

Выше КПД, меньше вредных выбросов

Улучшение эксплуатационных характеристик электростанции с помощью совершенствования управления производственным процессом

Пекка Иммонен, Тед Мацко, Марк Энтони

Электростанции на твердом топливе за последние десятилетия прошли длинный путь, чтобы стать генерирующими электроэнергию предприятиями с высоким коэффициентом полезного действия и значительно сниженным выбросом газов в атмосферу. На практике были предприняты серьезные меры по улучшению котлов, паровых турбин и совершенствованию паротурбинного цикла.

Тем не менее, лишь недавно по-настоящему улучшенные технологии управления производственным процессом – прочно утвердившиеся в других отраслях промышленности – стали доступны для электростанций. Теперь управление на основе прогнозирующих моделей с множеством переменных (multi-variable model predictive control, MPC) компании АББ продемонстрировало свои превосходные рабочие качества и претворило в жизнь существенную экономию энергии и снижение выброса газов. Станции, использующие технологию компании АББ, достигли уменьшения выброса окислов азота на 8–40%, а, кроме того, генерируют сотни гигаватт электроэнергии в год дополнительно при том же расходе топлива.



Инновации в технологиях

Управление на основе прогнозирующих моделей с множеством переменных (MPC) – это технология, намного превосходящая по своим рабочим характеристикам традиционные стратегии управления с одним входом и одним выходом (см. вставку). Первоначально разработанное для нефтеперерабатывающих заводов MPC за 30 лет практического применения приобрело широкое распространение в обрабатывающей промышленности. Однако лишь недавно MPC нашло свою дорогу к управлению электростанциями и оптимизации их работы.

Столь медленный прогресс в энергетическом секторе можно, в частности, объяснить более высокими эксплуатационными требованиями. Динамические характеристики компонентов электростанций обычно намного быстрее тех, что можно наблюдать в производственных процессах нефтехимической отрасли, и для них требуются вычислительные возможности, которые до недавнего времени были либо недоступны, либо нерентабельны. Во времена низкой стоимости первичной электроэнергии и менее жестких требований к выбросам в окружающую среду экономическое превосходство MPC тоже было не столь значительным.

Рост рабочих характеристик компьютеров в настоящее время дал возможность применить MPC в приложениях для электростанций, требующих больших вычислительных возможностей. Для небольших промышленных электростанций уже внедрены технические решения с MPC, направленные на координированное управление и оптимизацию нескольких котлов, запасов топлива, турбин, паровых коллекторов и потоков мощности в сеть и из сети. Множество преимуществ MPC в промышленных электростанциях, таких как улучшенная стабильность работы станции, более высокая доступность и более низкая полная стоимость энергии, проложило дорогу к расширению его применения на крупных электростанциях [1].

В настоящее время самое распространенное применение MPC на больших электростанциях – это оптимизация сжигания топлива, управление распределением топлива и воздуха в котле для снижения выбросов (особенно NO_x) при улучшенной эффективности сжигания топлива [2].

В самое последнее время решения на основе MPC были внедрены на других технологических участках электростанции, таких как регулирование температуры основного контура и промежуточного перегрева пара, а также координация работы котла и турбины. Пакет OPTIMAX® компании АББ решает эти задачи и содержит в себе несколько технологий, например, программное обеспечение Predict&Control, которое относится к наиболее продвинутым решениям на основе MPC, применяемым как на промышленных электростанциях, так и на крупных ТЭЦ.

Улучшение рабочих характеристик при MPC

Главная цель улучшенного управления производственным процессом – уменьшить колебания параметров процесса. Для электростанций это означает улучшение устойчивости и надежности производственного процесса, а также снижение

влияния перепада температур на элементы, работающие под высоким давлением.

При уменьшенных колебаниях параметров процесса генерация энергии может происходить в более оптимальном режиме для данной электростанции. Во многих случаях этот оптимум определяется некоторыми ограничениями. За счет минимизации колебаний этот процесс может быть смещен ближе к своим предельным параметрам без нарушения ограничений (рис. 1).

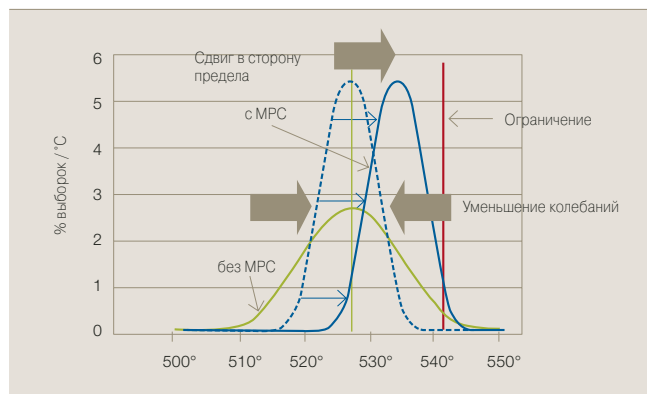
На ТЭЦ существует большое число возможных ограничений параметров производственного процесса. Некоторые из них перечислены на рис. 2. К преимуществам работы вблизи пределов относятся улучшенный расход тепла на 1 кВт-ч энергии, более высокая производительность при генерации и уменьшение выбросов в атмосферу.

Управление на основе прогнозирующих моделей с множеством переменных (MPC)

MPC – это общепринятое название технологии управления, использующей динамические модели процессов, представляющие соотношения между независимыми переменными (входами модели) и зависимыми переменными (выходами модели). Входы включают регулируемые переменные (MV) и переменные внешних воздействий прямой передачи (FF). Выходы модели называются управляемыми переменными (CV). Эти модели прогнозируют будущие состояния выходов на основании прошлых значений регулируемых переменных, расчетных будущих значений регулируемых переменных и прошлых значений переменных прямой передачи.

Алгоритм MPC с множеством переменных использует знания о динамических характеристиках процесса. Результаты взаимодействия между всеми участвующими в процессе количественными параметрами получаются в результате решения системы из многих уравнений. Этим он отличается от традиционного алгоритма управления (то есть от управления с идентификацией процесса, PID), когда каждый контроллер имеет один вход и один выход. При многих ограничениях и сложных взаимодействиях, участвующих в управлении электростанцией, MPC с множеством переменных хорошо подходит для того, чтобы усовершенствовать управление и оптимизацию в энергетике.

1 Уменьшение колебаний температуры пара позволяет работать ближе к пределу.



Управление на основе прогнозирующих моделей с множеством переменных также способствует ускорению выхода на режим, в то же время, удерживая станцию в приемлемом рабочем диапазоне во время нарастания мощности. Это может быть очень полезно для работы оборудования в циклическом режиме и при останове котла.

Система Predict&Control компании АББ

Прежний опыт применения MPC для оптимизации технологических процессов в обрабатывающей промышленности демонстрирует целый ряд недостатков [3].

- Имеются ограничения в выборе моделей управления. Широко доступные модели, импульсная и модель откликов, могут применяться только для устойчивых по своей природе процессов и плохо справляются с интегрирующими процессами.
- Контроллеры плохо работают в присутствии значительного шума измерений или чрезмерных внешних воздействий.
- Идентификация модели зависит от пошагового тестирования разомкнутого контура регулирования и только модели с одним входом и одним выходом (SISO) могут быть идентифицированы.

В отсутствие более разносторонних коммерческих программных решений компания АББ начала работу над общей системой, основанной на MPC. Этот новый программный продукт, Optimize^{IT} Predict&Control (P&C),

смог преодолеть недостатки предшествующих решений. Решение P&C основано на новой технологии, которая заменяет типичную совокупность моделей пошаговых откликов SISO истинной моделью пространства состояний с несколькими входами и несколькими выходами (MIMO)¹⁾ [4].

Новый алгоритм компании АББ идентифицирует точные модели пространства состояний исходя из данных тестирования станции. Способность идентифицировать модели MIMO, исходя из единственного набора тестов для замкнутого контура управления, уменьшает необходимое для тестирования время и очень упрощает задачу моделирования.

Фильтр Кальмана – это математический метод, который использует всю доступную информацию для наилучшей оценки состояния процесса и влияющих на него внешних воздействий.

Метод моделирования на основе пространства состояний позволяет системе P&C использовать фильтр Кальмана для оценки состояния в качестве части алгоритма управления с обратной связью. Фильтр Кальмана – это математический метод, первоначально предназначавшийся для оценки траекторий космических кораблей. Он использует всю доступную информацию

для получения наилучшей оценки состояния процесса и влияющих на него внешних воздействий. В эту модель, кроме управляемых переменных, можно включить дополнительные измерения процесса, обеспечив фильтр Кальмана большим объемом информации и способствуя дальнейшему усовершенствованию оценки состояния и внешних воздействий.

Основной принцип действия контроллера P&C показан на рис. 3. В каждом предварительно определенном интервале времени контроллер считывает фактические значения переменных процесса и использует входы (u) и выходы (y) для оценки текущего состояния процесса (\hat{X}), входных внешних воздействий (w) и выходных внешних воздействий (h). Такой подход отличается от подхода стандартных пакетов MPC, которые способны оценивать только выходные воздействия (h). Это приводит к весьма значительному улучшению

оценки состояния (\hat{X}) и совершенствованию управления величиной y.

Оптимальное построение MPC

На электростанции существует большое количество входов (регулируемых переменных, которые можно настроить, и переменных прямой передачи, генерированных внешними воздействиями) и выходов (управляемых, ограничивающих дополнительных переменных, оценивающих состояние процесса), которые могут быть использованы для модели управления. Выбор масштабов модели с необходимыми входами и выходами зависит от целей данного проекта, конфигурации станции и конкретных локальных экономических факторов.

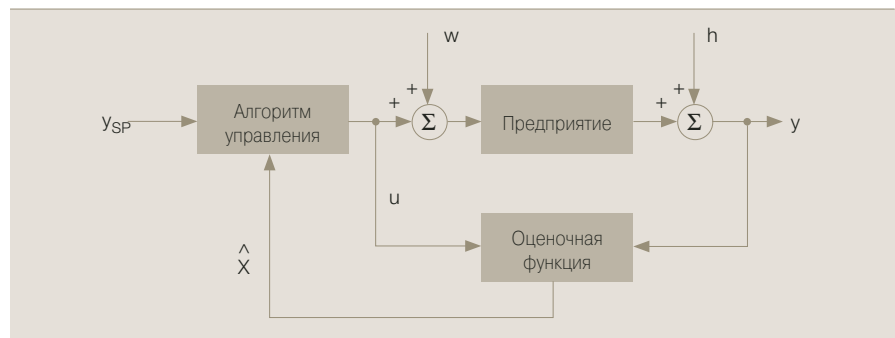
Входы и выходы MPC для типовой задачи оптимизации сжигания топлива показаны на рис. 4. Показаны регулируемые переменные (MV), пере-

2 Примеры ограничений для процессов на электростанции

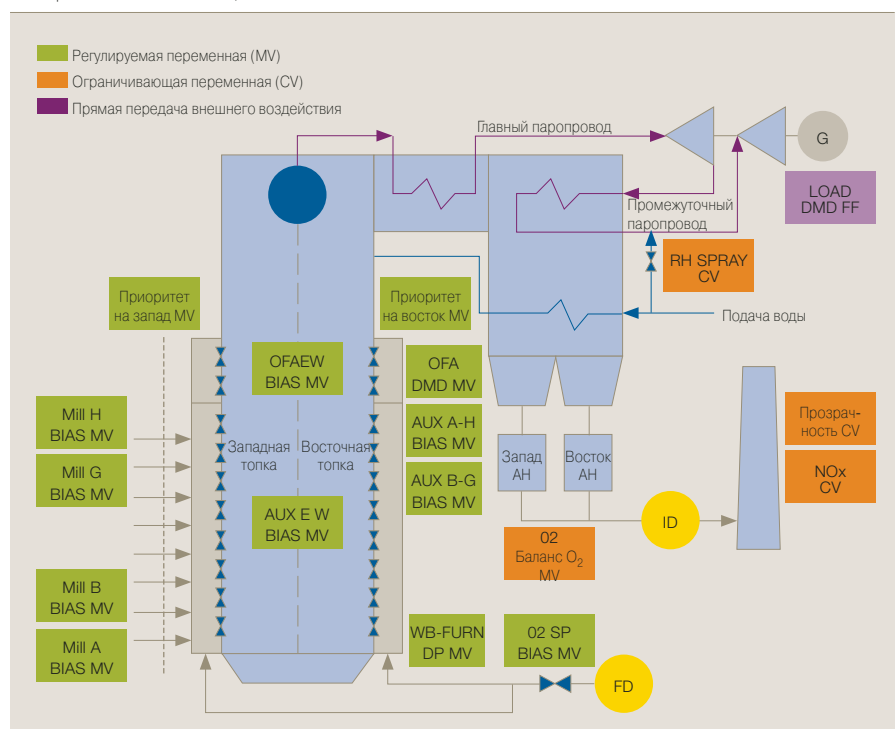
- Максимум температуры острого пара
- Максимум давления острого пара
- Максимальный расход пара
- Максимальная температура перегрева
- Максимальное содержание кислорода (O₂) в дымовом газе
- Максимальная оптическая прозрачность дымового газа
- Максимальные выбросы окислов азота (NOx)
- Максимальная мощность генератора
- Минимальная степень разрежения в конденсаторе
- Максимальная производительность воздушной дутьевой камеры
- Заслонки дифференциального давления дутьевой камеры

¹⁾ Модель пространства состояний описывает физическую систему несколькими дифференциальными уравнениями.

3 Основной принцип действия контроллера Predict&Control компании АББ.



4 Переменные оптимизации сжигания топлива



Инновации в технологиях

менные прямой передачи (FF) и ограничивающие переменные (CV) для этого котла, имеющего топку с двухцветным экраном.

Соотношения между этими параметрами показаны на рис. 5. Строки этой матрицы представляют входы модели; колонки определяют выходы. Элементы матрицы с пометками показывают физические соотношения, включенные в общую модель.

Приведенная выше структура представляет традиционные системы оптимизации сжигания топлива, где расходы впрыска парохладителей²⁾ включены в качестве ограничивающих параметров процесса. Задача системы – поддерживать средствами базового управления основную и промежуточную температуры в пределах удобного диапазона регулирования и минимизировать расход промежуточного впрыска.

Когда будет определена структура модели, в пределах P&C могут использоваться средства проектирования для создания и модификации структуры контроллера со множеством переменных. Для определения регулируемых, управляемых (или ограничивающих) переменных и переменных прямой передачи имеется удобное программное приложение – браузер. Свойства, связанные с этими переменными, также определяются с помощью средства конфигурирования.

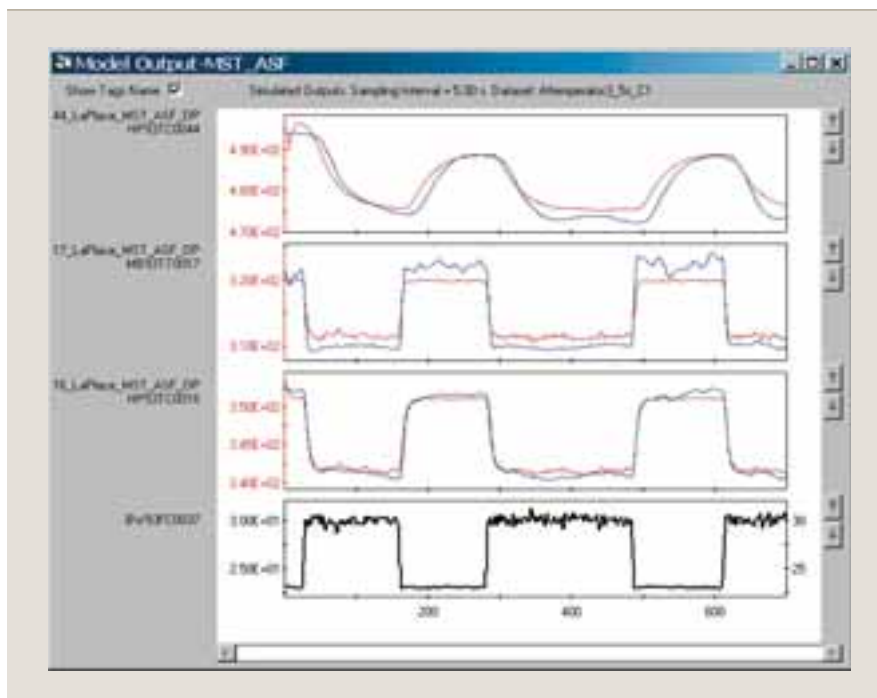
5 Матрица соотношений входов и выходов для управления оптимизацией сжигания топлива.

Регулируемые переменные	Ограничивающие переменные	NOx	Прозрачность дыма	O ₂ при равновесии	Потребность во впрыске, перегрев А	Потребность во впрыске, перегрев В
		млн ⁻¹	%	% (O ₂)	%	%
O2 SP BIAS	Смещение рабочей точки по кислороду	–	–			
WB FURN BIAS	Смещение рабочей точки для дутьевой камеры	–	–			
AA FF BIAS	Смещение восток-запад вспомогательного воздуха			–		
AA AH BIAS	Смещение А-Н подъема вспомогательного воздуха	–	–			
AA BG BIAS	Смещение В-Г подъема вспомогательного воздуха	–	–			
MILL AH BIAS	Смещение питающей линии дробилки Н	–	–			
MILL G BIAS	Смещение питающей линии дробилки G	–	–			
MILL B BIAS	Смещение питающей линии дробилки В	–	–			
MILL A BIAS	Смещение питающей линии дробилки А	–	–			
TILT DMD E	Потребность наклона форсунки на восток	–	–		–	
TILT DMD W	Потребность наклона форсунки на запад	–	–			–
OFA DMD	Потребность в остром дутье	–	–			
OFA FF BIAS	Смещение острого дутья восток-запад			–		
FF						
GENERATOR MW	Потребность устройства в нагрузке	–	–			

Обычно Predict&Control внедряют на уровне диспетчерского контроля, чтобы управлять уставками многобазовых контуров регулирования в цифровой системе управления. Примеры таких уставок – это значения расхода топлива, расхода парохладителя и кислорода. Для наилучших результатов важно правильно настроить базовые контуры, включающие датчики, исполнительные механизмы и другие полевые приборы. Средство управления эффективностью регулирования (Loop Performance Manager, LPM) компании АББ является частью того же пакета усовершенствованного управления производственными процессами (Advanced Process Control Suite), что и Predict&Control, и возможности LPM в настройке и контроле контура регулирования позволяют оптимизировать базовые контуры перед вводом MPC в действие.

Это средство проектирования обладает большими возможностями обработки данных для импорта, анализа тенденций и фильтрации собранных данных о процессе, включая автоматическую идентификацию и удаление недостоверных данных. Вычислительным ядром средств моделирования является средство параметрической идентификации, которое используется для построения моделей пространства состояний. Реальный алгоритм сочетает в себе простоту использования и способность пользоваться данными тестирования как замкнутых, так и разомкнутых контуров при идентификации модели. Обеспечено наглядное отображение тенденций, чтобы проиллюстрировать степень совпадения идентифицированных моделей с практическими измерениями. Пример управления основной температурой пара показан на рис. 6, где сравниваются реальные температуры (показано красным) со значениями, прогнозируемыми исходя из изменений впрыска парохладителя (показано синим).

6 Сравнение прогнозируемых на основе модели и измеренных температур на электростанции



Финальная стадия построения MPC – это настройка контроллера для конкретного предприятия. С помощью взвешенных параметров для различных петель обратной связи MPC настраивается так, чтобы получить желаемую динамическую характеристику данного технологического процесса. Эта настройка включает установку весовых коэффициентов для ошибок управления и дрейфа различных переменных.

Большой весовой коэффициент устанавливается, когда допустимы малая ошибка управления или дрейф, и наоборот. Кроме того различным ограничениям присваиваются приоритеты. В случае конфликта между ограничениями, то из них, которое имеет более высокий приоритет, удовлетворяется первым. Если существуют адекватные степени свободы и возможностей управления, то дополнительные ограничения разрешаются в порядке очередности.

Вся станция одним взглядом

Операторы электростанций нуждаются в быстром и полном обзоре состояния станции со всеми доступными подробностями по запросу. Имеется два способа мониторинга усовершенствованной системы управления на базе Р&С и доступа к ней. Контроллер может использовать компоновку и встраивание объектов для управления процессами (Object Linking and Embedding for Process Control, OPC), чтобы вывести все рабочие параметры на консоль цифровой системы управления, что способствует истинному отображению работы станции в одном окне. Кроме этого оператор может воспользоваться пользовательским интерфейсом Р&С.

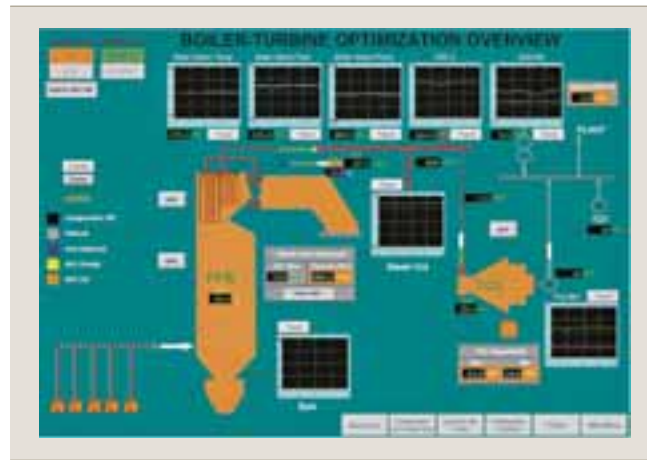
Типичный экран просмотра оптимизации приведен на рис. 7. Он может быть использован для мониторинга состояния усовершенствованного управления и оптимизации, а также для включения и выключения оптимизации любого выбранного компонента.

Впечатляющие достижения с Р&С в экономии средств

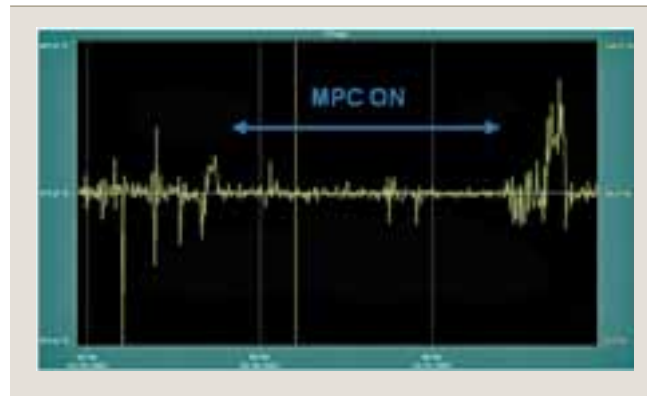
Усовершенствованные системы управления на основе прогнозирующих моделей определяют ряд достижений в улучшении работы станций. Некоторые из этих улучшений перечислены ниже.

- Типовое уменьшение выброса окислов азота NO_x составляет 8% при номинальной нагрузке и до 40% при колебаниях нагрузки
- Увеличение тепловой мощности на:

7 Обзор состояния оптимизации блока котел-турбина на одном экране.



8 Увеличение тепловой мощности за счет улучшенного управления температурой основного пара.



- 0,25 – 1,5% при номинальной нагрузке
- 1,5 – 2,5% при колебаниях нагрузки
- Снижение содержания несгоревшего углерода в золе на 1 – 1,5%
- Пониженное образование углекислого газа CO₂ на 1 МВт-ч произведенной энергии
- Поддержание образования угарного газа CO на желаемом уровне
- Увеличение коэффициента готовности
- Ускоренное нарастание мощности

Существенное улучшение эксплуатационных характеристик котла может быть получено при работе на наивысшей возможной температу-

ре основного пара. Рис. 8 показывает, как можно снизить отклонения температуры с помощью MPC со множеством переменных, что является предпосылкой для безопасной работы на максимальной температуре. В этом случае усовершенствованное управление пылеугольным котлом снизило стандартное отклонение температуры основного пара на 80%, что позволило сместить рабочую точку вверх на 10 °С. Хотя может показаться, что 10 °С – это мало, результирующее улучшение в части тепловой мощности составило 1,2%, что добавляет приблизительно 10000 МВт-ч выработанной за год энергии при том же расходе топлива.

Увеличение тепловой мощности также может быть достигнуто путем настройки расходов впрыска при перегреве как ограничивающих переменных. Благодаря сниженным отклонениям в расходе при управлении MPC, их можно уменьшить и работать ближе к пределу. За счет сокращения расхода впрыска наполовину по сравнению с исходной величиной, в другом приложении было получено соответствующее улучшение тепловой мощности на 0,36%, что обеспечило приблизительно 25000 МВт-ч дополнительной энергии в год с тем же расходом топлива. В то же самое время выброс окислов азота NO_x снизился на 10%.

Как показывают эти примеры, системы управления, основанные на MPC, оказывают значительное влияние на работу электростанции, эффективность использования энергии и выбросы. MPC – это мощное средство, удовлетворяющее растущий спрос в энергоснабжении и дающее как экономический, так и экологический выигрыш.

Пекка Иммонен

ABB Utility Automation Systems
Виклифф, штат Огайо, США
pekka.immonen@us.abb.com

Тед Мацко

ABB Process Automation
Виклифф, штат Огайо, США
ted.matsko@us.abb.com

Марк Энтони

ABB Power Systems
Баден, Швейцария
marc.antonie@ch.abb.com

²⁾ Пароохладитель – это прибор, который регулирует температуру впрыска.

Литература

- [1] Immonen, P., Matsko, T., Antonie, M. (2007, September). Increasing stability and efficiency of industrial power plants. Paper presented at POWER-GEN Asia, Bangkok, Thailand.
- [2] М. Антуан, Точнее, эффективнее и экономнее. АББ Ревю 3/2005, с. 36–41.
- [3] Qin, S. J., Badgwell, T. A. (2003). A survey of industrial model predictive control technology. Control Engineering Practice (11) 7, 733–764.
- [4] Bonavita, N., Martini, R., Matsko, T. (2003, June). Improvement in the performance of online control applications via enhanced modeling techniques. Paper presented at ERTC Computing, Milan, Italy.