

ЭНЕРГЕТИКА

В. И. БУКИН

ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ АНАЛОГОВОГО УСТРОЙСТВА
ДЛЯ ОПТИМАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАГРУЗОК НА ТЭЦ

При построении специализированных вычислительных устройств (ВУ) для оптимального распределения нагрузок на ТЭЦ основными вопросами являются затраты на эти устройства и точность получения решения. Эти затраты резко возрастают при применении более точных методов оптимизации, дающих возможность приблизиться к абсолютному минимуму, т. к. последнее обстоятельство вызвано тем, что различные по точности методы вызывают и различные затраты для их реализации. Окупиться же эти затраты могут только реальной экономией топлива за счет меньшего отклонения нагрузок отдельных, совместно работающих агрегатов, от действительно оптимальных. Разумный подход к вопросу точности при построении специализированных ВУ представляет интерес и играет существенную роль при выборе средств техники для решения поставленной задачи. Следует иметь в виду, что погрешность полученного решения определяется не только методической погрешностью и погрешностью вычислительной техники, но также зависит от погрешности исходной информации и последняя может являться одной из основных и в некоторых случаях достигает до 30%. Поэтому существующее мнение, что решение задач оптимизации с помощью средств цифровой техники с применением более точных методов предпочтительнее не всегда оправдывается, т. к. погрешность исходной информации остается одной и той же, а затраты для реализации решения более точным методом на цифровой машине всегда больше, чем на аналоговой.

В статье на примере аналоговой математической модели (АММ) котельного цеха ТЭЦ дается анализ влияния точности решающей техники на точность распределения нагрузок, между агрегатами при различной точности исходной информации. Настоящее исследование основывается на выполнении расчетов с применением самих аналоговых моделей. Для исследования использованы уравнения котельного цеха, работающего на общий паропровод в режиме оптимального распределения нагрузок [1]

$$\sum_{i=0}^n D_{ki} - D_{kct} = 0;$$

$$b_{ki} = f(D_{ki}); \quad (1)$$

$$b_{kl} = f(D_{kl});$$

$$b_{k1} = b_{k2} = \dots = b_{kn} = b_{k0},$$

где D_{kl} — расход пара $l^{\text{го}}$ котлоагрегатом (нагрузка $l^{\text{го}}$ котлоагрегата);
 U_{k1} — заданная нагрузка котельного цеха;

$b_{kl} = f(D_{kl})$ — зависимость значения относительного прироста расхода топлива (ОПРТ) $l^{\text{го}}$ котла от нагрузки;

b_{k0} — ОПРТ котельного цеха ТЭЦ.

При рассмотрении точности АММ в основу исследования следует положить не исходные, а так называемые машинные уравнения, т. е. построенная на основе машинных уравнений математическая модель обычно содержит помимо основных решающих блоков целый ряд и дополнительных устройств, например, таких как инверторы, блоки постоянных коэффициентов, блоки переменных коэффициентов, делители напряжения, интеграторы и другие. В результате машинные уравнения исследуемой математической модели будут содержать большее число параметров, чем исходные моделируемые уравнения. Машинные уравнения математической модели котельного цеха ТЭЦ можно представить так.

$$k_1 \cdot U_1 = k_2 \cdot \sum_{i=1}^n U_{ki} = k_2 \cdot U_{k0}; \quad (2)$$

$$U_{ki} = f(U_{bki}); \quad (3)$$

$$\begin{matrix} \vdots \\ U_{kn} = f(U_{bkn}); \\ \vdots \end{matrix}$$

$$U_{bki} = U_{bk2} = \dots = U_{bkn} = U_{bko}; \quad (4)$$

$$U_{bko} = k_n \int_0^t U_1 \cdot dt, \quad (5)$$

где — U_i — нагрузка i -го котла, выраженная в вольтах;

U_{bki} — ОПРТ i -го котла в вольтах;

U_{k1} — заданная нагрузка котельного цеха в вольтах;

k_i — коэффициенты передачи решающих устройств.

Для решения системы уравнений (2) — (5) математическая модель будет иметь вид (рис. 1) и состоит из блока суммирования (БС), для реализации выражения (2), интегратора для реализации выражения (5), функциональных блоков (ФБ) для реализации выражений (3), которые заданы в виде графиков, блоков масштабных коэффициентов (МК) и блока введения погрешности (БК) в функциональные блоки для исследования влияния точности исходной информации на точность решения. Исследование влияния погрешности исходной информации и погрешности решающих устройств на результат полученного решения осуществляется посредством искусственного ввода возможной погрешности в функциональные блоки или в блоки масштабных коэффициентов и последующего сравнения результатов решения, полученного с учетом вво-

да этих погрешностей и без них. Введение погрешности может осуществляться как для всех блоков одновременно, так и для каждого блока в

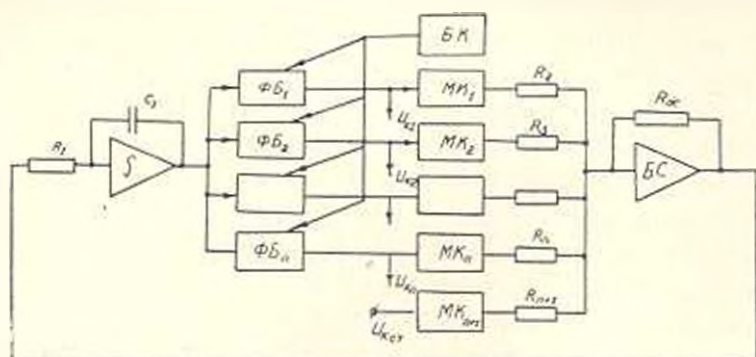


Рис. 1.

отдельности. В связи с тем, что перерасход топлива на станции зависит от точности распределения нагрузок между агрегатами, представляется целесообразным анализировать влияние точности исходной информации и решающей техники не на перерасход топлива на станции, а на отклонение фактических нагрузок от действительно оптимальных, т. к. перерасход топлива на станции определится выражением

$$B_n = B_2 - B_1 = \sum_{i=1}^n \int_{D_{kij}}^{D_{ki}} b_{ki} dD_k - \sum_{j=1}^m \int_{D_{kij}}^{D_{kj}} b_{kj} dD_k, \quad (6)$$

где B_2 — перерасход топлива i -ми котлами, у которых нагрузка возросла от действительно оптимальной за счет введения погрешности;

B_1 — экономия топлива i -ми котлами, у которых нагрузка уменьшилась от действительно оптимальной за счет введения погрешности;

D_{kij} (D_{k0j}) — оптимальные нагрузки i (j) котлов при отсутствии погрешности;

D_{ki} (D_{kj}) — нагрузки i (j) котлов при наличии погрешности.

Значения выходных параметров (нагрузки котлоагрегатов) в общем случае можно представить после решения системы (2) — (5) в виде:

$$U_{ks} = F_s(U_{b1}, U_{b2}, \dots, U_{bn}, U_{kc1}, k_1, k_2, \dots, k_n), \quad (7)$$

где $s = 1, 2, 3, \dots, n$.

В случае, когда вводимая погрешность в функциональные блоки и решающие устройства равна нулю, т. е. когда погрешность исходной информации и решающей техники отсутствует, значения выходных параметров равны

$$U_{k0s} = F_{s0}(U_{b10}, U_{b20}, \dots, U_{bn0}, U_{kc10}, K_{10}, K_{20}, \dots, K_{n0}). \quad (8)$$

Для выявления степени влияния отдельных составляющих ошибок на точность получения конечного результата разложим выражение (7) в ряд Тейлора по степеням приращений параметров U_{b1} , U_{kc1} и k_i и

ограничимся членами первого порядка малости. Вычитая из полученного выражения выражение (8), будем иметь

$$\Delta U_{k2} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial F_{k2}}{\partial U_{ki}} \right) \Delta U_{ki} + \sum_{j=1}^m \left(\frac{\partial F_{k2}}{\partial k_j} \right) \Delta k_j + \frac{\partial F_{k2}}{\partial U_{k2}} \cdot \Delta U_{k2} \quad (9)$$

что является хорошим приближением, если величины приращений малы и функция является приближенно линейной в точке, для которой определяются производные.

Для расчета погрешностей ΔU_{k2} наиболее сложным представляется вычисление значений частных производных выражения (9), особенно в тех случаях, если значение F_{k2} не задано в аналитической форме, поэтому представляется целесообразным частные производные получать непосредственно на модели (рис. 1), давая приращения исследуемому параметру и определяя при этом значение выходного параметра (как результат решения на модели).

Так, например, при наличии погрешности в исходной информации, т. е. в ХОПРТ производные получаем как

$$\frac{\partial F_{k2}}{\partial U_{ki}} = \frac{\Delta U_{ki}}{\Delta U_{ki}} \quad (10)$$

где ΔU_{ki} — погрешность входной в характеристику ОПРТ;

ΔU_{k2} — изменение выходного параметра (нагрузки котлоагрегата) в зависимости от ΔU_{ki} .

Остальные исследуемые параметры поддерживаются постоянными. Аналогичным образом можно получить значения частных производных и для других параметров, имеющих погрешности.

С помощью рассматриваемой модели можно вычислить погрешности выходных напряжений только от известных погрешностей отдельных ее параметров, т. е. выражением (10) можно пользоваться для исследования конкретного устройства, у которого известны значения погрешностей его параметров. В общем случае, для оценки точности серии одинаковых моделей при построении АММ на базе серийных работающих блоков, анализ точности следует проводить посредством вероятностных формул.

Целью расчета обычно является отыскание предельной суммарной ошибки при вычислении выходного параметра. В связи с тем, что суммарная ошибка при большом числе слагаемых является нормально распределенной случайной величиной, то в качестве практически предельной ошибки можно принимать

$$\epsilon_{\Sigma} = \left\{ \sum_{i=1}^n c_{ki}^2 (\Delta U_{ki})^2 + \sum_{j=1}^m c_{kj}^2 (\Delta k_j)^2 + c_{k2}^2 (\Delta U_{k2})^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (11)$$

где

$$c_{ki} = \frac{\partial F_{k2}}{\partial U_{ki}}; \quad c_{kj} = \frac{\partial F_{k2}}{\partial k_j}; \quad c_{k2} = \frac{\partial F_{k2}}{\partial U_{k2}}$$

Погрешность исходной информации

U_{k1}

ΔU_{k1}

г

%

$$\Delta U'_{bk1} = 0$$

11,5

0

$$\Delta U'_{bk1} = \Delta U'_{bk2} = \Delta U'_{bk5} = +10^{\circ}_0$$

11,4

-0,87

$$\Delta U'_{bk1} = \Delta U'_{bk2} = \Delta U'_{bk5} = +20^{\circ}_0$$

11,5

0

$$\Delta U'_{bk1} = \Delta U'_{bk2} = \Delta U'_{bk5} = -10^{\circ}_0$$

11,6

0,89

$$\Delta U'_{bk1} = \Delta U'_{bk2} = \Delta U'_{bk5} = -20^{\circ}_0$$

11,7

-1,73

$$\Delta U'_{bk1} = +10^{\circ}_0. \text{ Остальные равны } 0$$

13,0

+1,5

$$\Delta U'_{bk1} = \Delta U'_{bk2} = +10^{\circ}_0. \text{ Остальные равны } 0$$

12,6

-9,7

$$\Delta U'_{bk1} = \Delta U'_{bk2} = \Delta U'_{bk3} = +10^{\circ}_0. \text{ Остальные } 0$$

12,0

+4,3

$$\Delta U'_{bk1} = \Delta U'_{bk2} = \Delta U'_{bk3} = +10^{\circ}_0$$

$$\Delta U'_{bk1} = \Delta U'_{bk5} = -10^{\circ}_0$$

13,0

-13,0

$$\Delta U'_{bk1} = \Delta U'_{bk3} = \Delta U'_{bk5} = +10^{\circ}_0$$

$$\Delta U'_{bk2} = \Delta U'_{bk4} = -10^{\circ}_0$$

13,2

+14,8

Таблица 1

$$U_{KCI} = 60V$$

U_{K2}	ΔU_{K2}	U_{K3}	ΔU_{K3}	U_{K1}	ΔU_{K1}	U_{K5}	ΔU_{K5}
V	%	V	%	V	%	V	%
10,8	0	11	0	11,2	0	15,0	0
10,7	-0,92	11,1	-0,91	11,1	-0,89	15,2	+1,32
10,7	-0,92	11,2	-1,8	11,1	-0,89	15,1	-0,67
10,8	0	10,9	-0,91	11,2	0	14,9	-0,66
10,9	-0,93	11,0	0	11,0	-0,89	15,1	+0,68
10,5	+2,8	11,0	0	10,8	-3,5	15,0	0
11,9	+10,2	10,7	-2,7	10,5	-6,3	14,8	-1,3
11,9	+10,2	11,5	+4,5	10,3	-8	14,5	-3,3
12,1	+12,0	12,2	+10,9	9,8	-12,5	13,9	-7,3
9,5	-12,0	12,4	+12,7	9,9	-11,6	16,5	+10,0

Таблица 2

Исходная погрешность Пределная погрешность	$\sigma_1 \Delta U_{b1} $			$\sigma_2 \Delta U_{b2} $			$\sigma_3 \Delta U_{b3} $			$\sigma_4 \Delta U_{b4} $			$\sigma_5 \Delta U_{b5} $		
	10 ⁰ _и	20 ⁰ _и	30 ⁰ _и	10 ⁰ _о	20 ⁰ _о	30 ⁰ _о	10 ⁰ _о	20 ⁰ _о	30 ⁰ _о	10 ⁰ _о	20 ⁰ _о	30 ⁰ _о	10 ⁰ _о	20 ⁰ _о	30 ⁰ _о
	U_{k1}			U_{k2}			U_{k3}			U_{k4}			U_{k5}		
$\sigma \Delta U_{k1} $ ° _и	10,7	18,4	26,9	9,3	11,6	19,4	2,29	8,4	11,5	10,8	5,4	21,4	4,0	4,55	4,85
$\sigma_2 \Delta U_{k2} $ ° _о	10,75	18,46	26,9	9,35	11,68	19,49	2,44	8,46	11,53	10,89	15,45	21,43	4,15	4,66	4,95
$\sigma_2 \Delta U_{k3} $ ° _о	10,9	18,55	27,0	9,45	11,8	19,6	2,78	8,56	11,6	11	15,51	21,5	4,26	4,7	5,05
$\sigma_3 \Delta U_{k4} $ ° _о	11,3	18,65	21,1	9,75	11,9	19,7	3,8	8,9	11,9	11,48	15,7	21,6	5,0	4,79	5,36
$\Delta \sigma_1$ ° _и	0,05	0,06	0,03	0,05	0,08	0,09	0,1	0,05	0,03	0,09	0,05	0,03	0,15	0,11	0,10
$\Delta \sigma_2$ ° _о	0,2	0,15	0,1	0,15	0,2	0,2	0,45	0,16	0,1	0,4	0,3	0,1	0,26	0,15	0,20
$\Delta \sigma_3$ ° _о	0,55	0,25	0,2	0,45	0,3	0,3	0,51	0,5	0,4	0,68	0,3	0,2	1,0	0,24	0,51

ность АММ находится в пределах 1, 2, 3%. Результаты выполненных расчетов при $U_{\text{кст}} = 70v$ приведены в табл. 2.

В первой строке табл. 2 приведены предельные погрешности выходных напряжений $U_{\text{вх}}$, вычисленные посредством формулы (11), в которой $\Delta k_i = 0$ и $\delta|\Delta U_{\text{кст}}| = 0$.

В этом случае она приобретает вид:

$$\delta_{\text{вх}} = \left\{ \sum_{i=1}^n c_{1i}^2 (\delta|\Delta U_{\text{вх}}|)^2 \right\}^{\frac{1}{2}}.$$

Во 2, 3 и 4 строках табл. 2 приведены предельные погрешности выходных напряжений, вычисленных по формуле (11), когда только $\Delta U_{\text{кст}} = 0$. В этом случае выражение (11) приобретает вид

$$\delta_{\text{вх}} = \left\{ \sum_{i=1}^n c_{1i}^2 (\delta|\Delta U_{\text{вх}}|)^2 + \sum_{j=1}^m c_{2j}^2 (\delta|\Delta k_j|)^2 \right\}^{\frac{1}{2}}.$$

В 5, 6 и 7 строках приведены разности, полученные по формуле:

$$\Delta \delta_i = \delta_{\text{вх}} - \delta_{\text{вх}i}.$$

Эта разность характеризует долю погрешности в процентах вносимой АММ. Исходя из полученных результатов исследования, видно, что влияние АММ на точность решения при учете точности исходной информации составляет сравнительно небольшой процент. Учитывая полученные результаты и целый ряд преимуществ АММ (простота, удобство эксплуатации и время получения решения), использование их при построении специализированных вычислительных машин для оптимизации режима ТЭЦ, следует считать весьма целесообразным наряду с ЦВМ.

В заключение автор выражает благодарность Е. Д. Сафарову за ценные замечания, учтенные при редактировании статьи.

Апр НИИ энергетики

Получено 6. IX. 1968.

Վ. Ն. ՅՈՒՆԻՆ

ՋԷԿԻ ԲԻՆԵԼԱՅԲԻ ՈՊՏԻՄԱԼ ԲԱԶԵՄԱՆ ԱՆԱԼՈԳԱԶԻՆ ՍԱՐԲԻ ՃՇՏՈՒԹՅԱՆ ՈՐՈՐԴԱՆԱՊՐՈԹՅՈՒՆԸ

Ա. Վ. Փ Ո Փ Ո Ւ Ն

Քննարկվում են բարդ սխեմաների անալոգային մոդելների ճշտության արգրերը և ՋԷԿ-ի կախյալական ճեխի անալոգային մոթեմատիկական մոդելի (ԱՄՄ) օրինակի վրա ղույլ է տրված աղբեղատների միջև բեռնվածքի բաշխման ճշտության վրա ԱՄՄ-ի աղբեղության տատիճանը սկզբնական ինՖորմացիայի տրման տարրեր ճշտությունների դեպրում:

Ինչպես մասնավոր օրինակի, այնպես էլ բնդհանուր դեպքի համար բերված է ճշտության անալիզի բրդ-սխեման՝ օպտագործելով համանականության տեսության բանաճեղք:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Горюхины В. М. Наивыгоднейшее распределение нагрузок между параллельно работающими электростанциями. М.—Л., 1948.
2. Митяевский П. А. К вопросу о расчете точности аналоговых математических моделей. Известия АН АрмССР, (серия ТН), т. XXI, № 1, 1968.