

Варганова А.В.

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова

## ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОМЫШЛЕННЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

В работе приводится подход по разработке теплоэнергетической модели промышленных электростанций. Данный алгоритм основан на методах динамического программирования и модифицированного последовательного эквивалентирования. Сочетание предложенных методов отличается возможностью построения моделей в табличной форме, учета ограничений в виде равенств и неравенств. Кроме того, модели могут иметь точки недифференцируемости и разрывы. Основным критерием оптимизации является минимум суммарных затрат на первичный энергоноситель с учетом собственных нужд и фонда оплаты труда. При построении эквивалентной модели в качестве исходных данных используются технико-экономические модели энергетических котлов электростанции, представляющие собой зависимость паропроизводительности котла от себестоимости свежего пара, учитывающие расход топлива на выработку 1 т свежего пара и возможные объемы энергоресурсов в составе топливной смеси котла (например, смесь доменного и природного газов). Эквивалентная модель позволяет для необходимой паропроизводительности (с учетом теплофикационных и производственных отборов) электростанции определять оптимальные загрузки котлов по тепловой мощности и соответствующие им расходы первичного топлива, а также затраты на него. При построении модели учитываются эксплуатационные характеристики котлов, а именно температура питающей воды и давление пара в барабане. Отличительной особенностью теплоэнергетической модели электростанции является учет всех возможных соотношений топлива при поиске оптимального значения паропроизводительности энергоустановки. Разработанный алгоритм реализован в оригинальном программном продукте КАТРАН-OptHeatPower, предназначенном для планирования и принятия оперативных решений при управлении нормальными, ремонтными и послеаварийными режимами промышленных тепловых электростанций.

**Ключевые слова:** технико-экономическая модель, энергетический котел, энергетический ресурс, турбогенератор, местная электростанция, система электроснабжения, промышленное предприятие.

### ВВЕДЕНИЕ

Современные промышленные предприятия, выполняя программы по энергосбережению и энергоменеджменту, решают задачи оптимизации режимов систем электроснабжения с источниками распределенной генерации, наличие которых в энергоузлах обусловлено необходимостью в тепловой мощности и сокращением затрат на передачу мощности для энергоемких потребителей. Существует большое число подходов по реализации данных мероприятий.

Одним из способов решения данной задачи является оптимизация режимов промышленных систем электроснабжения по реактивной мощности [1, 2]. Важным также является решение задач оптимизации при проектировании систем с распределенной генерацией [3].

В научных работах рассматриваются вопросы оптимизации внутростанционных режимов промышленных электростанций. В работе [4] приведены вопросы оптимального распределения мощности между отдельными агрегатами электростанций с учетом выработки генераторами реактивной мощности [5], что обеспечивает сокращение потерь мощности в распределительных сетях. В [6] рассматривается вопрос автоматизированного проектирования собственных нужд электростанций, при этом решаются задачи оптимизации на этапе проектирования.

В [7, 8] описываются другие методы и подходы по оптимизации режимов теплоэнергетических систем и сетей, позволяющие повысить эффективность их работы за счет внедрения мероприятий по энергосбережению.

Большое число работ направлено на изучение и моделирование работы электростанций в условиях управляемых сетей [9, 10]. Внедряются новые методы по управлению и контролю при комбинированном

производстве тепловой и электрической энергии [11, 12]. Уделяется внимание вопросам эксплуатации электростанций в условиях промышленных систем электроснабжения [13, 14] с учетом оценки энергоэффективного потребления топливно-энергетических ресурсов [15] и прогноза поведения электроустановок в аварийных режимах [16, 17].

Немаловажным остается вопрос учета ограничений и требований, предъявляемым к моделям электростанций [18], которые должны позволять адекватно отражать весь жизненный цикл тепловых электростанций [19].

Как уже отмечалось, немаловажной задачей является распределение нагрузок между агрегатами электростанций, данная задача в работе [20] решается с использованием генетического алгоритма, однако авторы работы [21] предлагают подход с использованием метода динамического программирования. Выбор конкретного метода обусловлен особенностями режимов работы электростанций и определяется непосредственно для рассматриваемого объекта.

Таким образом, вопросы моделирования тепловых электростанций в условиях промышленных систем электроснабжения являются актуальными и требуют новых подходов с целью оптимизации и повышения эффективности режимов их работы.

В данной статье предлагается алгоритм, позволяющий создавать теплоэнергетическую модель промышленных электростанций, отличающийся возможностью учета эксплуатационных характеристик, экономических показателей работы как отдельных агрегатов электростанции, так и в целом рассматриваемой электроустановки. Разработанная модель позволяет оперативно определять оптимальные загрузки котлоагрегатов и планировать их режимы работы в нормальных, ремонтных и послеаварийных режимах.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КОТЛОВ  
ПРОМЫШЛЕННЫХ ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

Для осуществления оптимизации режимов промышленных тепловых электростанций методом динамического программирования [21] разработаны адаптированные модели котлоагрегатов, которые в общем виде представляются в табличном виде (табл. 1).

В приведенной модели параметр  $X$  обозначает возможную величину загрузки котла ( $D_i$ ) (табл. 2).  $Y$  – это расходующийся энергоноситель для производства заданного значения пара  $X_i$ . Для котлов данный параметр эквивалентен расходу таких энергоносителей, как природный, доменный или коксовый газы, уголь, различные топливные смеси: газозольные смеси, смесь из природного и доменного газов, смесь из природного, доменного и коксового газов и пр. Для модели котла данный параметр соответствует расходам  $B_i, B_{i+1}, B_{i+m}$  для  $m$  видов топлива в топливной смеси. Важным параметром, который позволяет осуществлять дальнейший оптимизационный расчет, является себестоимость свежего пара  $S_i$ . Данный показатель рассчитывается с использованием алгоритма, приведенного в [21, 22].

Данные модели построены на основании режимных карт котлов, однако исходные данные необходимо адаптировать для расчетов.

Для этого между каждым соседним значением задается шаг оптимизации, равный 1 т/ч. Для того чтобы привести расходную характеристику к нужному виду, используется следующее выражение:

$$D_i = D_{i-1} + \Delta D, \quad (1)$$

где  $D_i$  – текущая паропроизводительность котла, т/ч;  $D_{i-1}$  – паропроизводительность котла на предыдущей ступени модели, т/ч;  $\Delta D$  – заданный шаг, т/ч, для промышленных тепловых электростанций принимается равным 1 т/ч.

**Таблица 1**  
Универсальная технико-экономическая модель  
основного оборудования промышленных тепловых  
электростанций

$X_i$	$X_{i1}$	$X_{i2}$	$X_{i3}$	...	$X_{ij}$
$Y_i$	$Y_{i1}$	$Y_{i2}$	$Y_{i3}$	...	$Y_{ij}$
$Y_{i+1}$	$Y_{(i+1)1}$	$Y_{(i+1)2}$	$Y_{(i+1)3}$	...	$Y_{(i+1)j}$
...	..	...	...	...	...
$Y_{i+n}$	$Y_{(i+n)1}$	$Y_{(i+n)2}$	$Y_{(i+n)3}$	...	$Y_{(i+n)j}$
$S_i$ , руб./т	$S_{i1}$	$S_{i2}$	$S_{i3}$	...	$S_{ij}$

**Таблица 2**  
Общий вид технико-экономической модели котлоагрегата

$D_i$ , т/ч	$D_{i1}$	$D_{i2}$	$D_{i3}$	...	$D_{ij}$
$B_i$ , м <sup>3</sup> /ч	$B_{i1}$	$B_{i2}$	$B_{i3}$	...	$B_{ij}$
$B_{i+1}$ , м <sup>3</sup> /ч	$B_{(i+1)1}$	$B_{(i+1)2}$	$B_{(i+1)3}$	...	$B_{(i+1)j}$
...	..	...	...	...	...
$B_{i+m}$ , м <sup>3</sup> /ч	$B_{(i+n)1}$	$B_{(i+n)2}$	$B_{(i+n)3}$	...	$B_{(i+n)j}$
$S_i$ , руб./т	$S_{i1}$	$S_{i2}$	$S_{i3}$	...	$S_{ij}$

Для каждой из паропроизводительностей котлоагрегата необходимо определить величину расхода энергоносителей и себестоимость одной тонны свежего пара:

$$B_i = \left( \frac{D_i - D_{i-1}}{D_{i+1} - D_{i-1}} \right) \cdot (B_{i+1} - B_{i-1}) + B_{i-1}, \quad (2)$$

где  $B_i$  – текущий расход энергоносителя, м<sup>3</sup>/ч или т;  $D_{i+1}$  – расход пара на следующей ступени модели, т/ч;  $B_{i-1}, B_{i+1}$  – расход энергоносителя на предыдущей и последующей ступени модели, м<sup>3</sup>/ч или т.

$$S_i = \left( \frac{D_i - D_{i-1}}{D_{i+1} - D_{i-1}} \right) \cdot (S_{i+1} - S_{i-1}) + S_{i-1}, \quad (3)$$

где  $S_i$  – себестоимость пара для текущей ступени модели, руб./т;  $S_{i-1}, S_{i+1}$  – себестоимость пара на предыдущей и последующей ступени модели, руб./т.

Данные модели составляются для каждого котлоагрегата, они позволяют учитывать технологические особенности работы котлов и генераторов, нагрузку производственных и теплофикационных отборов. Однако данные модели необходимо обязательно обновлять после очередного капитального ремонта оборудования, т.к. после этого изменяются режимные карты котлов, которые отражают зависимость паропроизводительности котла от расхода возможных энергоносителей при различных параметрах.

Разработанные модели позволяют построить эквивалентную модель котлоагрегата исследуемой электростанции с использованием метода динамического программирования.

РАЗРАБОТКА ЭКВИВАЛЕНТНОЙ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ  
МОДЕЛИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

При построении моделей используется подход, основанный на методе динамического программирования. Применение данного метода затруднено тем, что для расчетов необходимо хранить большое число данных, однако авторы решили данную проблему применения совместно с методом модифицированного эквивалентирования [21]. Первоначально все модели котлов ранжируются для процесса эквивалентирования по величине средней себестоимости пара. Эквивалентирование начинается с котлов, у которых указанная величина имеет наименьшее значение. Если средние значения себестоимостей пара одинаковы, то в качестве приоритетного элемента для преобразований выбирается тот, у которого наибольшие значения паропроизводительностей.

Эквивалентная модель котлоагрегатов представляется в табличном виде и является решением задачи внутристанционной оптимизации режимов работы основного оборудования тепловых электростанций. Для получения эквивалентных значений возможных суммарных паропроизводительностей электростанции используется подход, описанный в [21]. Целевая функция для определения оптимального соотношения между паропроизводительностями котлоагрегатов имеет сле-

дующий вид:

$$Z_n = \sum_{j=1}^n \left( \sum_{k=1}^m (C_{k,j}(Y_j) + C_{от k,j}(Y_j)) \right) \rightarrow \min, \quad (4)$$

где  $Y_j$  – оптимальное управление на  $j$ -м шаге;  $C_{k,j}(Y_j)$  – стоимость расхода первичного энергоносителя, идущего на выработку пара, необходимого для производства электроэнергии при суммарной загрузке источников  $P_{Г}$ ;  $P_{Г}$  – суммарная мощность турбогенераторов, получающих пар от одного паропровода;  $C_{k,j}(Y_j)$  – стоимость расхода пара через отборы;  $n$  – число котлов на электростанции, подключенных к одному паропроводу;  $m$  – общее число различных видов первичных энергоносителей, используемых на рассматриваемой электростанции.

На функцию (4) накладываются независимые ограничения, обусловленные максимальной и минимальной выработкой котлоагрегатов, определяемых в соответствии с режимными картами, балансом производства пара каждым  $n$ -м котлом и его расходом на выработку электроэнергии, теплофикационную и производственную нагрузку, собственные нужды. Также учитываются зависимые ограничения на минимальное и максимальное значение давления в барабане котла и по минимальному и максимальному значению температуры питательной воды.

В общем виде эквивалентная модель котлоагрегата с числом  $m$  котлов на электростанции приведена в табл. 3. Разработанный алгоритм реализован в оригинальном программном продукте [23].

Результатом работы алгоритма являются рекомендации по оптимальному расположению генераторов в системе электроснабжения и вывод технико-экономических показателей: затрат на передачу мощности в сети, потери активной мощности в сети.

Таблица 3

Эквивалентная модель котла электростанции

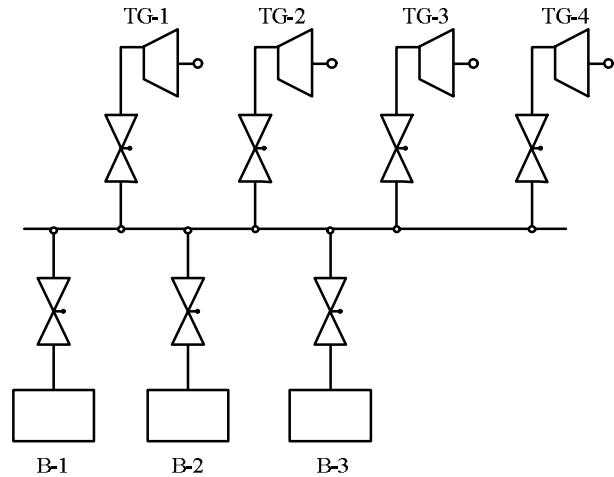
$D_{эkv(i+(i+m))}$ , Т/ч	$D_{эkv(i+(i+m))1}$	$D_{эkv(i+(i+m))2}$	...	$D_{эkv(i+(i+m))j}$
$B_{эkv(i+(i+m))}$ , М <sup>3</sup> /ч	$B_{эkv(i+(i+m))1}$	$B_{эkv(i+(i+m))2}$	...	$B_{эkv(i+(i+m))j}$
$S_{эkv(i+(i+m))}$ , руб./Т	$S_{эkv(i+(i+m))1}$	$S_{эkv(i+(i+m))2}$	...	$S_{эkv(i+(i+m))j}$
$D_i$ , Т/ч	$D_{i1}$	$D_{i2}$	...	$D_{ij}$
$B_i$ , М <sup>3</sup> /ч	$B_{i1}$	$B_{i2}$	...	$B_{ij}$
$B_{i+n}$ , М <sup>3</sup> /ч	$B_{(i+n)1}$	$B_{(i+n)2}$	...	$B_{(i+n)j}$
$S_i$ , руб./Т	$S_{i1}$	$S_{i2}$	...	$S_{ij}$
$D_{i+1}$ , Т/ч	$D_{(i+1)1}$	$D_{(i+1)2}$	...	$D_{(i+1)j}$
$B_{i+1}$ , М <sup>3</sup> /ч	$B_{(i+1)1}$	$B_{(i+1)2}$	...	$B_{(i+1)j}$
$B_{(i+1)+n}$ , М <sup>3</sup> /ч	$B_{((i+1)+n)1}$	$B_{((i+1)+n)2}$	...	$B_{((i+1)+n)j}$
$S_{i+1}$ , руб./Т	$S_{(i+1)1}$	$S_{(i+1)2}$	...	$S_{(i+1)j}$
...	...	...	...	...
$D_{i+m}$ , Т/ч	$D_{(i+m)1}$	$D_{(i+m)2}$	...	$D_{(i+m)j}$
$B_{i+m}$ , М <sup>3</sup> /ч	$B_{(i+m)1}$	$B_{(i+m)2}$	...	$B_{(i+m)j}$
$B_{(i+m)+n}$ , М <sup>3</sup> /ч	$B_{((i+m)+n)1}$	$B_{((i+m)+n)2}$	...	$B_{((i+m)+n)j}$
$S_{i+m}$ , руб./Т	$S_{(i+m)1}$	$S_{(i+m)2}$	...	$S_{(i+m)j}$

ПРИМЕР РАСЧЕТА

Рассмотрим построение эквивалентной модели на примере котлоагрегатов тепловой электростанции, структурная схема которой приведена на рисунке. На электростанции работают три энергетических котла, использующих один вид топлива, режимные карты котлов приведены в табл. 4.

В результате расчетов, механизм которых приведен в табл. 5 для котлов № 1 и 2, получаем их обобщенную модель на первом этапе эквивалентирования (табл. 6). А эквивалентная теплоэнергетическая модель электростанции приведена в табл. 7.

Используя эквивалентную модель котлоагрегатов электростанции, можно найти оптимальные загрузки котлов при любой необходимой суммарной заданной тепловой нагрузке электростанции. Например, если электростанции необходимо вырабатывать 30 т/ч свежего пара, то котел №1 необходимо загрузить на 10 т/ч, котел №2 – 8 т/ч, котел №3 – 12 т/ч. При этом для каждого из котлов определяются соответствующие расходы энергетических ресурсов, что позволяет определить затраты на выработку единицы свежего пара.



Структурная схема тепловой электростанции

Таблица 4

Расходные характеристики котлоагрегатов

Котел №1							
$D_1$ , Т/ч	10	11	12	13	14	15	16
$B_1$ , М <sup>3</sup> /ч	3	4	5	4	6	5	4
$S_1$ , руб./Т	1	2	3	4	5	6	7
Котел №2							
$D_2$ , Т/ч	5	6	7	8	9	10	
$B_2$ , М <sup>3</sup> /ч	4	3	5	7	6	7	
$S_2$ , руб./Т	2	1	4	3	3	4	
Котел №3							
$D_3$ , Т/ч	8	9	10	11	12	13	14
$B_3$ , М <sup>3</sup> /ч	5	6	4	5	7	6	8
$S_3$ , руб./Т	3	4	4	5	3	7	6

Таблица 5

Процесс расчета эквивалентной характеристики агрегатов №1 и 2

$D_{\text{ЭКВ1-2}}$ , Т/ч	$D_1+D_2$ , Т/ч	$З_{\text{ЭКВ1-2}}$ , руб./ч	$D_{\text{ЭКВ1-2}}$ , Т/ч	$D_1+D_2$ , Т/ч	$З_{\text{ЭКВ1-2}}$ , руб./ч
15	10+5	$10 \cdot 1 + 5 \cdot 2 = 20$	21	11+10	$11 \cdot 2 + 10 \cdot 4 = 62$
16	10+6	$10 \cdot 1 + 6 \cdot 1 = 16$		12+9	$12 \cdot 3 + 9 \cdot 3 = 63$
	11+5	$11 \cdot 2 + 5 \cdot 2 = 32$		13+8	$13 \cdot 4 + 8 \cdot 3 = 76$
17	10+7	$10 \cdot 1 + 7 \cdot 4 = 38$		14+7	$14 \cdot 5 + 7 \cdot 4 = 98$
	11+6	$11 \cdot 2 + 6 \cdot 1 = 28$		15+6	$15 \cdot 6 + 6 \cdot 1 = 96$
18	12+5	$12 \cdot 3 + 5 \cdot 2 = 46$		16+5	$16 \cdot 7 + 5 \cdot 2 = 122$
	10+8	$10 \cdot 1 + 8 \cdot 3 = 34$	12+10	$12 \cdot 3 + 10 \cdot 4 = 76$	
	11+7	$11 \cdot 2 + 7 \cdot 4 = 50$	13+9	$13 \cdot 4 + 9 \cdot 3 = 79$	
	12+6	$12 \cdot 3 + 6 \cdot 1 = 42$	14+8	$14 \cdot 5 + 8 \cdot 3 = 94$	
19	13+5	$13 \cdot 4 + 5 \cdot 2 = 62$	15+7	$15 \cdot 6 + 7 \cdot 4 = 118$	
	10+9	$10 \cdot 1 + 9 \cdot 3 = 37$	16+6	$16 \cdot 7 + 6 \cdot 1 = 118$	
	11+8	$11 \cdot 2 + 8 \cdot 3 = 46$	13+10	$13 \cdot 4 + 10 \cdot 4 = 92$	
20	12+7	$12 \cdot 3 + 7 \cdot 4 = 64$	14+9	$14 \cdot 5 + 9 \cdot 3 = 97$	
	13+6	$13 \cdot 4 + 6 \cdot 1 = 58$	15+8	$15 \cdot 6 + 8 \cdot 3 = 114$	
	14+5	$14 \cdot 5 + 5 \cdot 2 = 80$	16+7	$16 \cdot 7 + 7 \cdot 4 = 140$	
	10+10	$10 \cdot 1 + 10 \cdot 4 = 50$	14+10	$14 \cdot 5 + 10 \cdot 4 = 110$	
20	11+9	$11 \cdot 2 + 9 \cdot 3 = 49$	15+9	$15 \cdot 6 + 9 \cdot 3 = 117$	
	12+8	$12 \cdot 3 + 8 \cdot 3 = 60$	16+8	$16 \cdot 7 + 8 \cdot 3 = 136$	
	13+7	$13 \cdot 4 + 7 \cdot 4 = 80$	15+10	$15 \cdot 6 + 10 \cdot 4 = 130$	
	14+6	$14 \cdot 5 + 6 \cdot 1 = 76$	16+9	$16 \cdot 7 + 9 \cdot 3 = 139$	
	15+5	$15 \cdot 6 + 5 \cdot 2 = 100$	26	16+10	$16 \cdot 7 + 10 \cdot 4 = 152$

Таблица 6

Эквивалентная расходная характеристика агрегатов №1 и 2

$D_{\text{ЭКВ1-2}}$ , Т/ч	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
$B_{\text{ЭКВ1-2}}$ , М <sup>3</sup> /ч	7	6	7	10	9	10	11	12	11	13	12	11
$S_{\text{ЭКВ1-2}}$ , руб./Т	1,5	1	1,5	2	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5
$D_1$ , Т/ч	10	10	11	10	10	11	11	12	13	14	15	16
$B_1$ , М <sup>3</sup> /ч	3	3	4	3	3	4	4	5	4	6	5	4
$S_1$ , руб./Т	1	1	2	1	1	2	2	3	4	5	6	7
$D_2$ , Т/ч	5	6	6	8	9	9	10	10	10	10	10	10
$B_2$ , М <sup>3</sup> /ч	4	3	3	7	6	6	7	7	7	7	7	7
$S_2$ , руб./Т	2	1	1	3	3	3	4	4	4	4	4	4

Таблица 7

Эквивалентная расходная характеристика агрегатов №1-2 и 3

$D_{\text{ЭКВ123}}$ , Т/ч	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
$B_{\text{ЭКВ123}}$ , М <sup>3</sup> /ч	12	11	12	10	14	13	14	17	16	17	18	19	18	20	19	18	20	19
$S_{\text{ЭКВ123}}$ , руб./Т	2	1,7	2	2	2	1,7	2	2,3	2,3	2,7	3	3,3	3,7	4	4,3	4,7	5,3	5,7
$D_{\text{ЭКВ1-2}}$ , Т/ч	15	16	17	16	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	25	26
$B_{\text{ЭКВ1-2}}$ , М <sup>3</sup> /ч	7	6	7	6	7	6	7	10	9	10	11	12	11	13	12	11	12	11
$S_{\text{ЭКВ1-2}}$ , руб./Т	1,5	1	1,5	1	1,5	1	1,5	2	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	5	5,5
$D_1$ , Т/ч	10	10	11	10	10	10	11	10	10	11	11	12	13	14	15	16	15	16
$B_1$ , М <sup>3</sup> /ч	3	3	4	3	3	3	4	3	3	4	4	5	4	6	5	4	5	4
$S_1$ , руб./Т	1	1	2	1	1	1	2	1	1	2	2	3	4	5	6	7	6	7
$D_2$ , Т/ч	5	6	6	6	5	6	6	8	9	9	10	10	10	10	10	10	10	10
$B_2$ , М <sup>3</sup> /ч	4	3	3	3	4	3	3	7	6	6	7	7	7	7	7	7	7	7
$S_2$ , руб./Т	2	1	1	1	2	1	1	3	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4
$D_3$ , Т/ч	8	8	8	10	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	14	14
$B_3$ , М <sup>3</sup> /ч	5	5	5	4	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	8	8
$S_3$ , руб./Т	3	3	3	4	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	6	6

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе приведен подход по построению технико-экономической модели промышленных тепловых электростанций.

Модель позволяет учитывать эксплуатационные характеристики оборудования, а также их остаточный ресурс. Кроме того, модель электростанции разработана с целью определения оптимальных нагрузок котлоагрегатов, а также экономически целесообразный состав топливной смеси.

Разработанный подход предназначен для диспетчерских служб электростанций и в целом для систем электроснабжения промышленного предприятия с целью планирования и оперативного управления нормальными, ремонтными и послеаварийными режимами работы электростанций.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. C. Wang, G. Yao, X. Wang, Y. Zheng, L. Zhou, Q. Xu and X. Liang, "Reactive power optimization based on particle swarm optimization algorithm in 10 kV distribution network," in *Advances in Swarm Intelligence*, 2011, pp. 157-164.
2. D. Yang, "Particle swarm optimization algorithm for the application of reactive power optimization problem," in *Lecture Notes in Electrical Engineering*, 2012, pp. 625-631.
3. Sosnina E.N., Shalukho A.V., Lipuzhin I.A., Kechkin A.Y. and Voroshilov A.A. "Optimization of Virtual Power Plant Topology with Distributed Generation Sources," *2018 International Conference and Utility Exhibition on Green Energy for Sustainable Development (ICUE)*, Phuket, Thailand, 2018, pp. 1-7, doi: 10.23919/ICUE-GESD.2018.8635749.
4. Varganova A.V., Malafeev A.V. "Energy-efficient distribution of heat between the boiler units of industrial power plants with the use of computers," *Power Technology and Engineering*, 2018, no. 52, vol. 1, pp. 74-78.
5. Gazizova O.V., Varganova A.V. and Malafeev A.V. "Steady-State Stability of Industrial Distributed Generation Sources in Terms of Optimization of Their Active and Reactive Power Loading," *2018 International Ural Conference on Green Energy (UralCon)*, Chelyabinsk, 2018, pp. 187-192, doi: 10.1109/URALCON.2018.8544371.
6. Puttgen H.B. and Jansen J.F. "An expert system for the design of a power plant electrical auxiliary system," in *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 3, no. 1, pp. 254-261, Feb. 1988, doi: 10.1109/59.43208.
7. Варганова А.В. О методах оптимизации режимов работы электроэнергетических систем и сетей // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2017. Т. 17. № 3. С. 76-85.
8. Dzobo O. "Virtual power plant energy optimisation in smart grids," *2019 Southern African Universities Power Engineering Conference/Robotics and Mechatronics/Pattern Recognition Association of South Africa (SAUPEC/RobMech/PRASA)*, Bloemfontein, South Africa, 2019, pp. 714-718.
9. Siqing Lu, E. Swidenbank and B.W. Hogg, "Power Plant Analyser-an applied MATLAB Toolbox", *IEE Colloquium on Applied Control Techniques Using MATLAB*, London, UK, 1995, pp. 11/1-11/4, doi: 10.1049/ic:19950062.
10. M.S. Donne, A.W. Pike and R. Savry, "Application of modern methods in power plant simulation and control," in *Computing & Control Engineering Journal*, vol. 12, no. 2, pp. 75-84, April 2001, doi: 10.1049/cce:20010205.
11. Yuanhang Dai, Lei Chen, Yong Min, Qun Chen, Kang Hu, Junhong Hao, Yiwei Zhang, Fei Xu, "Dispatch Model of Combined Heat and Power Plant Considering Heat Transfer Process", *Sustainable Energy IEEE Transactions on*, vol. 8, no. 3, pp. 1225-1236, 2017.
12. Chaoqun Sheng, Nian Liu, Xiyuan Ma, Changcheng Zhou, Jiahao Han, "Probabilistic Production Simulation for Industrial Integrated Energy System with Power and Steam Loads", *Energy Internet and Energy System Integration (EI2) 2018 2nd IEEE Conference on*, pp. 1-5, 2018.
13. Погодин А.А. Распределенная генерация в схемах электроснабжения промышленного производства // Ростовский научный журнал. 2018. №12. С. 374-381.
14. Илюшин П.В. Анализ особенностей сетей внутреннего электроснабжения промышленных предприятий с объектами распределенной генерации // Энергетик. 2016. №12. С. 21-25.
15. Бондаренко Л.В. Методы и модели управления материальными запасами топлива на тепловых электростанциях // Известия ТРТУ. 2006. № 15 (70). С. 119-122.
16. Крохин Г.Д., Шалин А.И. Нечеткие модели отказов энергоустановок тепловых электростанций // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. 2006. № 2 (23). С. 135-149.
17. Чубаров К.М., Сенько Н.В. Исследование последствий крупных технологических аварий на тепловых станциях // Современные научные исследования и разработки. 2017. №2(10). С. 436-437.
18. Осика Л.К., Журавлёв В.С. Требования к виртуальным моделям тепловых электростанций и инструментам их создания // Электрические станции. 2014. №1(990). С. 2-8.
19. Осика Л.К., Журавлёв В.С. Виртуальное моделирование как единый инструмент управления жизненным циклом тепловых электростанций // Электрические станции. 2013. № 4 (981). С. 2-10.
20. Мерзликина Е.И., Щедеркина Т.Е. Генетический алгоритм оптимизации в задаче распределения нагрузки тепловой электростанции // Вестник Московского энергетического института. Вестник МЭИ. 2018. № 1. С. 22-28.
21. Варганова А.В. Алгоритм внутростанционной оптимизации режимов работы котлоагрегатов и турбогенераторов промышленных электростанций // Промышленная энергетика. 2018. № 1. С. 17-22.
22. Варганов Д.Е., Варганова А.В. Расчет себестоимости свежего пара на крупных тепловых промышленных электростанциях // Электротехнические системы и комплексы. 2016. № 1 (30). С. 24-28.
23. А.с. 2019618397 Российская Федерация, КАТРАН-OptActivePower / Варганова А.В., Малафеев А.В.; заявитель ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». № 2019616954; заявл. 07.06.2019; опубл. 01.07.2019.

Поступила в редакцию 30 июня 2020 г.

## INFORMATION IN ENGLISH

## THERMAL POWER MODEL OF INDUSTRIAL POWER PLANTS

Aleksandra V. Varganova

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Industrial Electric Power Supply Department, Power Engineering and Automated Systems Institute, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: aleksandra-khlamova@yandex.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4675-7511>.

The paper presents an approach to the development of a heat and power model of industrial power plants. This algorithm is based on dynamic programming and modified sequential

equivalence methods. The combination of the proposed methods is distinguished by the possibility of constructing models in a tabular form taking into account constraints in the form of equalities and

inequalities. In addition, models can have points of discontinuities. The main criterion for optimization is the minimum of total costs for the primary energy carrier taking into account the costs of in-house needs and the wages fund. When constructing an equivalent model, technical and economic models of boiler units are used as initial data, which represent the dependence of the boiler steam output on the prime cost of live steam taking into account the fuel consumption for the production of 1 ton of live steam and possible volumes of energy resources in the fuel mixture of the boiler (for example, a mixture of blast furnace and natural gases). The equivalent model allows for the required steam capacity (taking into account the heating and production withdrawals) of the power plant to determine the optimal load of the boilers in terms of thermal power and, corresponding to them, the primary fuel consumption, as well as the costs of it. When constructing the model, the operational characteristics of the boilers are taken into account, namely, the temperature of the feed water and the steam pressure in the drum. A distinctive feature of the thermal power plant model is the consideration of all possible fuel ratios when searching for the optimal value of the power plant steam capacity. The developed algorithm is implemented in the original KATRAN-OptHeatPower software product intended for planning and making operational decisions in the management of normal, repair and post-emergency modes of industrial thermal power plants.

**Keywords:** technical and economic model, energy boiler, energy resource, turbine generator, local power plant, power supply system, industrial plant.

REFERENCES

1. C. Wang, G. Yao, X. Wang, Y. Zheng, L. Zhou, Q. Xu and X. Liang, "Reactive power optimization based on particle swarm optimization algorithm in 10 kV distribution network," in *Advances in Swarm Intelligence*, 2011, pp. 157-164.
2. Yang D. "Particle swarm optimization algorithm for the application of reactive power optimization problem," in *Lecture Notes in Electrical Engineering*, 2012, pp. 625-631.
3. Sosnina E.N., Shalukho A.V., Lipuzhin I.A., Kechkinand A.Y., Voroshilov A.A. "Optimization of Virtual Power Plant Topology with Distributed Generation Sources," *2018 International Conference and Utility Exhibition on Green Energy for Sustainable Development (ICUE)*, Phuket, Thailand, 2018, pp. 1-7, doi: 10.23919/ICUE-GESD.2018.8635749.
4. Varganova A.V., Malafeev A.V. "Energy-efficient distribution of heat between the boiler units of industrial power plants with the use of computers," *Power Technology and Engineering*, 2018, no. 52, vol. 1, pp. 74-78.
5. Gazizova O.V., Varganova A.V. and Malafeev A.V. "Steady-State Stability of Industrial Distributed Generation Sources in Terms of Optimization of Their Active and Reactive Power Loading," *2018 International Ural Conference on Green Energy (UralCon)*, Chelyabinsk, 2018, pp. 187-192, doi: 10.1109/URALCON.2018.8544371.
6. H.B. Puttgen and J.F. Jansen, "An expert system for the design of a power plant electrical auxiliary system," in *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 3, no. 1, pp. 254-261, Feb. 1988, doi: 10.1109/59.43208.
7. Varganova A.V. About Optimization Methods of Power Supply System and Network Modes *Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Energetika* [Bulletin of South Ural State University. Series "Power Engineering"], 2017, vol. 17, no. 3, pp. 76-85. (In Russian)
8. Dzobo O. "Virtual power plant energy optimisation in smart grids" *2019 Southern African Universities Power Engineering Conference/Robotics and Mechatronics/Pattern Recognition Association of South Africa (SAUPEC/RobMech/PRASA)*, Bloemfontein, South Africa, 2019, pp. 714-718.
9. Siqing Lu, E. Swidenbank and B.W. Hogg, "Power Plant Analyser-an applied MATLAB Toolbox," *IEE Colloquium on Applied Control Techniques Using MATLAB*, London, UK, 1995, pp. 11/1-11/4, doi: 10.1049/ic:19950062.
10. Donne M.S., Pike A.W. and Savry R., "Application of modern methods in power plant simulation and control," in *Computing & Control Engineering Journal*, vol. 12, no. 2, pp. 75-84, April 2001, doi: 10.1049/cce:20010205.
11. Yuanhang Dai, Lei Chen, Yong Min, Qun Chen, Kang Hu, Junhong Hao, Yiwei Zhang, Fei Xu, "Dispatch Model of Combined Heat and Power Plant Considering Heat Transfer Process", *Sustainable Energy IEEE Transactions on*, vol. 8, no. 3, pp. 1225-1236, 2017.
12. Chaoqun Sheng, Nian Liu, Xiyuan Ma, Changcheng Zhou, Jiahao Han, "Probabilistic Production Simulation for Industrial Integrated Energy System with Power and Steam Loads", *Energy Internet and Energy System Integration (EI2) 2018 2nd IEEE Conference on*, pp. 1-5, 2018.
13. Pogodin A.A. Distributed Generation in Power Supply Schemes for Industrial Production. *Rostovskiy nauchnyy zhurnal* [Rostov Scientific Journal], 2018, no. 12, pp. 374-381. (In Russian)
14. Ilyushin P.V. Analysis of the peculiarities of internal power supply networks of industrial enterprises with distributed generation facilities. *Energetik* [Power engineer], 2016, no. 12, pp. 21-25. (In Russian)
15. Bondarenko L.V. Methods and models of fuel inventory management at thermal power plants. *Izvestia TRTU* [Proceedings of TRTU], 2006, no. 15 (70), pp. 119-122. (In Russian)
16. Krokhin G.D., Shalin A.I. Fuzzy models of failures of power plants of thermal power plants. *Nauchnyy vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Scientific Bulletin of Novosibirsk State Technical University], 2006, no. 2 (23), pp. 135-149. (In Russian)
17. Chubarov K.M., Senko N.V. Investigation of the consequences of major technological accidents at thermal power plants. *Sovremennye nauchnye issledovaniya i razrabotki* [Modern research and development], 2017, no. 2 (10), pp. 436-437. (In Russian)
18. Osika L.K., Zhuravlev V.S. Requirements for virtual models of thermal power plants and tools for their creation. *Elektricheskie stantsii* [Power Technology and Engineering], 2014, no. 1 (990), pp. 2-8. (In Russian)
19. Osika L.K., Zhuravlev V.S. Virtual modeling as a single tool for managing the life cycle of thermal power plants. *Elektricheskie stantsii* [Power Technology and Engineering], 2013, no. 4 (981), pp. 2-10. (In Russian)
20. Merzlikina E.I., Shchederkina T.E. Genetic algorithm of optimization in the problem of load distribution of a thermal power plant. *Vestnik Moskovskogo energeticheskogo instituta. Vestnik MEI* [Bulletin of Moscow Energy Institute. MEI Bulletin], 2018, no. 1, pp. 22-28. (In Russian)
21. Varganova A.V. Algorithm for in-plant optimization of operating modes of boiler units and turbine generators of industrial power plants. *Promyshlennaya energetika* [Industrial energy], 2018, no. 1, pp. 17-22. (In Russian)
22. Varganov D.E., Varganova A.V. Cost Calculation of Working Steam in Terms of Industrial Thermal Power Stations. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical systems and complexes], 2016, no. 1 (30), pp. 24-28. (In Russian)
23. Varganova A.V., Malafeev A.V. *KATRAN-OptActivePower* [KATRAN-OptActivePower]. Software RF, no. 2019618397, 2019.

Варганова А.В. Теплоэнергетическая модель промышленных электростанций // *Электротехнические системы и комплексы*. 2020. № 3(48). С. 11-16. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-3\(48\)-11-16](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-3(48)-11-16)

Varganova A.V. Thermal Power Model of Industrial Power Plants. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2020, no. 3(48), pp. 11-16. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-3\(48\)-11-16](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-3(48)-11-16)