

# Оптимизация предприятий

Интерактивная оптимизация гибридных опреснительных предприятий

Гоец-Д. Вольф, Стефан Локстерманн, Рамеш Кумар



Интенсивное развитие стран Ближнего Востока, свидетелями которого мы являемся, уже потребовало наличия базовой инфраструктуры, в которую входят предприятия по выработке электроэнергии и подготовке воды. Гибридные опреснительные предприятия отличаются высокой гибкостью и играют жизненно важную роль в производстве воды и электроэнергии. При этом, однако, растущие цены на топливо и необходимость консервации его запасов заставляют производить электроэнергию и воду наиболее оптимизированными способами из всех возможных. Существует множество эксплуатационных возможностей для оптимизации, которыми можно воспользоваться при краткосрочном и долгосрочном планировании.

В данной статье описывается новый подход к экономической оптимизации опреснительных и вырабатывающих электроэнергию предприятий, в основу которой положены различные интерактивные и автономные оптимизационные программные пакеты компании АББ. Эффективность этих пакетов иллюстрируется их успешным внедрением на занимающемся выработкой воды и электроэнергии предприятии г. Фуджайрах (FWPP = Fujairah Water and Power Plant) в Объединенных Арабских Эмиратах.

На Ближнем Востоке опреснительные предприятия играют важную роль в выработке электроэнергии и воды, которые необходимы для удовлетворения постоянно растущего спроса на них. В частности, в настоящее время существенно выросло число строящихся гибридных опреснительных предприятий, что объясняется их гибкостью, которая обеспечивает реализацию производственных процессов на различных уровнях и в различных сочетаниях. Необходимо, однако, отметить, что все эти предприятия имеют сложную системную структуру, особенно принимая во внимание то, что на одном гибридном опреснительном предприятии используется по меньшей мере два различных типа процесса опреснения. Тем не менее, именно эта структура отличается массой возможностей для ее оптимизации.

Одно из таких гибридных опреснительных предприятий находится в двадцати километрах севернее г. Фуджайрах в Оманском заливе. Рост расходов, вызванный приватизацией предприятия, вынудил его руководство искать пути снижения производственных издержек за счет оптимизации. В 2005 году предприятие FWPP установило у себя различные оптимизационные пакеты компании АББ (из прикладного семейства OPTIMAX<sup>®</sup>)<sup>1)</sup>. Именно эта система контроля и оптимизации производства и будет рассмотрена ниже.

## Предприятие FWPP

Для выработки электроэнергии предприятие FWPP имеет четыре газовые турбины (ГТ) PG9171E мощностью 106 МВт и парогенераторы с рекуперацией тепла (ПРТ) производства компании General Electric, а также две паровые турбины (ПТ) NG90/90 мощностью 119 МВт производства компании Siemens (рис. 1). Производство воды обеспечивается пятью многоступенчатыми дистилляторами (МД), каждый из которых имеет производительность 47,3 тыс. м<sup>3</sup> в сутки, а также одной двухступенчатой установкой обратного

<sup>1)</sup> Более подробно пакет OPTIMAX<sup>®</sup> описывается на с. 44 данного номера АББ Ревю.

## Эффективные энергосистемы

осмоса (ОО), имеющей производительность 142 тыс. м<sup>3</sup> в сутки. В целом установленная электрическая мощность предприятия составляет порядка 660 МВт, а производство воды находится на уровне 378,5 тыс. м<sup>3</sup> в сутки при окружающей температуре 46 °С. Парогенераторы ППРТ направляют пар высокого давления в общий коллектор. Пар низкого давления, используемый дистилляторами, либо отбирается на выходе паровых турбин, либо редуцируется из пара высокого давления редуцирующей станцией.

### Области оптимизации

Стоимость топлива составляет 90 процентов от всех затрат на топливо, химикаты, запасные части и техническое обслуживание ГТ, ПТ, МД и ОО. Если не принимать во внимание капитальные затраты, то топливо несомненно является самым

затратным компонентом на предприятиях по выработке электроэнергии и опреснению воды. Следовательно, ключ к снижению затрат – это оптимизация расхода топлива. Для этого были разработаны следующие инструменты:

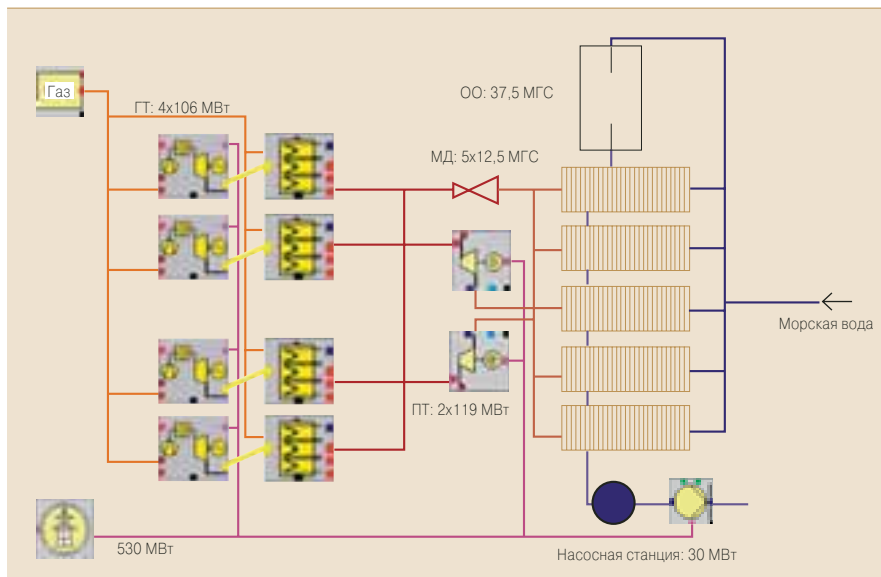
- планирование нагрузки, которое используется для планирования и интерактивной оптимизации на сутки вперед;
- гибридная оптимизация делает возможными интерактивную оптимизацию и планирование;
- технологическая оптимизация, в том числе
  - оптимизация МД,
  - оптимизация ОО,
  - оптимизация дутьевого вентилятора (изменение параметров управления).

В дополнение к оптимизации расхода топлива перечисленные инструменты позволяют также

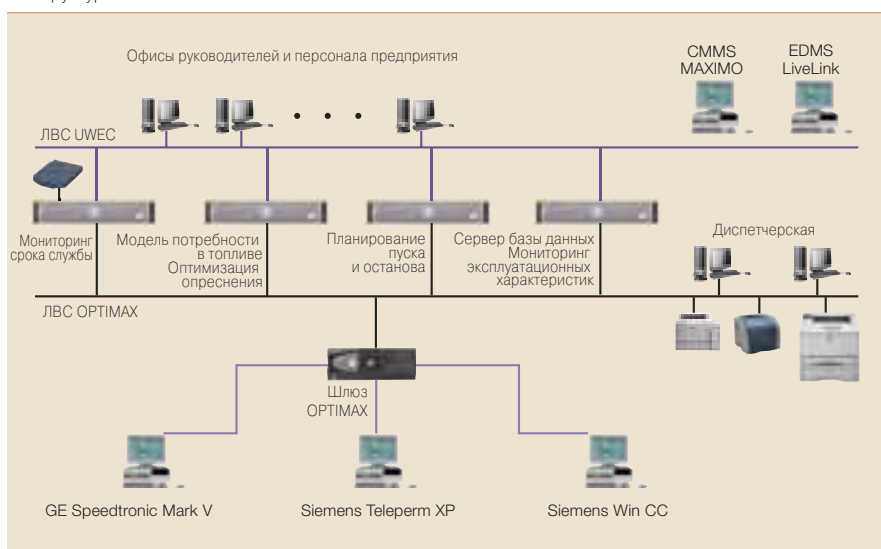
улучшить техническое обслуживание во всем технологическом процессе.

Если не принимать во внимание капитальные затраты, то топливо является самым затратным компонентом на предприятиях по выработке электроэнергии и опреснению воды, следовательно, оптимизация расхода топлива – это ключ к снижению затрат.

1 Структура предприятия FWPP.



2 Структура системы.



### Структура системы

Модульная структура системы оптимизации, реализованная на предприятии FWPP, показана на рис. 2. Сбор данных в реальном времени обеспечивался аппаратурой Siemens Teleperm XP через OPC-сервер, а также системами Siemens Win CC и GE Mark V. Полученные данные в полном объеме сохранялись в долговременной базе данных PGIM (Power Generation Information Manager, бывшей PlantConnect) компании АББ, которая в дальнейшем использовалась в качестве общего источника данных для всех инструментов оптимизации и других приложений. В систему PGIM также входит модуль PIMS (Plant Information Management System) с интерфейсом HSI (Human System Interface), который дает возможность пользователю просматривать графическую информацию, тенденции и отчеты. С помощью интегрированного программного инструмента, известного под названием "Technical Calculation", производилось вычисление таких производственных показателей, как эффективность ГТ.

Инструмент PowerCycle, также производства компании АББ, представляет собой средство, способное с высокой точностью строить термодинамическую модель предприятия при постоянно меняющихся внешних условиях и при различных установившихся режимах работы. На предприятии FWPP модель PowerCycle используется для:

- проверки правильности данных – модель производит сверку оперативных данных, чтобы избежать ошибок измерения;
- оптимизации МД – модель выдает оптимальные внутренние уставки для работы МД при заданной нагрузке;
- построения модели потребности в топливе – PowerCycle используется для расчета ожидаемой потребности в топливе в зависимости от конструктивных особенностей предприятия, которая подтверждается измерением рабочих характеристик при ручном управлении.

К другим инструментам относятся:

- PowerFit, который рассчитывает оптимальные графики; это программное обеспечение в основном используется в качестве инструмента для планирования на день вперед;
- BoilerLife определяет истечение срока службы основных компонентов бойлеров.

**Оптимизационное решение**

Оптимизационное решение, реализованное на предприятии FWPP, включает в себя:

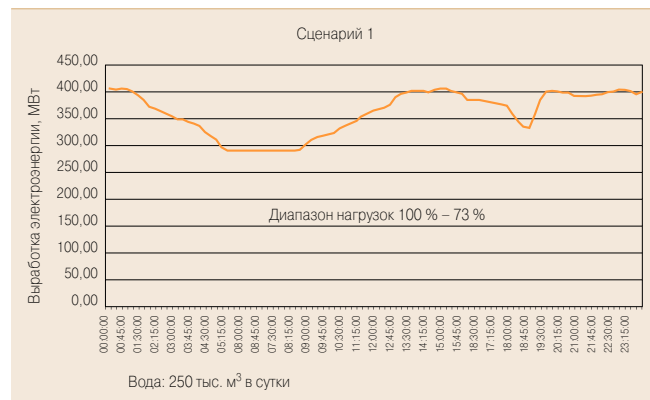
- графики нагрузки;
- гибридную оптимизацию;
- оптимизацию МД;
- оптимизацию технологических процессов;
- оптимизацию рабочих процессов.

**Графики нагрузки**

Нагрузки на предприятия по выработке воды и электроэнергии меняются в течение суток. Это в особенности справедливо для регионов со значительным суточным изменением относительной влажности и температуры, от которых и зависит нагрузка. Приведенный на рис. 3 пример кривой ежедневной электрической нагрузки показывает, что предприятие FWPP работает на 50 – 80 процентов от его чистой суммарной производительности. Следует отметить, что 20-процентное изменение нагрузки на более чем на 150 МВт эквивалентно примерно полуторакратной максимальной мощности одной ГТ.

Ежедневная потребность в воде предприятию задается. Если учитывать вместимость резервуаров с питьевой водой, то в работе предприятия возникает дополнительная гибкость.

3 Кривая суточной электрической нагрузки для предприятия FWPP в г. Фуджайрах.



Задача системы построения графиков нагрузки состоит в том, чтобы найти оптимальное сочетание компонентов предприятия, которые обеспечили бы выполнение конкретных требований на выработку воды и электроэнергии. Иными словами, на основе спроса, оговоренного диспетчерами нагрузок, структуры предприятия, цен на топливо, переменных затрат на техническое обслуживание, стоимости химикатов, условий окружающей среды, режимов работы и рабочих характеристик всего предприятия и его отдельных компонентов, проводятся соответствующие расчеты. Конечный результат представляет собой предложение, обеспечивающее оптимальную, с точки зрения затрат, работу предприятия при конкретном сочетании нагрузки на ГТ, ПТ, ОО и МД. Вообще говоря, основные преимущества оптимизации достигаются за счет:

- нахождения наилучшего сочетания между работой ГТ и ПТ;
- нахождения наилучшего сочетания между работой ПТ и обходным потоком пара;
- нахождения наилучшего сочетания между работой МД и ОО;

- использования возможностей для хранения воды.

Правильно подобранные сочетания делают оптимизацию предприятия действенной в течение одного или нескольких дней. Оптимизационный пакет программного обеспечения включает в себя четыре составляющие:

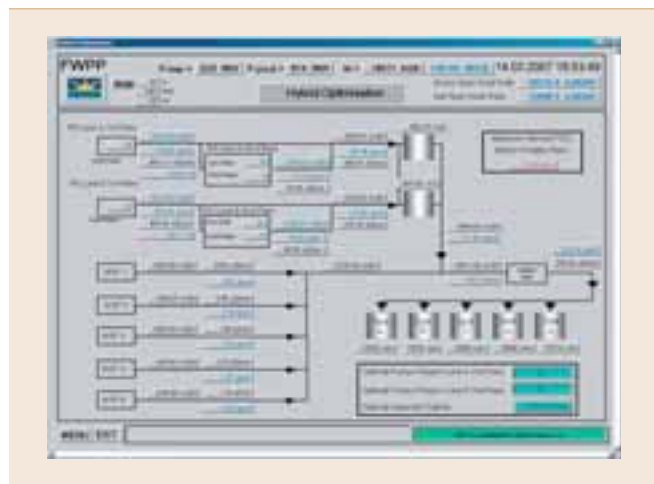
- графический интерфейс пользователя (GUI);
- ядро, которое координирует взаимодействие GUI, оптимизатора и базы данных;
- оптимизатор (CPLEX), задача которого состоит в нахождении глобального минимума; эту задачу оптимизатор решает по методу MIP (Mixed Integer Linear Programming);
- базу данных Oracle для хранения всех конфигураций и результатов; графики для всего основного оборудования представлены либо в табличной форме, либо в виде графической информации.

На предприятии FWPP было показано, что (при использовании конкретных тестовых нагрузок и условий) в среднем за счет внедрения упомянутого оптимизационного программного обеспечения можно сэкономить 2,7 процента от стоимости топлива. Максимальную экономию, доходящую до 6 процентов и более, можно обеспечить при работе с низкими нагрузками.

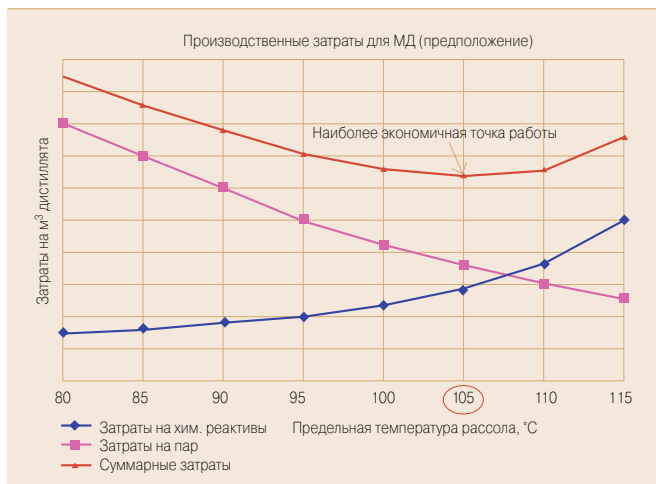
**Гибридная оптимизация**

Предприятие FWPP является гибридным в том смысле, что получение воды обеспечивают МД и ОО. Питьевая вода должна быть произведена в заданных объемах. Однако качество воды, полученной по двум технологиям, не является одинаковым: вода, полученная от МД, является

4 Гибридная оптимизация.



5 Принцип минимальных затрат для МД.



## Эффективные энергосистемы

почти деминерализованной, в то время как вода, полученная от ОО, отличается высоким качеством. В связи с этим смешанную питьевую воду, полученную по двум технологиям, предприятие еще должно дополнительно минерализовать, чтобы обеспечить оптимальные критерии минерализации, оговоренные органами здравоохранения.

Установка обратного осмоса на предприятии FWPP представляет собой современную установку, построенную фирмой Degremont<sup>2)</sup>. Она состоит из двух линий, каждая из которых имеет два контура. Минерализация на выходе первого контура составляет порядка 500 промилле, в то время как на выходе второго контура – всего 15 промилле. Часть воды обходит второй контур и смешивается с водой на его выходе. До оптимизации вода, полученная на установке ОО, имеет минерализацию порядка 80–100 промилле.

Цель оптимизации состоит в том, чтобы найти минимальное количество решеток<sup>3)</sup> второго контура, необходимое для гарантированного обеспечения требуемого качества воды. Это, в свою очередь, уменьшает:

- расход электроэнергии на насосы решеток второго контура на 0,5 МВт/насос;
- расходы на техническое обслуживание решеток второго контура;
- расходы на химикаты в установке получения питьевой воды.

Кроме того, уменьшение количества работающих решеток во втором контуре приводит к увеличению объема воды, производимой установкой ОО, так как на каждом втором контуре сбрасывается примерно 10 процентов воды.

Цель оптимизации состоит в том, чтобы найти минимальное количество решеток второго контура, необходимое для гарантированного обеспечения требуемого качества воды.

Для интерактивной гибридной оптимизации используется имитатор, показанный на рис. 4. В приведенном производственном примере можно вывести из эксплуатации две решетки второго контура (при стандартной технологии одна ре-

шетка второго контура используется для каждой двух работающих решеток первого контура). Кроме того, имеется также автономный инструмент для моделирования различных сценариев. На предприятии FWPP гибридная оптимизация обеспечивает экономию, эквивалентную 6 процентам от общих затрат на топливо.

### Оптимизация МД

Основные эксплуатационные расходы, связанные с установкой многоступенчатой дистилляции, определяются стоимостью пара, химических реактивов и электроэнергии, потребляемой оборудованием установки. Задача МД-оптимизатора состоит в том, чтобы свести к минимуму сумму этих затратных составляющих путем вычисления оптимальных уставок, которые обеспечат постоянство производимого объема воды. На рис. 5 показана типичная затратная кривая в функции от предельной температуры рассола (ПТР).

Затраты на пар, приходящиеся на м<sup>3</sup> дистиллята, с повышением ПТР уменьшаются, поскольку, если производство воды должно оставаться на одном и том же уровне, увеличивается производительность. Затраты на реактивы (например, для предотвращения накипи), приходящиеся на м<sup>3</sup> дистиллята, с повышением ПТР возрастают, поскольку при более высоких температурах образование накипи усиливается. Оптимизатор вычисляет оптимальные значения приведенных ниже параметров, так как при заданной нагрузке эти параметры можно использовать в различных сочетаниях:

- предельная температура рассола (ПТР),
- обратный поток рассола,
- морская вода для сброса температуры (только в зимнее время),
- морская вода для сброса потока,
- добавочный поток.

Кроме того, используется пакет моделирования процессов, который способен моделировать установки МД вплоть до уровня ступеней. Показанная на рис. 6 модель линии МД получена путем объединения расчетных оптимизированных уставок для упомянутых выше параметров с другими компонентами, например, нагревателем рассола и насосами. Определенные с помощью оптимизационного пакета уставки используются операторами для управления процессом дистилляции.

На предприятии используются два инструмента оптимизации – интерактивный и автономный. Интерактивный инструмент каждые 10 минут вычисляет оптимизированные уставки для заданного объема выпуска дистиллированной воды, в то время как автономный инструмент используется для целей планирования.

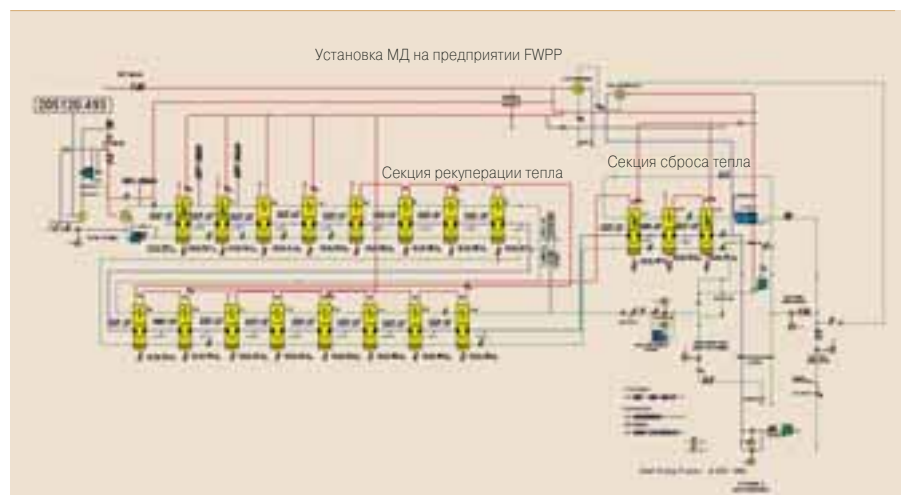
Гибридная оптимизация на предприятии FWPP позволяет сэкономить 0,6 процента от общих затрат на топливо.

Применение оптимизационного инструмента для МД при различных производственных условиях позволило на 1,78 процента сократить соответствующие суммарные затраты.

### Оптимизация технологических процессов

Чтобы иметь возможность своевременно обнаружить любой необычный спад эффективности, необходимо контролировать работу различных зон предприятия (рис. 7). В последующих разделах

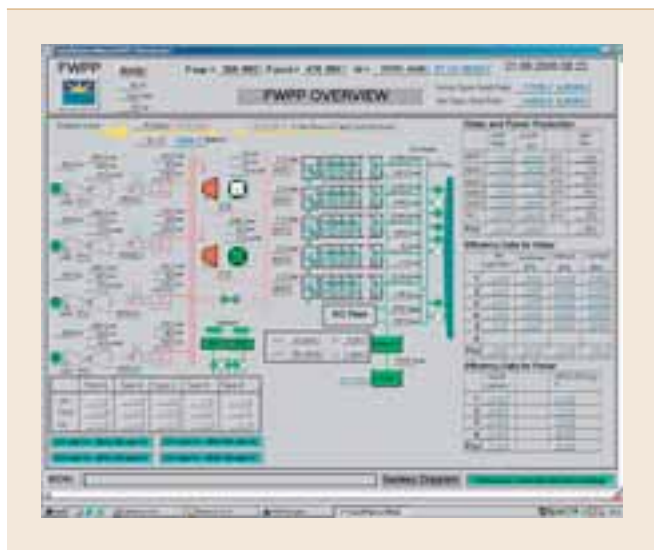
6 Модель многоступенчатой дистилляции.



<sup>2)</sup> <http://www.degremont.ca> (март 2007 г.)

<sup>3)</sup> Решетка представляет собой пакет обратноосмотических мембран, который можно включать в контур и исключать из него.

7 Обзор процессов на предприятии FWPP.

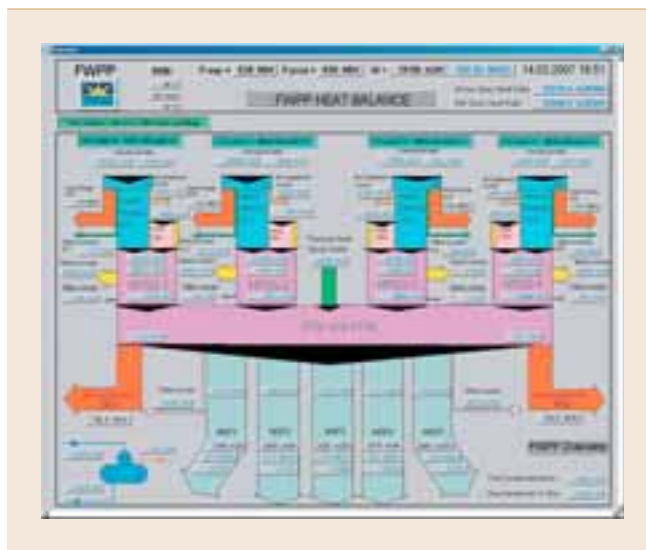


будет описан расчет производственных характеристик в принципе, а также будет рассмотрен пример, в котором были обнаружены отклонения от проектных параметров.

На предприятии FWPP все расчеты выполняются для всего основного оборудования, то есть ГТ, ППРТ, ПТ, насосов питающей воды, установки МД, насосов подачи морской воды, установки ОО и пр. Фотографии изображений на экране и соответствующие тенденции (рис. 8) используются операторами и другими специалистами для анализа работы как всего предприятия в целом, так и его отдельных зон. Сравнение фактических и ожидаемых параметров в сочетании с контрольными идентификаторами делает анализ простым и эффективным. В одном из конкретных случаев, когда была использована система PMOS, была обнаружена неэффективная работа ППРТ. Проведенное исследование показало, что проблема заключается в дутьевом вентиляторе. Точнее говоря, дутьевой вентилятор включается только тогда, когда средняя температура газообразных продуктов сгорания на выходе из прямооточных горелок превышает конкретную контрольную уставку. На предприятии FWPP эта уставка составляла 800 °С. В то же время конструктивные критерии говорили о том, что необходимая уставка составляет 840 °С, и эта разница в 40 °С приводила к тому, что во время работы дутьевого вентилятора эффективность бойлера снижалась на 1,7 процента.

В довершение всего вентиляторы вообще никогда не отключались, так как нижняя уставка температуры в 700 °С была слишком низкой (температура редко снижалась ниже этого значения). После внедрения программного пакета такая практика была изменена, и результатом стало значительное повышение эффективности.

8 Диаграмма теплового баланса с расчетными тепловыми потоками.



#### Оптимизация рабочих процессов

В дополнение к описанному выше существуют виды рабочих процессов, которые также можно оптимизировать и улучшить. К ним относятся:

- автоматическое создание журналов и отчетов, которое экономит рабочее время и позволяет избежать ошибок, допускаемых при ручном вводе данных;
- автоматический обмен данными с другими системами, например, с системой CMMS (Computerized Maintenance Management System).

На предприятии FWPP было автоматизировано создание свыше 100 журналов и отчетов, что дало экономии порядка 18 рабочих часов в сутки. Простые в использовании инструменты, предназначенные для конфигурирования различных типов отчетов, были разработаны компанией АББ с использованием в системе программного обеспечения Microsoft Excel.

В целом предприятие FWPP сэкономило более четырех процентов всех затрат на топливо, к которым можно добавить экономию, полученную в результате оптимизации рабочих процессов.

#### Заключение

Оправдав себя установка системы PMOS (Performance Monitoring and Optimization System) на предприятии FWPP, вырабатывающем воду и электроэнергию, показала эффективность

применения современных методов оптимизации на электростанциях. По сути дела большинство из описанных методов оптимизации могут также быть использованы на вырабатывающих электроэнергию и воду предприятиях с негибридной структурой.

В целом предприятие FWPP сэкономило более четырех процентов всех затрат на топливо, к которым можно добавить экономию, полученную в результате оптимизации рабочих процессов. Достиженные результаты показывают наличие потенциала, который существует для оптимизации других гибридных и негибридных предприятий.

**Гоец-Д. Вольф**  
**Стефан Локстерманн**  
 ABB AG, Minden  
 Германия  
 goetz.d.wolff@de.abb.com  
 stefan.lauxtermann@de.abb.com

**Рамеш Кумар**  
 ABB AG, Абу Даби  
 ОАЭ  
 ramesh.kumar@uae.abb.com

#### Литература

- [1] Ludwig Heinz, Stummeyer Karen, FICHTNER, Potabilisation – Nachbehandlung von Destillat und Permeat aus Meerwasserentsalzungsanlagen, May 2004
- [2] Glade Heike, Meyer Jan-Helge, Will Stefan, Strategies for optimization of the Reverse Osmosis Plant in Fujairah, June 2005
- [3] Water Quality Regulation of UAE, Revision 2, January 2004
- [4] On technical and market aspects of water desalination, Nils Huesgen, December 2002