



ОПТИМИЗАЦИЯ РАБОТЫ ВОЗДУХОДУВОК ДОМЕННОЙ ПЕЧИ

Рик Фасел

Компрессор Контролс Корпорэйшен

В этом документе описаны типовые системы воздуходувок доменных печей, применяемых в сталелитейной промышленности по всему миру. Здесь также приводятся примеры оригинальных технических решений по системам управления, предлагаемым компанией Compressor Controls Corporation (CCC)

Работа доменной печи

Надежное и эффективное функционирование доменной печи является критическим фактором для успешной и прибыльной работы комплексного сталелитейного производства и предприятия в целом.

Без адекватной и надежной подачи расплавленного металла в последующие звенья технологической цепочки производства стали очень трудно или невозможно обеспечить поставку конечной продукции, необходимой для выполнения условий контрактов с заказчиками.

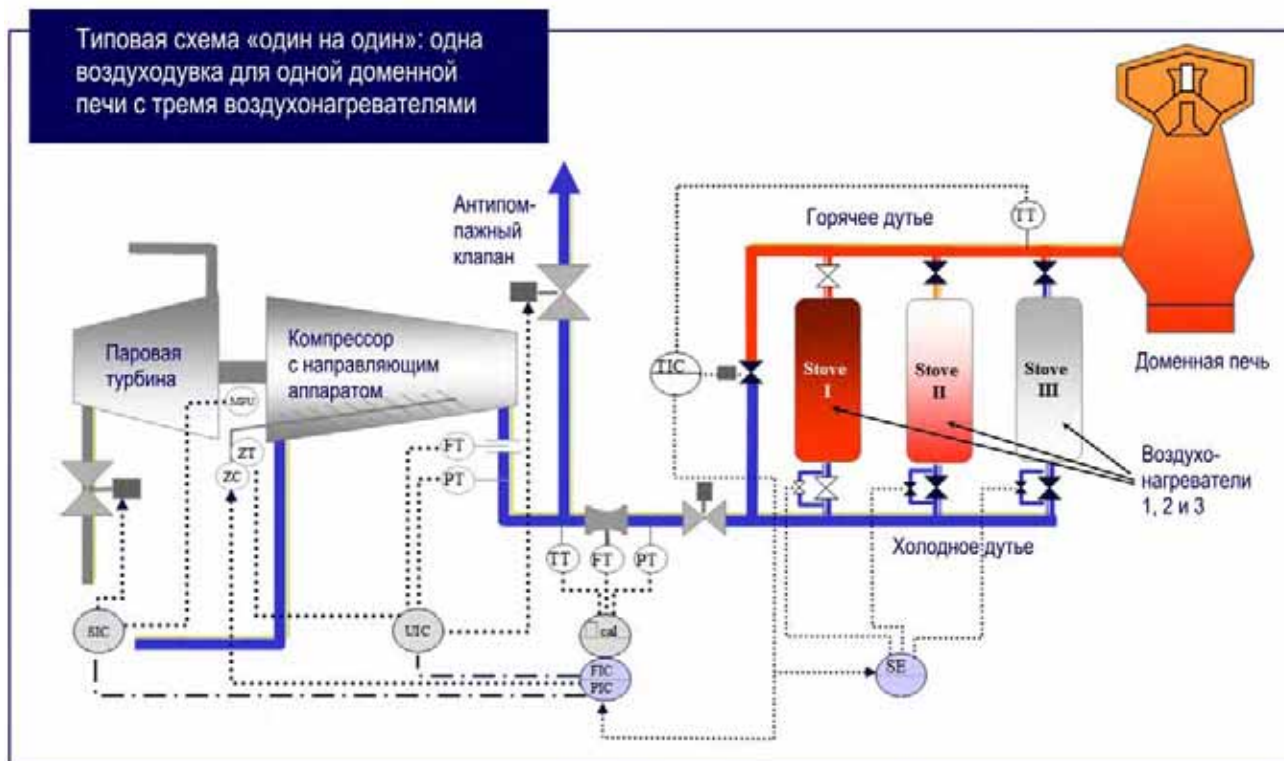
Доменные печи требуют постоянного притока сжатого воздуха (дутья) через лещадь печи для питания процесса горения и поддержания высокого уровня расплавленного металла (шихты).

Если воздухопоток в полностью загруженной печи упадет даже на короткий отрезок времени, расплавленный металл опустится на лещадь печи, попадет на раскаленные фурмы для дутья (горелки) и быстро затвердеет.

В результате данная печь выйдет из строя на период от 8 до 36 часов (в зависимости от серьезности ситуации), в течение которого необходимо удалить затвердевший металл и заменить поврежденные элементы оборудования. Такая несвоевременная потеря воздухопотока часто называется осадком шихты.

Перед входом в печь сжатый воздух (холодное дутье) обогащается кислородом и нагревается (приблизительно, до 1.100°C) в футерованных кирпичом воздухонагревателях для оптимизации производства жидкого чугуна.

В некоторых технологических процессах используется четыре воздухонагревателя, однако, как правило, в последовательности операций для поддержания задания по расходу горячего дутья участвуют три воздухонагревателя. В каждый момент времени один из воздухонагревателей работает в режиме дутья, другой - в режиме нагрева, а третий, только что нагретый, готовится перейти в режим дутья.



На входе и выходе каждого воздухонагревателя установлены изолирующие клапаны. Когда эти клапаны закрыты, доменные (колошниковые) или коксовые газы используются для нагрева кирпичной футеровки воздухонагревателей, которая, в свою очередь, нагревает проходящее через воздухонагреватели холодное дутье. В воздухонагревателе воздух будет нагреваться в течение 40 – 50 минут, после чего воздухонагреватель остывает и становится неэффективным.

Регулятор температуры управляет перепускным клапаном воздухонагревателя для поддержания заданной температуры горячего дутья. Положение перепускным клапана также используется в последовательности переключения воздухонагревателей. Когда холодное дутье проходит через воздухонагреватель, работающий в режиме дутья, температура холодного воздуха в линии перепуска постепенно снижается и количество воздуха уменьшается до момента полного закрытия пе-

репускного клапана. Перед закрытием перепускного клапана система сигнализирует о том, что процесс подачи горячего дутья должен быть передан только что нагретому воздухонагревателю.

В линии главного воздухопровода холодного дутья установлены большие клапаны с гидравлическим управлением (клапаны "снорт" или воздушно-разгрузочные клапаны доменной печи). Эти клапаны используются техническим персоналом доменной печи (как правило, в ручном режиме) для быстрого сброса некоторого количества (или всего) дутья воздуходувки в атмосферу. Ситуации, в которых требуется открытие воздушно-разгрузочных клапанов, варьируются от аварийных ситуаций, связанных с превышением давления, до простого встряхивания оборудования при тугом ходе доменной печи. Во втором случае операторы «встряхивают» шихту с помощью кратковременных всплесков дутья с целью повышения газопроницаемости жидкого чугуна.

Воздуходувки доменной печи

Для подачи холодного воздуха (дутья) в доменные печи используются большие центробежные или осевые компрессоры (турбовоздуходувки). В качестве привода таких агрегатов иногда применяются электродвигатели, однако, как правило, приводом служат конденсационные паровые турбины, использующие малозатратные парообразования, образующиеся из промежуточных/побочных продуктов горения, участвующих в комплексном производстве. Эти воздуходувки могут применяться автономно, либо устанавливаться параллельно, либо работать в системе с отдельным дутьём. При этом даже при автономной работе (один компрессор на печь) обычно имеется несколько вариантов конфигурации трубопровода в целях повышения гибкости в логике переключения воздуходувок.

Задачи системы управления воздуходувками

Современные системы управления воздуходувками доменных печей должны выполнять четыре основных задачи:

- Повышение (или поддержание) надежности доменной печи и турбовоздуходувки
- Максимальное увеличение производительности доменной печи
- Минимальное использование пара (потребление энергии).
- Упрощение операций и усовершенствование автоматизации системы

Надежность системы состоит в том, что она должна всеми имеющимися средствами предотвращать осадки шихты, приводящие к крайне дорогостоящим простоям технологического процесса. Система также должна обеспечивать антипомпажную защиту и защиту от превышения частоты вращения

турбовоздуходувок при любых возмущениях технологического процесса и оборудования в ходе его производственной эксплуатации. Для обеспечения работоспособности турбоагрегатов система должна предотвращать поломки оборудования, возникающие в результате помпажа или срабатывания защиты от превышения частоты вращения.

Пропускная способность доменной печи может быть увеличена за счет автоматической компенсации потерь горячего дутья при загрузке шихты в воздухоподогреватели, а также путем снижения до минимума отклонения от задания по массовому расходу при нормальных условиях эксплуатации (см. более подробную информацию ниже). С целью расширения диапазона рабочих режимов турбовоздуходувки, что позволит максимально увеличить давление при подаче дутья в печь, в системе должны использоваться передовые методы антипомпажного регулирования.

Согласно имеющимся данным, повышение давления на колошнике доменной печи на 1 фунт/кв. дюйм (0, 07 кг/см²) дает следующие результаты:

- Повышение производительности доменной печи, приблизительно, на 0.8%
- Увеличение экономии кокса, приблизительно, на 0.4%;
- Снижение уровня выбросов пыли в доменной печи в диапазоне от 13 до 33%
- Силикотермическое восстановление жидкого металла, приблизительно, на 0.4%

Используя эти цифры, можно легко подсчитать, что при повышении давления на колошнике доменной печи на 3 фунт/кв. дюйм (0, 21 кг/см²) производительность доменной печи увеличится, приблизительно, на 2.4%, а потребление кокса снизится, приблизительно, на 1.2%.

Усовершенствование системы антипомпажного регулирования турбовоздуходувки также позволило расширить область эффективных рабочих режимов (режимы работы без стравливания газов в атмосферу).

Расширение области рабочих режимов и повышение их эффективности означает снижение выбросов сжатого воздуха в атмосферу во время выполнения проверочных операций, отработки процедур пуска/оста-нова, а также при других условиях, требующих снижения расхода дутья. Кроме того, при изменениях в составе шихты, не-которые воздухоподводящие машины перестают соответствовать требованиям доменных печей, с которыми они работают, в результате чего появляется необходимость постоянных сбросов воздуха даже при нормальных условиях работы воздухоподводки. Экономия энергии, достигаемая за счет устранения ненужных выбросов может играть важную роль для максимального повышения эффективности работы доменной печи.

Уникальные задачи управления / Стандартные решения

Компания Compressor Controls Corporation (CCC) поставляет специализированные схемы антипомпажного регулирования и управления производительностью турбокомпрессорного оборудования, реализованные в аппаратном обеспечении, выполняющем высокоскоростное цифровое управление, как правило, в конфигурации с резервированием. Благодаря своей специализации исключительно в области критических условий работы турбомашинного оборудования, а также в результате внедрения сотен аналогичных систем, компания добилась высокой стандартизации своих технических решений и соответствующих алгоритмов управления, успешно проверенных в эксплуатации.

Одним из самых серьезных нарушений в работе доменной печи обычно считается работа без дутья, «порожняком». При работе порожняком подача холодного дутья прерывается чаще всего в результате ошибок оператора, отказов клапана или проблем при переключении воздухонагревателей. Такая потеря подачи воздуха в печь не только создает возмущения в

процессе горения и прерывает подачу шихты, но также создает широкую волну высокого давления в трубопроводе холодного дутья. Такое значительное повышение давления может привести соединенную с печью турбовоздуходувку в помпаж в течение нескольких секунд и вызвать большие колебания расхода холодного дутья, что повлечет за собой создание очагов перегрева в печи с возможным выплеском жидкого металла на живое сечение фурмы.

Помпажные хлопки также могут привести к повреждениям турбовоздуходувок и турбоприводов в результате реверса тяги и быстрого повышения температуры в различных зонах между стенками турбовоздуходувки. Разрушение турбооборудования может привести к длительным простоям печи и, как следствие, к остановке процесса производства стали.

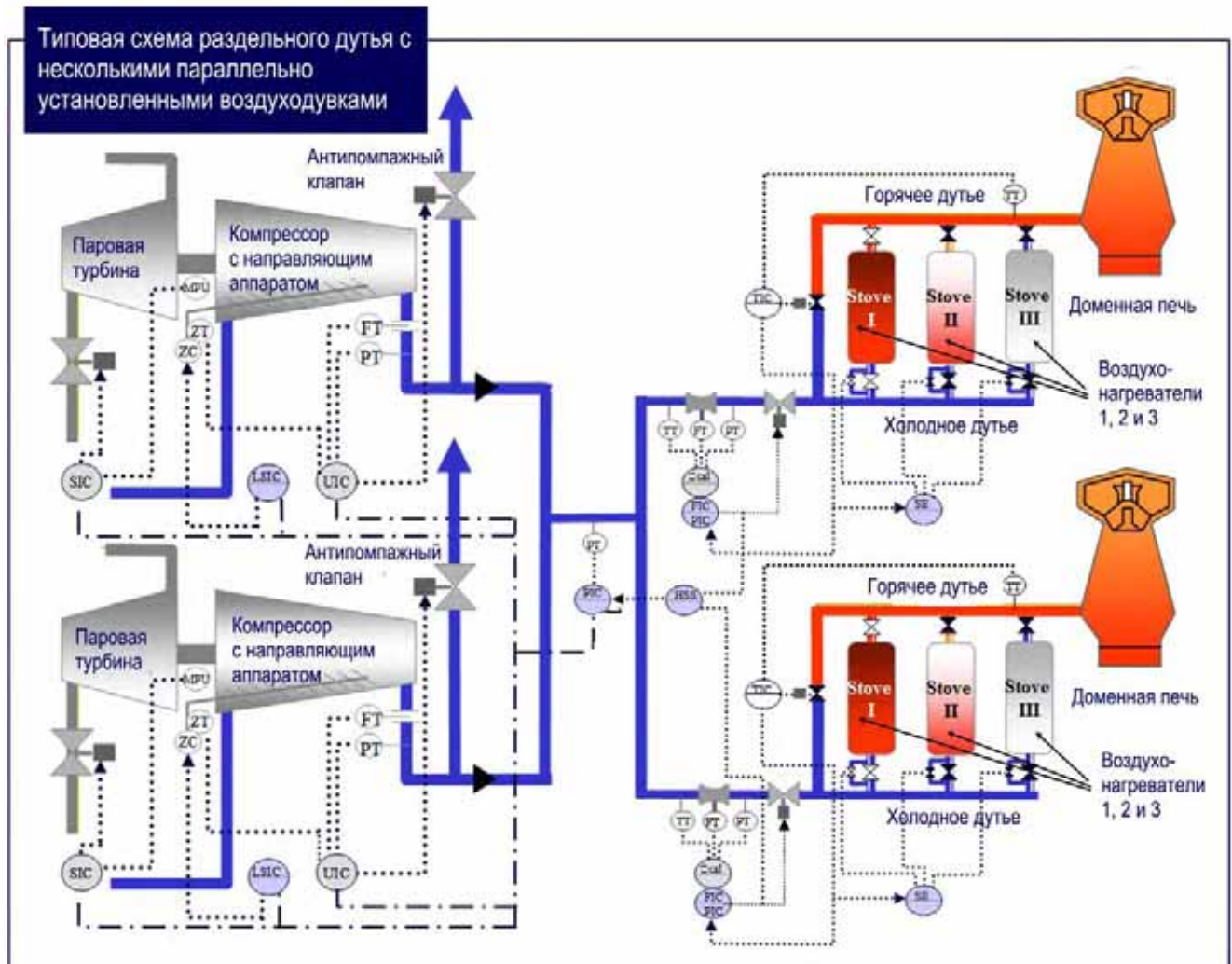
Последовательность операций по переключению воздухонагревателей создает уникальные проблемы (не существующие в других системах управления технологическими процессами) для разработчиков системы управления турбомашинным оборудованием. Основной задачей воздухоподводки является обеспечение стабильного потока дутья в печь в соответствии с контролируемой оператором скоростью дутья, выраженной в единицах массового расхода, поскольку в работе печи необходимо точное количество подаваемого обогащенного кислородом дутья.

Во-первых, система регулирования массового расхода должна обеспечивать высокую точность измерений расхода подаваемого в печь дутья. В связи с тем, что температура горячего дутья (на выходе воздухонагревателей) поддерживается на уровне, приблизительно, 1100°C, ограничения по температуре для электронных датчиков обычно не позволяют выполнять достоверные измерения переменных непосредственно в линии горячего дутья. Поэтому измерения должны проводиться в линии холодного дутья, а также необходимо предусматривать компенсацию пропускной способности воздухоподводки во время периодических снижений расхода горячего дутья,

связанных с загрузкой воздухонагревателей.

Далее, при выполнении нормальной процедуры переключения воздухонагревателей, перед переключением на только что

нагретый воздухонагреватель, давление в нем должно быть увеличено в соответствии с давлением сети (дутья), чтобы свести к минимуму любые перепады в расходе подаваемого в печь дутья.



Для повышения давления в воздухонагревателях используются их загрузочные клапаны, а поскольку эти клапаны обычно устанавливаются за (по направлению потока) любыми точками достоверных измерений в линии холодного дутья, потери расхода горячего дутья (равные количеству воздуха, необходимого для повышения давления в только что нагретом воздухонагревателе) не выявляются приборами, задействованными в технологическом процессе. Другими словами, поскольку

массовый расход в трубопроводе холодного дутья сохраняется на одном уровне, типовая система управления не предпримет никаких действий для увеличения пропускной способности воздуходувки во время выполнения процедуры загрузки. Без компенсации такой проблемы в измерениях, доменная печь будет испытывать периодические снижения массового расхода, приводящие к снижению производительности ниже оптимального уровня.

Многие большие доменные печи используют несколько турбовоздуховодов, работающих одновременно по параллельной схеме. При такой конфигурации перед работниками системы управления также возникает ряд проблем, связанных с динамикой работы контуров управления и требованиями по распределению нагрузки. Даже если в такой системе используются идентичные воздуховоды и приводы, эти агрегаты могут существенно отличаться друг от друга по характеристикам помпажа и запираания, а также по показателям рабочего кпд. Это происходит из-за небольших несоответствий в допусках и различий в технологической трубной обвязке, в результате чего возникают трудности при поддержании стабильного режима во время возмущений процесса, а также при выравнивании нагрузки во время стабильной работы.

Эти трудности, естественно, увеличиваются при использовании в параллельной схеме машин с различными размерами и характеристиками, поскольку увеличивается общая пропускная способность. См. Документ AN-21 компании ССС, где приводятся сведения по схеме распределения нагрузки между параллельно работающими компрессорами, использующей стандартный критерий "S".

На многих комплексных металлургических производствах применяются несколько турбовоздуховодов, соединенных с несколькими доменными печами по схеме раздельного дутья. На таких установках давление в общем коллекторе холодного дутья обычно регулируется с помощью управления клапаном турбовоздуховодки, а для поддержания требуемого массового расхода в каждую доменную печь используются отдельные дроссельные заслонки, установленные в каждом выделенном для данной печи трубопроводе холодного дутья.

В этих случаях задание по давлению в коллекторе устанавливается на достаточно высоком уровне, чтобы иметь возможность поддерживать задание по массовому расходу во все подключенные печи.

Задание по давлению должно включать значительный запас, учитывающий все рабочие условия конкретного предприятия. Наличие такого запаса часто вызывает чрезмерные перепады давления на дроссельной заслонке в линии холодного дутья, что приводит к потерям энергии технологического процесса.

Система управления подачей дутья (в этих случаях) должна обеспечивать снижение до минимума перепадов давления, а также автоматическую компенсацию потерь при выполнении последовательностей загрузки воздухонагревателей, использующих дроссельные заслонки.

Регулирование массового расхода и компенсация потерь при загрузке воздухонагревателей

Компанией ССС были разработаны и усовершенствованы стратегии управления массовым расходом специально для работы доменной печи, гарантирующие компенсацию затрат энергии при загрузке воздухонагревателей.

В регуляторах массового расхода производства ССС реализованы стандартные алгоритмы управления воздуховодками доменной печи, включая возможность автоматического регулирования производительности воздуховодки для компенсации перепадов давления в линии подачи горячего дутья в печь при выполнении операций по переключению воздухонагревателей.

В алгоритмах также предусмотрены ограничения по давлению и частоте вращения. Разработанная ССС схема регулирования производительности воздуховодки включает три основных рабочих режима: *регулирование массового расхода, регулирование давления и автоматическое регулирование загрузки воздухонагревателя.*

Переключение между режимами обычно выполняется оператором с помощью трехпозиционного переключателя, либо задействуется дистанционно через дискретные выходы программируемого логического контроллера (PLC) или по линиям последовательной связи с системой управления более высокого уровня.

На загрузочных клапанах воздухонагревателей и воздушном разгрузочном клапане доменной печи обычно устанавливаются конечные выключатели, обеспечивающие подачу сигналов на дискретные входы системы управления для индикации открытия клапанов.

Для алгоритмов регулятора процесса (производительности) компании CCC требуются аналоговые входные сигналы по расходу, давлению и температуре в трубопроводе холодного дутья, которые используются для вычисления массового расхода.

В системе с одной воздуходувкой на одну доменную печь выходной сигнал этого регулятора управляет частотой вращения паровой турбины (задание для регулятора частоты вращения) и/или положением лопаток направляющего аппарата воздуходувки.

В случае с осевым компрессором, имеющим переменную частоту вращения и изменяемую геометрию, используются выходные сигналы двухконтурного регулятора с цифровым разделением, применяемые с учетом конфигурируемых контрольных точек, взаимных наложений сигналов и ограничений.

В режиме автоматического управления загрузкой воздухонагревателя регулятор процесса будет регулировать задание по массовому расходу, когда все загрузочные клапаны воздухонагревателей закрыты, а при открытии одного из загрузочных клапанов регулятор автоматически переключается на регулирование давления в линии холодного дутья (удерживая его на уровне давления в сети).

Открытие загрузочного клапана указывает на то, что идет процесс загрузки воздухонагревателя и на то, что началось снижение расхода в печь. Открытие одного из загрузочных клапанов, естественно, приведет к снижению давления в линии холодного дутья при относительно неизменном значении массового расхода.

При переключении в режим управления давлением в результате открытия загрузочного клапана, регулятор становится способным «видеть» возмущение и начинает увеличивать частоту вращения турбины и/или приоткрывать лопатки направляющего аппарата, чтобы компенсировать потери.

Анализ трендов в работе различных систем показывает, что регулирование давления в линии холодного дутья при выполнении процедур загрузки воздухонагревателей обеспечивает очень плавное и достаточно точное управление массовым расходом в линии горячего дутья. По окончании загрузки воздухонагревателей система переключается обратно в режим регулирования массового расхода дутья при значении расхода, вычисляемого на момент переключения, которое затем регулятор плавно и постепенно изменяет до достижения последнего выбранного оператором задания по расходу.

Переход в режим регулирования массового расхода может выполняться в любое время, когда потребуются заблокировать режим регулирования давления. Как правило, такой переход инициируется (автоматически) при открытии воздушно-разгрузочного клапана доменной печи.

Переход в режим регулирования давления может выполняться в любое время, когда для работы системы требуется постоянное давление в линии (обычно это выполняется при проведении проверочных процедур или процедур пуска или останова).

Схема регулирования по наиболее открытому клапану для систем с отдельным дутьем

В системах, использующих одну или более воздуходувок, обеспечивающих подачу дутья в несколько доменных печей, давление в коллекторе холодного дутья обычно регулируется независимо от массового расхода в каждую печь.

В этом случае скорость дутья каждой отдельно взятой печи регулируется с помощью отдельного регулирующего клапана расхода (обычно используется дроссельная заслонка) по каждой доменной печи. Чрезмерное падение давления на этих заслонках, выполняющих функцию регулирующих клапанов указывает на потери энергии в системе и может ограничивать максимальное давление подачи дутья. Использование специализированной схемы оптимизации управления давлением в коллекторе может значительно снизить падение давления на этих клапанах и повысить эффективность работы доменной печи.

В настоящее время компания CCC разработала схему управления по наиболее открытому клапану (**most-open valve**, сокращенно - MOV), которая обеспечивает непрерывный контроль положения регулирующего клапана расхода в линии холодного дутья и автоматическое регулирование задания по давлению в коллекторе холодного дутья.

Кроме традиционных контуров регулирования массового расхода и давления, требуемых для данной системы управления, в схему MOV дополнительно включен специальный контур регулирования, реализующий алгоритм выбора по верхнему значению сигнала положения отдельно взятого регулирующего клапана расхода (используя выходные сигналы регулятора расхода или сигналы датчиков положения клапана) в качестве своей

переменной процесса и сравнения этого значения с устанавливаемым оператором заданием по положению клапана.

Выходной сигнал контура MOV затем становится заданием для мастер-регулятора давления в коллекторе. Задачей данной системы является удержание положения наиболее открытого регулирующего клапана как можно ближе к 100 % его открытия при одновременном поддержании управляемости остальных регулирующих клапанов. В данной схеме регулирования компании CCC заложен алгоритм развязки всех контуров, предназначенный для обеспечения максимальной стабильности всей системы и непосредственной настройки пропускной способности воздуходувки (при быстро развивающихся возмущениях, в обход каскадной схемы, включающей контуры регулирования положения клапана и давления) для удовлетворения требований по расходу в печи с наибольшим газовым сопротивлением.

Для лучшего понимания принципа работы системы, приведем следующий пример. Предположим, задание регулятора MOV установлено на 95% открытия. Когда наиболее открытый регулирующий клапан открывается более, чем на 95 %, регулятор MOV начинает увеличивать задание по давлению в коллекторе для удовлетворения требуемых расходов во всех печах. Соответственно, когда наиболее открытый регулирующий клапан открывается менее, чем на 95 %, регулятор MOV начинает уменьшать задание по давлению в коллекторе, чтобы свести к минимуму потери давления в системе.

На некоторых установках компанией CCC был успешно применен асимметричный коэффициент передачи по контуру в тех случаях, когда задание по давлению изменяется быстрее при его увеличении и медленнее при его снижении.

Автоматизация системы

Регуляторы массового расхода компании CCC также выполняют ряд автоматических функций:

- Процедуры автоматического пуска и останова;
- Автоматическое выравнивание нагрузок агрегатов при выполнении воздуходувками режимных переходов;
- Автоматическое снижение скорости дутья при проведении контрольных процедур в печи;
- Автоматический режим переключения при открытом воздушно-разгрузочном клапане доменной печи. Имеется возможность переключения в режим местного регулирования частоты вращения с выбором в качестве задания текущей частоты вращения или одного из предварительно установленных значений расхода.



CCC - Des Moines
4725 121st Street
Des Moines, Iowa 50323-2316
U.S.A.
T: 515-270-0857
F: 515-270-1331
E: usadesmoines@cccglobal.com

CCC - Россия
ул.Шаболовка 34, стр.2
Москва, 115419, Россия
T: 7-495-617-1293/94/95
T: 7-495-913-9764
F: 7-495-913-9765
E: russia@cccglobal.com

Заключение

Технические решения компании CCC по управлению воздуходувками доменной печи предоставляют конечному пользователю ряд преимуществ:

- увеличение производства чугуна/металла за счет стабилизации массового расхода и автоматической компенсации потерь при загрузке воздухонагревателей;
- повышение давления на колошнике позволяет снижать требуемое количество кокса, а также снижать общие затраты пользователя на кокс;
- наконец, повышение надежности работы воздуходувок/процесса.

Компания CCC предлагает ряд технических решений по управлению предприятиями сталелитейного производства, включая оптимизацию работы газового насоса / коксовой пересыпки коксовой печи, оптимизацию/автоматизацию работы воздушных компрессоров заводского воздуха, а также компрессоров установки разделения воздуха для трубопроводов технологического воздуха и кислородной системы. Для получения дополнительной информации, пожалуйста, обратитесь к Российскому представительству компании CCC, или в головной офис компании CCC в г. Де Мойн, штат Айова, США.

