Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
АМУРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

«Кадры для регионов»

ФГБОУ ВПО «Амурский государственный университет»

Учебное пособие подготовлено в рамках реализации проекта о подготовке высококвалифицированных кадров для предприятий и организаций регионов («Кадры для регионов»)

МЕТОДЫ ОПТИМИЗАЦИИ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Методические указания к практическим занятиям

Благовещенск

Издательство АмГУ

2014

ББК 31.2я73
М54

Печатается по решению редакционно-издательского совета Амурского государственного университета

Разработаны в рамках реализации гранта «Подготовка высококвалифицированных кадров в сфере электроэнергетики и горно-металлургической отрасли для предприятий Амурской области» по заказу предприятия-партнера ОАО «Дальневосточная распределительная сетевая компания»

Рецензент:

С.В. Крутько, начальник центральной диспетчесркой информационно-аналитической службы ОАО «Дальневосточная распределительная сетевая компания» (ОАО «ДРСК», г. Благовещенск).

М54 **Методы оптимизации развития электроэнергетических систем:** Методические указания к практическим занятиям / Сост.: А.Н. Козлов. – Благовещенск: Амурский гос. ун-т, 2014. – 20 с.

Методическая разработка предназначена для подготовки магистров по направлению 140400.68 «Электроэнергетика и электротехника» магистерской программы «Электроэнергетические системы и сети».

Приведены краткие теоретические сведения, необходимые для решения задач, пример решения и таблицы исходных данных для самостоятельного решения.

В авторской редакции.

ББК 31.2я73

©Амурский государственный университет, 2014
©Козлов А.Н. (составитель), 2014

ПРЕДИСЛОВИЕ

Дисциплина «Методы оптимизации развития электроэнергетических систем» введена в учебный план подготовки магистров по направлению 140400.68 «Электроэнергетика и электротехника» магистерской программы «Электроэнергетические системы и сети» в Амурском государственном университете по согласованию с предприятиями, принимающими на работу выпускников энергетического факультета.

Цель дисциплины – изучение содержания и принципов решения основных энергетических задач по энергоснабжению потребителей в современных условиях функционирования электроэнергетического рынка, вопросов оптимизации энергетических режимов, а также методов решения задач по надежности электроэнергетических систем и противоаварийному управлению.

Задачей изучения дисциплины является овладение принципами управления режимами электроэнергетических систем, выбора их рациональной структуры по типам электростанций и оборудования энергосистем, определения наиболее экономичных режимов работы при обеспечении необходимых требований по надежности эксплуатации, экологичности и бесперебойности электроснабжения.

Освоение данной дисциплины помогает студенту в приобретении следующих компетенций:

– готовности эксплуатировать, проводить испытания и ремонт технологического оборудования электроэнергетической и электротехнической промышленности (ПК-18);

– способности разработки планов, программ и методик проведения испытаний электротехнических и электроэнергетических устройств и систем (ПК-22);

– способности определять эффективные производственно-технологические режимы работы объектов электроэнергетики и электротехники (ПК-23);

– способности к монтажу, регулировке, испытаниям и сдаче в эксплуатацию электроэнергетического и электротехнического оборудования (ПК-45);

– способности к наладке и опытной проверке электроэнергетического и электротехнического оборудования (ПК-46);

– способности к проверке технического состояния и остаточного ресурса оборудования и организации профилактических осмотров и текущего ремонта (ПК-47);

– готовности к приемке и освоению вводимого оборудования (ПК-48);

– готовности к составлению заявок на оборудование и запасные части и подготовке технической документации на ремонт (ПК-49);

– готовности к составлению инструкций по эксплуатации оборудования и программ испытаний (ПК-50).

В результате изучения дисциплины студенты должны:

– ***знать:*** критерии оптимизации при решении режимных задач; метод Лагранжа; принцип решения задачи распределения активной нагрузки между электростанциями; принцип решения многокритериальных задач; принцип решения задачи оптимизации состава работающих агрегатов в энергосистеме; задачи диспетчерской службы; компьютерные программы расчета состояния электрооборудования;

– ***уметь:*** применять методы оптимизации режимов работы электроэнергетических систем; оптимизировать конфигурацию электрических сетей; строить эквивалентные энергетические характеристики электростанций;

– ***владеть:*** навыками решения задач оптимального распределения нагрузок в энергосистеме с применением метода Лагранжа; информацией о технических параметрах оборудования для использования при решении задач оптимизации.

Дисциплина «Методы оптимизации развития электроэнергетических систем» относится к вариативной части профессиональные цикла **М2.В** основной образовательной программы подготовки магистров по направлению 140400.68 «Электроэнергетика и электротехника» и предусмотрена в учебном плане в качестве дисциплины по выбору – шифр М2.В.ДВ.2

Учебным планом предусмотрено, что общие трудозатраты по дисциплине составляют 4 зачетные единицы трудоемкости (ЗЕТ). Число часов, выделяемое на изучение дисциплины – 144, в том числе 10 – лекции, 12 – лабораторные работы, 36 – практические занятия.

Знания, полученные при освоении дисциплины, могут быть востребованы при выполнении выпускной квалификационной работы.

Настоящее учебное пособие – очередная часть комплекта учебно-методических материалов, разрабатываемого кафедрой энергетики Амурского государственного университета в рамках реализации гранта Министерства образования и науки Российской Федерации «Подготовка высококвалифицированных кадров в сфере электроэнергетики и горно-металлургической отрасли для предприятий Амурской области» по заказу предприятия-партнера – ОАО «Дальневосточная распределительная сетевая компания» (ОАО «ДРСК»).

ВВЕДЕНИЕ

При решении задач энергетики часто необходим научно-технический подход, применение разнообразных методов расчета и технико-экономического анализа, невозможных без широкого использования моделей, современных программных и вычислительных средств. Для упрощения отдельных задач используется разделение решаемой проблемы на подзадачи, с последующей увязкой результатов, полученных в ходе решения.

Особенно это касается задач оптимизации режимов электроэнергетических систем. Задачи оптимизации могут решаться отдельно друг от друга, или составлять комплексы, в которых результаты решения одних задач могут выступать исходными данными для других, или результаты увязываются в ходе общего процесса оптимизации. В качестве инструментария выступает, во-первых, определенная иерархия математических моделей, которая позволяет решать в совокупности поставленную проблему; во-вторых, выделенной иерархии математических моделей соответствуют эффективные методы согласования решений, которые могли бы корректироваться специалистами по существу. Следует учитывать, что важным свойством, присущим части задач энергетики, является неопределенность, поэтому их решение сводится к многоэтапной расчетной задаче в условиях некоторой неопределенности исходной информации. Повышение эффективности решения таких задач немыслимо без использования вычислительной техники.

Различные виды представления информации при решении задач оптимизации режимов диктуют необходимость использования соответствующих методов. В практических занятиях, включенных в настоящие методические указания, используется подход от простого к сложному: последующие задания усложняются по сравнению с предыдущими.

ПЕРЕЧЕНЬ ТЕМ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ

Перечень тем	Часы	Осваиваемые компетенции
Оптимизация режимов электростанций	4	ОК- 5, ПК- 7, ПК-18, ПК-21, ПК-23

КРИТЕРИИ ДОСТИЖЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБУЧЕНИЯ ПО БЛОКУ ПРАКТИЧЕСКИХ ДИСЦИПЛИН

Балл	Критерии оценки (содержательная характеристика)
«1»	Работа выполнена полностью. Студент практически не владеет теоретическим материалом, допуская грубые ошибки, испытывает затруднения в формулировке собственных суждений, неспособен ответить на дополнительные вопросы.
«2»	Работа выполнена полностью. Студент не владеет теоретическим материалом, допуская ошибки по сущности рассматриваемых (обсуждаемых) вопросов, испытывает затруднения в формулировке собственных обоснованных и аргументированных суждений, допускает ошибки при ответе на дополнительные вопросы.
«3»	Работа выполнена полностью. Студент владеет теоретическим материалом на минимально допустимом уровне, отсутствуют ошибки при описании теории, испытывает затруднения в формулировке собственных обоснованных и аргументированных суждений, допуская незначительные ошибки на дополнительные вопросы.
«4»	Работа выполнена полностью. Студент владеет теоретическим материалом, отсутствуют ошибки при описании теории, формулирует собственные, самостоятельные, обоснованные, аргументированные суждения, допуская незначительные ошибки на дополнительные вопросы.
«5»	Работа выполнена полностью. Студент владеет теоретическим материалом, отсутствуют ошибки при описании теории, формулирует собственные, самостоятельные, обоснованные, аргументированные суждения, представляет полные и развернутые ответы на дополнительные вопросы.

Работа, оцененная менее, чем 3 баллами, **НЕ МОЖЕТ БЫТЬ «ЗАЧТЕНА» и пересдается.**

Оптимизация режимов электростанций

<u>Задача 1.</u> Найти оптимальное распределение активных мощностей между тепловыми станциями ТЭС-1 и ТЭС-2 с учетом потерь мощности в линиях электропередачи, питающих нагрузки P_{1H} и P_{3H}.

Схема системы представлена на рис. 1.1.

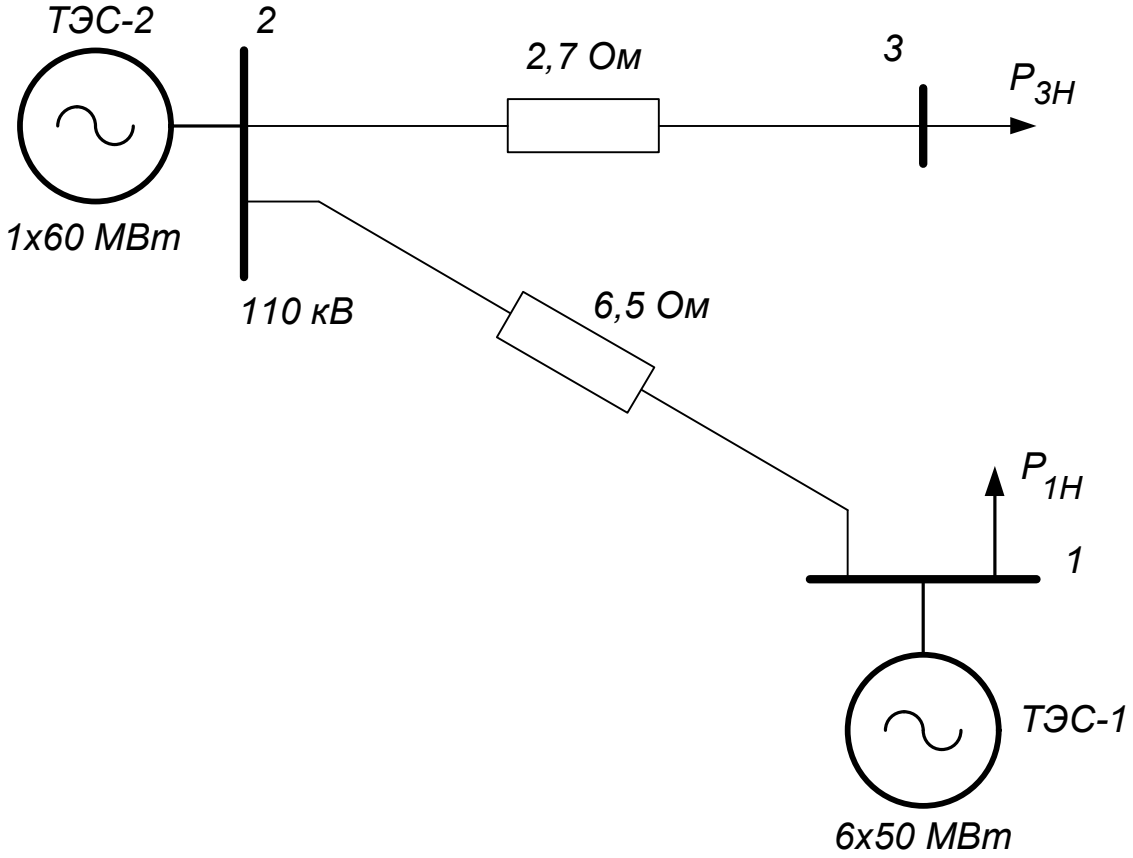

Рис. 1.1. Схема системы

Характеристики удельных приростов ТЭС-1 и ТЭС-2 даны в табл. 1.1.

Таблица 1.1.

ε	0,32	0,34	0,36	0,38	0,40	0,42	0,43	0,44	0,45	0,46
P_1, МВт	120	120	202	240	240	240	258	270	280	280
P_2, МВт	20	20	20	20	20	20	28	34	40	45,3
ε	0,47	0,48	0,49	0,50	0,52	0,54	0,56	0,58	0,60	
P_1, МВт	280	280	280	288	300	300	300	300	300	
P_2, МВт	50	50	50	50	50	50	56	60	60	

Если для заданной схемы принять за балансирующую и базисную точку узел 2, то $r_{11} = 6,5$ Ом; $r_{23} = 2,7$ Ом; $r_{13} = 0$.

Величины нагрузок P_{1H} и P_{3H} определяют из табл. 1.2, номера вариантов определяется преподавателем.

Таблица 1.2.

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
P_{1H}, МВт	152	158	164	169	175	181	187	192	196	200
Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
P_{3H}, МВт	50	55	59	63	67	70	75	80	85	87

Допустимый небаланс мощности в системе $\delta P \le 0{,}5$ МВт.

Критерий оптимального распределения мощностей между тепловыми электростанциями с учетом потерь имеет вид:

$$\mu = \frac{\varepsilon_1}{1 - \partial\Delta P / \partial P_1} = \frac{\varepsilon_2}{1 - \partial\Delta P / \partial P_2},$$

где μ - удельный прирост энергосистемы.

<u>Рассмотрим пример</u> решения задачи оптимального распределения мощности между тепловыми электростанциями ЭС-2 и ЭС-3, питающими по линиям 110 кВ нагрузку 70 МВт – рис. 1.2.

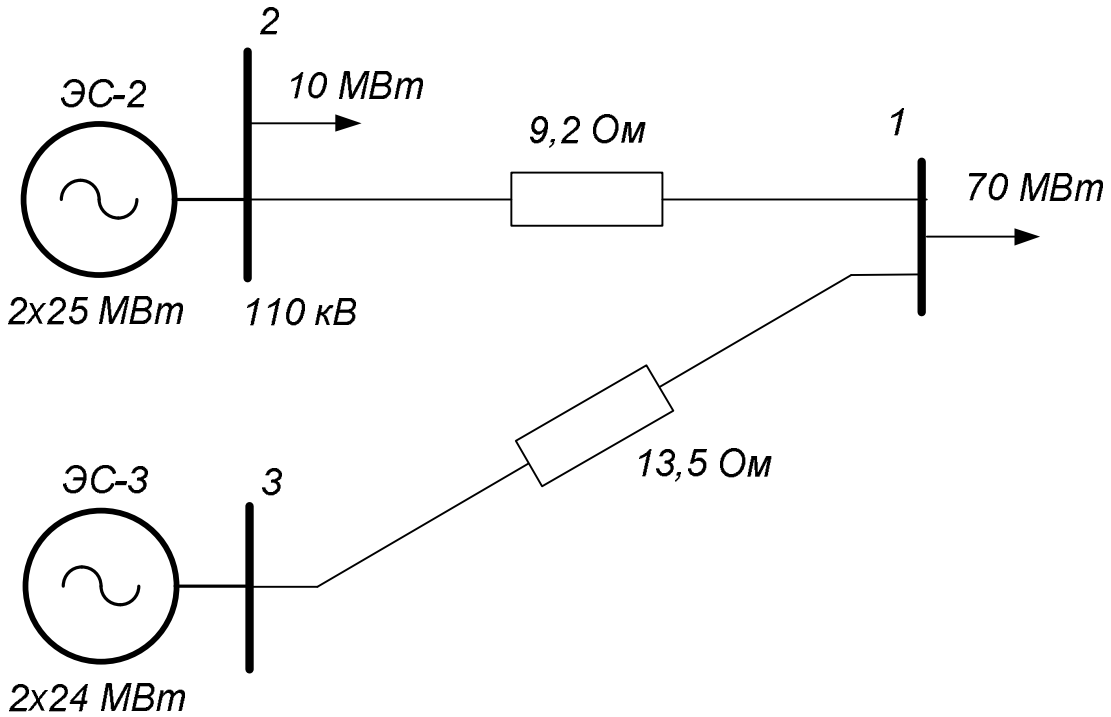

Рис. 1.2. Схема системы для примера расчета.

Удельные приросты станций имеют следующие значения (табл. 1.3.):

ε	0,42	0,44	0,46	0,48	0,50	0,52	0,54	0,56
P_2, МВт	22	29	34	34	34	34	34	34
P_3, МВт	24,8	35	42	42	42	42	42	45
ε	0,58	0,60	0,62	0,64	0,66	0,68	0,70	0,72
P_2, МВт	34	38	42	45	48	50	50	50
P_3, МВт	48	48	48	48	48	48	48	48

В данном случае критерий оптимального распределения запишется как:

$$\mu = \frac{\varepsilon_2}{1 - \partial\Delta P / \partial P_2} = \frac{\varepsilon_3}{1 - \partial\Delta P / \partial P_3},$$

Примем за базисную и балансирующую точку узел 3. При этом мощность P_3 исключается из числа независимых переменных и критерий оптимальности приобретает вид:

$$\mu = \frac{\varepsilon_2}{1 - \partial\Delta P / \partial P_2} = \frac{\varepsilon_3}{1 - \partial\Delta P / \partial P_3} = \varepsilon_3 .$$

При определении потерь в линиях предполагаем, что напряжение в узлах равно номинальному и что потери зависят только от активных мощностей. В этом случае потери и удельные приросты потерь можно представить как:

$$\Delta P = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=1}^{n-1} B_{ij} P_i P_j ;$$

$$\frac{\partial \Delta P}{\partial P_2} = 2 \cdot \sum_{j=1}^{n-1} B_{ij} P_j .$$

В нашем случае ($n = 3$):

$$\Delta P = B_{11} P_1^2 + B_{22} P_2^2 + 2 B_{12} P_1 P_2 ;$$

$$\frac{\partial \Delta P}{\partial P_2} = 2 \cdot B_{12} + 2 \cdot B_{22} P_2 ,$$

где $B_{11} = r_{11} / U^2$, $B_{22} = r_{22} / U^2$, $B_{12} = r_{12} / U^2$ – коэффициенты потерь.

Сопротивления r_{11}, r_{22}, r_{12} можно определить методом единичных токов; в данном случае $r_{11} = r_{12} = 13,5$ Ом; $r_{22} = 22,7$ Ом.

Вычислим соответствующие коэффициенты потерь

$$B_{11} = B_{12} = 13,5 / 110^2 = 11,15 \cdot 10^{-4} ;$$

$$B_{22} = 22,7 / 110^2 = 18,76 \cdot 10^{-4} .$$

Искомое оптимальное распределение мощностей между станциями будем определять итеративным путем. В качестве начального распределения используем режим, полученный

без учета потерь в линиях. Для этой цели построим графики удельных приростов станций ЭС-2 (кривая 2), ЭС-3 (кривая 3) и системы (кривая 1) – рис. 1.3.

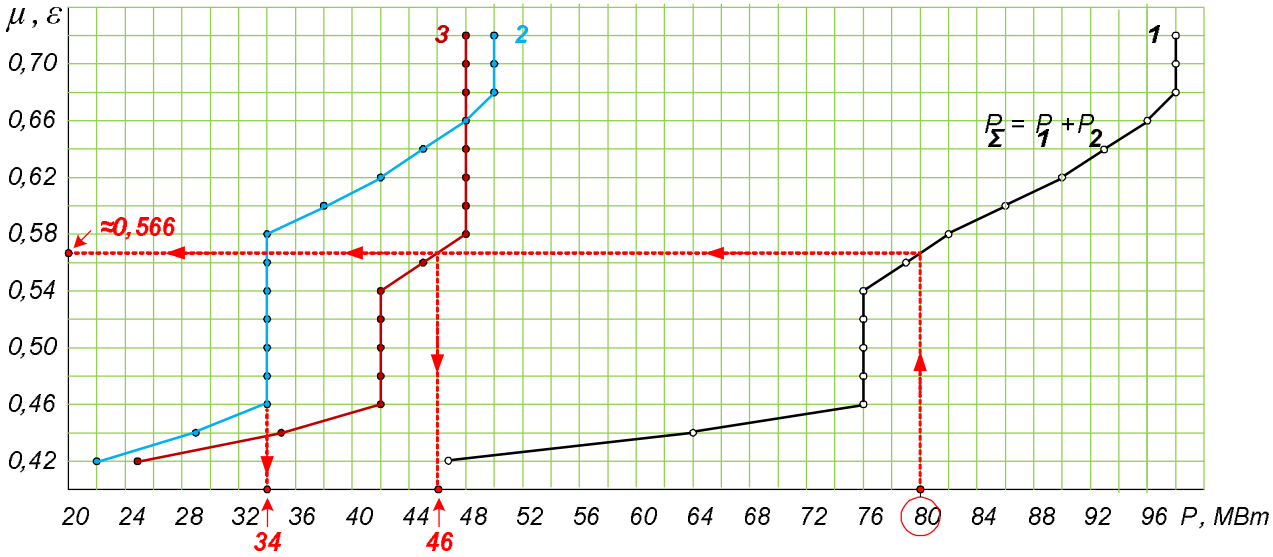

Рис. 1.3. Графики удельных приростов станций и системы.

По суммарной нагрузке системы $P_{\Sigma} = 10 + 70 = 80$ МВт найдем, что

$\mu \approx 0,566$;

$P_{20} = 34$ МВт;

$P_{30} = 46$ МВт.

Для заданного режима потери мощности в линиях и удельные приросты потерь составят:

$$\Delta P = 11,15 \cdot 10^{-4} \cdot (-70)^2 + 18,76 \cdot 10^{-4} \cdot (34 - 10)^2 + 2 \cdot 11,15 \cdot 10^{-4} \cdot (-70)(34 - 10) =$$

$$= 5,463 + 1,081 - 3,746 = 2,798 \text{ МВт};$$

$$\frac{\partial \Delta P}{\partial P_2} = 2 \cdot 11,15 \cdot 10^{-4} \cdot (-70) + 2 \cdot 18,76 \cdot 10^{-4} \cdot (34 - 10) = -0,156 + 0,09 = -0,066 .$$

Знак «минус» у $\partial \Delta P / \partial P_2$ означает, что увеличение мощности станции ЭС-2 приводит к снижению потерь.

Небаланс мощности в системе:

$\delta P = 34 + 46 - 80 - 2,798 = -2,798$ МВт.

Уточним значение ε_2 и $\partial \Delta P / \partial P_2$ (с учетом потерь в линиях):

1. $\varepsilon_2 = \mu \cdot (1 - \partial \Delta P / \partial P_2) = 0,566 \cdot (1 + 0,066) = 0,603$;

Этому значению ε_2 соответствует $P_2 = 38,64$ МВт – рис. 1.4. Тогда

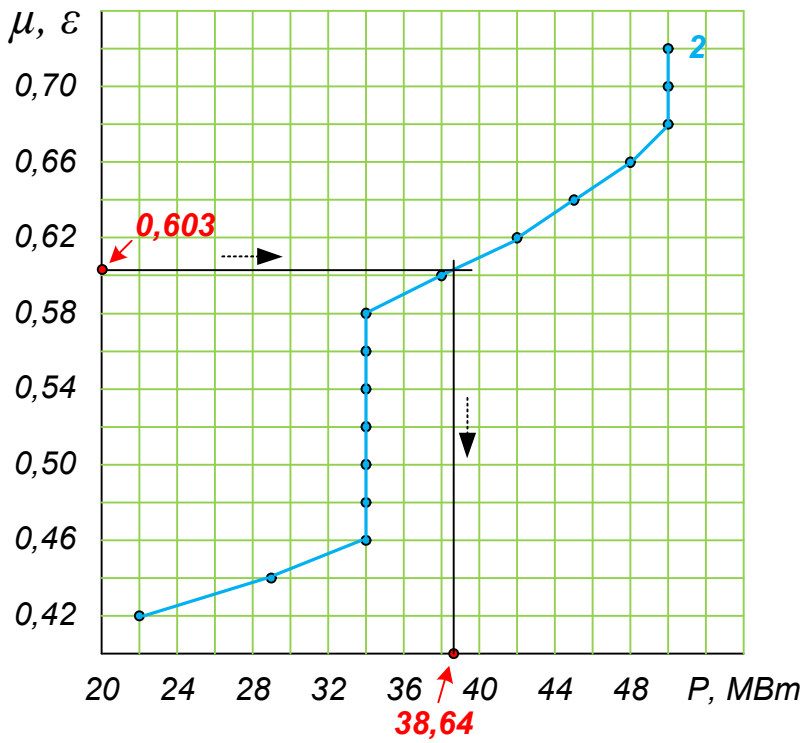

Рис. 1.4.

$$\frac{\partial \Delta P}{\partial P_2} = 2 \cdot 11,15 \cdot 10^{-4} \cdot (-70) + 2 \cdot 18,76 \cdot 10^{-4} \cdot (38,64 - 10) = -0,156 + 0,107 = -0,049 .$$

2. $\varepsilon_2 = \mu \cdot (1 - \partial \Delta P / \partial P_2) = 0,566 \cdot (1 + 0,049) = 0,594$;

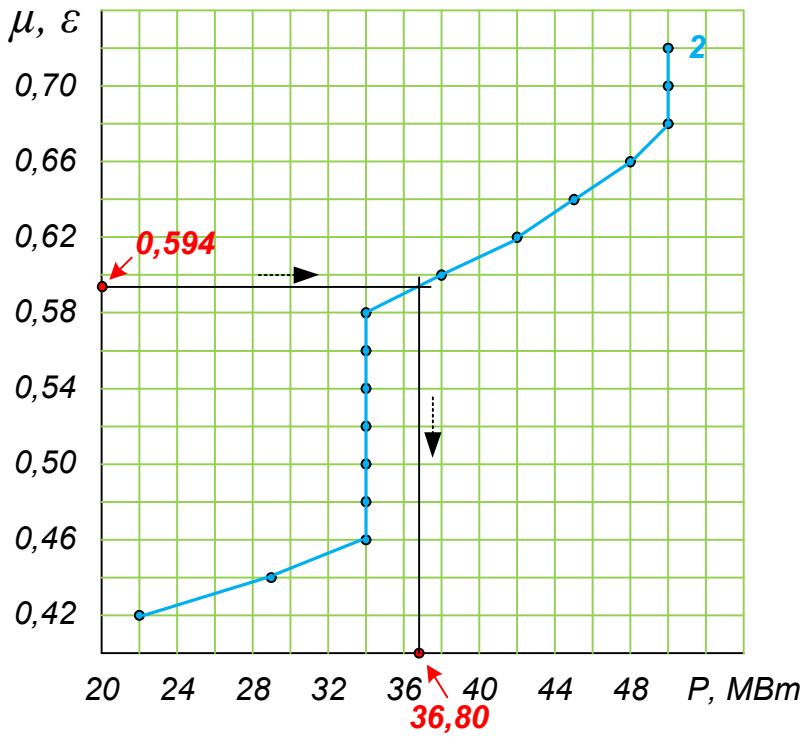

Рис. 1.5.

$P_2 = 36,8$ МВт

$$\frac{\partial \Delta P}{\partial P_2} = 2 \cdot 11,15 \cdot 10^{-4} \cdot (-70) + 2 \cdot 18,76 \cdot 10^{-4} \cdot (36,8 - 10) = -0,156 + 0,100 = -0,056 .$$

3. $\varepsilon_2 = \mu \cdot (1 - \partial \Delta P / \partial P_2) = 0,566 \cdot (1 + 0,056) = 0,598$;

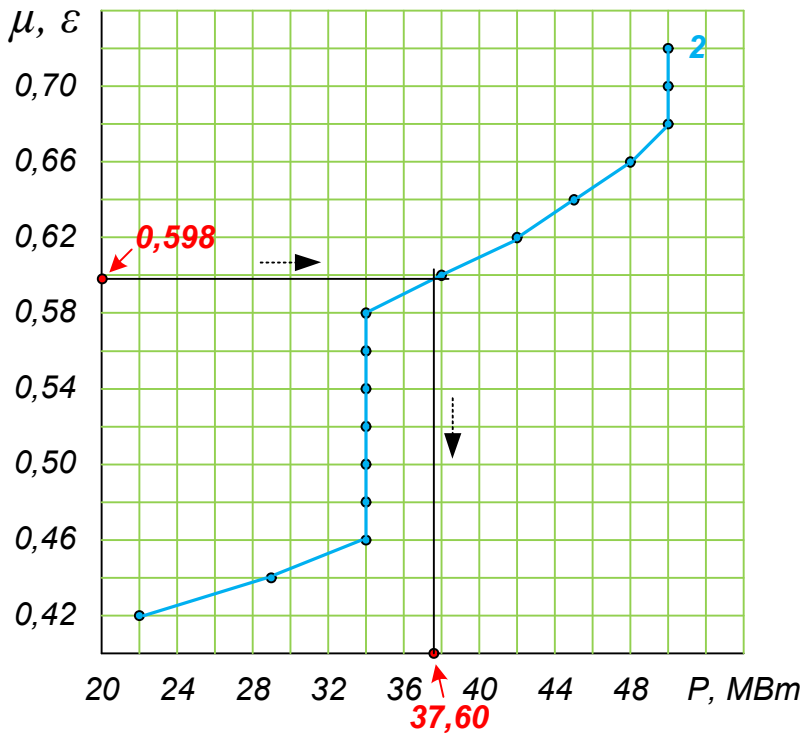

Рис. 1.6.

$P_2 = 37,6$ МВт

$$\frac{\partial \Delta P}{\partial P_2} = 2 \cdot 11,15 \cdot 10^{-4} \cdot (-70) + 2 \cdot 18,76 \cdot 10^{-4} \cdot (37,6 - 10) = -0,156 + 0,104 = -0,052 .$$

4. $\varepsilon_2 = \mu \cdot (1 - \partial \Delta P / \partial P_2) = 0,566 \cdot (1 + 0,052) = 0,595$;

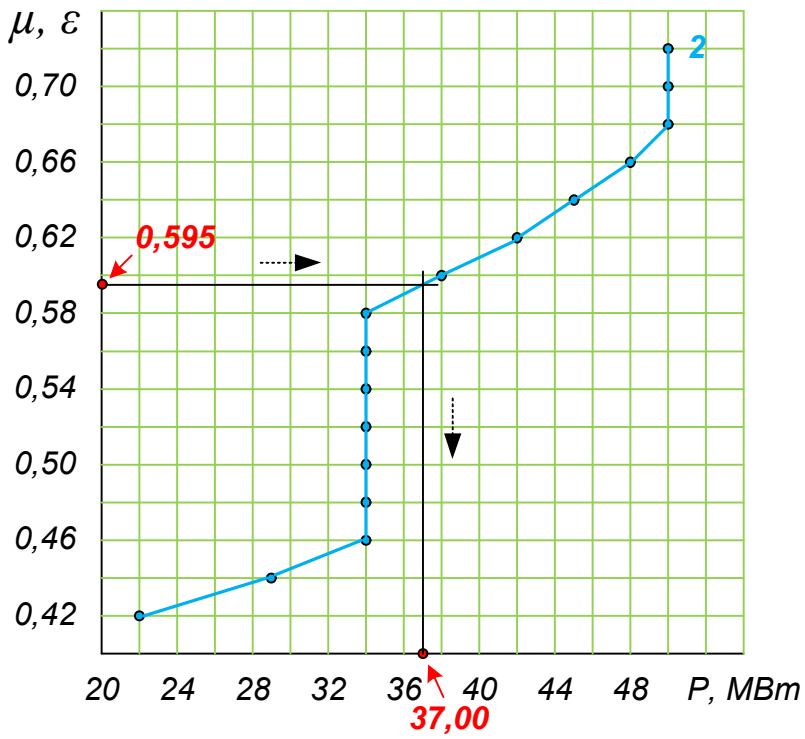

Рис. 1.7.

$P_2 = 37{,}0$ МВт

$$\frac{\partial \Delta P}{\partial P_2} = 2 \cdot 11{,}15 \cdot 10^{-4} \cdot (-70) + 2 \cdot 18{,}76 \cdot 10^{-4} \cdot (37{,}0 - 10) = -0{,}156 + 0{,}101 = -0{,}055 .$$

5. $\varepsilon_2 = \mu \cdot (1 - \partial \Delta P / \partial P_2) = 0{,}566 \cdot (1 + 0{,}055) = 0{,}597$;

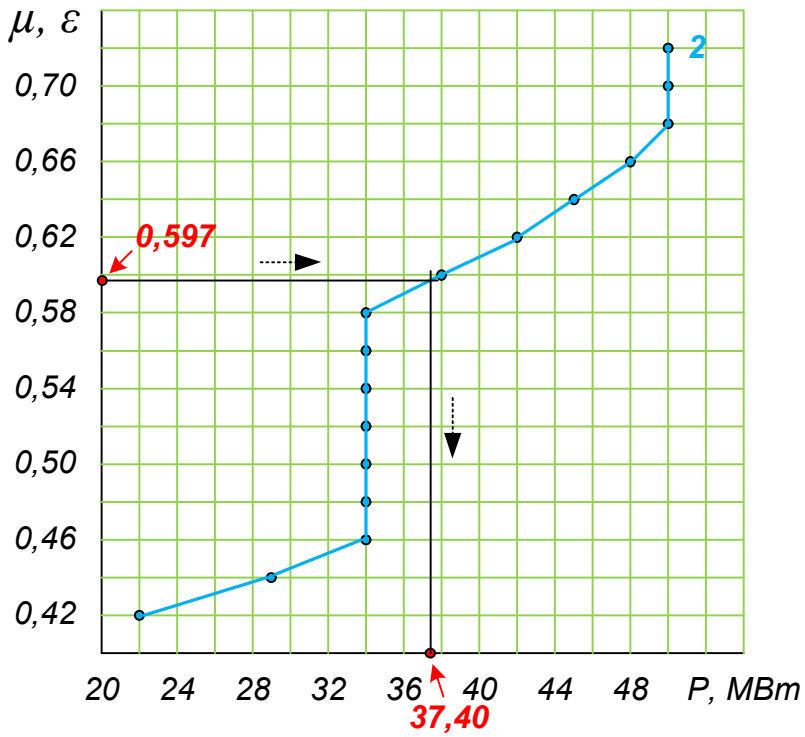

Рис. 1.8.

$P_2 = 37,4$ МВт

$$\frac{\partial \Delta P}{\partial P_2} = 2 \cdot 11,15 \cdot 10^{-4} \cdot (-70) + 2 \cdot 18,76 \cdot 10^{-4} \cdot (37,4 - 10) = -0,156 + 0,103 = -0,053 .$$

6. $\varepsilon_2 = \mu \cdot (1 - \partial \Delta P / \partial P_2) = 0,566 \cdot (1 + 0,053) = 0,596$;

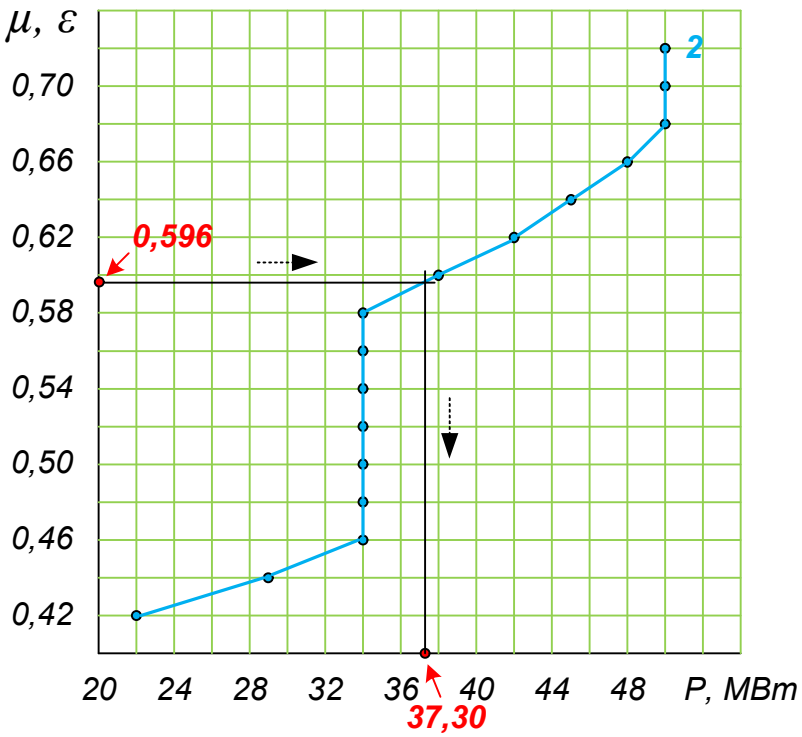

Рис. 1.9.

$P_2 = 37,3$ МВт

$$\frac{\partial \Delta P}{\partial P_2} = 2 \cdot 11,15 \cdot 10^{-4} \cdot (-70) + 2 \cdot 18,76 \cdot 10^{-4} \cdot (37,3 - 10) = -0,156 + 0,102 = -0,054 .$$

Результаты расчетов проиллюстрированы на рис. 1.10 и 1.11.

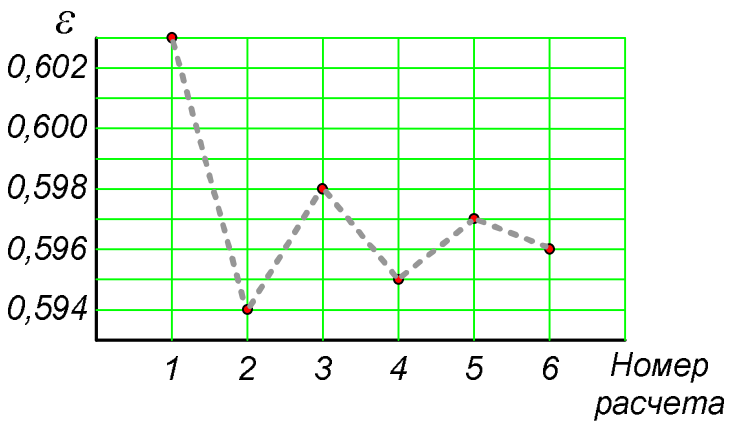

Рис. 1.10. Результаты итерационных расчетов ε_2 .

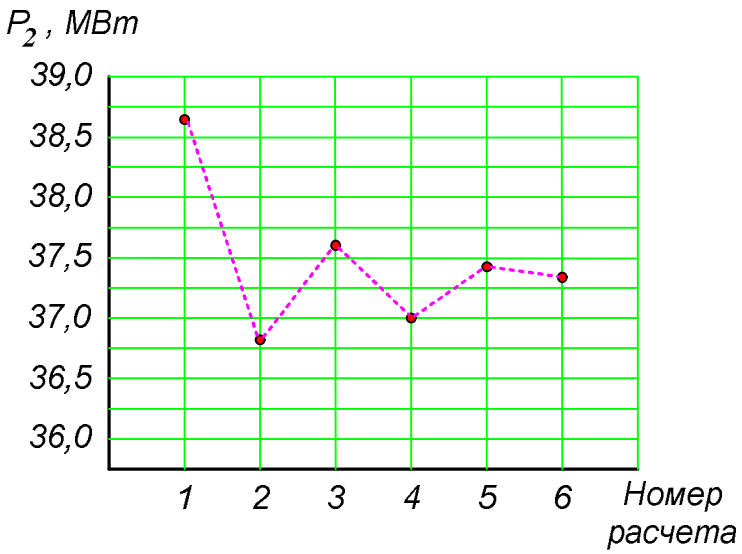

Рис. 1.11. Результаты итерационных расчетов P_2.

Будем считать уточнение ε_2 законченным. При этом:

$$\Delta P = 11{,}15 \cdot 10^{-4} \cdot (-70)^2 + 18{,}76 \cdot 10^{-4} \cdot (37{,}3 - 10)^2 + 2 \cdot 11{,}15 \cdot 10^{-4} \cdot (-70)(37{,}3 - 10) =$$

$$= 5{,}463 + 1{,}398 - 4{,}261 = 2{,}6 \text{ МВт};$$

$$\delta P = 37{,}3 + 46 - 80 - 2{,}6 = 0{,}7 \text{ МВт}.$$

Знак небаланса говорит о том, что точку оптимума мы «проскочили». Уменьшим значение удельного прироста системы до значения $\mu = 0{,}56$, которому соответствует $P_3 = 45$ МВт и вновь повторим уточнение ε_2 и $\partial\Delta P/\partial P_2$:

1. $\varepsilon_2 = \mu \cdot (1 - \partial\Delta P/\partial P_2) = 0{,}56 \cdot (1 + 0{,}054) = 0{,}59$; $P_2 = 36$ МВт

$$\frac{\partial \Delta P}{\partial P_2} = 2 \cdot 11{,}15 \cdot 10^{-4} \cdot (-70) + 2 \cdot 18{,}76 \cdot 10^{-4} \cdot (36 - 10) = -0{,}156 + 0{,}097 = -0{,}059.$$

2. $\varepsilon_2 = \mu \cdot (1 - \partial\Delta P/\partial P_2) = 0{,}56 \cdot (1 + 0{,}059) = 0{,}593$; $P_2 = 36{,}7$ МВт

$$\frac{\partial \Delta P}{\partial P_2} = 2 \cdot 11{,}15 \cdot 10^{-4} \cdot (-70) + 2 \cdot 18{,}76 \cdot 10^{-4} \cdot (36{,}7 - 10) = -0{,}156 + 0{,}1 = -0{,}056.$$

3. $\varepsilon_2 = \mu \cdot (1 - \partial\Delta P/\partial P_2) = 0{,}56 \cdot (1 + 0{,}056) = 0{,}591$; $P_2 = 36{,}2$ МВт

$$\frac{\partial \Delta P}{\partial P_2} = 2 \cdot 11{,}15 \cdot 10^{-4} \cdot (-70) + 2 \cdot 18{,}76 \cdot 10^{-4} \cdot (36{,}2 - 10) = -0{,}156 + 0{,}098 = -0{,}058.$$

4. $\varepsilon_2 = \mu \cdot (1 - \partial\Delta P/\partial P_2) = 0{,}56 \cdot (1 + 0{,}058) = 0{,}592$; $P_2 = 36{,}4$ МВт

$$\frac{\partial \Delta P}{\partial P_2} = 2 \cdot 11,15 \cdot 10^{-4} \cdot (-70) + 2 \cdot 18,76 \cdot 10^{-4} \cdot (36,4 - 10) = -0,156 + 0,099 = -0,057 .$$

5. $\varepsilon_2 = \mu \cdot (1 - \partial \Delta P / \partial P_2) = 0,56 \cdot (1 + 0,057) = 0,592$; $P_2 = 36,4$ МВт

$$\frac{\partial \Delta P}{\partial P_2} = 2 \cdot 11,15 \cdot 10^{-4} \cdot (-70) + 2 \cdot 18,76 \cdot 10^{-4} \cdot (36,4 - 10) = -0,156 + 0,099 = -0,057 .$$

Будем считать повторное уточнение ε_2 законченным. При этом:

$$\Delta P = 11,15 \cdot 10^{-4} \cdot (-70)^2 + 18,76 \cdot 10^{-4} \cdot (36,4 - 10)^2 + 2 \cdot 11,15 \cdot 10^{-4} \cdot (-70)(36,4 - 10) =$$

$$= 5,463 + 1,307 - 4,121 = 2,649 \text{ МВт};$$

$$\delta P = 36,4 + 45 - 80 - 2,649 = -1,249 \text{ МВт}.$$

Сравнив последнюю рассчитанную величину δP с полученной ранее, делаем вывод, что результат первого расчета ближе к оптимальному. Принимая во внимание, что в исходных данных любой системы всегда присутствует погрешность, считаем, что оптимальный режим отвечает следующим параметрам:

$\mu = \varepsilon_3 = 0,566$;

$P_3 = 46$ МВт;

$\varepsilon_2 = 0,596$;

$P_2 = 37,3$ МВт;

$\Delta P = 2,6$ МВт.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Чемборисова Н.Ш., Степанов А.С., Пейзель В.М. Оптимизация режимов электроэнергетических систем и сетей: Учебное пособие. – Благовещенск, Изд-во Амурского гос. ун-та, 2006. – 104 с.

2. Веников В.А., Журавлев В.Г., Филиппова Т.А. Оптимизация режимов электростанций и энергосистем. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 352 с.

3. Арзамасцев Д.А., Бартоломей П.И., Холян А.М. АСУ и оптимизация режимов энергосистем. – М.: Высшая школа, 1963. – 295 с.

4. Модели оптимизации развития энергосистем: Учеб. для электроэнергет. спец. вузов / Д.А Арзамасцев, А.В. Липес, А.Л. Мызин / Под ред. Д.А. Арзамасцева. – М.: Высшая школа, 1987. – 272 с.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	**3**
Введение	**5**
Перечень тем практических занятий	**6**
Критерии достижения результатов обучения по блоку практических дисциплин	**7**
Оптимизация режимов электростанций	**8**
Библиографический список	**18**

Составитель:

Козлов Александр Николаевич,
доцент кафедры энергетики АмГУ, канд. техн. наук;

Методы оптимизации развития электроэнергетических систем:
*Методические указания к практическим занятиям***.**

Издательство АмГУ. Формат 60x84/16. Усл. печ. л. 1,16. Заказ 585.