

## ВРАХУВАННЯ ОБМЕЖЕНЬ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ СИСТЕМ РЕГУЛЮВАННЯ ЕНЕРГОБЛОКІВ ТЕС і АЕС

Ковриго Ю.М., Фоменко Б.В.

Підвищення ефективності, надійності і безпеки функціонування ТЕС та АЕС пов'язане з удосконаленням систем керування технологічними процесами енергоблоків. На передній план висувуються високі вимоги до точності регулювання технологічних параметрів в умовах постійно діючих збурень, обумовлених зміною навантаження і умов експлуатації, нестабільністю характеристик технологічних об'єктів керування. Підвищення точності керування технологічними процесами в свою чергу дає можливість підвищити якість функціонування енергоблоків в стаціонарних і перехідних режимах, зниження частоти їх зупинок внаслідок спрацьовування блокувань та захистів, підвищення надійності і безпеки експлуатації ТЕС та АЕС.

Одним із перспективних напрямків підвищення ефективності АСУТП теплоенергетичних процесів є використання нових структур систем регулювання. Удосконалення таких схем шляхом доповнення контурами підстройки параметрів в режимі нормальної експлуатації та в перехідних режимах дозволить суттєво підвищити якість регулювання і розширити область використання.

В системах автоматичного керування використовуються регулюючі органи та виконавчі механізми, які обмежені по амплітуді та/або швидкості наростання сигналу. Нехтування цією особливістю може призвести до серйозних погіршень у випадках, коли вхідний сигнал досягає цих обмежень. Одним загальним наслідком ситуації, в якій вхідний сигнал попадає в межі насичення є випадок, коли інтегратор в регуляторі продовжує інтегрувати в той час, коли вхідний сигнал обмежений. Це означає, що значення командного сигналу регулюючого блоку може досягнути неприпустимо високої величини, що призведе до поганої перехідної реакції. Величина інтегральної складової ПІ- або ПІД- регулятора пропорційна площині, яка обмежена перехідною характеристикою  $y(t)$  і заданим значенням  $y^*(t)$ . Якщо сигнал похибки  $e = y^*(t) - y(t)$  додатний, інтегральний член буде зростати, та навпаки. Доки керуючий сигнал необмежений, насичення відсутнє. Якщо керуючий сигнал обмежений, реакція стає більш повільною і інтегральна частина збільшується доти, доки похибка не змінить знак. Після зміни знаку сигналу похибки керуючий сигнал  $u(t)$  залишається великим та додатним на протязі тривалого часу, що призводить до значного перерегулювання по  $y(t)$  та до збільшення часу регулювання [1].

До методів врахування обмежень відносяться алгоритми умовного інтегрування, компенсації інтегрального насичення та модельного прогнозуючого керування.

Метод умовного інтегрування полягає в вимиканні інтегратора при визначених умовах. В межах цього методу можна виділити чотири алгоритми, а саме, коли:

- інтегральна складова обмежена заздалегідь встановленим значенням;
- інтегратор зупиняється, коли похибка більша, ніж заздалегідь визначена границя, коли вихідна величина далеко від сигналу завдання;
- інтегратор зупиняється, коли насичується керуюча змінна, коли  $u \neq \hat{u}$ ;
- інтегратор зупиняється, коли насичується керуюча змінна, і похибка керування і сигнал керування мають той же знак, тобто коли  $u \cdot e > 0$ .

Техніка компенсації інтегрального насичення може використовуватись в системах, в яких ефективно використовуються стандартні алгоритми регулювання, і можлива проста реалізація за рахунок використання стандартних блоків в програмному забезпеченні про-

мислових контролерів. Методика розробки систем автоматичного керування з компенсацією інтегрального насичення зводиться до наступної процедури [2]:

- 1). Розробити систему автоматичного керування припускаючи, що лінеаризована модель адекватно відображає динаміку реальної замкнутої системи;
- 2). Додатковий нелінійний зворотній зв'язок розробляється з метою покращення реакції доти, доки не будуть виконані вимоги до системи. Загальний вигляд системи керування та регулятора з компенсацією інтегрального насичення показаний на рис. 1, 2, більш детально ці алгоритми розглянуті в [3].

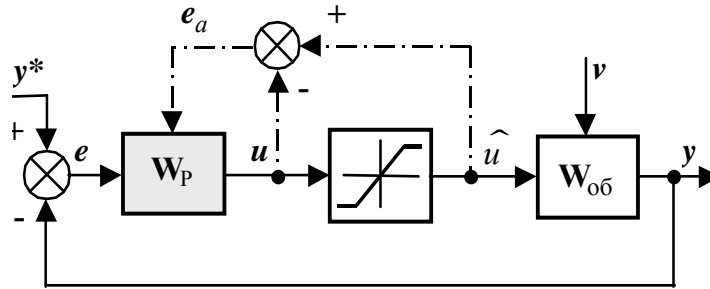


Рис. 1 Система керування з компенсацією інтегрального насичення

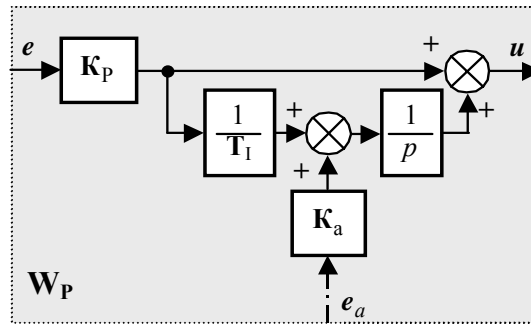


Рис. 2 Структура регулятора з компенсацією інтегрального насичення

Рівняння для регулятора з компенсацією інтегрального насичення:

$$u(p) = K_p e(p) + \frac{K_p}{T_i p} e(p) + \frac{K_a}{p} (\hat{u}(p) - u(p)) = \frac{(T_i p + 1) K_p e(p) + K_a T_i \hat{u}(p)}{T_i p + T_i K_a}$$

Якщо  $K_a = \frac{1}{T_i}$ ,  $u(p) = K_p e(p) + \frac{1}{T_i p + 1} \hat{u}(p)$

Для врахування вихідних обмежень (рис. 3) система, що представлена на рис. 1, може бути модифікована:

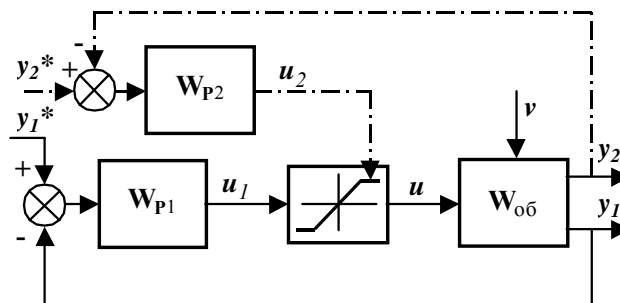


Рис. 3 Система керування з врахуванням вихідних обмежень

Інший клас стратегій, пов'язаних з обмеженнями – алгоритми модельного прогнозуючого керування. Основна ідея цих алгоритмів полягає в тому, щоб сформулювати задачу проектування регулятора як задачу оптимізації в реальному масштабі часу, що вирішується при умові заданих жорстких обмежень. До переваг використання модельного

прогнозуючого керування можна віднести: можливість керування багатомірними і багато-зв'язними об'єктами зі складною структурою, що враховують нелінійності; оптимізація в реальному часі при обмеженнях на керуючі та керовані змінні; враховування невизначеності в завданні об'єктів і збурень; враховування транспортного запізнення та зміну критеріїв якості в ході процесу.

Алгоритм для модельного прогнозуючого керування наступний [4]:

1. Прогнозуюче керування на деякому інтервалі часу розраховується за математичною моделлю об'єкта;
2. Використовується оптимізація керування, метою якого служить наближення керованих змінних прогнозуючої моделі до відповідних сигналів завдання на горизонті прогнозу;
3. На кроці розрахунку реалізовується знайдене оптимальне керування і здійснюється вимір фактичного стану об'єкта на кінець кроку;
4. Горизонт прогнозу переміщується на крок вперед, і пункти 1-3 послідовності повторюються. Ілюстрація методу модельного прогнозуючого керування представлена на рис. 4.

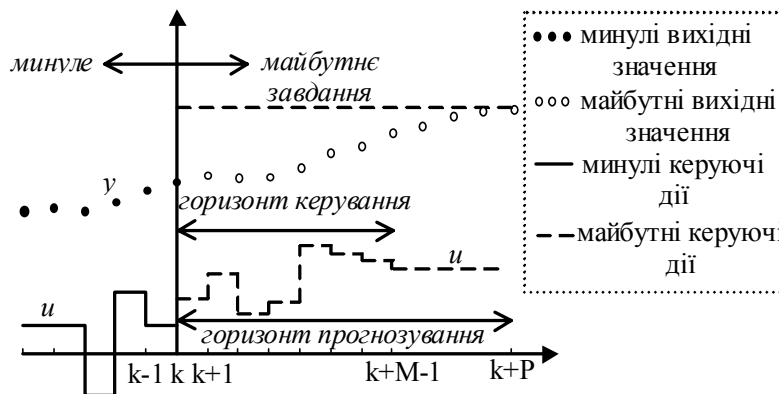


Рис. 4 Графічне представлення модельного прогнозуючого керування

Вищезазначена схема може бути об'єднана з попереднім проведенням ідентифікації рівнянь моделі, які використовуються для прогнозу. Підхід передбачає мінімізацію функціоналу, що характеризує якість процесу керування, в режимі реального часу, тому для роботи в реальному масштабі часу необхідно, щоб вирішення оптимізаційної задачі здійснювалось в межах допустимого запізнення.

Більш детально розглянемо в математичному вигляді вищезазначені кроки 1 та 2.

*Крок 1.* Знаходимо прогнозований вихід процесу за моделлю, що представлена у вигляді передатної функції [5]. Номінальна модель дана у вигляді:

$$a(z)y_k = b(z)u_k \quad (1.1)$$

Тоді якщо  $A(z) = a(z)\Delta(z)$ , то різницева форма рівняння

$$A(z)y_k = b(z)\Delta u_k \quad (1.2)$$

Визначимо  $A(z)$ ,  $b(z)$ , якщо  $b_0 = 0$

$$\begin{aligned} A(z) &= 1 + A_1z^{-1} + A_2z^{-2} + \dots + A_{n+1}z^{-n-1} \\ b(z) &= b_1z^{-1} + b_2z^{-2} + \dots + b_nz^{-n} \end{aligned} \quad (1.3)$$

Для прогнозування на 1 крок вперед запишемо різницеве рівняння для (1.1)

$$y_{k+1} = -A_1y_k - \dots - A_{n+1}y_{k-n} + b_1\Delta u_k + \dots + b_{n-1}\Delta u_{k-n+1} \quad (1.4)$$

Виділимо компоненти, які є відомими, і компоненти, які залежать від ступеня свободи d.o.f. (приріст майбутніх керуючих дій)

$$y_{k+1} = \underbrace{-[A_1, \dots, A_{n+1}]y}_{\leftarrow k \text{ відомі}} + \underbrace{[b_2, \dots, b_n]\Delta u}_{\leftarrow k-1} + \underbrace{b_1\Delta u_k}_{d.o.f.} \quad (1.5)$$

Для прогнозування на багато кроків вперед розраховуємо  $y_{k+1}$ , підставляємо в (1.5) на кроці  $k+2$ , щоб отримати  $y_{k+2}$ , використовуємо прогнозування на 2 кроки вперед для розрахунку  $y_{k+3}$ , і т.д. В результаті отримуємо:

$$\underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 \\ A_1 & 1 & \cdots & 0 \\ A_2 & A_1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix}}_{C_A} \underbrace{\begin{bmatrix} y_{k+1} \\ y_{k+2} \\ \vdots \\ y_{k+n_y} \end{bmatrix}}_{\underline{y}_{\rightarrow k}} + \underbrace{\begin{bmatrix} A_1 & A_2 & \cdots & A_{n+1} \\ A_2 & A_3 & \cdots & 0 \\ A_3 & A_4 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix}}_{H_A} \underbrace{\begin{bmatrix} y_k \\ y_{k-1} \\ \vdots \\ y_{k-n} \end{bmatrix}}_{\underline{y}_{\leftarrow k}} = \quad (1.6)$$

$$= \underbrace{\begin{bmatrix} b_1 & 0 & \cdots & 0 \\ b_2 & b_1 & \cdots & 0 \\ b_3 & b_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix}}_{C_{zb}} \underbrace{\begin{bmatrix} \Delta u_k \\ \Delta u_{k+1} \\ \vdots \\ \Delta u_{k+n_y-1} \end{bmatrix}}_{\underline{\Delta u}_{\rightarrow k-1}} + \underbrace{\begin{bmatrix} b_2 & b_3 & \cdots & b_n \\ b_3 & b_4 & \cdots & 0 \\ b_4 & b_5 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix}}_{H_{zb}} \underbrace{\begin{bmatrix} \Delta u_{k-1} \\ \Delta u_{k-2} \\ \vdots \\ \Delta u_{k-n+1} \end{bmatrix}}_{\underline{\Delta u}_{\leftarrow k-1}}$$

Знаходимо прогнозований вихід із виразу (1.6)

$$\underline{y}_k = H \underline{\Delta u}_{k-1} + P \underline{\Delta u}_{k-1} + Q \underline{y}_k \quad (1.7)$$

де  $H = C_A^{-1} C_{zb}$ ,  $P = C_A^{-1} H_{zb}$ ,  $Q = -C_A^{-1} H_A$

Крок 2. Далі приведемо послідовність дій, необхідних для розрахування закону керування.

Запишемо функціонал:

$$J = \|\underline{r} - \underline{y}\|_2^2 + \lambda \|\underline{\Delta u}\|_2^2 \quad (1.8)$$

Підставимо (1.7) в (1.8):

$$J = \|\underline{r} - H \underline{\Delta u} - P \underline{\Delta u} - Q \underline{y}\|_2^2 + \lambda \|\underline{\Delta u}\|_2^2 \quad (1.9)$$

Розгорнувши рівняння (1.9), отримуємо:

$$\min_{\underline{\Delta u}} J = \underline{\Delta u}^T (H^T H + \lambda I) \underline{\Delta u} + 2 \underline{\Delta u}^T H^T [P \underline{\Delta u} + Q \underline{y} - \underline{r}] + k \quad (1.10)$$

$k = \|\underline{r} - P \underline{\Delta u} - Q \underline{y}\|_2^2$  містить параметри, що не залежать від  $\underline{\Delta u}$ , тому далі не враховуються.

Всі обмеження можна об'єднати і записати у вигляді системи лінійних нерівностей:

$$C \underline{\Delta u} - d_k \leq 0 \quad (1.11)$$

де

$$C = \begin{bmatrix} I \\ -I \\ C_{I/\Delta} \\ -C_{I/\Delta} \\ H \\ -H \end{bmatrix}; \quad d = \begin{bmatrix} \overline{\Delta U} \\ -\underline{\Delta U} \\ \overline{U} - L u_{k-1} \\ -\underline{U} - L u_{k-1} \\ \overline{Y} - Q \underline{\Delta u} - P \underline{y} \\ -\underline{Y} - Q \underline{\Delta u} - P \underline{y} \end{bmatrix}, \quad C_{I/\Delta} = \begin{bmatrix} I & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ I & I & 0 & \cdots & 0 \\ I & I & I & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ I & I & I & \vdots & I \end{bmatrix}, \quad L = \begin{bmatrix} I \\ I \\ \vdots \\ I \end{bmatrix}, \quad \begin{matrix} \underline{\Delta U} \leq \underline{\Delta u} \leq \overline{\Delta U} \\ \underline{U} \leq u \leq \overline{U} \\ \underline{Y} \leq y \leq \overline{Y} \end{matrix}$$

$I$  - одинична матриця.

Для оптимізації керування використовується вираз (1.10) та обмеження (1.11). Таким чином, для знаходження оптимального керування необхідно розв'язати задачу квадратичного програмування:

$$\min_{\Delta \underline{u}} J = \Delta \underline{u}^T S \Delta \underline{u} + 2 \Delta \underline{u}^T f \quad (1.12)$$

$$C \Delta \underline{u} - d_k \leq 0, \text{ де } S = H^T H + \lambda I, f = [P \Delta \underline{u} + Q y - r]$$

В системах автоматичного керування теплоенергетичними процесами зазвичай використовуються ПІ- та ПІД- закони регулювання, які не завжди задовольняють вимогам до якості регулювання складними системами. Навіть, якщо при розробці та моделюванні системи автоматичного керування без врахування обмежень були знайдені оптимальні параметри регулятора, то в реальних умовах ці настройки призведуть до не найкращого перехідного процесу. До того ж відомо, що динамічні властивості об'єкта керування змінюються в часі при зміні режимів роботи і це може викликати необхідність підстроювання АСР у процесі експлуатації.

Таким чином, виникає необхідність підвищення ефективності існуючих ПІ- та ПІД- регуляторів за рахунок маловитратної модернізації та з використанням нових принципів при розробці систем автоматичного керування теплоенергетичними процесами. В статті розглядається розробка систем автоматичного керування з використанням алгоритмів регулювання з врахуванням обмежень і надаються рекомендації щодо їх реалізації.

Робота вищезазначених алгоритмів розглядалась на прикладі системи автоматичного регулювання теплового навантаження котла ТПП-210А. В якості структури АСР теплового навантаження була обрана триконтурна схема, яка детально описана в роботі з маловитратної модернізації котла ТПП-210 А [6].

Система пиліподачі котла в умовах експлуатації підлягає дії багатьох керуючих і збурюючих впливів, до яких можна віднести зміни подачі палива і первинного повітря, якість палива, режим роботи системи пиліприготування, характер витікання пилу з бункера та ін. Ці збурення мають випадковий характер і впливають на рівномірність розподілу палива по пальниках, і стабілізацію пиліподачі в часі, що призводить до зміни експлуатаційних показників котла, що визначають надійність та економічність його роботи. Враховуючи вищезазначене, висуваються підвищені вимоги до якості регулювання теплового навантаження.

Моделювання та дослідження АСР теплового навантаження проводились з використанням мови програмування пакету Matlab та середовища Simulink.

Дослідження алгоритмів умовного інтегрування на прикладі вищезазначеної системи дали наступні результати. Перші два алгоритми мають недолік – вони можуть впливати на статичну похибку. Насправді, в першу чергу обмеження на інтегральну складову не повинні перешкоджати досягненню заданого значення. Також необхідно уникнути залипання регулятора на такому значенні, при якому похибка керування все ще більша, ніж граничне значення. Виходить, що обидва методи потребують використання додаткових параметрів, які обираються з вимогою забезпечення компромісного рішення між необхідністю уникнути насичення інтегратора та необхідністю забезпечити нульову статичну похибку. Можна уникнути цих проблем, якщо використовувати 3 та 4 алгоритм. Але відносно третього алгоритму, четвертий має велику перевагу, яка полягає в тому, що інтегратор не зупиняється, щоб допомогти увести керуючий сигнал від насичення. Перехідні процеси з використанням 4-го алгоритму умовного інтегрування в порівнянні з алгоритмом компенсації інтегрального насичення майже не відрізняються, тому результати в таблиці приводяться тільки для одного алгоритму.

Далі дослідження проводились за наступною схемою: 1 - в системи були введені обмеження на керуючий вплив, 2 - за рахунок використання алгоритмів компенсації інтегрального насичення були покращені перехідні процеси, 3 - для регулювання вищезазначених параметрів було використане модельне прогноуюче керування з обмеженнями. Отримані результати були зведені в табл. 1.

Також було проведене моделювання АСР теплового навантаження з врахуванням вихідних обмежень. Результати – зменшується динамічна похибка, але час регулювання майже не зменшується.

Таблиця 1

Вид АСР	АСР теплового навантаження			
	Збурення-вихід		Завдання-вихід	
	$\Delta_{дин}$	$T_{рег}, с.$	$\Pi, \%$	$T_{рег}, с.$
1. АСР з обмеженнями	1,13	2800	8	2950
2. АСР з алгоритмом компенсації інтегрального насичення	1,1	1520	8	1670
3. АСР з модельним прогнозуючим керуванням	0,88	750	1	500

Як видно з табл. 1, використання алгоритмів компенсації інтегрального насичення та модельного прогнозуючого керування значно покращують якість регулювання, а саме – зменшують динамічну похибку  $\Delta_{дин}$ , перерегулювання  $\Pi$  та час регулювання  $T_{рег}$ .

З використанням алгоритму компенсації інтегрального насичення в порівнянні з ПІД-законом регулювання зменшились: динамічна похибка на 12%; час регулювання на 45%. З використанням алгоритму МПК з обмеженнями в порівнянні з ПІД-законом регулювання зменшились: динамічна похибка на 22%; перерегулювання на 88%; час регулювання на 73% (збурення-вихід) та 83% (завдання-вихід).

Враховуючи результати досліджень, можна зробити наступні рекомендації по використанню алгоритмів для підвищення якості функціонування систем автоматичного керування теплоенергетичними процесами.

Алгоритми умовного інтегрування та компенсації інтегрального насичення слід використовувати:

1). В системах, де стандартні ПІ- та ПІД-регулятори задовольняють вимогам регулювання;

2). З алгоритмами автопідстройки.

Модельне прогнозуюче керування слід застосовувати:

1). Коли використання стандартного ПІ- або ПІД-закону регулювання не задовольняє поставленим вимогам. Коли об'єкту керування властива велика інерційність, наявність великого запізнення, інверсна реакція.

2). Коли незначна зміна керуючого сигналу викликає значну зміну керованої величини.

3). Врахування обмежень на вихідні параметри та керуючі змінні важливе для нормального регулювання.

До того ж, перевагою використання алгоритмів умовного інтегрування та компенсації інтегрального насичення є простота реалізації як на існуючих системах регулювання з використанням промислових контролерів, так і на етапі їх проектування. Оскільки ці методи сформульовані як у вигляді структурних схем, так і в алгоритмічному вигляді, то їх можна достатньо легко реалізувати на промислових контролерах як за допомогою технологічних, так і стандартних мов програмування. Кращі результати дає використання модельного прогнозуючого керування, але вирішення задачі оптимізації в режимі on-line потребує використання сучасних обчислювальних комплексів з високою швидкодією. Таким чином, при розробці систем автоматичного керування для підвищення ефективності функціонування енергоблоків ТЕС і АЕС доцільно використовувати вищерозглянуті алго-

ритми, враховуючи доступні технічні засоби, складність процесів та технологічні вимоги до них.

Основна увага в статті приділяється розробці регуляторів для систем з обмеженнями. В роботі розглядаються алгоритми умовного інтегрування, компенсації інтегрального насичення та модельного прогнозуючого керування, які враховують обмеження, на прикладі системи автоматичного регулювання теплового навантаження котла.

Основное внимание в статье уделяется разработке регуляторов для систем с ограничениями. В работе рассматриваются алгоритмы условного интегрирования, компенсации интегрального насыщения и модельного прогнозирующего управления, которые учитывают ограничения, на примере системы автоматического регулирования тепловой нагрузки котла.

This article deals with the problem of designing controllers to systems with constraints. The algorithms of conditional integrating, anti-windup and model predictive control are considered for the control system of boiler.

1. Гудвин Г.К. Проектирование систем управления / Гудвин Г.К., Гребе С.Ф., Сальгадо М.Э.-М.: БИНОМ, 2004. - 911 с.
2. Glattfelder A.H. Control systems with input and output constraints / Glattfelder A.H., Shaufelberger W. – London.: Springer, 2003. – 499 p.
3. Ковриго Ю.М., Фоменко Б.В., Полищук И.А. Математическое моделирование систем автоматического регулирования с учетом ограничений на управление в пакете Matlab // Автоматика. Автоматизация. Электротехнические комплексы и системы. - 2007. - №2. -С.21-28.
4. Веремей Е.И. Пособие “Model predictive control toolbox” [электронный ресурс] / Веремей Е.И., Ермеев В.В., Сотников М.В. – Электрон. дан. – Режим доступа: <http://matlab.exponenta.ru/modelpredict/book1/index.php>, вільний.
5. Rossiter J.A. Model-based predictive control: a practical approach. CRC Press, 2003. – 344 p.
6. Свириденко В.П., Попутников А.Б. Опыт модернизации схемы регулятора тепловой нагрузки котла ТПП-210А при работе на угольной пыли // Энергетика и электрификация. - 2001. -№4. – С.20-23.