

МЕТОД ЭКСТРЕМАЛЬНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ (СООТНОШЕНИЯ «ТОПЛИВО — ВОЗДУХ») В ТОПКАХ МОЩНЫХ БЛОКОВ КОТЕЛ — ТУРБИНА.

А. А. Волков, В. Ф. Шостак

Харьковский институт горного машиностроения, автоматики и вычислительной
техники

§ 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В настоящее время как в нашей стране, так и за рубежом основное количество электроэнергии вырабатывается тепловыми электрическими станциями путем сжигания природного топлива в топках котлоагрегатов. Вследствие этого эффективность процесса сжигания топлива имеет огромное экономическое значение.

Эффективность процесса горения при достаточном перемешивании топлива и окислителя (в нашем случае в качестве окислителя используется воздух) определяется величиной их количественного соотношения. Со снижением соотношения «топливо — воздух» значительно увеличиваются потери с уходящими газами и потери на собственные нужды котлоагрегата. Увеличение этого соотношения приводит к неполному сгоранию топлива, т. е. также вызывает интенсивное возрастание потерь. Таким образом, зависимость показателя эффективности, определяющего к. п. д. котлоагрегата, от величины соотношения «топливо — воздух» носит ярко выраженный экстремальный характер.

В камерных топках современных мощных котлоагрегатов перемешивание топлива с воздухом обеспечивается конструкцией горелочных устройств и аэродинамикой топки. Настройка горелочных устройств выполняется при наладке котлоагрегата и в процессе эксплуатации остается неизменной. Количество воздуха, подаваемого в топку, регулируется автоматической системой, управляющей производительностью дутьевых вентиляторов.

В настоящее время на мощных котлоагрегатах используются два принципа регулирования расхода воздуха:

- а) по расходу топлива из условия поддержания постоянным их количественного соотношения (система «топливо — воздух»);
- б) по расходу пара, отдаваемого котлоагрегатом (система «топливо — воздух»).

Системы «топливо — воздух» более просты, но совершенно не учитывают изменения физико-химического состава топлива. Такие системы применяются для газовых топок. Характерной особенностью пылеугольных топок является резкое изменение физико-химического состава топлива, поэтому в этом случае применяются системы «тепло — воздух». Системы регулирования этого типа обеспечивают постоянное количество воздуха на единицу тепла, отдаваемого с паром, и таким образом частично учитывают изменение физико-химического состава топлива.

Опыт эксплуатации и экспериментальные данные свидетельствуют о том, что физико-химический состав топлива (теплотворная способность, зольность, содержание влаги и т. д.) и величина неконтролируемых подсосов в топочное пространство значительно изменяются в процессе эксплуатации. Сильно изменяется и состояние экранов и конвективных поверхностей, что в свою очередь ухудшает условия теплообмена между продуктами горения и теплоносителем. В пылеугольных топках большое влияние на процесс горения оказывает размер частиц пыли, который определяется эффективностью работы системы пылеприготовления и может также изменяться в процессе эксплуатации. В силу этих причин количество воздуха, необходимое для поддержания оптимального режима горения, даже при постоянных нагрузке и расходе топлива не остается постоянным. Количественное измерение указанных факторов связано с большой затратой времени, а измерение некоторых из них, например, величины неконтролируемых подсосов практически может оказаться вообще невозможным. Поэтому изменения их нельзя непосредственно использовать для автоматической (или ручной) корректировки воздуха, и на практике эффективность горения вследствие влияния этих факторов значительно отклоняется от оптимальных значений, что приводит к увеличению потерь в топке и в конечном счете существенному ухудшению к. п. д. блока котел — турбина. [5, 6].

Таким образом, поддерживать оптимальное соотношение «топливо — воздух» можно только с помощью системы экстремального регулирования, способной измерять в процессе эксплуатации показатель эффективности процесса горения и корректировать расход воздуха с целью достижения максимального значения этого показателя.

Существующие методы определения эффективности процесса горения при помощи различных типов газоанализаторов имеют ряд недостатков, не позволяющих эффективно использовать их для оптимизации процесса горения. В частности, эти методы позволяют проводить замер только в отдельных точках и не дают возможности непосредственно контролировать процесс горения.

Известны попытки использовать для оптимизации процесса горения в топках котлоагрегатов и других промышленных объектов самонастраивающиеся экстремальные системы с подачей поисковых сигналов на вход управляемого объекта [11]. При этом процесс горения контролировался не непосредственно, а путем измерения параметров, зависящих от нагрева (давление пара, температура и т. п.). Это обуславливало большую инерционность и запаздывание в подобных системах управления, что при наличии принудительных поисковых воздействий приводило к значительному ухудшению динамики процесса, вызывало потери на поиск, усложняло условия работы всех автоматических систем котлоагрегата и усложняло аппаратуру управления. Поэтому такие экстремальные системы не могли качественно решить задачу оптимизации процесса горения.

§ 2. ВЫБОР ПОКАЗАТЕЛЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ

При сгорании смеси топлива и окислителя температура ее определяется их количественным соотношением. Максимальной она бывает, когда соотношение «топливо — воздух» стехиометрическое, т. е. обеспечивающее полное сгорание топлива при минимальном количестве окислителя.

В установившемся режиме горения температура в любом единичном объеме факела, расположенном достаточно далеко от его периферии (так

что изменения формы факела не влияют существенно на процесс горения в этом объеме), определяется количеством энергии, выделяющейся в этом объеме за единицу времени. Условия теплопередачи и уноса тепла с продуктами горения из единичного объема в этом случае могут быть приняты постоянными. В свою очередь, количество энергии, выделяющейся в этом же объеме топочного пространства за единицу времени, зависит от количества молекул топлива и окислителя, вступивших в реакцию.

Таким образом, процессы горения смеси в замкнутом объеме и в факеле имеют некоторые аналогичные особенности, и можно ожидать, что максимальная температура факела будет достигнута при соотношении «топливо — воздух» близком к стехиометрическому.

Экспериментальные исследования [1, 2, 10], проведенные при разработке точных методов измерения температуры пламени, полностью подтвердили указанную зависимость между температурой пламени, измеренной по интенсивности излучения факела, и соотношением «топливо — воздух» (рис. 1).

Согласно закону Стефана-Больцмана (для пламени вводится соответствующий коэффициент черноты излучения) интенсивность излучения тела пропорциональна величине абсолютной температуры его в четвертой степени [1].

Из вышесказанного следует, что максимальная интенсивность излучения факела газовых топков соответствует такому соотношению «топливо-воздух», которое обеспечивает полное сгорание топлива при минимальном избытке воздуха, т. е. оптимальный режим горения.

Для пылеугольного факела, как показали экспериментальные исследования [8], также существует соотношение «топливо — воздух» при котором имеет место максимальное тепловыделение в объеме факела и максимальное выгорание топлива при данной длине факела. Однако это соотношение значительно превышает стехиометрическое и равно $1,25 \div 1,3$. Это объясняется значительной неоднородностью смеси, связанной с наличием в факеле твердых частиц топлива. Таким образом, как для газовых, так и пылеугольных топков оптимальный режим горения соответствует максимальной интенсивности излучения факела, которая может служить показателем эффективности процесса горения. Использование этого показателя эффективности позволяет:

1) непосредственно контролировать процесс горения во всем объеме топочного пространства и отдельно управлять горелками в процессе эксплуатации;

2) создать практически безинерционную систему оптимального управления процессом горения.

В свете сказанного проблема оптимизации процесса горения (соотношения «топливо — воздух») может быть сведена к задаче управления безынерционным объектом, входными величинами которого являются расход топлива и производительность дутьевого вентилятора, а критерием оптимальности — интенсивность излучения факела пламени.

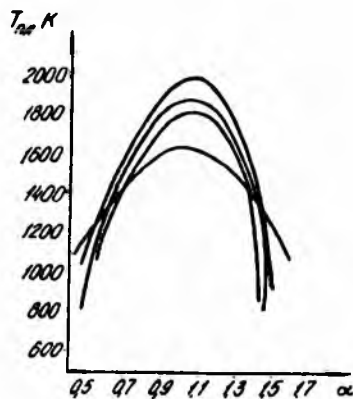


Рис. 1. Экстремальные зависимости температуры пламени от соотношения топлива и воздуха при сжигании природного газа. Кривые соответствуют различной степени перемешивания топлива и воздуха [10].

§ 3. СИСТЕМА ЭКСТРЕМАЛЬНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ СООТНОШЕНИЯ «ТОПЛИВО — ВОЗДУХ»

Опыт эксплуатации газовых топков мощных котлоагрегатов показывает, что расходы газа и воздуха, подаваемых к горелочным устройствам топков, изменяются во времени даже при отсутствии управляющих воздействий со стороны системы регулирования, причем эти изменения носят характер пульсаций (рис. 2). Управляющие воздействия со стороны системы регулирования расхода газа и производительности дутьевых вентиляторов (которые всегда имеют место даже при постоянном режиме работы блока котел-турбина) вносят дополнительные изменения в эти расходы.

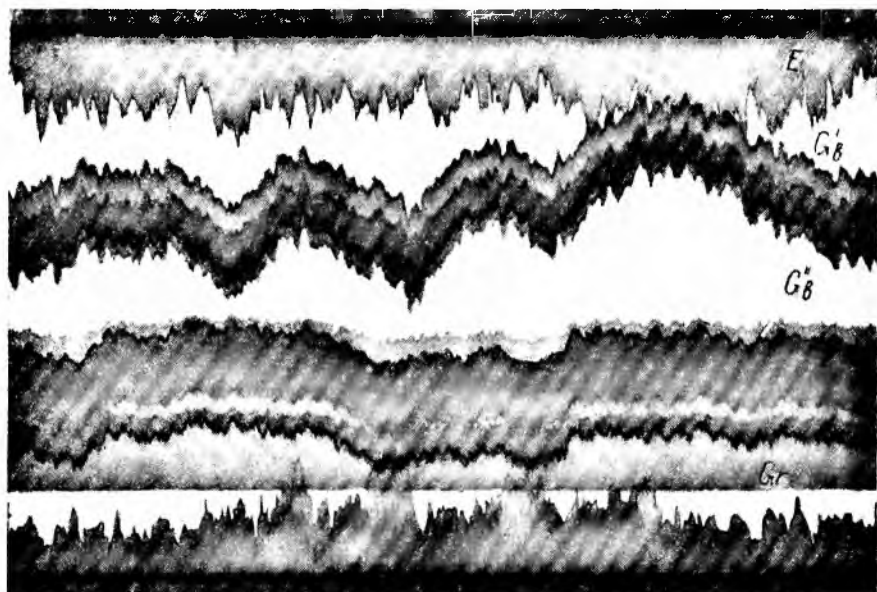


Рис. 2. Флуктуации расходов газа и воздуха в топке блока котел-турбина мощностью 200 мвт в установившемся режиме.

- G'_B — расход воздуха к правым горелкам топки;
- G''_B — расход воздуха к левым горелкам топки;
- G_r — расход газа;
- E — интенсивность излучения факела.

В пылеугольных топках, кроме управляющих воздействий со стороны указанных систем регулирования, также имеются пульсации расхода топлива, связанные со специфическим характером работы системы пылеподдачи.

Эти возмущения вызывают непрерывные отклонения величины соотношения «топливо — воздух» в факеле пламени, что приводит к соответствующим изменениям температуры факела и интенсивности его излучения, так как процессы в пламени протекают практически безынерционно. Другие параметры котлоагрегата (давление пара, температура экранов и пр.) при постоянном режиме работы блока сохраняют практически постоянные значения вследствие инерционности процесса теплопередачи.

Наличие естественных флуктуаций входных величин, вызывающих соответствующие изменения критерия оптимальности, позволяет исполь-

зовать для оптимизации процесса статистические методы (пассивное накопление информации с целью определения градиента критерия оптимальности по входным величинам), в частности, метод синхронного детектирования [3, 4].

Синхронный детектор в общем случае состоит из нелинейного безынерционного элемента и линейной части (фильтра) (рис. 3). На i -ом выходе синхронного детектора вырабатывается сигнал:

$$U_i = W_{\Phi_i} G(F, \delta x_i),$$

где w_{Φ_i} — линейный оператор, G — нелинейная функция, δx_i — поисковый сигнал (естественного происхождения или подводимый к объекту); F — выходная величина объекта управления.

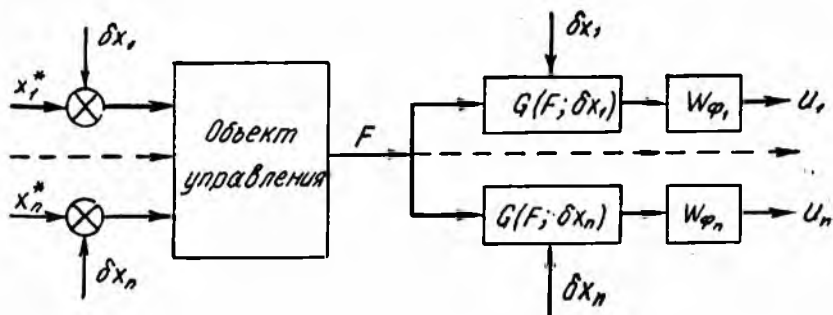


Рис. 3. Общая схема синхронного детектирования:

x_1^* ; x_2^* ... x_n^* выходные координаты объекта.

Целесообразно использовать частные виды операции синхронного детектирования, в которых нелинейная функция G соответствует умножению или коммутации.

$$\begin{aligned} G(F, \delta x_i) &= F \delta x_i; \\ G(F, \delta x_i) &= F \operatorname{sign} \delta x_i, \end{aligned}$$

где

$$\operatorname{sign} \delta x_i = \begin{cases} 1 & \text{при } \delta x_i > 0; \\ -1 & \text{при } \delta x_i < 0; \end{cases}$$

Эти виды операции синхронного детектирования отличаются простотой реализации и оптимальностью в отношении подавления помех. При использовании естественных флуктуаций входных координат эти флуктуации выделяются специальными измерителями и подаются на синхронные детекторы в качестве опорных сигналов. В этом случае входные координаты объекта представляют собой сумму:

$$x_i = x_i^* + \delta x_i \quad | i = 1, 2 \dots |,$$

где x_i^* — постоянная составляющая сигнала,

δx_i — независимые центрированные случайные функции времени.

Для центрированных независимых колебаний поиска с симметричными законами распределения математические ожидания сигналов на выходе

синхронных детекторов с множительными звеньями могут быть записаны [4] как

$$\bar{U}_v = W_{\Phi_v}(D) \left(\delta x_v^2 \frac{\partial F^*}{\partial x_v} + \dots \right)$$

или в интегральной форме:

$$\bar{U}_v = \int_0^{\infty} k_v(\tau) \left(\delta x_v^2 \frac{\partial F^*}{\partial x_v} + \dots \right)_{t-\tau} d\tau,$$

где F^* — величина выходной координаты, соответствующая

$k_v(\tau)$ — импульсные переходные функции фильтров.

Обозначенные точками члены рядов начинаются с

$$\frac{1}{3!} \sum_{ijk=1}^n \frac{\partial^3 F^*}{\partial x_i \partial x_j \partial x_k} \delta x_i \delta x_j \delta x_k \delta x_v,$$

т. е. имеют второй порядок малости относительно первых членов, если частные производные имеют одинаковый порядок величин. Таким образом, математические ожидания выходных сигналов синхронных детекторов с точностью до малых высших порядков пропорциональны соответствующим компонентам градиента.

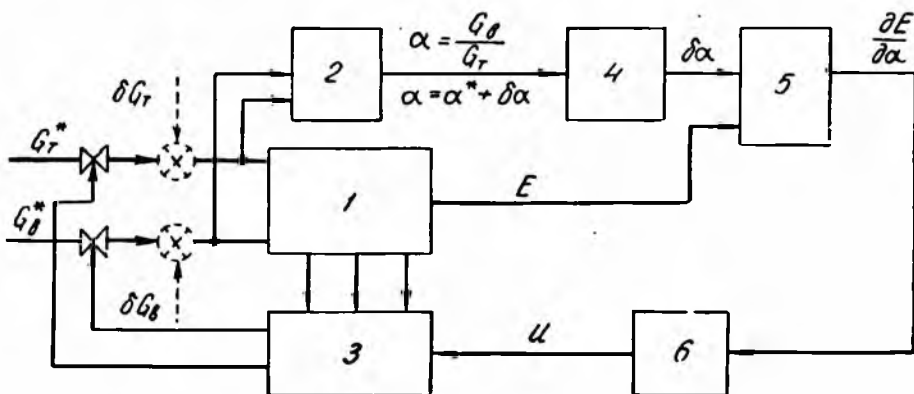


Рис. 4. Схема экстремального регулирования процесса горения:

1 — котлоагрегат; 2 — делительное звено; 3 — система регулирования котлоагрегата; 4 — фильтр для выделения переменной составляющей ($\delta\alpha$); 5 — синхронный детектор; 6 — устройство, вырабатывающее управляющее воздействие для корректировки работы системы регулирования котлоагрегата;

G_T — расход топлива; G_B — расход воздуха; G_T^* и G_B^* — расходы, задаваемые системой регулирования [3] котлоагрегата; δG_T , δG_B — естественные шумовые составляющие входных координат (показаны условно), E — интенсивность излучения факела горения.

Необходимо отметить, что процессы изменения нагрузки, присосов в топочное пространство и изменение физико-химического состава топлива протекают медленно по сравнению с флуктуацией входных величин. Вследствие этого процесс синхронного детектирования будет носить квазистационарный характер.

Таким образом, экстремальное регулирование процессов горения (соотношения «топливо — воздух») по предлагаемому методу в топках мощных

котлоагрегатов может быть осуществлено с помощью схемы, определяющей градиент интенсивности излучения по величине соотношения «топливо — воздух» $\left(\frac{\partial E}{\partial \alpha}\right)$, например, методом синхронного детектирования с использованием естественных флуктуаций расходов топлива и воздуха (рис. 4).

Величина этого градиента подается на устройство, которое вырабатывает корректирующее воздействие для изменения настройки системы регулирования расхода воздуха. Этим устройством может быть, в частности, звено, периодически интегрирующее значение градиента для устранения случайных ошибок. В конце каждого периода осуществляется коррекция настройки задатчика системы «топливо — воздух», исходя из величины и знака интеграла, и производится сброс интегратора.

Синхронным детектором может служить блок умножения с последовательно включенным на выходе фильтром.

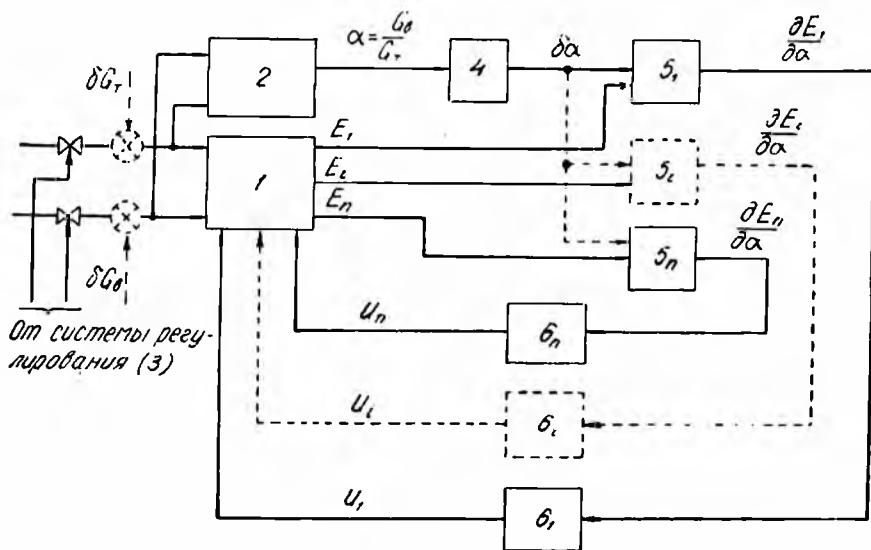


Рис. 5. Схема индивидуальной оптимизации горелочных устройств котлоагрегата. Обозначения соответствуют рис. 4.

Рассмотренная система позволяет решить задачу индивидуальной оптимизации работы горелочных устройств в процессе эксплуатации. При этом у каждой горелки должны быть установлены приемники излучения факела, сигналы которых подаются на входы синхронных детекторов, определяющих градиенты $\frac{\partial E_i}{\partial \alpha}$ для соответствующей горелки. Управляющие воздействия U_i корректируют настройку горелочных устройств (рис. 5).

Интенсивность излучения факела можно легко измерить в некотором количестве точек, достаточном для определения эффективности процесса горения во всем объеме топочного пространства. Критерий оптимальности в этом случае должен определяться на основании показаний ряда приемников излучения.

Излучение газовых топок, воспринимаемое приемниками, представляет собой сумму двух составляющих:

а) излучение газов факела;

б) излучение экранов топки.

Эффективность процесса горения характеризуется только первой составляющей, в то время как величина второй практически не меняется при постоянной нагрузке блока. В связи с этим для повышения точности оптимизации процесса целесообразно выделить первую составляющую излучения.

Как показывают результаты исследований [1, 2] для определения температуры технического углеродистого пламени газа наиболее удобно использовать интенсивность излучения CO_2 в инфракрасной области спектра $\lambda = 2,7 \mu$ или $\lambda = 4,3 \mu$. Выделить эту область спектра легко с помощью интерференционного и поглощающих фильтров. При этом область наибольшей интенсивности излучения экранов, лежащая между $\lambda = 1 \div 2 \mu$, отсеивается и приемником не воспринимается.

Излучение пылеугольных топок также состоит из этих двух составляющих, но в этом случае эффективность процесса горения может определяться не только по интенсивности излучения, но и по излучению частиц угольной пыли, температура которых, как показали исследования [1, 7], мало отличается от температуры газов пламени. Кроме того, излучение экранов сильно поглощается пылеугольным факелом. В связи с этим эффективность процесса горения в пылеугольных топках целесообразно определять как по излучению CO_2 в области $\lambda = 2,7 \mu$ или $\lambda = 4,3 \mu$, так и по излучению частиц угольной пыли, максимум которого лежит в области $\lambda = 1 \div 2 \mu$. В последнем случае применять фильтры нецелесообразно, так как области максимальной интенсивности излучения частиц угольной пыли и экранов топки совпадают.

Построение системы экстремального регулирования процесса горения (соотношения «топливо — воздух»), реализующей предлагаемый метод, в настоящее время не представляет трудностей. В качестве приемников инфракрасного излучения факела могут быть использованы выпускаемые отечественной промышленностью фотосопротивления типа ФС-А1.

Технология изготовления интерференционных фильтров в настоящее время тщательно разработана и освоена отечественной промышленностью.

Вычислительное устройство, осуществляющее синхронное детектирование (блок умножения и фильтр), отличается простотой и несложно в изготовлении. Вся аппаратура расположена вне топочного пространства, а излучение измеряется через прозрачные окна, поэтому не предъявляется никаких специальных требований к защите аппаратуры от нагрева.

Рассмотренный метод экстремального регулирования процессов горения может быть использован на мощных блоках котел-турбина, в котлоагрегатах, промышленных печах, нагревательных колодцах, а также на различных горелочных устройствах.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Е. Кадышев и ч. Измерение температуры пламени, Металлургиздат, М., 1961.
2. А. Е. Кадышев и ч., В. А. Докучаева. О применимости методов видимой и инфракрасной пирометрии для измерения температуры пламени в ограниченном пространстве. «Известия высших учебных заведений. Черная металлургия», 1961, № 9.
3. А. А. Красовский, Г. С. Поспелов. Основы автоматизации и технической кибернетики, Госэнергоиздат, М.-Л., 1962.
4. А. А. Красовский. Динамика непрерывных самонастраивающихся систем, Физматгиз, М., 1963.

5. К. М. Сокольский, И. К. Цабут. Контроль процесса горения в топках промышленных котлов, работающих на газе, по содержанию CO_2 в продуктах горения. «Промышленная энергетика» 1959, № 9.
 6. А. Л. Бычковский. Контроль присосов и воздушного режима в топочных камерах по ΔP — методу. «Теплоэнергетика», 1957, № 10.
 7. A. Z. Schack, «Techn. Physik», 1925, Bd. 6, S. 530.
 8. Б. В. Канторович. Вопросы теории горения потока топлива. Сб. докладов «Горение двухфазных систем под. ред. Л. Н. Хитрина», Изд-во АН СССР, М., 1958.
 9. М. Б. Равич. Вестник АН СССР, 1957, № 4.
 10. А. Е. Кадышевский. Современное состояние и пути развития оптической пирометрии пламени, УФН, т. LXXVI, вып. 4, 1962.
 11. В. М. Кунцевич, Ю. П. Булавицкий. Повышение эффективности работы котельных агрегатов с помощью экстремального регулирования, «Автоматика», 1959, № 2.
-