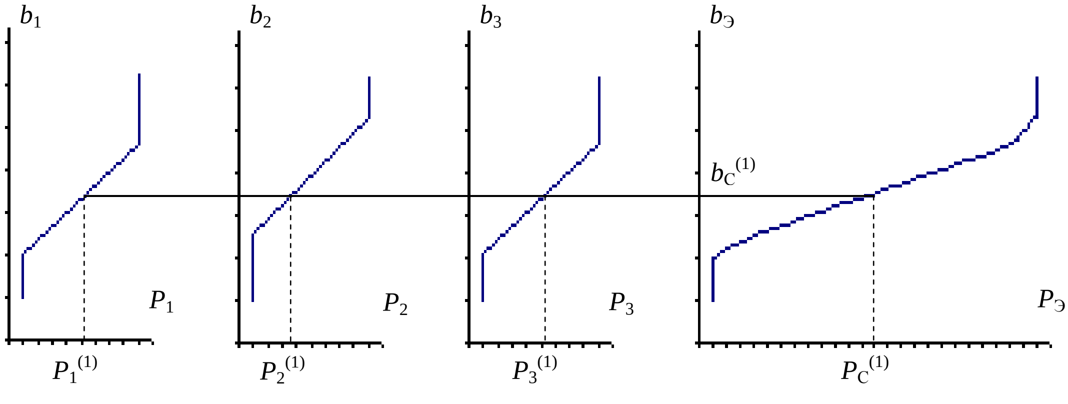


Рис. 4.1

На эквивалентной характеристике ОПРТ ТЭС таким образом получена точка с координатами [$P_c^{(1)}$; $b_c^{(1)}$]. Повторяют эту операцию, задаваясь значениями $b_c^{(2)}$, $b_c^{(3)}$, до получения

$$P_{Cmax} = P_{1max} + P_{2max} + P_{3max}\ .$$

Построив суммарную характеристику ОПРТ ТЭС, можно теперь, отложив на оси активных мощностей P_c, определить b_c и по нему обратным ходом получить P_1, P_2, P_3, то есть выполнить пункты 2 и 3.

5. ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОГО СОСТАВА РАБОТАЮЩИХ АГРЕГАТОВ ТЭС

Пусть на электростанции работают три агрегата. Нагрузка станции в момент времени t распределяется между агрегатами по равенству их относительных приростов:

$$b_1 = b_2 = b_3 = b_C,$$

которым соответствуют мощности P_1, P_2, P_3. Имея для останавливаемого агрегата (например, для агрегата 1) расход топлива в исходном режиме:

$$B_1 = B_{1XX} + \int_0^{P_1} b_1 dP$$

и соответственно изменения расходов на оставшихся в работе агрегатах:

$$\Delta B_2 = \int_{P_2}^{P_2'} b_2 dP\ ,$$

$$\Delta B_3 = \int_{P_3}^{P_3'} b_3 dP\ ,$$

целесообразность останова первого агрегата на время τ с учетом снятия расхода на его собственные нужды B_{1CH} определим из равенства:

$$\Delta B = (B_1 + B_{1CH})\tau - (\Delta B_2 + \Delta B_3)\tau - B_{1\Pi}(\tau) \geq 0,$$

или

$$\Delta B = (B_{1XX} + \int_0^{P_1} b_1 dP + B_{1CH})\tau - (\int_{P_2}^{P_2'} b_2 dP + \int_{P_3}^{P_3'} b_3 dP)\tau - B_{1\Pi}(\tau) \geq 0\ ,$$

где $B_{1\Pi}$ – расход на пуск агрегата, отключенного на время τ.

Считая линейными зависимости $b_2 = f(P_2)$ и $b_3 = f(P_3)$ в пределах $P_2 \div P_2'$ и $P_3 \div P_3'$, для суммы $(\Delta B_2 + \Delta B_3)$ имеем:

$$\Delta B_2+\Delta B_3\approx\frac{b_C+b'_C}{2}(P'_2-P_2)+\frac{b_C+b'_C}{2}(P'_3-P_3)=$$

$$=\frac{b_C+b'_C}{2}(\Delta P_2+\Delta P_3)=\frac{b_C+b'_C}{2}P_1$$

Это выражение можно упростить, если считать, что останов одного агрегата существенно не влияет на относительный прирост системы, т.е. $b_C = b_C$’:

$$\Delta B_2 + \Delta B_3 \approx b_C\, P_1$$

С учетом $\Delta B_2 + \Delta B_3 \approx b_C\, P_1$ выражение

$$\Delta B=(B_{1XX}+\int_0^{P_1}b_1dP+B_{1CH})\tau-(\int_{P_2}^{P'_2}b_2dP+\int_{P_3}^{P'_3}b_3dP)\tau-B_{1\Pi}(\tau)\ge 0$$

можно представить как:

$$\Delta B=(B_{1XX}+\int_0^{P_1}b_1dP+P_{1CH}\gamma_1)\tau-b_CP_1\tau-B_{1\Pi}(\tau)\ge 0,$$

где γ_1 – удельный расход топлива на ТЭС.

Аналогично условием пуска этого агрегата являются:

$$\Delta B=b_CP_1\tau+B_{1\Pi}(\tau)-(B_{1XX}+\int_0^{P_1}b_1dP+P_{1CH}\gamma_1)\tau\ge 0.$$

По этим выражениям можно определить максимальное время останова агрегата τ_{max} или максимальную мощность останавливаемого агрегата P_{max}. Эти выражения являются приближенными из-за неучёта в них повышенных расходов топлива при наборе мощности агрегата, длящегося часами, снижения надежности работы энергосистемы при пусках и остановах агрегатов. Тем не менее, они, при допущении линейной зависимости пусковых расходов B_Π от времени простоя агрегатов τ (что приводит задачу выбора состава оборудования к задаче почасовой оптимизации) легли в основу практических алгоритмов. Действительно, деля все члены выражения

$$\Delta B=b_CP_1\tau+B_{1\Pi}(\tau)-(B_{1XX}+\int_0^{P_1}b_1dP+P_{1CH}\gamma_1)\tau\ge 0$$ на τ и имея

$$\frac{B_\Pi(\tau)}{\tau}=B_\Pi^{(0)},$$

получаем критерий останова агрегата:

$$\Delta B_0=B_{1XX}+\int_0^{P_1}b_1dP+P_{1CH}\gamma_1-b_CP_1-B_\Pi^{(0)}\ge 0,$$

который теперь не зависит от времени простоя.

Таким образом, следует, что ΔB_0 – почасовая экономия расхода топлива от останова агрегата – является функцией только относительного прироста системы и не зависит от ее суммарной мощности. Это позволяет построить зависимости

$$\Delta B_0 = f\,(b_c)$$

для каждого агрегата и по точке пересечения данной кривой с осью абсцисс (эта точка называется критическим относительным приростом) судить об экономичности останова рассматриваемого агрегата в каждом часе. Основными недостатками указанного алгоритма являются необходимость многократных расчетов оптимальных режимов энергосистемы в каждом интервале цикла оптимизации и итеративный характер учета сетевого фактора.

В ТГТУ был разработан алгоритм оптимизации состава работающего оборудования электростанций энергосистемы с учетом основных режимных и технологических ограничений и сетевого фактора.

Алгоритм решения состоит из двух основных этапов. На первом этапе по известным ХОП отдельных агрегатов и их сочетаний строятся обобщенные ХОП электростанций, отражающие зависимость оптимального состава включенных агрегатов от нагрузок с учетом пусковых расходов на переход от одного состава агрегатов к следующему. На втором этапе производится произвольное оптимальное распределение графика нагрузок системы между электростанциями на основе полученных обобщенных ХОП (рис.5.1), которые целесообразно построить заранее, что резко сокращает затраты времени при оперативных расчетах.

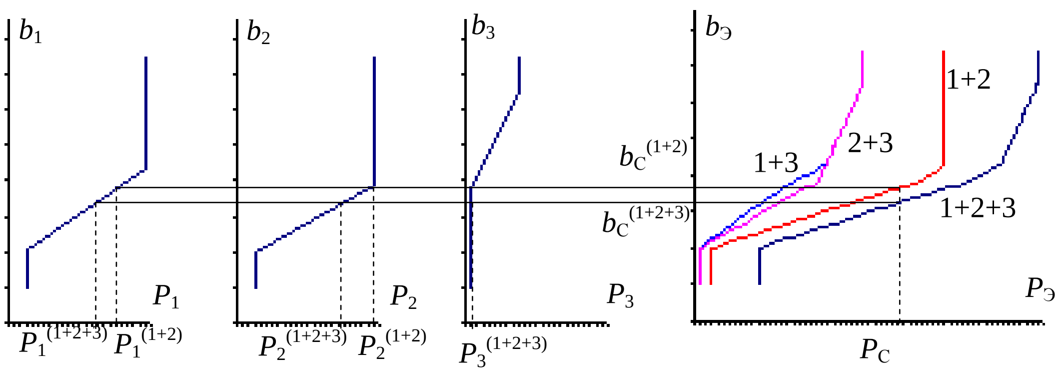
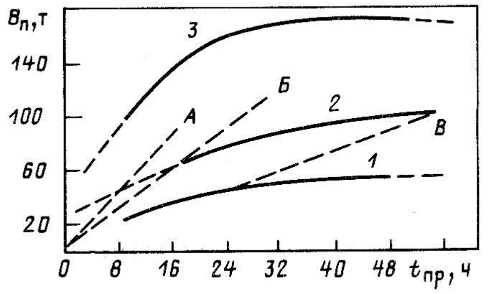


Рис. 5.1.

Таким образом, при наличии обобщенных ХОПРТ электростанций выбор состава работающего оборудования в принципе осуществляется совмещением с обычной задачей оптимального распределения нагрузок энергосистемы.



1 – блок 150 МВт;
2 – блок 200 МВт;
3 – блок 300 МВт;
А, Б, В – спрямленные зависимости для времени простоя 8, 18, 56 ч.

Рис. 5.2. Зависимость пускового расхода условного топлива от времени простоя агрегата.

6. ОПТИМИЗАЦИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РЕАКТИВНОЙ НАГРУЗКИ МЕЖДУ АГРЕГАТАМИ ТЭС

Генерация реактивной мощности влияет главным образом на режим напряжений и потокораспределение мощностей, поэтому вместо расхода топлива, как правило, используют более простой критерий оптимизации - потери активной мощности в генераторах (в задаче распределения мощности на ТЭС) или потери в сетях (в задаче распределения мощности в энергетической системе). Минимизируя потери активной мощности, можно снизить и расход топлива станции или системы.

Рассмотрим простейшую постановку задачи оптимизации: требуется минимизировать потери активной мощности на станции $\Delta \boldsymbol{P_{CT}(Q_{CT})}$:

$$\boldsymbol{I = \Delta P_{CT}(Q_{CT}) = \sum_{i=1}^{n} \Delta P_i(Q_i) \to \min} \qquad (6.1)$$

при следующих ограничениях:

$$\boldsymbol{\sum_{i=1}^{n} Q_i(N_i) - Q_{CT} = 0}, \qquad (6.2)$$

$$\boldsymbol{Q_i^{\min} \le Q_i \le Q_i^{\max}}. \qquad (6.3)$$

В формуле автономных ограничений (6.3) $\boldsymbol{Q_i^{\min}}$ - минимально допустимая реактивная нагрузка (в случае потребления) по условию устойчивости, а $\boldsymbol{Q_i^{\max}}$ - максимально допустимая реактивная мощность генератора.

В соответствии с методом Лагранжа оптимальное распределение достигается при условии равенства относительного прироста потерь:

$$\boldsymbol{\frac{\partial \Delta P_1}{\partial Q_1} = \frac{\partial \Delta P_2}{\partial Q_2} = \ldots = \frac{\partial \Delta P_n}{\partial Q_n} = \lambda = \frac{\partial \Delta P_{CT}}{\partial Q_{CT}}}. \qquad (6.4)$$

Аналитическое решение задачи осложняется тем, что реактивная нагрузка агрегата зависит от его активной нагрузки. Поэтому характеристику потерь следует предварительно аппроксимировать подходящим выражением. Остановимся на аппроксимации полиномом вида:

$$\Delta P(\beta, Q) = a_0 + a_1\beta + a_2 Q + a_3\beta Q + a_4\beta^2 + a_5 Q^2 + a_6\beta^2 Q + a_7\beta Q^2,$$

где $\beta = N / N_H$ - относительная активная нагрузка; N_H - номинальная мощность агрегата, МВт; Q - реактивная нагрузка, Мвар; a_i - постоянные коэффициенты.

Если учесть, что распределение реактивной мощности выполняется при уже известной активной мощности агрегата, то $\beta = const$, и относительные приращения потерь для принятой аппроксимации описываются линейной зависимостью:

для отдельных генераторов –

$$\frac{\partial \Delta P_i}{\partial Q_i} = \delta_i = (a_2 + a_3\beta_i + a_6\beta_i^2) + (2a_5 + 2a_7\beta_i)Q_i = c_{0i} + c_{1i}Q_i;$$

для станции в целом –

$$\frac{\partial \Delta P_{CT}}{\partial Q_{CT}} = \delta_{CT} = d_0 + d_1 Q_{CT}.$$

Нетрудно показать, что параметры характеристики относительных потерь станции связаны с параметрами характеристик блоков соотношениями:

$$d_0 = \min\{c_{0i}\},$$

$$d_1 = \frac{\delta_{CT} - d_0}{\delta_{CT}\sum\limits_{i=1}^{n}\frac{1}{c_{1i}} - \sum\limits_{i=1}^{n}\frac{c_{0i}}{c_{1i}}} = \frac{\delta_{CT} - d_0}{\delta_{CT} k_1 - k_2}.$$

Исходя из сказанного, алгоритм решения задачи выглядит следующим образом:

1. По заданной реактивной нагрузке станции Q_{CT} определяется значение относительного прироста потерь

$$\delta_{CT} = \frac{Q_{CT} + k_2}{k_1}.$$

2. По известному значению δ_{CT} вычисляются оптимальные нагрузки блоков

$$Q_i = \frac{\delta_{CT} - c_{0i}}{c_{1i}}.$$

Если оказалось, что $Q_i \le Q_i^{\max}$, то задача считается решенной. В противном случае принимается $Q_i = Q_i^{\max}$, а остаток нагрузки $Q_{CT} - Q_i^{\max}$ распределяется между оставшимися агрегатами по тому же алгоритму.

Пример. Выполним распределение реактивной нагрузки станции (Q_{CT} =510 Мвар между четырьмя генераторами ТГВ-200, работающими с относительными активными нагрузками β_1 = 1,0; β_2 = 0,75; β_3 = 0,5 и β_4 =0,0 (режим синхронного компенсатора СК). На реактивные нагрузки наложено ограничение $Q_i \le Q_i^{\max}$= 136 Мвар. Численные значения потерь мощности генератора ТГВ-200 приведены в табл. 6.1.

Таблица 6.1.

Потери активной мощности в генераторе ТГВ-200, кВт, в зависимости от его нагрузки

β	Реактивная нагрузка, Мвар						
	20	40	80	126	141	153	164
1	51	112,5	272	490	-	-	-
75	55	112,5	295	558	655	-	-
0,5	55	123	302	580	686	771	-
0(СК)	52	117	329,5	586	699	788	887

В результате аппроксимации получено следующее выражение функции потерь, кВт:

$$\Delta P(\beta, Q) = 0,34 + 1,17\beta + 2,216Q - 0,137Q\beta^2 + 0,0194Q^2 - 0,00327Q^2\beta$$

Такой зависимости соответствует функция относительных приростов потерь

$$\frac{\partial \Delta P(\beta, Q)}{\partial Q} = (2,216 - 0,137\beta^2) + (0,0388 - 0,00654\beta)Q$$

Принимая во внимание данные об относительных нагрузках генераторов β_i, получаем:

$\delta_1 = 2{,}079+0{,}0321Q_1$;
$\delta_2= 2{,}116 + 0{,}0339Q_2$;
$\delta_3= 2{,}147 + 0{,}0355Q_3$;
$\delta_4= 2{,}216 + 0{,}0388Q_4$.

Вычислим коэффициенты K_1, K_2:

$$k_1 = \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{c_{1i}} = 111{,}5 \ ; \qquad k_2 = \sum_{i=1}^{n} \frac{c_{0i}}{c_{1i}} = 250{,}9 .$$

Тогда значение относительного прироста потерь станции для заданной реактивной нагрузки

$$\delta_{CT}(Q_{CT} = 510) = \frac{510 + 250{,}9}{111{,}5} = 6{,}82.$$

По найденному относительному приросту определяем оптимальные нагрузки генераторов:

Q_1 =145 Мвар; Q_2 =129 Мвар; Q_3 =120 Мвар; Q_4 =116 Мвар.

Оптимальная нагрузка первого генератора оказалась больше допустимой. Поэтому принимаем ее равной максимально возможной Q_1 =136 Мвар, а остаток суммарной нагрузки $Q_{СТ}$ = 510—136 =374 Мвар распределяем вновь между оставшимися генераторами. Новые значения нагрузок Q_2 = 132, Q_3 = 122 и Q_4 = 122 Мвар меньше предельно допустимого значения, поэтому принимаем их в качестве оптимальных.

Заметим, что суммарные потери активной мощности станции при таком распределении составляют 1954 кВт.

7. ОСНОВЫ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ

На практике часто встречаются случаи, когда искомое решение должно удовлетворять не одному, а сразу нескольким критериям оптимальности. Многокритериальные задачи могут возникнуть, например, при оптимизации режимов работы нескольких взаимосвязанных элементов, эффективность каждого из которых оценивается своим критерием. Работа одного элемента в различных режимах также может характеризоваться различными критериями, например, в одном режиме работы котла требуется максимизировать его производительность при заданном расходе топлива, в другом режиме требуется минимизировать расход топлива при заданной нагрузке, а в третьем режиме требуется выбрать оптимальную нагрузку, соответствующую максимальному КПД.

Постановка задачи оптимизации одновременно по нескольким критериям, вообще говоря, противоречива, так как минимальное (максимальное) значение каждого критерия достигается при различных значениях вектора аргументов. Поэтому многокритериальная оптимизация требует выбора ***компромиссного*** между множеством критериев решения.

Пусть $\boldsymbol{X} \in \boldsymbol{D}$ - вектор искомых переменных, а $\boldsymbol{I^T=[I_1 , I_2 , \ldots, I_m]}$ - вектор критериев с составляющими $\boldsymbol{I_1(X), I_2(X), \ldots, I_m(X)}$. И пусть каждый из критериев желательно сделать минимальным.

На множестве допустимых значений вектора аргументов $\boldsymbol{D}$ можно выделить подмножество $\boldsymbol{D_к}$, в котором изменение вектора $\boldsymbol{X}$ не может одновременно уменьшить все составляющие вектора критериев $\boldsymbol{I}$ - уменьшение одной из составляющих обязательно вызывает увеличение другой (рис. 7.1) для одной переменной $\boldsymbol{x}$ и двух критериев $\boldsymbol{I_1}$, $\boldsymbol{I_2}$). Именно в этом подмножестве следует искать компромиссное решение, поэтому область $\boldsymbol{D_к}$ называется ***областью компромиссов***.

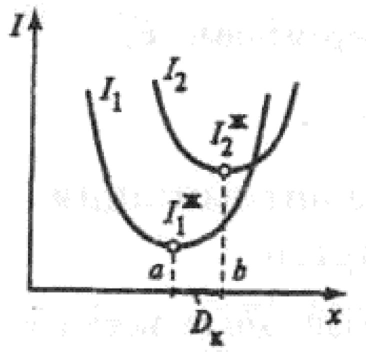


Рис. 7.1. Критерии качества.

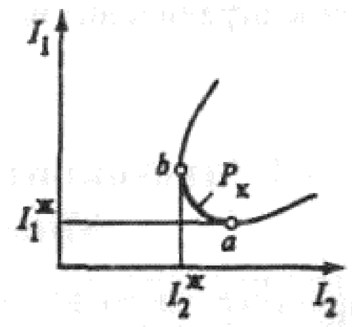


Рис. 7.2. Множество Парето.

Множеству значений вектора $\boldsymbol{X}$ в области компромиссов $\boldsymbol{D_к}$ соответствует в пространстве критериев та часть множества значений вектора критериев $\boldsymbol{P}$ (участок **ab** на рис. 7.2), для которой уменьшение значения одного критерия вызывает увеличение значений других критериев. Множество $\boldsymbol{P_к}$ вектора критериев $\boldsymbol{I}$, соответствующее множеству $\boldsymbol{D_к}$ вектора переменных, называется ***множеством Парето***, а соответствующие ему решения - оптимальными по Парето (т.е. компромиссными).

Теперь из множества Парето нужно выбрать одну единственную точку, соответствующую некоторому компромиссному решению. Схемы компромиссов могут быть различными.

Можно придать отдельным критериям I_i в зависимости от степени их важности некоторые веса μ_i и рассматривать обобщенный критерий I в виде ***свертки критериев***

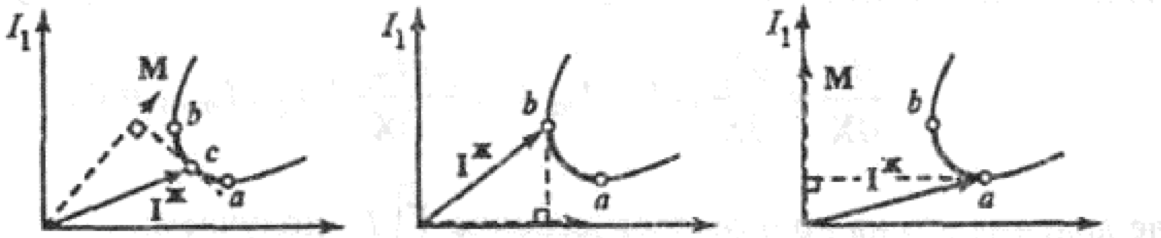
$$I = \sum_{i=1}^{m} \mu_i I_i \quad ,$$

причем «веса» критериев μ_i должны удовлетворять условиям

$$\mu_i \geq 0, \quad \sum_{i=1}^{m} \mu_i = 1.$$

Веса отдельных критериев можно рассматривать как составляющие ***вектора приоритетов*** $M^{\text{T}} = [\mu_1, \mu_2, \ldots, \mu_m]$.

Когда выбраны приоритеты, т.е. значения весов отдельных критериев, то тем самым определено и направление вектора M. Оптимальным по Парето будет то решение, вектор критерия которого I^* имеет минимальную (максимальную) проекцию на направление M (точка c рис. 7.3, *а*).



а) *б)* *в)*

Рис. 7.3. Вектор приоритетов и оптимальное решение

Частным случаем вектора приоритетов примера из двух критериев может быть вектор $M^{\text{T}}=[1,0]$ (рис. 7.3,б, точка b). В этом случае принимается во внимание только критерий I_1 и минимизируется его значение.

Если в задаче приоритет отдается критерию I_2, а влиянием критерия I_1 пренебрегают, то вектор приоритетов будет $M^{\text{T}}=[0,1]$ и оптимальным на множестве Парето будет решение в точке a (рис.7.3,*в*).

Другой возможной схемой является ***справедливый компромисс***, когда сумма относительных изменений составляющих вектора I равна нулю

$$\sum_{i=1}^{m} \frac{\Delta I_i}{I_i} = 0 \quad ,$$

т.е. сумма относительных увеличений одних составляющих вектора $\boldsymbol{I}$ равна сумме относительных уменьшений других составляющих. В примере одной переменной и двух критериев (рис. 7.4) имеем

$$\frac{\Delta I_1}{I_1} = \frac{\Delta I_2}{I_2} .$$

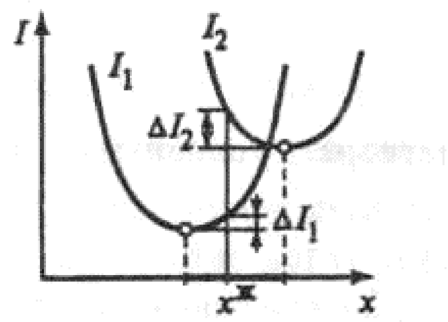


Рис. 7.4. Приращение критериев

Этому методу соответствует свертка критериев по формуле

$$\boldsymbol{I} = \prod_{i=1}^{m} \boldsymbol{I}_i(\boldsymbol{X}) \rightarrow \boldsymbol{min} \text{ (или } \boldsymbol{max}\text{).}$$

Действительно, из необходимого условия существования экстремума

$$\frac{\partial I}{\partial X} = \frac{\partial I_1}{\partial X} I_2 I_3 \ldots I_m + \ldots + \frac{\partial I_m}{\partial X} I_1 I_2 \ldots I_{m-1} = 0 \, ,$$

после деления его на полное произведение $\prod_{i=1}^{m} \boldsymbol{I}_i$ получаем:

$$\sum_{i=1}^{m} \frac{\partial I_i}{I_i} = 0 \qquad \text{или} \qquad \sum_{i=1}^{m} \frac{\Delta I_i}{I_i} = 0 \; .$$

Весьма привлекательным при выборе компромиссного решения выглядит ***метод «идеала».***

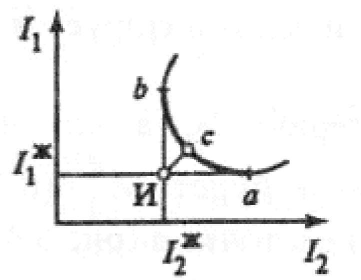


Рис. 7.5. Метод идеала.

В пространстве критериев отмечается точка **И** (рис. 7.5), соответствующая минимальным (максимальным) значениям всех критериев.

Эта точка не имеет решения ***X*** и является недостижимым идеалом.

Оптимальным считается то решение на множестве Парето, которое находится ближе всего к точке **И**. Наиболее близкой является точка пересечения множества и нормали, проведенной из точки **И** к поверхности критериев (точка ***с*** рис. 7.5).

7.1. ПОСТАНОВКА МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ЗАДАЧИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАГРУЗКИ

До сих пор задача оптимизации распределения нагрузок рассматривалась как однокритериальная. В качестве критерия принимался чисто ***экономический критерий*** - затраты на топливо (или расход топлива). Минимизация критерия выполнялась с учетом ограничений на суммарный отпуск электрической и тепловой энергии и на допустимые диапазоны изменения нагрузок отдельных агрегатов.

Однако если оценивать работу агрегатов с разных сторон, то можно назвать ряд других показателей, которые желательно учесть при оптимизации режимов. Среди таких показателей, прежде всего, следует выделить экологический показатель и показатель надежности работы оборудования.

В процессе эксплуатации оборудования станции степень важности различных критериев может изменяться. При работе оборудования в базовых режимах и соблюдении требований по концентрации загрязняющих веществ в приземном слое атмосферы предпочтение отдается технико-экономическому показателю. При превышении нормативов выбросов или при наличии неблагоприятных метеорологических условий на первое место выдвигается экологический критерий. Если же все показатели признаются важными, то в этом случае можно поставить задачу трехкритериальной оптимизации распределения нагрузок между агрегатами.

Обозначим: P – вероятность отказов энергоблоков ТЭС,
N – активная мощность, МВт.

В качестве показателя надежности работы оборудования естественно взять вероятность отказов $\boldsymbol{P(N,Q)}$, которая зависит от электрической $\boldsymbol{N}$ и тепловой $\boldsymbol{Q}$ нагрузки агрегата, а в качестве экологического показателя - выбросы вредных веществ в окружающую среду $\boldsymbol{V(N,Q)}$. Тогда задача распределения нагрузок для $\boldsymbol{n}$ агрегатов в общем виде может быть записана следующим образом:

$$
\left.
\begin{aligned}
I_1(N,Q) &= \sum_{i=1}^{n} B_i(N,Q) \to \min_{N,Q} \\
I_2(N,Q) &= \sum_{i=1}^{n} P_i(N,Q) \to \min_{N,Q} \\
I_3(N,Q) &= \sum_{i=1}^{n} V_i(N,Q) \to \min_{N,Q}
\end{aligned}
\right\} \qquad (7.1)
$$

при ограничениях

$$
\sum_{i=1}^{n} N_i = N_\Sigma \ , \quad \sum_{i=1}^{n} Q_i = Q_\Sigma \ ; \qquad (7.2)
$$

$$
\left.
\begin{aligned}
& N_i^{\min} \le N_i \le N_i^{\max} \\
& Q_i^{\min} \le Q_i \le Q_i^{\max} \\
& N_i + Q_i \le S_i^{\max}
\end{aligned}
\right\} \quad i = 1,2,\ldots,n. \qquad (7.3)
$$

В формулах (7.1) - (7.3) приняты обозначения:

- $I_1(N,Q)$, $I_2(N,Q)$, $I_3(N,Q)$ - критерии оптимальности по расходу топлива, надежности и экологичности;

- $B_i(N_i,Q_i)$, $P_i(N_i,Q_i)$, $V_i(N_i,Q_i)$ - энергетические характеристики i - го агрегата, отражающие зависимость расхода топлива, вероятность аварийных простоев и отказов и количества выбросов вредных веществ в окружающую среду от электрической и тепловой мощности агрегата;

- N_i, Q_i - электрическая и тепловая мощности агрегата;

- N_Σ, Q_Σ - заданные суммарные для всех агрегатов электрическая и тепловая мощности;

- $N_i^{\min}, N_i^{\max}, Q_i^{\min}, Q_i^{\max}, S_i^{\max}$ - допустимые пределы нагрузки;

- $N=\{N_1,\ldots,N_n\}$, $Q=\{Q_1,\ldots,Q_n\}$ - векторы аргументов целевых функций.

Поставленная задача условной оптимизации с тремя целевыми функциями (7.1), имеющими разрывы непрерывности, с двумя связями (7.2) и с 3n двусторонними автономными ограничениями (7.3) оказывается весьма сложной для аналитического решения методом неопределенных множителей Лагранжа. Овражный характер целевых функций требует использования специальных численных алгоритмов поиска компромиссного решения. Кроме того, остается открытой проблема свертки критериев, имеющих различные размерности.

7.2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИТЕРИЯ НАДЕЖНОСТИ

В процессе эксплуатации энергетического оборудования происходит износ его элементов, старение материалов, увеличение вибрации, загрязнение поверхностей, в результате чего снижается уровень надежности и экономичности. Неизбежное участие электростанций в настоящее время в регулировании и покрытии неравномерности графиков нагрузки приводит к увеличению числа остановочно-пусковых режимов и изменению нагрузки агрегатов в широких пределах. При переводе агрегатов с одного режима работы на другой изменяются температурные, гидравлические и другие параметры оборудования, которые влияют не только на экономичность, но и на надежность оборудования. В связи с этим из соображений надежности диапазон изменения нагрузок агрегата - от минимальной до максимальной - может быть ограничен.

Для определения количественных характеристик надежности оборудования используются методы теории вероятности и математической статистики, основанные на анализе эксплуатационных данных, отражающих действительное состояние оборудования. В качестве критерия надежности используются вероятность аварийного простоя и число отказов. Критерий зависит, прежде всего, от средней электрической нагрузки агрегата (энергоблока) за расчетный период и наработки с начала эксплуатации. Другие факторы, такие как вакуум в конденсаторе, загрязнение поверхностей и т.п., целесообразно учитывать лишь в отдельных случаях.

Зависимость вероятности аварийного простоя от электрической мощности и времени эксплуатации имеет вид

$$\boldsymbol{P(\overline{N},T)=m(\overline{N},T)\frac{M\{T_a\}}{T_p}}, \tag{7.4}$$

где $\boldsymbol{\overline{N}}$ - средняя электрическая нагрузка за каждую наработку до отказа; $\boldsymbol{T}$ - наработка с начала эксплуатации; $\boldsymbol{m(\overline{N},T)}$ - число отказов за расчетный период; $\boldsymbol{M\{T_a\}}$ - математическое ожидание длительности аварийного простоя за расчетный период; $\boldsymbol{T_p}$ - суммарная наработка за расчетный период.

Вычисление функции (7.4) на практике не представляется возможным из-за недоступности требуемого объема информации. Поэтому прибегают к априорной аппроксимации сечений поверхности функции $\boldsymbol{P(\overline{N},T)}$. Аппроксимация желательна в любом случае: во-первых, она позволяет сгладить случайные отклонения в экспериментальных данных, а во-вторых, предоставляет возможность иметь численные значения вероятности для любых дискретных значений аргументов.

Обычно принимают экспоненциальную зависимость вероятности отказа от времени наработки с начала эксплуатации $\boldsymbol{T}$:

$$\boldsymbol{P(T)=b_1\frac{M\{T_a\}}{T_p}\exp\{b_2T_p+b_3T\}}, \tag{7.5}$$

где $\boldsymbol{b_1, b_2, b_3}$ - коэффициенты.

Зависимость вероятности отказа агрегата от средней мощности аппроксимируют полиномом (время наработки $\boldsymbol{T}$ рассматривается при этом как константа):

$$\boldsymbol{P(\overline{N})=(d_1\overline{N}^2+\mathrm{d}_2\overline{N}+d_3)\frac{M\{T_a\}}{T_p}}, \tag{7.6}$$

где $\boldsymbol{d_1, d_2, d_3}$ - коэффициенты.

Коэффициенты аппроксимирующих зависимостей (7.5), (7.6) могут быть получены из эксплуатационных данных.

7.3. МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНЫХ ЗАДАЧ

Как известно, для решения многокритериальной задачи векторный критерий $\boldsymbol{I = [I_l, I_2, ..., I_m]}$ следует преобразовать в единый критерий скалярного вида, т.е. выполнить свертку критериев. Такое преобразование приводит исходную задачу к обычной однокритериальной задаче с ограничениями.

Наибольшее практическое распространение из рассмотренных ранее методов свертки получил ***метод приоритетов*** (метод весовых коэффициентов). В соответствии с этим методом единый компромиссный критерий равен взвешенной сумме исходных критериев

$$\boldsymbol{I(X)=\sum_{j=1}^{m}\mu_j I_j(X)\to\min_{X\in D}}, \tag{7.7}$$

где $\boldsymbol{\mu_j}$ - весовые коэффициенты, определяемые на основе экспертных оценок важности критериев, причем $\boldsymbol{\sum_{j=1}^{m}\mu_j=1}$.

Обратим внимание на то, что исходные критерии, как, например, в задаче распределения нагрузок, имеют разную размерность. Поэтому прежде, чем переходить к свертке критериев (7.7), их следует привести к безразмерному виду. Способов нормализации может быть множество, но всегда желательно, чтобы максимальное значение критерия было равно единице. Это позволит легче ориентироваться в выборе весовых коэффициентов.

В качестве нормированного критерия можно взять его отнесенное к максимальному значению выражение

$$\boldsymbol{I_j^H = \frac{I_j}{I_j^{\max}}}\,, \tag{7.8}$$

причем максимальное значение критерия обычно легко находится по граничным значениям вектора аргументов $\boldsymbol{I_j^{\max} = I_j(X^{\max})}$ или $\boldsymbol{I_j^{\max} = I_j(X^{\min})}$ в зависимости от физической природы критерия.

Нормализацию критерия можно выполнить, например, и по его приращениям:

$$\boldsymbol{I_j^H = \frac{I_j - I_j^{\min}}{I_j^{\max} - I_j^{\min}}}\,, \tag{7.9}$$

где $\boldsymbol{I_j^{\max} - I_j^{\min}}$ - диапазон изменения размерного критерия, зависящий от границ области допустимых значений вектора аргументов.

Предварительную нормализацию критериев можно и не производить, но тогда свертка критериев выполняется с помощью весовых коэффициентов $\boldsymbol{c_i}$, имеющих размерность, обратную размерности соответствующего критерия:

$$\boldsymbol{I(X) = \sum_{j=1}^{m} c_j I_j(X) \to \min_{X \in D}}\,.$$

При численном решении многокритериальных задач оптимизации безусловный интерес представляет ***метод главного критерия***. В соответствии с этим методом среди всех исходных критериев выбирают один, наиболее важный, а остальные включаются в задачу как ограничения. Если для неглавных критериев задать границы их допустимого увеличения $\boldsymbol{I_j^{доп}}$, то исходная задача становится однокритериальной с добавочными ограничениями-неравенствами:

$$\boldsymbol{I(X) = I_1(X) \to \min_{X \in D}}\,, \tag{7.10}$$

при дополнительных ограничениях

$$\boldsymbol{I_j(X) \le I_j^{доп}\,, \quad j = 2, 3, \ldots, m}\,. \tag{7.11}$$

Дополнительные ограничения-неравенства можно привести к ограничениям-равенствам с помощью метода Валентайна. Но при этом возрастает количество аргументов.

Учитывая сложность многокритериальных задач, более предпочтительным может оказаться ***метод штрафных функций***. Штрафные функции вида

$$Ш_j = \left(\frac{I_j(X)}{I_j^{доп}} \right)^{2M}, \quad j = 2, 3, ..., m, \tag{7.12}$$

где M - положительное число, добавляются к критерию (7.10). Объем вычислений при таком подходе возрастает существенно, особенно при больших M. Для уменьшения объема вычислений на практике берут $M=1$, но при этом нет гарантий, что на оптимальном решении какие-то критерии не превысят своих допустимых значений.

В этом смысле явным преимуществом обладают модульно-линейные штрафные функции

$$Ш_j = \left| I_j(X) - I_j^{доп} \right| + \left(I_j(X) - I_j^{доп} \right), \quad j = 2, 3, ..., m. \tag{7.13}$$

Функция (7.13) имеет при своей простоте замечательное свойство: она тождественно равна нулю, пока критерий меньше допустимого значения, и круто возрастает за пределами допустимого уровня.

Упомянем еще об одном численном методе решения многокритериальных задач, применяемом в практике оптимизации - ***минимаксном методе***. В процессе оптимизации ставится задача минимизации наибольшего из всех получаемых значений критериев:

$$I(X) = \max_{1 \le j \le m} I_j(X) \to \min_{X \in D}. \tag{7.14}$$

7.4. МЕТОД ГЛАВНОГО КРИТЕРИЯ В ЗАДАЧЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАГРУЗКИ

Естественно считать главным из трех рассмотренных экономический критерий (суммарный расход топлива всех агрегатов), а на ухудшение экологического критерия и критерия надежности наложить ограничения. Если для унификации и упрощения решения использовать штрафные функции, математическая формулировка задачи может быть записана следующим образом:

$$I(X) = I_1(X) + C^T Ш = \sum_{i=1}^{n} B_i(X) + \sum_{j=1}^{5} C_j Ш_j \to \min_{X \in D}, \tag{7.15}$$

где $X = \{ N,Q \}$ - вектор оптимизируемых переменных; C - вектор весовых коэффициентов; $Ш$ - вектор штрафных функций.

Штрафные функции $\boldsymbol{Ш_j}$ составляются в соответствии с ограничениями - равенствами (7.2) и неравенствами (7.11) следующим образом:

- по суммарной отпускной электрической энергии

$$Ш_1 = \left| N_\Sigma - \sum_{i=1}^{n} N_i \right|; \tag{7.16}$$

- по суммарной отпускной тепловой энергии

$$Ш_2 = \left| Q_\Sigma - \sum_{i=1}^{n} Q_i \right|; \tag{7.17}$$

- по минимальной и максимальной мощностям

$$Ш_3 = \sum_{i=1}^{n} \left(|v_i| + v_i \right), \qquad v_i = (N_i - N_i^{\min})(N_i - N_i^{\max}); \tag{7.18}$$

- по критерию надежности - суммарной вероятности аварийных простоев

$$Ш_4 = \left| I_2(X) - I_2^{доп} \right| + \left(I_2(X) - I_2^{доп} \right) = \left| \sum_{i=1}^{n} P_i(N_i, T_i) - P_i^{доп} \right| + \left(\sum_{i=1}^{n} P_i(N_i, T_i) - P_i^{доп} \right); \tag{7.19}$$

- по экологическому критерию - суммарному выбросу вредных веществ в окружающую среду

$$Ш_5 = \left| I_3(X) - I_3^{доп} \right| + \left(I_3(X) - I_3^{доп} \right) = \left| \sum_{i=1}^{n} V_i(N_i, T_i) - V_i^{доп} \right| + \left(\sum_{i=1}^{n} V_i(N_i, T_i) - V_i^{доп} \right). \tag{7.20}$$

7.5. МЕТОД ПРИОРИТЕТОВ В ЗАДАЧЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАГРУЗКИ

В предыдущем методе штрафные функции и критерии можно было и не нормировать, учитывая нормирующие множители соответствующим выбором весовых коэффициентов $\boldsymbol{C_i}$. Аналогично можно поступить в отношении штрафных функций метода приоритетов, но критерии оптимальности следует предварительно нормировать.

Введем весовые коэффициенты (приоритеты) μ_1, μ_2, μ_3 и выполним нормирование критериев, например, по схеме (7.8):

$$I_1^H(X)=\frac{\sum_{i=1}^{n}B_i(X)}{\sum_{i=1}^{n}B_i^{\max}};\ I_2^H(X)=\frac{\sum_{i=1}^{n}P_i(X)}{\sum_{i=1}^{n}P_i^{\max}};\ I_3^H(X)=\frac{\sum_{i=1}^{n}V_i(X)}{\sum_{i=1}^{n}V_i^{\max}}. \qquad (7.21)$$

При нормировании критерия надежности необходимо учесть, что максимальное значение вероятности отказа агрегата равно единице, а сумма вероятностей по всем агрегатам равна n.

С учетом (7.21) целевая функция может быть записана в следующей форме:

$$I(X)=\mu_1 I_1{}^H(X)+\mu_2 I_2{}^H(N,T)+\mu_3 I_3{}^H(X)+\sum_{j=1}^{3}C_j Ш_j\to\min_{X\in D}, \qquad (7.22)$$

где $T=\left\{T_1,T_2,\dots,T_n\right\}$ - вектор наработок с начала эксплуатации агрегатов.

Штрафные функции $Ш_j$ составляются в соответствии с ограничениями - равенствами (7.2):

- по суммарной отпускной электрической энергии

$$Ш_1=\left|\,N_\Sigma-\sum_{i=1}^{n}N_i\,\right|; \qquad (7.23)$$

- по суммарной отпускной тепловой энергии

$$Ш_2=\left|\,Q_\Sigma-\sum_{i=1}^{n}Q_i\,\right|; \qquad (7.24)$$

- по минимальной и максимальной мощностям агрегатов

$$Ш_3=\sum_{i=1}^{n}\left(\left|v_i\right|+v_i\right),$$
$$v_i=(N_i-N_i^{\min})(N_i-N_i^{\max}); \qquad (7.25)$$

Аналогично (7.25) может быть добавлена штрафная функция для ограничений по тепловой нагрузке и на сумму электрической и тепловой нагрузок.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЗАДАНИЙ КУРСОВОГО ПРОЕКТА

ЗАДАНИЕ №1

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛИНОМИАЛЬНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ РАСХОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭНЕРГОБЛОКОВ ТЭС С ПОМОЩЬЮ ИНТЕРПОЛЯЦИОННОЙ ФОРМУЛЫ ЛАГРАНЖА.

1. Записать интерполяционную формулу Лагранжа для трех блоков ТЭС в виде:

$$B(P)=\frac{(P-P_2)(P-P_3)}{(P_1-P_2)(P_1-P_3)}\cdot B_1+\frac{(P-P_1)(P-P_3)}{(P_2-P_1)(P_2-P_3)}\cdot B_2+\frac{(P-P_1)(P-P_2)}{(P_3-P_1)(P_3-P_2)}\cdot B_3$$

2. Подставив исходные данные расходных характеристик в эти формулы, после упрощения получить расходные характеристики для каждого из трех энергоблоков станции в виде:

$$B_i(P_i) = a_{0i} + a_{1i}P_i + a_{2i}P_i^2,$$

где i – номер энергоблока станции.

ЗАДАНИЕ № 2

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОПТИМИЗАЦИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ АКТИВНОЙ НАГРУЗКИ МЕЖДУ АГРЕГАТАМИ ТЭС

Составить математическую модель оптимизации распределения нагрузки между агрегатами ТЭС согласно варианту задания. Для этого:

1. Записать целевую функцию оптимизации в виде:

$$F = B_C = \sum_{i=1}^{n} B_i(P_i) = B_1(P_1) + B_2(P_2) + \ldots + B_n(P_n) \to \min.$$

2. Записать уравнения связи между зависимыми и независимыми переменными (зависимость расхода топлива от выдаваемой мощности энергоблока)

$$B_i(P_i) = a_{0i} + a_{1i}P_i + a_{2i}P_i^2$$

3. Записать ограничения, накладываемые на переменные:
   - *автономные ограничения* (ограничения-неравенства) на допустимые пределы изменения мощности блоков вида:

   $$P_i^{\min} \le P_i \le P_i^{\max}$$

   - *ограничения-связи* (ограничения-равенства) на суммарную активную нагрузку энергоблоков, которая должна быть равна заданной суммарной мощности станции P_C вида:

   $$P_C = \sum_{i=1}^{n} P_i = P_1 + P_2 + \dots + P_n \; .$$

4. Записать уравнение оптимального распределения нагрузки.

ЗАДАНИЕ № 3

ОПТИМАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ АКТИВНОЙ НАГРУЗКИ МЕЖДУ АГРЕГАТАМИ ТЭС ПРИ ЗАДАННОМ СОСТАВЕ РАБОТАЮЩИХ АГРЕГАТОВ

1. Записать расходные характеристики трех блоков ТЭС в виде полиномов второй степени типа (1.4). Рассчитать их.
2. С помощью дифференцирования расходных характеристик по соответствующим мощностям агрегатов найти характеристики относительных приростов расхода топлива (ОПРТ) для трех блоков ТЭС. Записать их в линейном виде.
3. Построить на миллиметровой бумаге расходные характеристики агрегатов $\boldsymbol{B_1(P_1)}$, $\boldsymbol{B_2(P_2)}$ и $\boldsymbol{B_3(P_3)}$ и точно под ними характеристики относительных приростов расхода топлива блоков $\boldsymbol{b_1(P_1)}$, $\boldsymbol{b_2(P_2)}$ и $\boldsymbol{b_3(P_3)}$.
4. Найти графически суммарную характеристику относительных приростов расхода топлива на ТЭС $\boldsymbol{b_C(P_C)}$. Точно под ней построить суточный график нагрузки $\boldsymbol{P_C(t)}$ согласно варианту задания.
5. Используя принцип равенства относительных приростов расхода топлива (ОПРТ), найти суточные графики нагрузки каждого блока станции $\boldsymbol{P_i(t)}$.
6. Произвести для всех интервалов времени проверку

   $$\boldsymbol{P_1(t) + P_2(t) + P_3(t) = P_C(t)}.$$

7. Определить оптимальный расход условного топлива для каждого блока и суммарный часовой расход топлива для ТЭС на каждом расчетном интервале времени.
8. Результаты расчетов оформить графически и в виде таблиц.

Таблица 3.1. Суммарная характеристика ОПРТ ТЭС.

$\boldsymbol{b_C}$, т.у.т./МВт*ч						
$\boldsymbol{P_C}$, МВт						

Таблица 3.2. Распределение мощности нагрузки между агрегатами ТЭС.

Расчетное время	Интервал 1	Интервал 2	Интервал 3	Интервал 4	Интервал 5
$\boldsymbol{P_C}$, МВт					
$\boldsymbol{P_1}$, МВт					
$\boldsymbol{P_2}$, МВт					
$\boldsymbol{P_3}$, МВт					

Таблица 3.3. Нагрузки блоков $\boldsymbol{P_i}$ и часовые расходы топлива $\boldsymbol{B_i}$ для каждого расчетного интервала времени.

Расчетное время суток		Интервал 1	Интервал 2	Интервал 3	Интервал 4	Интервал 5
$\boldsymbol{P_C}$, МВт						
1 блок	$\boldsymbol{P_1}$, МВт					
	$\boldsymbol{B_1}$, т.у.т./ч					
2 блок	$\boldsymbol{P_2}$, МВт					
	$\boldsymbol{B_2}$, т.у.т./ч					
3 блок	$\boldsymbol{P_3}$, МВт					
	$\boldsymbol{B_3}$, т.у.т./ч					
$\boldsymbol{B_C}$, т.у.т./ч						

ЗАДАНИЕ № 4

ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОГО СОСТАВА РАБОТАЮЩИХ АГРЕГАТОВ ТЭС ВО ВРЕМЯ ПРОХОЖДЕНИЯ НОЧНОГО ПРОВАЛА ГРАФИКА НАГРУЗКИ

1. Используя результаты расчета и построения задания 3, на графике $\boldsymbol{b_C(P_C)}$ построить суммарные характеристики ОПРТ станции при отключении одного блока для всех возможных комбинаций состава работающих агрегатов (1+2, 1+3 и 2+3).

2. Определить оптимальный состав работающих агрегатов ТЭС при прохождении ночного провала графика нагрузки станции с учетом пусковых расходов топлива. Для этого:
   1) Определить пусковые расходы топлива отдельных агрегатов в зависимости от времени простоя блоков;
   2) Заполнить таблицу 4.1 для каждого интервала суток;
   3) Рассчитать суммарный суточный расход топлива на ТЭС для различных комбинаций состава работающего оборудования с учетом пусковых расходов:

$$\boldsymbol{B_{\sum к} = \sum B_{C\,к} * t_{инт} + B_{пуск\,к}}\ ;$$

   4) Выбрать оптимальный состав работающих агрегатов ТЭС.

Таблица 4.1. Нагрузки блоков $\boldsymbol{P_i}$, часовые расходы топлива $\boldsymbol{B_i}$ и суммарный расход $\boldsymbol{B_\sum}$ для расчетного интервала времени.

	Состав 1+2+3	Состав 1+2	Состав 1+3	Состав 2+3	Время простоя блока $\boldsymbol{t_{пр}}$, ч	Пусковые расходы $\boldsymbol{B_{пуск\,i}}$, т.у.т.
$\boldsymbol{P_C}$, МВт						
$\boldsymbol{P_1}$, МВт						
$\boldsymbol{P_2}$, МВт						
$\boldsymbol{P_3}$, МВт						
$\boldsymbol{B_1}$, т.у.т./ч						
$\boldsymbol{B_2}$, т.у.т./ч						
$\boldsymbol{B_3}$, т.у.т./ч						
$\boldsymbol{B_C}$, т.у.т./ч						
$\boldsymbol{B_\sum}$, т.у.т.						

3. Показать графически и в табличной форме (таблица 3.3) новые суточные графики нагрузки агрегатов ТЭС.

ЗАДАНИЕ № 5

ОПТИМИЗАЦИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РЕАКТИВНОЙ НАГРУЗКИ МЕЖДУ АГРЕГАТАМИ ТЭС

1. По известному суточному графику активной нагрузки агрегатов определить для каждого интервала времени относительную активную нагрузку всех блоков

$$\beta_i = \frac{P_i}{P_{ном}}.$$

2. Записать для всех блоков ТЭС аналитические выражения для функции потерь в виде полинома:

$$\Delta P_i(\beta_i, Q_i) = a_{0i} + a_{1i}\beta_i + a_{2i}Q_i + a_{3i}\beta_i Q_i + a_{4i}\beta_i^2 + a_{5i}Q_i^2 + a_{6i}\beta_i^2 Q_i + a_{7i}\beta_i Q_i^2 .$$

Значения коэффициентов полиномов a_i в функции потерь $\Delta P_i(\beta_i, Q_i)$ в зависимости от мощности блоков приводятся в таблице 6.

3. Методом дифференцирования определить выражения относительного прироста потерь для каждого блока

$$\delta_i = \frac{d\Delta P_i}{dQ_i} = (a_{2i} + a_{3i}\beta_i + a_{6i}\beta_i^2) + 2(a_{5i} + a_{7i}\beta_i)Q_i = c_{0i} + c_{1i}Q_i .$$

4. На каждом интервале суточного графика реактивной нагрузки станции осуществить оптимальное распределение ее между агрегатами. Для этого:

   1) По заданной реактивной нагрузке станции Q_c определить значение относительного прироста потерь ТЭС по формуле:

$$\delta_c = \frac{Q_c + k_2}{k_1},$$

где

$$k_1 = \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{c_{1i}} \quad \text{и} \quad k_2 = \sum_{i=1}^{n} \frac{c_{0i}}{c_{1i}}$$

   2) По найденному значению δ_c вычислить оптимальные реактивные нагрузки блоков

$$Q_i = \frac{\delta_c - c_{0i}}{c_{1i}}.$$

3) Если $\boldsymbol{Q_i \le Q_i^{\max}}$, то задача решена. Если нет, принимаем $\boldsymbol{Q_i = Q_i^{\max}}$, а остаток нагрузки $\boldsymbol{Q_c - Q_i^{\max}}$ распределяем между двумя оставшимися агрегатами по тому же алгоритму.

5. Построить суточные графики реактивной нагрузки блоков.
6. Определить суммарные потери активной мощности для ТЭС.

Результаты расчетов для каждого интервала представить в табличной форме.

Таблица 5.1.

	Интервал №			
	P, МВт	$\boldsymbol{\beta}$	***Q,*** МВар	Δ***P***, кВт
Блок 1				
Блок 2				
Блок 3				
ТЭС				

ЗАДАНИЕ № 6

МНОГОКРИТЕРИАЛЬНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ АКТИВНОЙ НАГРУЗКИ МЕЖДУ АГРЕГАТАМИ ТЭС (ОПТИМИЗАЦИЯ ПО ЭКОНОМИЧЕСКОМУ И НАДЕЖНОСТНОМУ КРИТЕРИЮ)

1. Составить **модель многокритериальной оптимизации** (из двух критериев):

Обозначим: P – вероятность отказов энергоблоков ТЭС,
N – активная мощность, МВт.

Целевая функция:

1) В качестве экономического критерия примем минимум расхода топлива:

$$I_1(N) = \sum_{i=1}^{n} B_i(N_i) = B_1(N_1) + B_2(N_2) + \ldots + B_n(N_n) \to \min$$

2) В качестве критерия по надежности примем вероятность отказов оборудования в зависимости от его нагрузки

$$I_2(N) = \sum_{i=1}^{n} P_i(N_i) = P_1(N_1) + P_2(N_2) + \ldots + P_n(N_n) \to \min$$

2. Записать уравнения связи (зависимость расхода топлива от выдаваемой мощности и зависимость вероятности отказов от нагрузки)***:***

$$B_i(N_i) = a_{0i} + a_{1i} N_i + a_{2i} N_i^2$$

$$P_i(N_i) = d_{0i} + d_{1i} N_i + d_{2i} N_i^2$$

3. Записать ограничения:

- *автономные ограничения* (ограничения-неравенства)

  на допустимые пределы изменения мощности энергоблоков вида:

$$N_i^{\min} \le N_i \le N_i^{\max}$$

  на допустимые пределы по надёжности:

$$P_i(N_i) \le 0{,}25 \text{ (для метода главного критерия)}$$

- *ограничения-связи* (ограничения-равенства) на суммарную активную мощность станции – баланс мощности вида:

$$N_C = \sum_{i=1}^{n} N_i = N_1 + N_2 + \ldots + N_n$$

4. Провести оптимизацию распределения активной нагрузки станции между энергоблоками методом главного критерия и методом приоритетов.

ПРИМЕР ВЫПОЛНЕНИЯ РАСЧЕТОВ ПО КУРСОВОМУ ПРОЕКТУ

Исходные данные по энергоблокам ТЭС представлены в табл. П.1.

Таблица П.1.

№ блока	**№ расходной характеристики**			**Мощность блока**	
	Блок 300 МВт	**Блок 200 МВт**	**Блок 160 МВт**	**$P_{мин}$, МВт**	**$P_{мах}$, МВт**
1	2			100	280
2	3			90	300
3		4		100	200

Выберем турбогенераторы, установленные на ТЭС, и выпишем их основные параметры в таблицу П.2:

Таблица П.2.

№ блока	**тип ТГ**	**Номинальная мощность**		**Номин. напряжение**	**Cosφ**	**Ном. ток, кА**	**Ном. частота вращения, об/мин**	**ОКЗ**
		S, МВА	**P, МВт**	**$U_{ном}$, кВ**				
1	ТГВ-300-2У3	353	300	20	0,85	10,2	3000	
2	ТГВ-300-2У3	353	300	20	0,85	10,2	3000	
3	ТГВ-200-2Д	235,3	200	18	0,85	7,55	3000	

Таблица П.3. Расходные характеристики энергоблоков 300 МВт

№ 2		**№ 3**	
P, МВт	**B, т.у.т./ч**	**P, МВт**	**B, т.у.т./ч**
100	43	90	40
210	99	180	83
280	143	270	134

Таблица П.4. Расходная характеристика энергоблока 200 МВт

№ 4	
P, МВт	**B, т.у.т./ч**
100	42
150	68
200	100

Таблица П.5. Суточный график нагрузки ТЭС

Интервал суток, ч	0 - 4	4 - 10	10 - 18	18 - 22	22 - 24
P_C, МВт	350	480	670	700	460

ЗАДАНИЕ №1

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛИНОМИАЛЬНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ РАСХОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭНЕРГОБЛОКОВ ТЭС С ПОМОЩЬЮ ИНТЕРПОЛЯЦИОННОЙ ФОРМУЛЫ ЛАГРАНЖА

Для аппроксимации расходных характеристик энергоблоков ТЭС воспользуемся интерполяционной формулой Лагранжа, позволяющей получить расходные характеристики в виде полинома 2-ой степени, получив при этом достаточную точность:

$$F(x)=\frac{(P-P_2)(P-P_3)}{(P_1-P_2)(P_1-P_3)}\cdot B_1+\frac{(P-P_1)(P-P_3)}{(P_2-P_1)(P_2-P_3)}\cdot B_2+\frac{(P-P_1)(P-P_2)}{(P_3-P_1)(P_3-P_2)}\cdot B_3$$

После упрощения формула примет вид:

$$B_i(P_i) = a_{0i} + a_{1i} P_i + a_{2i} P_i^2,$$

где i – номер энергоблока на станции

Подставим исходные данные расходных характеристик в эти формулы. Так как на рассматриваемой электростанции установлены три агрегата, то найдем расходные характеристики для каждого из трех энергоблоков данной станции:

$$B^{(1)}(P^{(1)})=\frac{(P-210)(P-280)}{(100-210)(100-280)}\cdot 43+\frac{(P-100)(P-280)}{(210-100)(210-280)}\cdot 99+\frac{(P-100)(P-210)}{(280-100)(280-210)}\cdot 143=$$
$$=0.00066378\cdot P^2+0.3033189\cdot P+6.03030303$$

$$B^{(2)}(P^{(2)})=\frac{(P-180)(P-270)}{(90-180)(90-270)}\cdot 40+\frac{(P-90)(P-270)}{(180-90)(180-270)}\cdot 83+\frac{(P-90)(P-180)}{(270-90)(270-180)}\cdot 134=$$
$$=0.00049383\cdot P^2+0.3444444\cdot P+5$$

$$B^{(3)}(P^{(3)})=\frac{(P-150)(P-200)}{(100-150)(100-200)}\cdot 42+\frac{(P-100)(P-200)}{(150-100)(150-200)}\cdot 68+\frac{(P-100)(P-150)}{(200-100)(200-150)}\cdot 100=$$
$$=0.0012\cdot P^2+0.22\cdot P+8$$

В результате расчета были получены следующие полиномиальные зависимости расходных характеристик трех энергоблоков ТЭС:

$$B_1(P_1) = 6.03030303 + 0.3033189P_1 + 0.00066378P_1^2$$

$$B_2(P_2) = 5 + 0.3444444P_2 + 0.00049383P_2^2$$

$$B_3(P_3) = 8 + 0.22P_3 + 0.00128P_3^2$$

ЗАДАНИЕ № 2

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОПТИМИЗАЦИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ АКТИВНОЙ НАГРУЗКИ МЕЖДУ АГРЕГАТАМИ ТЭС

Задача оптимального распределения мощности между энергоблоками ТЭС заключается в поиске минимума расхода топлива станции.

Целевая функция модели оптимизации представляется в виде:

$$F = B_C = \sum_{i=1}^{n} B_i(P_i) = B_1(P_1) + B_2(P_2) + \ldots + B_n(P_n) \to \min.$$

Для рассматриваемой станции, состоящей из трех энергоблоков:

$$B_C = B_1(P_1) + B_2(P_2) + B_3(P_3) \to \min.$$

$B_C = 6.03030303 + 0.3033189P_1 + 0.00066378P_1^2 + 5 + 0.3444444P_2 +$ $+0.00049383P_2^2 + 8 + 0.22P_2 + 0.00128P_3^2 = 19.03030303 + 0.3033189P_1 +$ $+0.00066378P_1^2 + 0.3444444P_2 + 0.00049383P_2^2 + 0.22P_2 + 0.00128P_3^2 \to min$

Уравнения-связи (зависимость расхода топлива от выдаваемой мощности)***:***

$$B_i(P_i) = a_{0i} + a_{1i}P_i + a_{2i}P_i^2$$

$$\begin{cases} B_1(P_1) = a_{01} + a_{11}P_1 + a_{21}P_1^2 \\ B_2(P_2) = a_{02} + a_{12}P_2 + a_{22}P_2^2 \\ B_3(P_3) = a_{03} + a_{13}P_3 + a_{23}P_3^2 \end{cases}$$

$$\begin{cases} B_1(P_1) = 6.03030303 + 0.3033189P_1 + 0.00066378P_1^2 \\ B_2(P_2) = 5 + 0.3444444P_2 + 0.00049383P_2^2 \\ B_3(P_3) = 8 + 0.22P_3 + 0.00128P_3^2 \end{cases}$$

Ограничения:

- *автономные ограничения* (ограничения-неравенства) на допустимые пределы изменения мощности станций (блоков) вида:

$$P_i^{\min} \le P_i \le P_i^{\max}$$

$$\begin{cases} P_1^{\min} \le P_1 \le P_1^{\max} \\ P_2^{\min} \le P_2 \le P_2^{\max} \\ P_3^{\min} \le P_3 \le P_3^{\max} \end{cases}$$

$$\begin{cases} 100 \le P_1 \le 280 \\ 90 \le P_2 \le 300 \\ 100 \le P_3 \le 200 \end{cases}$$

- *ограничения-связи* (ограничения-равенства) на суммарную активную нагрузку блоков, которая должна быть равна заданной мощности станции P_C вида:

$$P_C = \sum_{i=1}^{n} P_i = P_1 + P_2 + ... + P_n$$

Заданный суточный график нагрузки ТЭС состоит из пяти интервалов, на каждом из которых необходимо наиболее оптимально распределить нагрузку между тремя энергоблоками станции:

$$\begin{cases} 350 = P_1^{I} + P_2^{I} + P_3^{I} \\ 480 = P_1^{II} + P_2^{II} + P_3^{II} \\ 670 = P_1^{III} + P_2^{III} + P_3^{III} \\ 700 = P_1^{IV} + P_2^{IV} + P_3^{IV} \\ 460 = P_1^{V} + P_2^{V} + P_3^{V} \end{cases}$$

Уравнение оптимизации формируется на основании принципа равенства относительных приростов расхода топлива агрегатов и электростанции, выведенного на основе метода неопределенных множителей Лагранжа.

ЗАДАНИЕ № 3

ОПТИМАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ АКТИВНОЙ НАГРУЗКИ МЕЖДУ АГРЕГАТАМИ ТЭС

1. Запишем расходные характеристики трех блоков ТЭС в виде полиномов второй степени вида:

$$B_i(P_i) = a_{0i} + a_{1i} P_i + a_{2i} P_i^2$$

$$B_1(P_1) = 6.03030303 + 0.3033189P_1 + 0.00066378P_1^2$$

$$B_2(P_2) = 5 + 0.3444444P_2 + 0.00049383P_2^2$$

$$B_3(P_3) = 8 + 0.22P_2 + 0.00128P_3^2$$

2. С помощью дифференцирования расходных характеристик по соответствующим мощностям агрегатов найдем характеристики относительных приростов расхода топлива (ОПРТ), которые показывают, как изменится расход топлива ***i***-го энергоблока, если его нагрузка изменится на величину ∂P_i , для каждого из трех блоков ТЭС:

$$b_i(P_i) = \frac{\partial B_i(P_i)}{\partial P_i} = a_{1i} + 2a_{2i} P_i$$

$$b_1(P_1) = 0.3033189 + 2 \cdot 0.00066378 \cdot P_1 = 0.3033189 + 0.001328 \cdot P_1$$

$$b_2(P_2) = 0.3444444 + 2 \cdot 0.00049383 \cdot P_2 = 0.3444444 + 0.000988 \cdot P_2$$

$$b_3(P_3) = 0.22 + 2 \cdot 0.0012 \cdot P_3 = 0.22 + 0.0024 \cdot P_3$$

3. Построим на миллиметровой бумаге расходные характеристики агрегатов $\boldsymbol{B_1(P_1)}$, $\boldsymbol{B_2(P_2)}$ и $\boldsymbol{B_3(P_3)}$ и точно под ними характеристики относительных приростов расхода топлива блоков $\boldsymbol{b_1(P_1)}$, $\boldsymbol{b_2(P_2)}$ и $\boldsymbol{b_3(P_3)}$. Результаты расчетов сведем в таблицу П.6.

Таблица П.6.

P₁, МВт	***B₁***, т.у.т./ч	***P₂***, МВт	***B₂***, т.у.т./ч	***P₃***, МВт	***B₃***, т.у.т./ч
100	42.99999	90	40.00002	100	42
105	45.19696	95	42.17903	105	44.33
110	47.42712	100	44.38274	110	46.72
115	49.69047	105	46.61114	115	49.17
120	51.987	110	48.86423	120	51.68
125	54.31673	115	51.14201	125	54.25
130	56.67964	120	53.44448	130	56.88
135	59.07575	125	55.77164	135	59.57
140	61.50504	130	58.1235	140	62.32
145	63.96752	135	60.50005	145	65.13
150	66.46319	140	62.90128	150	68
155	68.99205	145	65.32721	155	70.93
160	71.5541	150	67.77784	160	73.92
165	74.14933	155	70.25315	165	76.97
170	76.77776	160	72.75315	170	80.08
175	79.43937	165	75.27785	175	83.25
180	82.13418	170	77.82724	180	86.48
185	84.86217	175	80.40131	185	89.77
190	87.62335	180	83.00008	190	93.12
195	90.41772	185	85.62355	195	96.53
200	93.24528	190	88.2717	200	100
205	96.10603	195	90.94454		
210	98.99997	200	93.64208		
215	101.9271	205	96.36431		
220	104.8874	210	99.11123		
225	107.8809	215	101.8828		
230	110.9076	220	104.6791		
235	113.9675	225	107.5001		
240	117.0606	230	110.3458		
245	120.1868	235	113.2162		
250	123.3463	240	116.1113		
255	126.5389	245	119.031		
260	129.7647	250	121.9755		
265	133.0238	255	124.9446		
270	136.316	260	127.9385		
275	139.6414	265	130.957		
280	142.9999	270	134.0002		
		275	137.0681		
		280	140.1607		
		285	143.278		
		290	146.42		
		295	149.5867		
		300	152.778		

P_1, МВт	b_1, т.у.т./МВт*ч	P_2, МВт	b_2, т.у.т./МВт*ч	P_3, МВт	b_3, т.у.т./МВт*ч
100	0.383334	90	0.383334	100	0.383334
100	0.436075	90	0.433334	100	0.46
280	0.675036	300	0.640742	200	0.7
280	0.75	300	0.75	200	0.75

4. Найдем графически суммарную характеристику относительных приростов расхода топлива на ТЭС $\boldsymbol{b_C(P_C)}$. Точно под ней построим суточный график нагрузки $\boldsymbol{P_C(t)}$ согласно варианту задания.

Таблица П.7. Суммарная характеристика ОПРТ ТЭС.

b_C, т.у.т./МВт*ч	$P_C = P_1 + P_2 + P_3$, МВт
0.383334	290
0.433334	290
0.438334	296.764
0.443334	305.5928
0.448334	314.4216
0.453334	323.2504
0.458334	332.0791
0.463334	342.297
0.468334	353.2091
0.473334	364.1212
0.478334	375.0333
0.483334	385.9454
0.488334	396.8576
0.493334	407.7697
0.498334	418.6818
0.503334	429.5939
0.508334	440.506
0.513334	451.4181
0.518334	462.3302
0.523334	473.2423
0.528334	484.1545
0.533334	495.0666
0.538334	505.9787
0.543334	516.8908
0.548334	527.8029
0.553334	538.715
0.558334	549.6271
0.563334	560.5392
0.568334	571.4514
0.573334	582.3635
0.578334	593.2756
0.583334	604.1877
0.588334	615.0998
0.593334	626.0119
0.598334	636.924
0.603334	647.8361
0.608334	658.7482
0.613334	669.6604
0.618334	680.5725
0.623334	691.4846
0.628334	702.3967
0.633334	713.3088
0.638334	724.2209
0.643334	732.5093
0.648334	738.3589
0.653334	744.2085
0.658334	750.0582
0.663334	755.9078
0.668334	761.7575
0.673334	767.6071
0.678334	770.9724
0.683334	773.0558
0.688334	775.1391
0.693334	777.2224
0.698334	779.3058
0.703334	780
0.748334	780

5. Используя принцип равенства относительных приростов расхода топлива (ОПРТ), найдем суточные графики нагрузки каждого блока станции $\boldsymbol{P_i(t)}$. Результаты представим в таблице П.8.

Таблица П.8. Распределение мощности нагрузки между агрегатами ТЭС.

Расчетное время	Интервал 1	Интервал 2	Интервал 3	Интервал 4	Интервал 5
	0 - 4	4 - 10	10 - 18	18 – 22	22 - 24
$\boldsymbol{P_C}$, МВт	350	480	670	700	460
$\boldsymbol{P_1}$, МВт	123.1918	168.0612	233.6396	243.994	161.1582
$\boldsymbol{P_2}$, МВт	123.9485	184.2596	272.4065	286.3245	174.9809
$\boldsymbol{P_3}$, МВт	102.8597	127.6793	163.9539	169.6815	123.8609

6. Произведем для всех интервалов времени проверку. На каждом интервале должен соблюдаться баланс мощности:

$$\boldsymbol{P_1(t) + P_2(t) + P_3(t) = P_C(t).}$$

1) 123.1918 + 123.9485 + 102.8597 = 350

2) 168.0612 + 184.2596 + 127.6793 = 480

3) 233.6396 + 272.4065 + 163.9539 = 670

4) 243.994 + 286.3245 + 169.6815 = 700

5) 161.1582 + 174.9809 + 123.8609 = 460

7. Определим оптимальный часовой расход условного топлива для каждого блока и суммарный часовой расход топлива для ТЭС на каждом расчетном интервале времени:

Таблица П.9. Нагрузки блоков $\boldsymbol{P_i}$ и часовые расходы топлива $\boldsymbol{B_i}$ для каждого расчетного интервала времени.

Расчетное время суток		Интервал 1	Интервал 2	Интервал 3	Интервал 4	Интервал 5
		0 - 4	4 - 10	10 - 18	18 – 22	22 - 24
$\boldsymbol{P_C}$, МВт		350	480	670	700	460
1 блок	$\boldsymbol{P_1}$, МВт	123.1918	168.0612	233.6396	243.994	161.1582
	$\boldsymbol{B_1}$, т.у.т./ч	53.47036	75.75461	113.1316	119.5552	72.1523
2 блок	$\boldsymbol{P_2}$, МВт	123.9485	184.2596	272.4065	286.3245	174.9809
	$\boldsymbol{B_2}$, т.у.т./ч	55.28019	85.23349	135.4737	144.1079	80.39145
3 блок	$\boldsymbol{P_3}$, МВт	102.8597	127.6793	163.9539	169.6815	123.8609
	$\boldsymbol{B_3}$, т.у.т./ч	43.32529	55.65182	76.32693	79.88011	53.65921
$\boldsymbol{B_C}$, т.у.т./ч		152.0758	216.6399	324.9323	343.5432	206.203

Суммарный расход топлива каждого агрегата за сутки составил:

$$\boldsymbol{B_{\sum i} = \sum B_i \cdot t_{инт}};$$

$$\boldsymbol{B_{1\Sigma}} = 53.47036 \cdot 4 + 75.75461 + 113.1316 \cdot 8 + 119.5552 \cdot 4 + 72.1523 \cdot 2 =$$

$$= 2195.988 \text{ т.у.т.}$$

$$\boldsymbol{B_{2\Sigma}} = 55.28019 \cdot 4 + 85.23349 + 135.4737 \cdot 8 + 144.1079 \cdot 4 + 80.3915 \cdot 2 =$$

$$= 2553.526 \text{ т.у.т.}$$

$$\boldsymbol{B_{3\Sigma}} = 43.32529 \cdot 4 + 55.65182 + 76.32693 \cdot 8 + 79.88011 \cdot 4 + 53.65921 \cdot 2 =$$

$$= 1544.667 \text{ т.у.т.}$$

Суммарный расход топлива на станции за сутки:

$$\boldsymbol{B_{\sum} = \sum B_C \cdot t_{инт}}$$

$$\boldsymbol{B_{\sum}} = 152.0758 \cdot 4 + 216.6399 \cdot 6 + 324.9323 \cdot 8 + 343.5432 \cdot 4 + 206.203 \cdot 2 =$$

$$= 6294.18 \text{ т.у.т.}$$

ЗАДАНИЕ № 4

ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОГО СОСТАВА РАБОТАЮЩИХ АГРЕГАТОВ ТЭС ВО ВРЕМЯ ПРОХОЖДЕНИЯ НОЧНОГО ПРОВАЛА ГРАФИКА НАГРУЗКИ

1. Используя результаты расчета и построения задания 3, на графике $b_C(P_C)$ построим суммарные характеристики ОПРТ станции при отключении одного блока для всех возможных комбинаций состава работающих агрегатов (1+2, 1+3 и 2+3).
2. Определим оптимальный состав работающих агрегатов ТЭС при прохождении ночного провала графика нагрузки станции с учетом пусковых расходов топлива. Для этого:
   1) Определим пусковые расходы топлива отдельных агрегатов в зависимости от времени простоя блоков по рис.5.2

Таблица П.10.

№ блока	Время простоя, ч	Пусковые расходы, т.у.т.
1	12	121
2	12	121
3	12	57

   2) Заполним таблицу П.11. Нагрузки блоков P_i, часовые расходы топлива B_i и суммарный расход B_Σ для расчетного интервала времени.

Таблица П.11.

Интервал 0 - 4; t = 4 ч				
	Состав 1+2+3	Состав 1+2	Состав 1+3	Состав 2+3
P_C, МВт	350	350	350	350
P_1, МВт	123.1918	167.0712	202.9964	0
P_2, МВт	123.9485	182.9288	0	211.2241
P_3, МВт	102.8597	0	147.0036	138.7759
B_1, т.у.т./ч	53.47037	75.23409	94.95566	0
B_2, т.у.т./ч	55.28018	84.53382	0	99.78752
B_3, т.у.т./ч	43.3253	0	66.27289	61.64118
B_C, т.у.т./ч	152.0758	159.7679	161.2285	161.4287
B_Σ, т.у.т.	608.3034	639.0717	644.9142	645.7148
Интервал 4 - 10; t = 6 ч				
	Состав 1+2+3	Состав 1+2	Состав 1+3	Состав 2+3
P_C, МВт	480	480	480	480
P_1, МВт	168.0612	222.5285	280	0
P_2, МВт	184.2595	257.4715	0	300
P_3, МВт	127.6793	0	200	180
B_1, т.у.т./ч	75.75462	106.3971	142.9999	0
B_2, т.у.т./ч	85.23348	126.4214	0	152.778
B_3, т.у.т./ч	55.65183	0	100	86.48
B_C, т.у.т./ч	216.6399	232.8185	242.9999	239.258
B_Σ, т.у.т.	1299.84	1396.911	1458	1435.548

Интервал 10 - 18; t = 8 ч				
	Состав 1+2+3	Состав 1+2	Состав 1+3	Состав 2+3
P_C, МВт	670	670	670	670
P_1 , МВт	233.6396	0	0	0
P_2 , МВт	272.4065	0	0	0
P_3 , МВт	163.9539	0	0	0
B_1 , т.у.т./ч	113.1317	0	0	0
B_2 , т.у.т./ч	135.4737	0	0	0
B_3 , т.у.т./ч	76.32694	0	0	0
B_C , т.у.т./ч	324.9323	0	0	0
B_Σ , т.у.т.	2599.458	0	0	0
Интервал 18 - 22; t = 4 ч				
	Состав 1+2+3	Состав 1+2	Состав 1+3	Состав 2+3
P_C, МВт	700	700	700	700
P_1 , МВт	243.994	0	0	0
P_2 , МВт	286.3244	0	0	0
P_3 , МВт	169.6815	0	0	0
B_1 , т.у.т./ч	119.5552	0	0	0
B_2 , т.у.т./ч	144.1079	0	0	0
B_3 , т.у.т./ч	79.88011	0	0	0
B_C , т.у.т./ч	343.5432	0	0	0
B_Σ , т.у.т.	1374.173	0	0	0
Интервал 22 - 24; t = 2 ч				
	Состав 1+2+3	Состав 1+2	Состав 1+3	Состав 2+3
P_C, МВт	460	460	460	460
P_1 , МВт	161.1582	213.9966	273.8202	0
P_2 , МВт	174.9809	246.0034	0	289.154
P_3 , МВт	123.8609	0	186.1798	170.846
B_1 , т.у.т./ч	72.15231	101.337	138.8537	0
B_2 , т.у.т./ч	80.39145	119.62	0	145.8867
B_3 , т.у.т./ч	53.65921	0	90.55508	80.61212
B_C , т.у.т./ч	206.203	220.957	229.4088	226.4988
B_Σ , т.у.т.	412.4059	441.9139	458.8175	452.9976

3) Рассчитаем суммарный расход топлива на ТЭС для различных комбинаций состава работающего оборудования с учетом пусковых расходов:

$$B_{\Sigma\,к} = \sum B_{C\,к} \cdot t_{инт} + B_{пуск\,к}\ ;$$

$$B_{\Sigma\,1+2+3} = \sum B_{C\,1+2+3} \cdot t_{инт} + B_{пуск\,1+2+3}$$

$$B_{\Sigma\,1+2+3} = 152.0758 \cdot 4 + 216.6399 \cdot 6 + 324.9323 \cdot 8 + 343.5432 \cdot$$

$$\cdot\, 4 + 206.203 \cdot 2 + 0 = 608.3034 + 1299.84 + 2599.458 +$$

$$+\, 1374.173 + 412.4059 + 0 = 6294.18 \text{ т.у.т.}$$

$$B_{\Sigma\,1+2} = \sum B_{C\,1+2} \cdot t_{инт} + B_{пуск\,1+2}$$

$$\boldsymbol{B}_{\sum 1+2} = 159.7679 \cdot 4 + 232.8185 \cdot 6 + 324.9323 \cdot 8 + 343.5432 \cdot 4 +$$
$$+ 220.957 \cdot 2 + 57 = 639.0717 + 1396.911 + 2599.458 +$$
$$+ 1374.173 + 441.9139 + 57 = 6508.5276 \text{ т.у.т.}$$

$$\boldsymbol{B}_{\sum 1+3} = \sum \boldsymbol{B}_{C\,1+3} \cdot \boldsymbol{t}_{инт} + \boldsymbol{B}_{пуск\ 1+3}$$

$$\boldsymbol{B}_{\sum 1+3} = 161.2285 \cdot 4 + 242.9999 \cdot 6 + 324.9323 \cdot 8 + 343.5432 \cdot 4 +$$
$$+ 229.4088 \cdot 2 + 121 = 644.9142 + 1458 + 2599.458 +$$
$$+ 1374.173 + 458.8175 + 121 = 6656.3625 \text{ т.у.т.}$$

$$\boldsymbol{B}_{\sum 2+3} = \sum \boldsymbol{B}_{C\,2+3} \cdot \boldsymbol{t}_{инт} + \boldsymbol{B}_{пуск\ 2+3}$$

$$\boldsymbol{B}_{\sum 2+3} = 161.4287 \cdot 4 + 239.258 \cdot 6 + 324.9323 \cdot 8 + 343.5432 \cdot 4 +$$
$$+ 206.203 \cdot 2 + 121 = 645.7148 + 1435.548 + 2599.458 +$$
$$+ 1374.173 + 452.9976 + 121 = 6628.8916 \text{ т.у.т.}$$

Запишем результаты расчетов в таблицу П.12.

Таблица П.12.

Суммарное значение расхода топлива за сутки с учетом пусковых расходов останавливаемых агрегатов				
Состав	**1+2+3**	**1+2**	**1+3**	**2+3**
$B_{\Sigma сут}$, т.у.т.	6294.18	6508.5276	6656.3625	6628.8916

4) Выберем оптимальный состав работающих агрегатов ТЭС. Из проведенных расчетов видно, что наиболее оптимальным составом является состав 1 + 2 + 3.

3. Покажем графически и в табличной форме суточные графики нагрузки агрегатов ТЭС при оптимальном распределении нагрузки станции.

Таблица П.13. Распределение мощности нагрузки между оптимальным составом выбранных агрегатов ТЭС.

Расчетное время	Интервал 1	Интервал 2	Интервал 3	Интервал 4	Интервал 5
	0 - 4	4 - 10	10 - 18	18 – 22	22 - 24
$\boldsymbol{P_C}$, МВт	350	480	670	700	460
$\boldsymbol{P_1}$, МВт	123.1918	168.0612	233.6396	243.994	161.1582
$\boldsymbol{P_2}$, МВт	123.9485	184.2596	272.4065	286.3245	174.9809
$\boldsymbol{P_3}$, МВт	102.8597	127.6793	163.9539	169.6815	123.8609

Вывод: *Оптимальным является состав* 1+2+3, *так как наименьший расход топлива за сутки получается при прохождении ночного провала заданного графика нагрузки ТЭС именно этим составом. Во-первых, много топлива расходуется на пуск агрегатов, а во-вторых – расходные характеристики агрегатов таковы, что при одной и той же нагрузке станции 3 агрегата с меньшей нагрузкой на каждый агрегат расходуют меньше топлива, чем 2 агрегата с большей нагрузкой на каждый агрегат.*

ЗАДАНИЕ № 5

ОПТИМИЗАЦИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РЕАКТИВНОЙ НАГРУЗКИ МЕЖДУ АГРЕГАТАМИ ТЭС

Найдем номинальные реактивные мощности турбогенераторов:

$$Q = P \cdot tg\varphi$$

$$tg\varphi = tg(arcCos\varphi) = tg(arcCos(0.85)) = 0.619744338$$

$$Q_1 = Q_2 = P_{1\,ном} \cdot tg\varphi_1 = 300 \cdot 0.619744338 = 185.9233015 \text{ кВАр}$$

$$Q_3 = P_3 \cdot tg\varphi_3 = 200 \cdot 0.619744338 = 123.9488677 \text{ кВАр}$$

Значения коэффициентов полиномов $\boldsymbol{a_i}$ в функции потерь $\Delta \boldsymbol{P_i(\beta_i\,,Q_i\,)}$ в зависимости от мощности блоков приводятся в таблице 6.

1. По известному суточному графику активной нагрузки агрегатов определим для каждого интервала времени относительную активную нагрузку каждого блока:

$$\boldsymbol{\beta_i = \frac{P_i}{P_{ном}}}.$$

$$\beta_1^I = \frac{P_1^I}{P_{1ном}^I} = \frac{123.1918}{280} = 0.439971$$

$$\beta_1^{II} = \frac{P_1^{II}}{P_{1ном}^{II}} = \frac{168.0612}{280} = 0.600219$$

$$\beta_1^{III} = \frac{P_1^{III}}{P_{1ном}^{III}} = \frac{233.6396}{280} = 0.834427$$

$$\beta_1^{IV} = \frac{P_1^{IV}}{P_{1ном}^{IV}} = \frac{243.994}{280} = 0.871407$$

$$\beta_1^{V} = \frac{P_1^{V}}{P_{1ном}^{V}} = \frac{161.1582}{280} = 0.575565$$

$$\beta_2^I = \frac{P_2^I}{P_{2ном}^I} = \frac{123.9485}{300} = 0.413162$$

$$\beta_2^{II} = \frac{P_2^{II}}{P_{2ном}^{II}} = \frac{184.2596}{300} = 0.614199$$

$$\beta_2^{III} = \frac{P_2^{III}}{P_{2ном}^{III}} = \frac{272.4065}{300} = 0.908022$$

$$\beta_2^{IV} = \frac{P_2^{IV}}{P_{2ном}^{IV}} = \frac{286.3245}{300} = 0.954415$$

$$\beta_2^{V} = \frac{P_2^{V}}{P_{2ном}^{V}} = \frac{174.9809}{300} = 0.58327$$

$$\beta_3^I = \frac{P_3^I}{P_{3ном}^I} = \frac{102.8597}{200} = 0.514299$$

$$\beta_3^{II} = \frac{P_3^{II}}{P_{3ном}^{II}} = \frac{127.6793}{200} = 0.638397$$

$$\beta_3^{III} = \frac{P_3^{III}}{P_{3ном}^{III}} = \frac{163.9539}{200} = 0.81977$$

$$\beta_3^{IV} = \frac{P_3^{IV}}{P_{3ном}^{IV}} = \frac{169.6815}{200} = 0.848408$$

$$\beta_3^{V} = \frac{P_3^{V}}{P_{3ном}^{V}} = \frac{123.8609}{200} = 0.619305$$

2. Запишем для всех блоков ТЭС аналитические выражения для функции потерь в виде полинома:

$$\Delta \boldsymbol{P_i(\beta_i, Q_i) = a_{0i} + a_{1i}\beta_i + a_{2i}Q_i + a_{3i}\beta_i Q_i + a_{4i}\beta_i^2 + a_{5i}Q_i^2 + a_{6i}\beta_i^2 Q_i + a_{7i}\beta_i Q_i^2}\ .$$

Для первого блока на каждом интервале:

$$\Delta P_1^I(\beta_1^I, Q_1^I) = 0.48 + 1.31\cdot 0.439971 + 2.36Q_1^I + 0.32\cdot 0.439971Q_1^I + 0\cdot 0.439971+$$
$$+ 0.029(Q_1^I)^2 - 0.19\cdot 0.439971Q_1^I - 0.0045\cdot 0.439971(Q_1^I)^2 =$$
$$= 1.056362 + 2.464012\ Q_1^I + 0.02702(Q_1^I)^2$$

$$\Delta P_1^{II}(\beta_1^{II}, Q_1^{II}) = 0.48 + 1.31\cdot 0.600219 + 2.36Q_1^{II} + 0.32\cdot 0.600219Q_1^{II} + 0\cdot 0.600219+$$
$$+ 0.029(Q_1^{II})^2 - 0.19\cdot 0.600219Q_1^{II} - 0.0045\cdot 0.600219(Q_1^{II})^2$$
$$= 1.266286 + 2.48362\ Q_1^I + 0.026299(Q_1^I)^2$$

$$\Delta P_1^{III}(\beta_1^{III}, Q_1^{III}) = 0.48 + 1.31\cdot 0.834427 + 2.36Q_1^{III} + 0.32\cdot 0.834427Q_1^{III} + 0\cdot 0.834427+$$
$$+ 0.029(Q_1^{III})^2 - 0.19\cdot 0.834427Q_1^{III} - 0.0045\cdot 0.834427(Q_1^{III})^2$$
$$= 1.5731 + 2.494726\ Q_1^I + 0.025245(Q_1^I)^2$$

$$\Delta P_1^{IV}(\beta_1^{IV}, Q_1^{IV}) = 0.48 + 1.31\cdot 0.871407 + 2.36Q_1^{IV} + 0.32\cdot 0.871407Q_1^{IV} + 0\cdot 0.871407+$$
$$+ 0.029(Q_1^{IV})^2 - 0.19\cdot 0.871407Q_1^{IV} - 0.0045\cdot 0.871407(Q_1^{IV})^2$$
$$= 1.621543 + 2.494574\ Q_1^I + 0.025079(Q_1^I)^2$$

$$\Delta P_1^{V}(\beta_1^{V}, Q_1^{V}) = 0.48 + 1.31\cdot 0.575565 + 2.36Q_1^{V} + 0.32\cdot 0.575565Q_1^{V} + 0\cdot 0.575565+$$
$$+ 0.029(Q_1^{V})^2 - 0.19\cdot 0.575565Q_1^{V} - 0.0045\cdot 0.575565(Q_1^{V})^2$$
$$= 1.23399 + 2.481239\ Q_1^I + 0.02641(Q_1^I)^2$$

Для второго блока на каждом интервале:

$$\Delta P_2^I(\beta_2^I, Q_2^I) = 0.48 + 1.31\cdot 0.413162 + 2.36Q_2^I + 0.32\cdot 0.413162Q_2^I + 0\cdot 0.413162+$$
$$+ 0.029(Q_2^I)^2 - 0.19\cdot 0.413162Q_2^I - 0.0045\cdot 0.413162(Q_2^I)^2 =$$

$$= 1.021242 + 2.459778\, Q_2^I + 0.027141(Q_2^I)^2$$

$$\Delta P_2^{II}(\beta_2^{II},Q_2^{II}) = 0.48+ 1.31\cdot 0.614199 + 2.36Q_2^{II}+0.32\cdot 0.614199Q_2^{II} +0\cdot 0.614199+$$
$$+ 0.029(Q_2^{II})^2 - 0.19\cdot 0.614199Q_2^{II} - 0.0045\cdot 0.614199(Q_2^{II})^2$$
$$= 1.2846 + 2.484868\, Q_2^I + 0.026236(Q_2^I)^2$$

$$\Delta P_2^{III}(\beta_2^{III},Q_2^{III}) =0.48+1.31\cdot 0.908022+2.36Q_2^{III}+0.32\cdot 0.908022Q_2^{III} +0\cdot 0.908022+$$
$$+ 0.029(Q_2^{III})^2 - 0.19\cdot 0.908022Q_2^{III} - 0.0045\cdot 0.908022(Q_2^{III})^2$$
$$= 1.669508 + 2.493911\, Q_2^I + 0.024914(Q_2^I)^2$$

$$\Delta P_2^{IV}(\beta_2^{IV},Q_2^{IV}) = 0.48+1.31\cdot 0.954415+2.36Q_2^{IV}+0.32\cdot 0.954415Q_2^{IV} +0\cdot 0.954415+$$
$$+ 0.029(Q_2^{IV})^2 - 0.19\cdot 0.954415Q_2^{IV} - 0.0045\cdot 0.954415(Q_2^{IV})^2$$
$$= 1.730284 + 2.49234\, Q_2^I + 0.024705(Q_2^I)^2$$

$$\Delta P_2^{V}(\beta_2^{V},Q_2^{V}) = 0.48 + 1.31\cdot 0.58327 + 2.36Q_2^{V} + 0.32\cdot 0.58327Q_2^{V} + 0\cdot 0.58327 +$$
$$+ 0.029(Q_2^{V})^2 - 0.19\cdot 0.58327Q_2^{V} - 0.0045\cdot 0.58327(Q_2^{V})^2$$
$$= 1.244083 + 2.482008\, Q_2^I + 0.026375(Q_2^I)^2$$

Для третьего блока на каждом интервале:

$$\Delta P_3^{I}(\beta_3^{I},Q_3^{I}) = 0.35 + 1.19\cdot 0.514299 + 2.23Q_3^{I} + 0\cdot 0.514299Q_3^{I} + 0\cdot 0.514299 +$$
$$+ 0.021(Q_3^{I})^2 - 0.15\cdot 0.514299Q_3^{I} - 0.0034\cdot 0.514299(Q_3^{I})^2 =$$
$$= 0.962015 + 2.190325\, Q_3^I + 0.019251(Q_3^I)^2$$

$$\Delta P_3^{II}(\beta_3^{II},Q_3^{II}) = 0.35 + 1.19\cdot 0.638397 + 2.23Q_3^{II} + 0\cdot 0.638397Q_3^{II} + 0\cdot 0.638397 +$$
$$+ 0.021(Q_3^{II})^2 - 0.15\cdot 0.638397Q_3^{II} - 0.0034\cdot 0.638397(Q_3^{II})^2$$
$$= 1.109692 + 2.168867\, Q_3^I + 0.018829(Q_3^I)^2$$

$$\Delta P_3^{III}(\beta_3^{III},Q_3^{III}) = 0.35 + 1.19\cdot 0.81977 + 2.23Q_3^{III} + 0\cdot 0.81977Q_3^{III} + 0\cdot 0.81977 +$$
$$+ 0.021(Q_3^{III})^2 - 0.15\cdot 0.81977Q_3^{III} - 0.0034\cdot 0.81977(Q_3^{III})^2$$
$$= 1.325526 + 2.129197\, Q_3^I + 0.018213(Q_3^I)^2$$

$$\Delta P_3^{IV}(\beta_3^{IV},Q_3^{IV}) =0.35 + 1.19\cdot 0.848408 + 2.23Q_3^{IV}+ 0\cdot 0.848408Q_3^{IV} + 0\cdot 0.848408+$$
$$+ 0.021(Q_3^{IV})^2 - 0.15\cdot 0.848408Q_3^{IV} - 0.0034\cdot 0.848408(Q_3^{IV})^2$$
$$= 1.359605 + 2.122031\, Q_3^I + 0.018115(Q_3^I)^2$$

$$\Delta P_3^{V}(\beta_3^{V},Q_3^{V}) = 0.35 + 1.19\cdot 0.619305 + 2.23Q_3^{V} + 0\cdot 0.619305Q_3^{V} + 0\cdot 0.619305 +$$
$$+ 0.021(Q_3^{V})^2 - 0.15\cdot 0.619305Q_3^{V} - 0.0034\cdot 0.619305(Q_3^{V})^2$$
$$= 1.086972 + 2.172469\, Q_3^I + 0.018894(Q_3^I)^2$$

3. Методом дифференцирования определим выражения относительного прироста потерь для каждого блока:

$$\delta_i = \frac{d\Delta P_i}{dQ_i} = (a_{2i} + a_{3i}\beta_i + a_{6i}\beta_i^2) + 2(a_{5i} + a_{7i}\beta_i)Q_i = c_{0i} + c_{1i}Q_i\,.$$

Для первого блока на каждом интервале:

$$\delta_1^{I} = \frac{d\Delta P_1^{I}}{dQ_1^{I}} = (2.36 + 0.32\cdot 0.439971 - 0.19\cdot 0.439971^2) + 2(0.029 - 0.0045\cdot 0.439971)Q_1 =$$
$$= 2.464012 + 0.05404Q_1$$

$$\delta_1^{II} = \frac{d\Delta P_1^{II}}{dQ_1^{II}} = (2.36 + 0.32\cdot 0.600219 - 0.19\cdot 0.600219^2) + 2(0.029 - 0.0045\cdot 0.600219)Q_1 =$$
$$= 2.48362 + 0.052598Q_1$$

$$\delta_1^{III} = \frac{d\Delta P_1^{III}}{dQ_1^{III}} = (2.36 + 0.32\cdot 0.834427 - 0.19\cdot 0.834427^2) + 2(0.029 - 0.0045\cdot 0.834427)Q_1 =$$
$$= 2.494726 + 0.05049Q_1$$

$$\delta_1^{IV} = \frac{d\Delta P_1^{IV}}{dQ_1^{IV}} = (2.36 + 0.32\cdot 0.871407 - 0.19\cdot 0.871407^2) + 2(0.029 - 0.0045\cdot 0.871407)Q_1 =$$
$$= 2.494574 + 0.050157Q_1$$

$$\delta_1^{V} = \frac{d\Delta P_1^{V}}{dQ_1^{V}} = (2.36 + 0.32\cdot 0.575565 - 0.19\cdot 0.575565^2) + 2(0.029 - 0.0045\cdot 0.575565)Q_1 =$$
$$= 2.481239 + 0.05282Q_1$$

Для второго блока на каждом интервале:

$$\delta_2^{I} = \frac{d\Delta P_2^{I}}{dQ_2^{I}} = (2.36 + 0.32\cdot 0.413162 - 0.19\cdot 0.413162^2) + 2(0.029 - 0.0045\cdot 0.413162)Q_2 =$$
$$= 2.459778 + 0.054282Q_2$$

$$\delta_2^{II} = \frac{d\Delta P_2^{II}}{dQ_2^{II}} = (2.36 + 0.32\cdot 0.614199 - 0.19\cdot 0.614199^2) + 2(0.029 - 0.0045\cdot 0.614199)Q_2 =$$
$$= 2.484868 + 0.052472Q_2$$

$$\delta_2^{III} = \frac{d\Delta P_2^{III}}{dQ_2^{III}} = (2.36 + 0.32\cdot 0.908022 - 0.19\cdot 0.908022^2) + 2(0.029 - 0.0045\cdot 0.908022)Q_2 =$$
$$= 2.493911 + 0.049828Q_2$$

$$\delta_2^{IV} = \frac{d\Delta P_2^{IV}}{dQ_2^{IV}} = (2.36 + 0.32\cdot 0.954415 - 0.19\cdot 0.954415^2) + 2(0.029 - 0.0045\cdot 0.954415)Q_2 =$$
$$= 2.49234 + 0.04941Q_2$$

$$\delta_2^{V} = \frac{d\Delta P_2^{V}}{dQ_2^{V}} = (2.36 + 0.32\cdot 0.58327 - 0.19\cdot 0.58327^2) + 2(0.029 - 0.0045\cdot 0.58327)Q_2 =$$
$$= 2.482008 + 0.052751Q_2$$

Для третьего блока на каждом интервале:

$$\delta_3^I = \frac{d\Delta P_3^I}{dQ_3^I} = (2.23 + 0 \cdot 0.514299 - 0.15 \cdot 0.514299^2) + 2(0.021 - 0.0034 \cdot 0.514299)Q_3 =$$
$$= 2.190325 + 0.038503Q_3$$

$$\delta_3^I = \frac{d\Delta P_3^I}{dQ_3^I} = (2.23 + 0 \cdot 0.514299 - 0.15 \cdot 0.514299^2) + 2(0.021 - 0.0034 \cdot 0.514299)Q_3 =$$
$$= 2.190325 + 0.038503Q_3$$

$$\delta_3^I = \frac{d\Delta P_3^I}{dQ_3^I} = (2.23 + 0 \cdot 0.514299 - 0.15 \cdot 0.514299^2) + 2(0.021 - 0.0034 \cdot 0.514299)Q_3 =$$
$$= 2.190325 + 0.038503Q_3$$

$$\delta_3^I = \frac{d\Delta P_3^I}{dQ_3^I} = (2.23 + 0 \cdot 0.514299 - 0.15 \cdot 0.514299^2) + 2(0.021 - 0.0034 \cdot 0.514299)Q_3 =$$
$$= 2.190325 + 0.038503Q_3$$

$$\delta_3^I = \frac{d\Delta P_3^I}{dQ_3^I} = (2.23 + 0 \cdot 0.514299 - 0.15 \cdot 0.514299^2) + 2(0.021 - 0.0034 \cdot 0.514299)Q_3 =$$
$$= 2.190325 + 0.038503Q_3$$

4. На каждом интервале суточного графика реактивной нагрузки станции осуществим оптимальное распределение ее между агрегатами. Для этого:

   1) По заданной реактивной нагрузке станции $\boldsymbol{Q_c}$ определим значение относительного прироста потерь ТЭС по формуле:

$$\boldsymbol{\delta_c = \frac{Q_c + k_2}{k_1}},$$

где

$$\boldsymbol{k_1 = \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{c_{1i}}} \qquad \text{и} \qquad \boldsymbol{k_2 = \sum_{i=1}^{n} \frac{c_{0i}}{c_{1i}}}$$

Расчеты запишем в таблицу П.14:

Таблица П.14.

Параметр	Интервал 1	Интервал 2	Интервал 3	Интервал 4	Интервал 5
c_{01}	2.464012	2.48362	2.494726	2.494574	2.481239
c_{02}	2.459778	2.484868	2.493911	2.49234	2.482008
c_{03}	2.190325	2.168867	2.129197	2.122031	2.172469
c_{11}	0.05404	0.052598	0.05049	0.050157	0.05282
c_{11}	0.054282	0.052472	0.049828	0.04941	0.052751
c_{11}	0.038503	0.037659	0.036426	0.036231	0.037789
$k_1 = \frac{1}{c_{11}} + \frac{1}{c_{12}} + \frac{1}{c_{13}}$	62.89935	64.62397	67.3282	67.77678	64.35231
$k_2 = \frac{c_{01}}{c_{11}} + \frac{c_{02}}{c_{12}} + \frac{c_{03}}{c_{13}}$	147.7985	152.1672	157.9141	158.7465	151.5171
Q_C	245	336	469	473.5	322
$\delta_c = \frac{Q_c + k_2}{k_1}$	6.244874	7.553965	9.311315	9.328365	7.358199

2) По найденному значению $\boldsymbol{\delta_c}$ вычислить оптимальные реактивные нагрузки блоков

$$\boldsymbol{Q_i = \frac{\delta_c - c_{0i}}{c_{1i}}}.$$

Результаты расчетов запишем в таблицу П.15:

Таблица П.15

Параметр	Интервал 1	Интервал 2	Интервал 3	Интервал 4	Интервал 5
c_{01}	2.464012	2.48362	2.494726	2.494574	2.481239
c_{02}	2.459778	2.484868	2.493911	2.49234	2.482008
c_{03}	2.190325	2.168867	2.129197	2.122031	2.172469
c_{11}	0.05404	0.052598	0.05049	0.050157	0.05282
c_{11}	0.054282	0.052472	0.049828	0.04941	0.052751
c_{11}	0.038503	0.037659	0.036426	0.036231	0.037789
δ_c	6.244874	7.553965	9.311315	9.328365	7.358199
$Q_1 = \frac{\delta_c - c_{01}}{c_{11}}$	69.9638	96.39799	135.0083	136.2471	92.33184
$Q_2 = \frac{\delta_c - c_{02}}{c_{12}}$	69.7308	96.60536	136.8193	138.3523	92.43864
$Q_3 = \frac{\delta_c - c_{03}}{c_{13}}$	105.3054	142.9967	197.1724	198.9006	137.2295

3) С помощью круговых диаграмм режимов работы генераторов электростанции определим максимальную реактивную мощность генераторов.

Так как на четырех интервалах $Q_3 > Q_3^{\max}$, то принимаем $Q_3 = Q_3^{\max}$, а остаток нагрузки $Q_c - Q_3^{\max}$ распределяем между двумя оставшимися агрегатами по тому же алгоритму:

Таблица П.16.

Параметр	Интервал 1	Интервал 2	Интервал 3	Интервал 4	Интервал 5
c_{01}	2.464012	2.48362	2.494726	2.494574	2.481239
c_{02}	2.459778	2.484868	2.493911	2.49234	2.482008
c_{03}	2.190325	2.168867	2.129197	2.122031	2.172469
c_{11}	0.05404	0.052598	0.05049	0.050157	0.05282
c_{11}	0.054282	0.052472	0.049828	0.04941	0.052751
c_{11}	0.038503	0.037659	0.036426	0.036231	0.037789
$k_1 = \frac{1}{c_{11}} + \frac{1}{c_{12}} + \frac{1}{c_{13}}$	36.92719	38.06982	39.87496	40.17597	37.88939
$k_2 = \frac{c_{01}}{c_{11}} + \frac{c_{02}}{c_{12}} + \frac{c_{03}}{c_{13}}$	90.91103	94.57476	99.46073	100.1767	94.0272
$Q_{ост} = Q_c - Q_3^{\max}$	0	19.04779	73.22358	65.17105	13.28066
$\delta_c^{(1)} = \frac{Q_{ост} + k_2}{k_1}$	2.4619	2.984583	4.330646	4.115589	2.832134
$Q_{1\,доб.} = \frac{\delta_c^{(1)} - c_{01}}{c_{11}}$	-0.03908	9.524365	36.36194	32.3186	6.643251
$Q_{2\,доб.} = \frac{\delta_c^{(1)} - c_{02}}{c_{12}}$	0.039081	9.523421	36.86164	32.85245	6.637404
$Q_1 = Q_1 + Q_{1\,доб.}$	69.92472	105.9224	171.3702	173.4193	98.97509
$Q_2 = Q_2 + Q_{2\,доб}$	69.76988	106.1288	173.6809	176.1318	99.07604
Q_3	105.3054	123.9489	123.9489	123.9489	123.9489

5. Построим суточные графики реактивной нагрузки блоков.

6. Определим суммарные потери активной мощности на ТЭС.
Результаты расчетов для каждого интервала представим в табличной форме – таблица П.17:

Таблица П.17.

Интервал № 1				
	P, МВт	***β***	***Q*,** МВар	Δ***P***, кВт
Блок 1	123.1918	0.439971	69.92472	305.4657
Блок 2	123.9485	0.413162	69.76988	304.7565
Блок 3	102.8597	0.514299	105.3054	445.098
ТЭС	350		245	1055.32
Интервал № 2				
	P, МВт	***β***	***Q*,** МВар	Δ***P***, кВт
Блок 1	168.0612	0.600219	105.9224	559.4002
Блок 2	184.2596	0.614199	106.1288	560.5062
Блок 3	127.6793	0.638397	123.9489	559.2213
ТЭС	480		336	1679.128
Интервал № 3				
	P, МВт	***β***	***Q*,** МВар	Δ***P***, кВт
Блок 1	233.6396	0.834427	171.3702	1170.486
Блок 2	272.4065	0.908022	173.6809	1186.344
Блок 3	163.9539	0.81977	123.9489	545.0459
ТЭС	670		469	2901.876
Интервал № 4				
	P, МВт	***β***	***Q*,** МВар	Δ***P***, кВт
Блок 1	243.994	0.871407	173.4193	1281.781
Блок 2	286.3245	0.954415	176.1318	1301.882
Блок 3	169.6815	0.848408	123.9489	542.6959
ТЭС	700		473.5	3126.359
Интервал № 5				
	P, МВт	***β***	***Q*,** МВар	Δ***P***, кВт
Блок 1	161.1582	0.575565	98.97509	505.5286
Блок 2	174.9809	0.58327	99.07604	506.053
Блок 3	123.8609	0.619305	123.9489	560.6423
ТЭС	460		322	1572.224

ЗАДАНИЕ № 6

МНОГОКРИТЕРИАЛЬНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ АКТИВНОЙ НАГРУЗКИ МЕЖДУ АГРЕГАТАМИ ТЭС (ОПТИМИЗАЦИЯ ПО ЭКОНОМИЧЕСКОМУ И НАДЕЖНОСТНОМУ КРИТЕРИЮ)

Составим **модель многокритериальной оптимизации** (из двух критериев):

Целевая функция:

1) В качестве экономического критерия примем минимум расхода топлива:

$$I_1(N) = \sum_{i=1}^{n} B_i(N_i) = B_1(N_1) + B_2(N_2) + \ldots + B_n(N_n) \to \min$$

2) В качестве критерия по надежности примем вероятность отказов оборудования в зависимости от его нагрузки

$$I_2(N) = \sum_{i=1}^{n} P_i(N_i) = P_1(N_1) + P_2(N_2) + \ldots + P_n(N_n) \to \min$$

Характеристика вероятности отказов энергоблоков в зависимости от их нагрузки приведены в таблице П.18:

Таблица П.18

Мощность блока	d_0	d_1	d_2
300 МВт	0.605	-0.003575	0.00000525
200МВт	0.7663	-0.00649	0.000014544

Для рассматриваемой станции, состоящей из трех энергоблоков:

$$I_1(N) = \sum_{i=1}^{3} B_i(N_i) = B_1(N_1) + B_2(N_2) + B_3(N_3) \to \min$$

$$I_2(N) = \sum_{i=1}^{3} P_i(N_i) = P_1(N_1) + P_2(N_2) + P_3(N_3) \to \min$$

$I_1(N) = B_C = 6.03030303 + 0.3033189N_1 + 0.00066378N_1^2 + 5 +$
$+0.3444444N_2 + 0.00049383N_2^2 + 8 + 0.22N_2 + 0.00128N_3^2 = 19.03030303+$
$+0.3033189N_1 + 0.00066378N_1^2 + 0.3444444N_2 + 0.00049383N_2^2 + 0.22N_2 +$
$+0.00128N_3^2 \to min$

$I_2(N) = P_C = 0.605 – 0.003575N_1 + 0.00000525N_1^2 + 0.605 – 0.003575N_2 +$
$+0.00000525N_2^2 + 0.7663 – 0.00649N_2 + 0.000014544N_3^2 = 1.9763 – 0.003575N_1$
$+ 0.00000525N_1^2 – 0.003575N_2 + 0.00000525N_2^2 – 0.00649N_2 + 0.000014544N_3^2 \to$
$\to min$

Уравнения-связи (зависимость расхода топлива от выдаваемой мощности и зависимость вероятности отказов от нагрузки)***:***

$$B_i(N_i) = a_{0i} + a_{1i}N_i + a_{2i}N_i^2$$

$$\begin{cases} B_1(N_1) = a_{01} + a_{11}N_1 + a_{21}N_1^2 \\ B_2(N_2) = a_{02} + a_{12}N_2 + a_{22}N_2^2 \\ B_3(N_3) = a_{03} + a_{13}N_3 + a_{23}N_3^2 \end{cases}$$

$$\begin{cases} B_1(N_1) = 6.03030303 + 0.3033189N_1 + 0.00066378N_1^2 \\ B_2(N_2) = 5 + 0.3444444N_2 + 0.00049383N_2^2 \\ B_3(N_3) = 8 + 0.22N_3 + 0.00128N_3^2 \end{cases}$$

$$P_i(N_i) = d_{0i} + d_{1i}N_i + d_{2i}N_i^2$$

$$\begin{cases} P_1(N_1) = d_{01} + d_{11}N_1 + d_{21}N_1^2 \\ P_2(N_2) = d_{02} + d_{12}N_2 + d_{22}N_2^2 \\ P_3(N_3) = d_{03} + d_{13}N_3 + d_{23}N_3^2 \end{cases}$$

$$\begin{cases} P_1(N_1) = 0.605 - 0.003575N_1 + 0.00000525N_1^2 \\ P_2(N_2) = 0.605 - 0.003575N_2 + 0.00000525N_2^2 \\ P_3(N_3) = 0.7663 - 0.00649N_3 + 0,000014544N_3^2 \end{cases}$$

Ограничения:

- *автономные ограничения* (ограничения-неравенства)

на допустимые пределы изменения мощности станций (блоков) вида:

$$N_i^{\min} \le N_i \le N_i^{\max}$$

$$\begin{cases} N_1^{\min} \le N_1 \le N_1^{\max} \\ N_2^{\min} \le N_2 \le N_2^{\max} \\ N_3^{\min} \le N_3 \le N_3^{\max} \end{cases}$$

$$\begin{cases} 100 \le N_1 \le 280 \\ 90 \le N_2 \le 300 \\ 100 \le N_3 \le 200 \end{cases}$$

на допустимые пределы по надёжности:

$P_i(N_i) \leq 0{,}25$ (для метода главного критерия)

- *ограничения-связи* (ограничения-равенства) на суммарную активную нагрузку энергоблоков, которая должна быть равна заданной N_C вида:

$$N_C = \sum_{i=1}^{n} N_i = N_1 + N_2 + \ldots + N_n$$

Заданный суточный график нагрузки состоит из пяти интервалов, на каждом из которых необходимо наиболее оптимально распределить нагрузку между тремя энергоблоками станции:

$$\begin{cases} 350 = N_1^{I} + N_2^{I} + N_3^{I} \\ 480 = N_1^{II} + N_2^{II} + N_3^{II} \\ 670 = N_1^{III} + N_2^{III} + N_3^{III} \\ 700 = N_1^{IV} + N_2^{IV} + N_3^{IV} \\ 460 = N_1^{V} + N_2^{V} + N_3^{V} \end{cases}$$

Характеристики вероятности отказов в зависимости от нагрузки энергоблоков покажем в таблице П.19:

Таблица П.19.

N_1, МВт	P_1	N_2, МВт	P_2	N_3, МВт	P_3
100	0.3	90	0.325775	100	0.26274
105	0.287506	95	0.31275625	105	0.245198
110	0.275275	100	0.3	110	0.228382
115	0.263306	105	0.28750625	115	0.212294
120	0.2516	110	0.275275	120	0.196934
125	0.240156	115	0.26330625	125	0.1823
130	0.228975	120	0.2516	130	0.168394
135	0.218056	125	0.24015625	135	0.155214
140	0.2074	130	0.228975	140	0.142762
145	0.197006	135	0.21805625	145	0.131038
150	0.186875	140	0.2074	150	0.12004
155	0.177006	145	0.19700625	155	0.10977
160	0.1674	150	0.186875	160	0.100226
165	0.158056	155	0.17700625	165	0.09141
170	0.148975	160	0.1674	170	0.083322
175	0.140156	165	0.15805625	175	0.07596
180	0.1316	170	0.148975	180	0.069326
185	0.123306	175	0.14015625	185	0.063418
190	0.115275	180	0.1316	190	0.058238
195	0.107506	185	0.12330625	195	0.053786
200	0.1	190	0.115275	200	0.05006
205	0.092756	195	0.10750625		
210	0.085775	200	0.1		
215	0.079056	205	0.09275625		
220	0.0726	210	0.085775		
225	0.066406	215	0.07905625		
230	0.060475	220	0.0726		
235	0.054806	225	0.06640625		
240	0.0494	230	0.060475		
245	0.044256	235	0.05480625		
250	0.039375	240	0.0494		
255	0.034756	245	0.04425625		
260	0.0304	250	0.039375		
265	0.026306	255	0.03475625		
270	0.022475	260	0.0304		
275	0.018906	265	0.02630625		
280	0.0156	270	0.022475		
		275	0.01890625		
		280	0.0156		
		285	0.01255625		
		290	0.009775		
		295	0.00725625		
		300	0.005		

6.1. Метод главного критерия

В качестве главного критерия выберем экономический критерий (суммарный расход топлива всех агрегатов), а критерий по надёжности включим в задачу как ограничение

$$I(N) = I_1(N) + C^T Ш = \sum_{i=1}^{n} B_i(N) + \sum_{j=1}^{3} C_j Ш_j \to \min_{N \in D},$$

где **N** - оптимизируемая переменная (нагрузка блоков); **C** - вектор весовых коэффициентов; **Ш** - вектор штрафных функций.

Штрафные функции $\boldsymbol{Ш_j}$ составляются в соответствии с ограничениями - равенствами и неравенствами следующим образом:

- по суммарной отпускной электрической энергии

$$Ш_1 = \left| N_{\sum} - \sum_{i=1}^{n} N_i \right|;$$

- по минимальной и максимальной мощностям

$$Ш_2 = \sum_{i=1}^{n} (|v_i| + v_i),$$

$$v_i = (N_i - N_i^{\min})(N_i - N_i^{\max});$$

- по критерию надежности - суммарной вероятности аварийных простоев

$$Ш_3 = \left| I_2(X) - I_2^{доп} \right| + \left(I_2(X) - I_2^{доп} \right) =$$

$$= \left| \sum_{i=1}^{n} P_i(N_i, T_i) - P_i^{доп} \right| + \left(\sum_{i=1}^{n} P_i(N_i, T_i) - P_i^{доп} \right),$$

где X – вектор оптимизируемых переменных

Для оптимального решения поставленной задачи необходимо, чтобы сумма штрафных функций была равна нулю.

Найдем значения вероятности отказа блоков в зависимости от нагрузки каждого блока на каждом расчетном интервале времени:

Таблица П.20. Нагрузки блоков $\boldsymbol{N_i}$ и вероятности отказа $\boldsymbol{P_i}$ для каждого расчетного интервала времени.

Расчетное время суток		Интервал 1	Интервал 2	Интервал 3	Интервал 4	Интервал 5
		0 - 4	4 - 10	10 - 18	18 – 22	22 - 24
$\boldsymbol{N_C}$, МВт		350	480	670	700	460
1 блок	$\boldsymbol{N_1}$, МВт	123.1918	168.0612	233.6396	243.994	161.1582
	$\boldsymbol{P_1}$	0.244264468	0.1524652	0.05632261	0.04527008	0.16521225
2 блок	$\boldsymbol{N_2}$, МВт	123.9485	184.2596	272.4065	286.3245	174.9809
	$\boldsymbol{P_2}$	0.242541073	0.1245178	0.02072459	0.01179394	0.14018944
3 блок	$\boldsymbol{N_3}$, МВт	102.8597	127.6793	163.9539	169.6815	123.8609
	$\boldsymbol{P_3}$	0.252617782	0.1747577	0.09319473	0.08381517	0.18556986

Произведем проверку штрафных функций на каждом интервале времени:

Штрафная функция по суммарной отпускной электрической энергии:

$$Ш_1^I = N_C^I – (N_1^I + N_2^I + N_3^I) = 350 – (123.1918 + 123.9485 + 102.8597) = 0$$
$$Ш_1^{II} = N_C^{II} – (N_1^{II} + N_2^{II} + N_3^{II}) = 480 – (168.0612 + 184.2596 + 127.6793) = 0$$
$$Ш_1^{III} = N_C^{III} – (N_1^{III} + N_2^{III} + N_3^{III}) = 670 – (233.6396+272.4065+163.9539) = 0$$
$$Ш_1^{IV} = N_C^{IV} – (N_1^{IV} + N_2^{IV} + N_3^{IV}) = 700 – (243.994 + 286.3245 + 169.6815) = 0$$
$$Ш_1^{V} = N_C^{V} – (N_1^{V} + N_2^{V} + N_3^{V}) = 460 – (161.1582 + 174.9809 + 123.8609) = 0$$

Штрафная функция по минимальной и максимальной мощностям:

$$\begin{aligned}
Ш_2^I = {} & (|(N_1^I – N_1^{min})(N_1^I – N_1^{max})| + (N_1^I – N_1^{min})(N_1^I – N_1^{max})) + \\
& + (|(N_2^I – N_2^{min})(N_2^I – N_2^{max})| + (N_2^I – N_2^{min})(N_2^I – N_2^{max})) + \\
& + (|(N_3^I – N_3^{min})(N_3^I – N_3^{max})| + (N_3^I – N_3^{min})(N_3^I – N_3^{max})) = \\
& = (|(123.1918–100)(123.1918–280)|+(123.1918–100)(123.1918–280)+ \\
& + (|(123.9485 – 90)(123.9485–300)|+(123.9485 – 90)(123.9485–300)+ \\
& +(|(102.8597–100)(102.8597–200)|+(102.8597–100)(102.8597–200) = 0
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
Ш_2^{II} = {} & (|(168.0612–100)(168.0612–280)|+(168.0612–100)(168.0612–280)+ \\
& + (|(184.2596 – 90)(184.2596–300)|+(184.2596 – 90)(184.2596–300)+ \\
& +(|(127.6793–100)(127.6793–200)|+(127.6793–100)(127.6793–200) = 0
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
Ш_2^{III} = {} & (|(233.6396–100)(233.6396–280)|+(233.6396–100)(233.6396–280)+ \\
& + (|(272.4065 – 90)(272.4065–300)|+(272.4065 – 90)(272.4065–300)+ \\
& +(|(163.9539–100)(163.9539–200)|+(163.9539–100)(163.9539–200) = 0
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
Ш_2^{IV} = {} & (|(243.994 – 100)(243.994 – 280)|+(243.994 – 100)(243.994 – 280)+ \\
& + (|(286.3245 – 90)(286.3245–300)|+(286.3245 – 90)(286.3245–300)+ \\
& +(|(169.6815–100)(169.6815–200)|+(169.6815–100)(169.6815–200) = 0
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
Ш_2^{V} = {} & (|(161.1582–100)(161.1582–280)|+(161.1582–100)(161.1582–280)+ \\
& + (|(174.9809 – 90)(174.9809–300)|+(174.9809 – 90)(174.9809–300)+ \\
& +(|(123.8609–100)(123.8609–200)|+(123.8609–100)(123.8609–200) = 0
\end{aligned}$$

Ограничение на допустимые пределы по надёжности: $P_i(N_i) \le 0{,}25$.

Штрафная функция по критерию надежности - суммарной вероятности аварийных простоев:

$$Ш_3^I = (|P_1^I - P_1^{доп}| + (P_1^I - P_1^{доп})) + (|P_2^I - P_2^{доп}| + (P_2^I - P_2^{доп})) + (|P_3^I - P_3^{доп}| + (P_3^I - P_3^{доп})) = (|0.244264468 - 0.25| + (0.244264468 - 0.25)) + (|0.242541073 - 0.25| + (0.242541073 - 0.25)) + (|0.252617782 - 0.25| + (0.252617782 - 0.25)) = 0.005235563$$

$$Ш_3^{II} = (|0.15246519 - 0.25| + (0.15246519 - 0.25)) + (|0.12451783 - 0.25| + (0.12451783 - 0.25)) + (|0.17475768 - 0.25| + (0.17475768 - 0.25)) = 0$$

$$Ш_3^{III} = (|0.05632261 - 0.25| + (0.05632261 - 0.25)) + (|0.02072459 - 0.25| + (0.02072459 - 0.25)) + (|0.09319473 - 0.25| + (0.09319473 - 0.25)) = 0$$

$$Ш_3^{IV} = (|0.04527008 - 0.25| + (0.04527008 - 0.25)) + (|0.01179394 - 0.25| + (0.01179394 - 0.25)) + (|0.08381517 - 0.25| + (0.08381517 - 0.25)) = 0$$

$$Ш_3^{V} = (|0.165212253 - 0.25| + (0.165212253 - 0.25)) + (|0.140189438 - 0.25| + (0.140189438 - 0.25)) + (|0.185569863 - 0.25| + (0.185569863 - 0.25)) = 0$$

По результатам расчетов получилось, что штрафная функция по критерию надёжности на первом интервале времени не равна нулю. Нагрузка третьего блока не удовлетворяет заданному критерию надёжности.

По графику зависимости вероятности отказа блока от его нагрузки, найдем допустимые пределы изменения мощности станций (блоков) при ограничении на допустимые пределы по надёжности $P_i(N_i) \le 0{,}25$.

С учетом критерия по надёжности запишем ограничения на допустимые пределы изменения мощности станций (блоков):

$$\begin{cases} 121 \le N_1 \le 280 \\ 121 \le N_2 \le 300 \\ 104 \le N_3 \le 200 \end{cases}$$

Жестко зафиксируем третий блок на первом временном промежутке на нагрузке 104 МВт и произведем перераспределение активной нагрузки между остальными блоками:

Суммарная нагрузка на первом интервале времени:

$N_C = 350$ МВт.

Нагрузка третьего блока:

$N_3 = 104$ МВт.

$\Delta N_C = N_C - N_3 = 350 - 104 = 246$ МВт.

Для распределения этой нагрузки между двумя оставшимися блоками воспользуемся критерием равенства относительных приростов расхода топлива. Приравняем выражение для характеристик относительных приростов распределения топлива 1-го и 2-го блока и определим оптимальное значение активных мощностей блоков $b_1 = b_2$, $N_2 = \Delta N_C - N_1$.

$$a_{11} + 2a_{21}N_1 = a_{12} + 2a_{22}(\Delta N_C - N_1)$$

$$0.3033189 + 2 \cdot 0.00066378 \cdot N_1 = 0.34444444 + 2 \cdot 0.00049383(246 - N_1)$$

$$N_1 = 122.7053585 \text{ МВт}$$

$$N_2 = \Delta N_C - N_1 = 246 - 122.7053585 = 123.2946415 \text{ МВт}$$

Определим значения вероятности отказа блоков в зависимости от нагрузки каждого блока, оптимальный часовой расход условного топлива для каждого блока и суммарный часовой расход топлива для ТЭС на каждом расчетном интервале времени:

Таблица П.21. Нагрузки блоков $\boldsymbol{N_i}$, вероятности отказа блока $\boldsymbol{P_i}$ и часовые расходы топлива $\boldsymbol{B_i}$ для каждого расчетного интервала времени.

Расчетное время суток		Интервал 1	Интервал 2	Интервал 3	Интервал 4	Интервал 5
		0 - 4	4 - 10	10 - 18	18 – 22	22 - 24
$\boldsymbol{P_C}$, МВт		350	480	670	700	460
1 блок	$\boldsymbol{N_1}$, МВт	122.7054	168.0612	233.6396	243.994	161.1582
	$\boldsymbol{P_1}$	0.24537552	0.1524652	0.05632261	0.04527008	0.16521225
	$\boldsymbol{B_1}$, т.у.т.	53.2434306	75.75461	113.1316	119.5552	72.1523
2 блок	$\boldsymbol{N_2}$, МВт	123.2946	184.2596	272.4065	286.3245	174.9809
	$\boldsymbol{P_2}$	0.244029892	0.1245178	0.02072459	0.01179394	0.14018944
	$\boldsymbol{B_2}$, т.у.т.	54.9751444	85.23349	135.4737	144.1079	80.39145
3 блок	$\boldsymbol{N_3}$, МВт	104	127.6793	163.9539	169.6815	123.8609
	$\boldsymbol{P_3}$	0.248647904	0.1747577	0.09319473	0.08381517	0.18556986
	$\boldsymbol{B_3}$, т.у.т.	43.8592	55.65182	76.32693	79.88011	53.65921
$\boldsymbol{B_C}$, т.у.т.		152.077775	216.6399	324.9323	343.5432	206.203

Суммарный расход топлива каждого агрегата за сутки составил:

$$\boldsymbol{B_{\sum i} = \sum B_i \cdot t_{инт}};$$

$$\boldsymbol{B_{1\Sigma}} = 53.24343 \cdot 4 + 75.75461 + 113.1316 \cdot 8 + 119.5552 \cdot 4 + 72.1523 \cdot 2 =$$

$$= 2195.08 \text{ т.у.т.}$$

$$\boldsymbol{B_{2\Sigma}} = 54.97514 \cdot 4 + 85.23349 + 135.4737 \cdot 8 + 144.1079 \cdot 4 + 80.3915 \cdot 2 =$$

$$= 2552.306 \text{ т.у.т.}$$

$$\boldsymbol{B_{3\Sigma}} = 43.8592 \cdot 4 + 55.65182 + 76.32693 \cdot 8 + 79.88011 \cdot 4 + 53.65921 \cdot 2 = =$$

$$1546.802 \text{ т.у.т.}$$

Суммарный расход топлива на станции за сутки:

$$\boldsymbol{B_{\sum} = \sum B_C \cdot t_{np}}$$

$$\boldsymbol{B_{\sum}} = 152.0778 \cdot 4 + 216.6399 \cdot 6 + 324.9323 \cdot 8 + 343.5432 \cdot 4 + 206.203 \cdot 2 =$$

$$= 6294.188 \text{ т.у.т.}$$

Суммарный расход топлива каждого агрегата ($\boldsymbol{B_{i\Sigma}}$) и станции ($\boldsymbol{B_{\Sigma}}$) за сутки составил:

Таблица П.22.

	Без учёта критерия по надёжности	С учётом критерия по надёжности
$\boldsymbol{B_{1\Sigma}}$, **т.у.т**	2195.988	2195.08
$\boldsymbol{B_{2\Sigma}}$, **т.у.т**	2553.526	2552.306
$\boldsymbol{B_{3\Sigma}}$, **т.у.т**	1544.667	1546.802
$\boldsymbol{B_{\Sigma}}$, **т.у.т**	6294.18	6294.188

Вывод: *При учёте критерия по надёжности увеличивается расход топлива. Но разница в расходе топлива получается небольшая – 0.008 т.у.т. за сутки. Для увеличения надёжности можно чуть-чуть «проиграть» по экономии топлива. В этом случае, выбор каким критерием «пожертвовать» должно принимать ЛПР (лицо, принимающее решение).*

6.2. Метод приоритетов

Для решения задачи оптимальности методом приоритетов необходимо предварительно произвести нормирование критериев оптимальности. Введем весовые коэффициенты (приоритеты) μ_1, μ_2 и выполним нормирование критериев:

$$I_1^H(N) = \frac{\sum_{i=1}^{n} B_i(N)}{\sum_{i=1}^{n} B_i^{\max}}, \quad I_2^H(N) = \frac{\sum_{i=1}^{n} P_i(N)}{\sum_{i=1}^{n} P_i^{\max}}$$

$$I_1^H(N) = \frac{19.030303 + 0.30332N_1 + 0.000664N_1^2 + 0.34444N_2 + 0.000494N_2^2 + 0.22N_3 + 0.00128N_3^2}{395.8}$$

$$I_2^H(N) = \frac{1.9763 - 0.003575N_1 + 0.00000525N_1^2 - 0.003575N_2 + 0.00000525N_2^2 - 0.00649N_2 + 0.0000014544N_3^2}{3}$$

Целевая функция примет следующий вид:

$$I(N_i) = \mu_1 I_1^H(N_i) + \mu_2 I_2^H(N_i) \to \min_{X \in D}$$

Если целевую функцию упростить относительно нагрузки блоков:

$I = a + b_1N_1 + b_2N_2 + b_3N_3 + c_1N_1^2 + c_2N_2^2 + c_3N_3^2$

Таблица П.23.

			a	***b₁***	***b₂***	***b₃***	***c₁***	***c₂***	***c₃***
I_1	μ_1	0.5	0.353424	-0.00021	-0.00016	-0.00080375	0.000001714	0.000001499	0.0000039399
I_2	μ_2	0.5							
I_1	μ_1	0.7	0.231286	0.000179	0.000252	-0.00025994	0.000001699	0.000001398	0.0000035767
I_2	μ_2	0.3							
I_1	μ_1	1	0.048081	0.000766	0.00087	0.000556	0.000001677	0.000001248	0.0000030318
I_2	μ_2	0							
I_1	μ_1	0	0.658767	-0.001192	-0.001192	-0.0021633	0.00000175	0.00000175	0.000004848
I_2	μ_2	1							

Применим метод неопределенных множителей Лагранжа:

Целевую функцию можно записать в виде:

$\Phi = I + \lambda(\Sigma N - N_C)$

Продифференцируем эту функцию по нагрузке блоков:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial \Phi}{\partial N_1} = \dfrac{\partial I}{\partial N_1} + \lambda = b_1 + 2c_1N_1 + \lambda = 0 \\ \dfrac{\partial \Phi}{\partial N_2} = \dfrac{\partial I}{\partial N_2} + \lambda = b_2 + 2c_2N_2 + \lambda = 0 \\ \dfrac{\partial \Phi}{\partial N_3} = \dfrac{\partial I}{\partial N_3} + \lambda = b_3 + 2c_3N_3 + \lambda = 0 \\ N_1 + N_2 + N_3 = N_C \end{cases}$$

Найдем из полученной системы уравнений λ:

$$\lambda = -\frac{b_1c_2c_3 + b_2c_1c_3 + b_3c_1c_2 + 2c_1c_2c_3N_C}{c_2c_3 + c_1c_3 + c_1c_2}$$

$$N_1 = -\frac{\lambda + b_1}{2c_1}$$

$$N_2 = -\frac{\lambda + b_2}{2c_2}$$

$$N_3 = -\frac{\lambda + b_3}{2c_3}$$

Найдем значения неопределённого множителя Лагранжа λ, нагрузки каждого агрегата, расходы топлива каждого блока и ТЭС целиком, а также вероятности отказа каждого блока в зависимости от нагрузки на каждом интервале времени при разных значениях весовых коэффициентов и результаты запишем в таблицы П.24 – П.27:

При весовых коэффициентах: $\mu_1 = 0.5$; $\mu_2 = 0.5$ Таблица П.24.

	1	**2**	**3**	**4**	**5**
***N*$_C$, МВт**	350	480	670	700	460
λ	-0.00017591	-0.00034871	-0.00060127	-0.00064115	-0.00032213
***N*$_1$, МВт**	113.3827827	163.806459	237.502601	249.138834	156.04897
***N*$_2$, МВт**	112.292696	169.939	254.191291	267.494284	161.070338
***N*$_3$, МВт**	124.3245213	146.254541	178.306108	183.366882	142.880692
***B*$_1$, т.у.т**	48.9547709	73.5268119	115.511491	122.79975	69.5267984
***B*$_2$, т.у.т**	49.90561803	77.7959906	124.46272	132.472032	73.2915369
***B*$_3$, т.у.т**	53.89929863	65.8444679	85.3790255	88.6888099	63.9316227
***B*$_C$, т.у.т**	152.7596876	217.16727	325.353237	343.960592	206.749958
***P*$_1$**	0.267148743	0.16026283	0.0520675	0.040197	0.17496916
***P*$_2$**	0.269754272	0.14908421	0.0354855	0.02436219	0.16537772
***P*$_3$**	0.184234452	0.12820987	0.07149174	0.06526786	0.1359185

При весовых коэффициентах: $\mu_1 = 0.7$; $\mu_2 = 0.3$ Таблица П.25.

	1	**2**	**3**	**4**	**5**
***N*$_C$, МВт**	350	480	670	700	460
λ	-0.00057641	-0.00074062	-0.00098063	-0.00101852	-0.00071536
***N*$_1$, МВт**	116.9751922	165.303297	235.93668	247.08932	157.868204
***N*$_2$, МВт**	116.111586	174.827409	260.642843	274.192648	165.794206
***N*$_3$, МВт**	116.9132218	139.869294	173.420477	178.718032	136.337591
***B*$_1$, т.у.т**	50.5937212	74.307825	114.544412	121.503011	70.4576835
***B*$_2$, т.у.т**	51.6517571	80.3120568	128.325167	136.571067	75.6811524
***B*$_3$, т.у.т**	50.12335053	62.2473481	82.2420992	85.6461292	60.2997964
***B*$_C$, т.у.т**	152.3688288	216.86723	325.111678	343.720207	206.438632
***P*$_1$**	0.258650465	0.15749791	0.05377348	0.04218462	0.17146361
***P*$_2$**	0.260681057	0.14045628	0.02985897	0.01946473	0.15659624
***P*$_3$**	0.206330784	0.14307865	0.07820699	0.07095729	0.15181202

При весовых коэффициентах: $\mu_1 = 1$; $\mu_2 = 0$ Таблица П.26.

	1	**2**	**3**	**4**	**5**
N_C, **МВт**	350	480	670	700	460
λ	-0.00117954	-0.00133004	-0.00155000	-0.00158473	-0.00130689
N_1, **МВт**	123.191785	168.061196	233.639566	243.994046	161.15821
N_2, **МВт**	123.94847	184.259545	272.406499	286.324439	174.980918
N_3, **МВт**	102.859744	127.679259	163.953935	169.681515	123.860872
B_1, **т.у.т**	53.4703684	75.7546181	113.131655	119.555186	72.1523074
B_2, **т.у.т**	55.2801821	85.2334843	135.473708	144.107876	80.39145
B_3, **т.у.т**	43.3252962	55.6518288	76.3269368	79.880113	53.6592107
B_C, **т.у.т**	152.075847	216.639931	324.932299	343.543176	206.202968
P_1	0.2442645	0.15246519	0.05632265	0.04527003	0.16521223
P_2	0.24254114	0.12451792	0.02072459	0.01179397	0.14018941
P_3	0.25261763	0.1747578	0.09319467	0.08381515	0.18556994

При весовых коэффициентах: $\mu_1 = 0$; $\mu_2 = 1$ Таблица П.27.

	1	**2**	**3**	**4**	**5**
N_C, **МВт**	350	480	670	700	460
λ	0.00082137	0.00062866	0.00034699	0.00030252	0.00065830
N_1, **МВт**	105.798241	160.860271	241.335547	254.042169	152.38919
N_2, **МВт**	105.798241	160.860271	241.335547	254.042169	152.38919
N_3, **МВт**	138.403518	158.279457	187.328907	191.915662	155.22162
B_1, **т.у.т**	45.55077642	71.9982528	117.892372	125.924745	67.6674324
B_2, **т.у.т**	46.96918732	73.1857845	116.888752	124.373929	68.9575591
B_3, **т.у.т**	61.4354145	72.8843444	91.3229027	94.4193912	71.0612582
B_C, **т.у.т**	153.9553782	218.068382	326.104026	344.718065	207.68625
P_1	0.285535944	0.16577367	0.04800036	0.03562072	0.18212659
P_2	0.285535944	0.16577367	0.04800036	0.03562072	0.18212659
P_3	0.146659252	0.10342823	0.06091518	0.05644645	0.1093312

При разных вариантах распределения весовых коэффициентов найдем суточные расходы топлива для каждого блока и для ТЭС:

Таблица П.28.

	1	**2**	**3**	**4**
μ_1	0.5	0.7	1	0
μ_2	0.5	0.3	0	1
B_1, **т.у.т**	2191.32448	2191.50455	2195.988	2196.365
B_2, **т.у.т**	2338.57137	2412.72727	2553.526	2197.512
B_3, **т.у.т**	1776.31469	1695.09839	1544.667	1933.431
B_C, **т.у.т**	6306.21055	6299.33022	6294.18	6327.309

Вывод: *Самое экономичное распределение нагрузки между агрегатами ТЭС будет в том случае, если мы не будем учитывать критерий по надёжности. Чем больше доля участия критерия по надёжности в целевой функции, тем больше лишнего топлива будет тратиться. Выбор весовых коэффициентов должно осуществлять ЛПР (лицо, принимающее решение).*

Литература

1. Фазылов Х.Ф., Насыров Т.Х. Установившиеся режимы энергосистем и их оптимизация: Учебник. – Ташкент: Молия, 1999. – 370 с.
2. Насиров Т.Х., Гайибов Т.Ш. Теоретические основы оптимизации режимов энергосистем. – Т.: Fan va texnologiya, 2014. – 184 с.
3. Насиров Т.Х., Сытдыков Р.А. Многокритериальные модели оптимизации энергосистем. – Т.: Fan va texnologiya, 2014. – 228 с.
4. Аракелян Э.К., Пикина Г.А. Оптимизация и оптимальное управление: Учебное пособие. – М.: Издательство МЭИ, 2003. – 356 с.
5. Костин В.Н. Оптимизационные задачи электроэнергетики: Учебное пособие. – СПб.: СЗТУ, 2003. – 120 с.
6. Автоматизация диспетчерского управления в электроэнергетике / Под ред. Ю.Н. Руденко и В.А. Семенова. - М.: Издательство МЭИ, 2000. - 648 с.
7. Веников В.А., Журавлев В.Г., Филиппова Т.А. Оптимизация режимов электростанций и энергосистем. - М.: Энергоатомиздат, 1990. –352 с.
8. P.S.R. Murty. Operation and Control in Power Systems. – BS Publications 4-4-309, Giriraj Lane, Sultan Bazar, Hiderabad – 500 095 A.P., 2008. – 410p.
9. Kolcun M., Griger V., Muhlbacher J. Electric power system operation control. - Bratislava: Mercury-Smecal, 2004. - p.299.
10. www.rtsoft.ru
11. www.s-avtomatika.ru
12. www.asutp.ru
13. www.ziyo.net
14. www.edunet.uz

СОДЕРЖАНИЕ

Редактор Ахметжанова Г.М.

Корректор Марданова Э.З.