

PADS-03-163

**Опыт использования встроенных инструментальных
средств усовершенствованного управления
для Атмосферной и Вакуумной колонн**

Крис Коминар
Ergon West Virginia, Inc.

Стив Елварт
Ergon Refining, Inc.

Пит Шарп
Emerson Process Management

Представлено на конференции по автоматизации процессов
и поддержки принятия решений
21 – 24 Сентября 2003 года, Сан Антонио, Техас

Краткий обзор

Компания Ergon West Virginia Inc. недавно установила новую распределенную систему управления (PCU) на часть установок нефтеперерабатывающего завода (Newell, WV lube oil). Данный документ посвящен применению встроенных средств усовершенствованного управления (Advanced Process Control, APC) на атмосферной и вакуумной колоннах НПЗ. Данный проект включал использование двух контроллеров, реализующих регулирование по прогнозирующей модели (Model Predictive Control, MPC), для улучшения управления профилем температуры на тарелках каждой колонны в целях стабилизации параметров качества продуктов. Также использовалась технология нейронных сетей для вычисления ряда ключевых параметров состава, которые производятся в реальном времени каждые несколько секунд и выводятся в качестве ориентира для операторов. Использование встроенных средств APC и ограничение размерности задачи многосвязного управления позволило компании Ergon реализовать проект за небольшую часть стоимости традиционных APC проектов и, тем не менее, достичь значительного снижения вариаций качества и получить большинство выгод, потенциально заложенных в данную технологию.

Введение

Компания Ergon владеет нефтеперерабатывающим заводом в городе Newell, Западная Вирджиния, производительностью 20,000 баррелей в день. На ряде установок завода недавно была завершена вторая фаза проекта модернизации системы управления. В рамках данного проекта две операторных были объединены в одном помещении, была установлена современная распределенная система управления (PCU), и большинство полевых устройств было модернизировано для поддержки технологии интеллектуальной полевой шины Foundation Fieldbus. Вторая фаза проекта охватывала установки первичной переработки, установки удаления смол из пропана, вакуумную колонну, и установку водоочистки.

Компании Ergon потребовалось провести некоторые предварительные работы для подготовки тендерной спецификации и технических требований к новой системе управления. Эти работы включали:

- n Обновление исходных чертежей технологических схем с КИП-овскими позициями (P&ID) для приведения их в соответствие фактическому положению
- n Ревизия и утверждение изменений и усовершенствований в схемах управления
- n Разработка стандартов и рекомендаций для PCU
- n Подготовка технических спецификаций PCU

Тендерная информация по данному проекту была предложена пяти потенциальным поставщикам систем управления, число которых впоследствии было сокращено до трех. В результате была выбрана система DeltaV компании Emerson, и заключен контракт на выполнение следующих работ:

- n Обновление листов спецификаций полевого оборудования
- n Генерация схем расположения полевых приборов
- n Разработка сегментов Fieldbus
- n Разработка схем прокладки кабельных каналов
- n Монтаж кабельных трасс и прокладка кабелей
- n Конфигурирование системы управления
- n Заводские приемочные испытания системы управления
- n Установка системы на объекте и приемочные испытания на объекте
- n Перевод на новую схему контуров управление без останова процесса (4 –10 контуров в день)

Общее время перехода на новую систему составило примерно 2 недели на каждую установку.

Общий объем фазы 2 отражает следующая таблица сигналов ввода-вывода:

FF	391
HART	77
AI	19
AO	22
DI	72
DO	3
Всего	584
FF	67%
Традиционный в/в	33%

Практика показывает, что современная цифровая система со встроенными возможностями усовершенствованного управления может обеспечить значительное повышение производительности по сравнению с традиционными системами управления. С новыми инструментальными средствами APC, которые встроены в платформы некоторых PCY, дополнительная стоимость внедрения этих стратегий управления разительно снизилась по сравнению с их реализацией на старых PCY. Несмотря на это, многие проекты замены систем управления ограничиваются немногим более, чем простым воспроизведением существующих стратегий управления. Соответственно, большинство потенциальных преимуществ никогда не реализуется или, в лучшем случае, откладывается на несколько лет.

Компания Ergon применила другой подход к проекту модернизации своей системы управления. В качестве инженеринговой части проекта поставщик системы управления должен был провести ревизию существующих схем регулирования и выработать рекомендации по усовершенствованию работы установок за счет возможностей, предлагаемых новой PCY. Кроме того, инженерная группа пересматривала приоритеты производства с учетом экономической ситуации и идентифицировала области, в которых будет получена наибольшая выгода от внедрения APC. Отчет инженерной группы стал частью проекта на инженеринг, и, таким образом, реализация функций расширенного регулирования и усовершенствованного управления была запланирована с самого начала.

Данный документ содержит описание опыта использования встроенных средств APC для достижения существенного улучшения работы установок первичной переработки и вакуумной трубчатки на нефтеперерабатывающем заводе.

Описание процесса

Установки первичной переработки и вакуумной трубчатки на НПЗ в городе Newell представляют собой классическую конфигурацию нефтеперерабатывающего завода. Сырье (нефть) предварительно нагревается, проходя через ряд теплообменников перед тем, как поступает в испарительную колонну (flash tower), в которой отделяются легкие компоненты нефти. Сырье далее нагревается в двухпоточной печи, которая сжигает топливный газ для поддержания температуры сырья на выходе обоих потоков. Вверху атмосферной колонны отбирается прямогонный бензин, и также имеется три продукта боковых отборов: керосин, тяжелые керосиновые фракции (тяжелый керосин) и атмосферный газойль, которые пропускаются через отпарные колонны (стриппинги). На колонне имеется два циркуляционных орошения, предназначенных для съема излишков тепла с колонны и предварительного нагрева сырой нефти в теплообменниках. Пары верха колонны конденсируются в пластинчатых обменниках. На рисунке 1 представлена упрощенная схема процесса первичной переработки (атмосферной колонны).

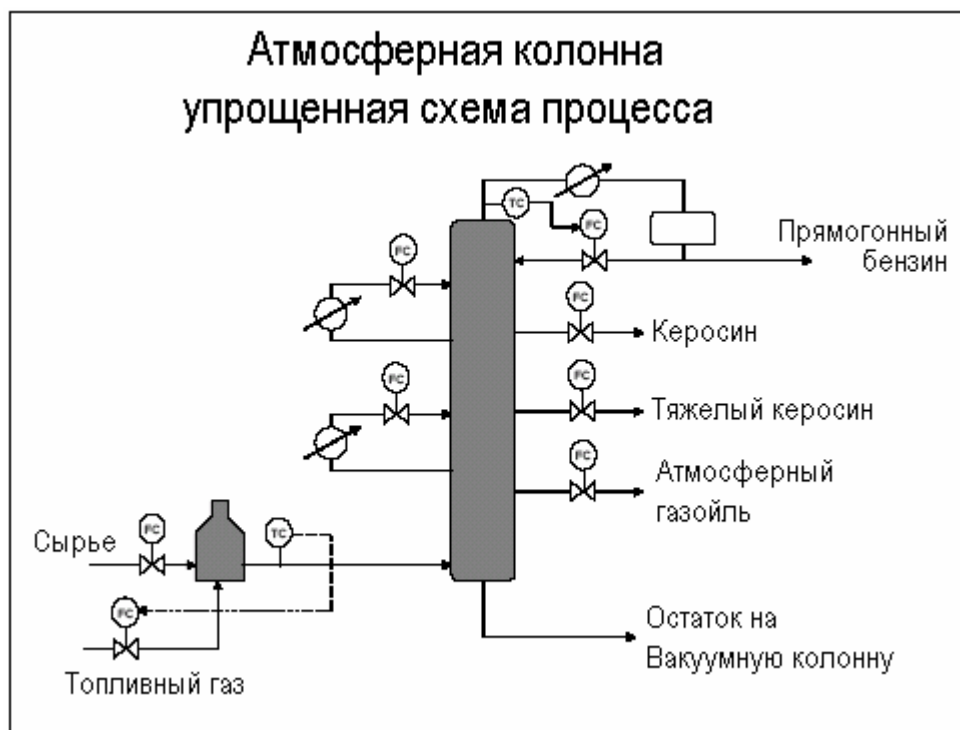


Рисунок 1

Остаток отбирается снизу атмосферной колонны и подается непосредственно на печь вакуумной секции, которая также является двухпоточной и работает на топливном газе. Вакуумная колонна использует систему эжекторов паров (вакуумных насосов), которая позволяет снизить номинальное давление до 50 – 70 мм ртутного столба. С вакуумной колонны отбирается три боковых продукта, которые далее пропускаются через стрипперы. Продуктами боковых отборов являются вакуумный газойль, и вакуумные погоны (дистиллят и тяжелый дистиллят). Верхняя секция колонны содержит насадку, с которой производится общий отбор вакуумного газойля. Часть потока вакуумного газойля охлаждается, проходя через пластинчатые теплообменники, и подается вверх колонны в качестве холодного орошения, а часть возвращается как горячее орошение. Часть потока тяжелого дистиллята также возвращается в колонну в качестве горячего орошения куба. На рисунке 2 представлена упрощенная схема вакуумной секции.

Установка первичной переработки нефти НПЗ города Newell обычно работает на стабильном составе нефти из района Аппалачей, выбранной для максимизации ценных компонентов производства масел. Ключевыми показателями качества являются температуры конца кипения различных боковых отборов, которые могут непосредственно продаваться как готовые продукты, перерабатываться на последующих установках технологической схемы или использоваться при смешении для получения продуктов различных марок. Лабораторные анализы ключевых продуктов проводятся каждые четыре часа, и по их результатам корректируются отборы каждой из колонн.

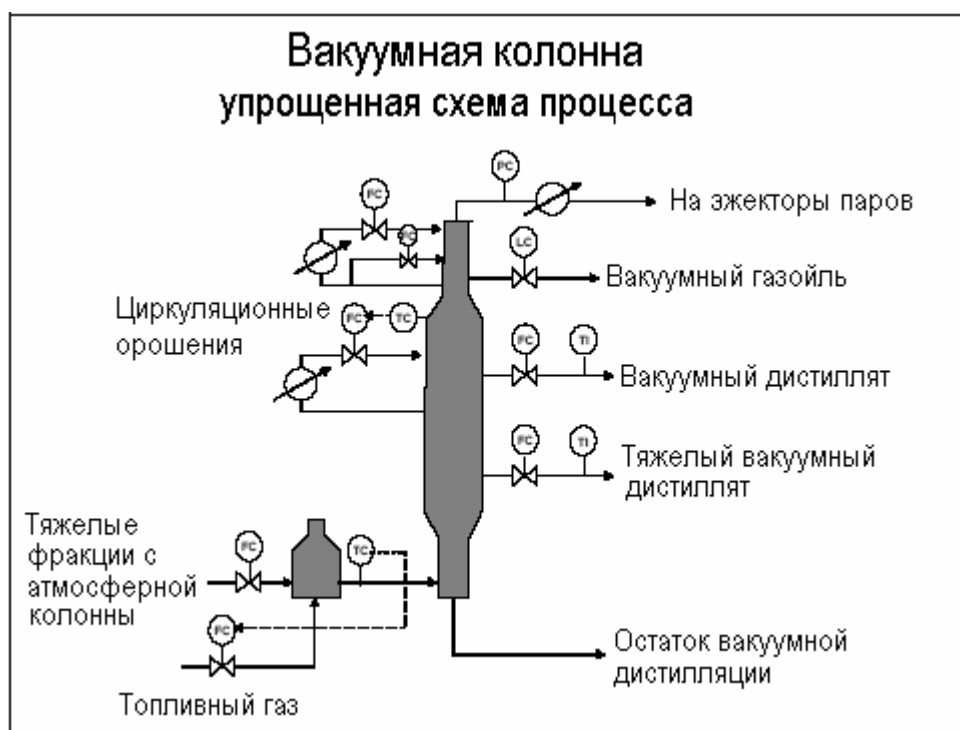


Рисунок 2

Установка первичной переработки нефти редко является узким местом НПЗ, поэтому увеличение ее производительности представляет ограниченный интерес. Основные возмущения технологического процесса связаны с переключением резервуаров сырьевого парка или капризами погоды.

Стратегии усовершенствованного управления

Разработка функций APC проводилась таким образом, чтобы можно было воспользоваться инструментальными средствами, встроенными в PCY, что в первую очередь относится к блокам MPC (регулирование по прогнозирующей модели) и нейронной сети. Задачами управления для обеих колонн являлись:

- n** Стабилизация режима работы колонны при выводе продуктов на заданные показатели качества.
- n** Поддержка работы колонны в рамках специфицированных регламентных и технологических ограничений
- n** Повышение выхода более ценных продуктов в соответствии с их ключевыми характеристиками качества
- n** Минимизация возмущений процесса при переключении резервуаров сырьевого парка или перепадах погоды.

Вышеставленные цели были достигнуты путем использования комбинации блоков MPC, манипулирующих расходами отборов продуктов для регулирования профиля температуры в колонне, и блоков нейронной сети, реализующих виртуальные сенсоры для вычисления ключевых показателей качества продуктов. Вычисления температур с компенсацией по давлению используются для учета влияния флуктуаций давления на температуры в колонне и дальнейшей стабилизации ключевых параметров качества.

Для атмосферной колонны блок MPC был сконфигурирован со следующими переменными:

Переменная	Описание
MV1	Расход острого орошения
MV2	Отбор керосина
MV3	Отбор тяжелого керосина
MV4	Отбор прямогонного бензина
CV1	Температура верха колонны
CV2	Температура на тарелке отбора керосина
CV3	Температура отбора тяжелого керосина
CV4	Температура отбора прямогонного бензина
DV1	Температура острого орошения
DV2	Температура на выходе из печи
DV3	Общий расход загрузки (сырья)
CNST	Нет

Обозначения:

MV – Манипулируемая переменная (Manipulated Variable)

CV – Регулируемая переменная (Controlled Variable)

DV – Переменная возмущения (Disturbance Variable)

CNST – Переменная ограничения (Constraint Variable)

Блок нейронной сети используется для прогноза в реальном времени температуры конца кипения нефти и прямогонного бензина, чтобы обеспечить ориентиры для операторов. Входные переменные блока нейронной сети включают температуры на тарелках колонны, давления, расходы отборов продуктов, температуру сырья на выходе из печи, расходы на орошение и пара на стрипперы. Прогнозируемые параметры качества могут постепенно заменить РСТ (температуры, скомпенсированные по давлению) в списке регулируемых переменных по мере того, как будет накоплено достаточно данных с процесса, чтобы сделать эти прогнозы точными и надежными (робастными).

Для вакуумной колонны блок MPC регулирует три переменные, а именно: температуры (скомпенсированные по давлению) на тех тарелках, которые, как было обнаружено, наиболее сильно зависят от расходов отбора продуктов. Регулятор на вакуумной колонне использует следующие переменные:

Переменная	Описание
MV1	Расход орошения (Т-102)
MV2	Отбор (расход) вакуумного дистиллята
MV3	Отбор тяжелого вакуумного дистиллята
CV1	Температура паров вакуумного газойля (в трубе)
CV2	Температура вакуумного дистиллята (тарелка 11)
CV3	Температура тяжелого вакуумного дистиллята (тарелка 7)
DV1	Температура орошения
DV2	Температура на выходе из печи
DV3	Общий расход загрузки (сырья)
CNST	Температура потока вакуумного дистиллята

Блок нейронной сети используется для вычисления температуры выкипания 95% вакуумного дистиллята (точки 95%) в основном в целях отображения на дисплей оператора. Входные переменные блока включают температуры на тарелках колонны, давления, расходы отборов продуктов, температуру сырья на выходе из печи, расходы на орошение и пара на стрипперы.

Реализация

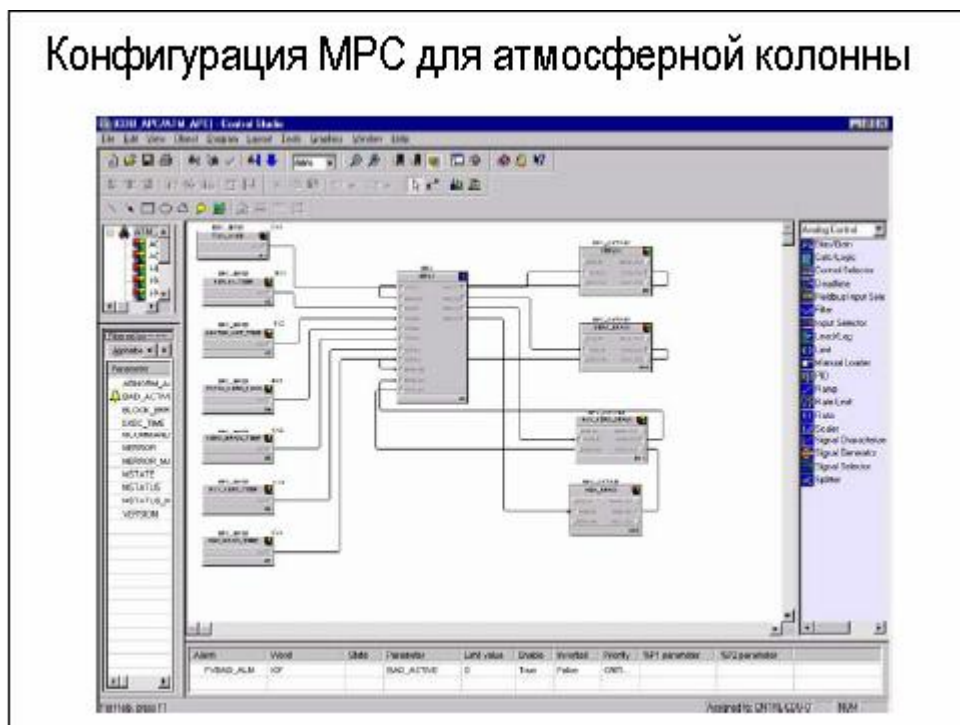


Рисунок 3

Ключевым преимуществом использования встроенных инструментальных средств APC представляется простота реализации стратегий усовершенствованного управления. Проект начался с технического совещания на площадке заказчика, чтобы утвердить задачи APC, стратегии управления и выполнить на объекте некоторые предварительные тесты ступенчатых возмущений для лучшего понимания динамики процесса и параметров ограничений. Был подготовлен краткий документ (brief Functional Design), который очерчивал стратегии управления, специальные вычисления и процедуры тестирования. Стратегии усовершенствованного управления конфигурировались прямо по этому документу, что позволило исключить фазу детальной проработки (Detailed Design). Конфигурация управления для каждой из колонн, включая нестандартные вычисления компенсаций по давлению для температур, блоки MPC и нейронной сети, а также модификация мнемосхем оператора были выполнены менее чем за один день.

Конфигурация блока MPC для атмосферной колонны показана на рисунке 3. Данная конфигурация была выполнена графически средствами Студии Управления примерно таким же образом, что и конфигурация контуров ПИД или других алгоритмов в системе.

После завершения конфигурации использовались встроенные средства автоматического тестирования для определения реакции процесса на ступенчатые изменения манипулируемых переменных. Средства автоматического тестирования MPC используют методику псевдослучайного релейного сигнала, которая состоит в релейных изменениях манипулируемых переменных вблизи из текущих значений по специальному тестовому шаблону. К сожалению, на атмосферной колонне во время испытаний наблюдались дополнительные возмущения в температуре сырья на выходе из печи, давлениях в колонне и температуре орошений (была штормовая погода), что помешало получению качественных результатов. Таким образом, нам пришлось использовать

автоматические средства для реализации традиционного тестирования, заключающегося в снятии динамики процесса, связанной со ступенчатым изменением каждой манипулируемой переменной в отдельности.

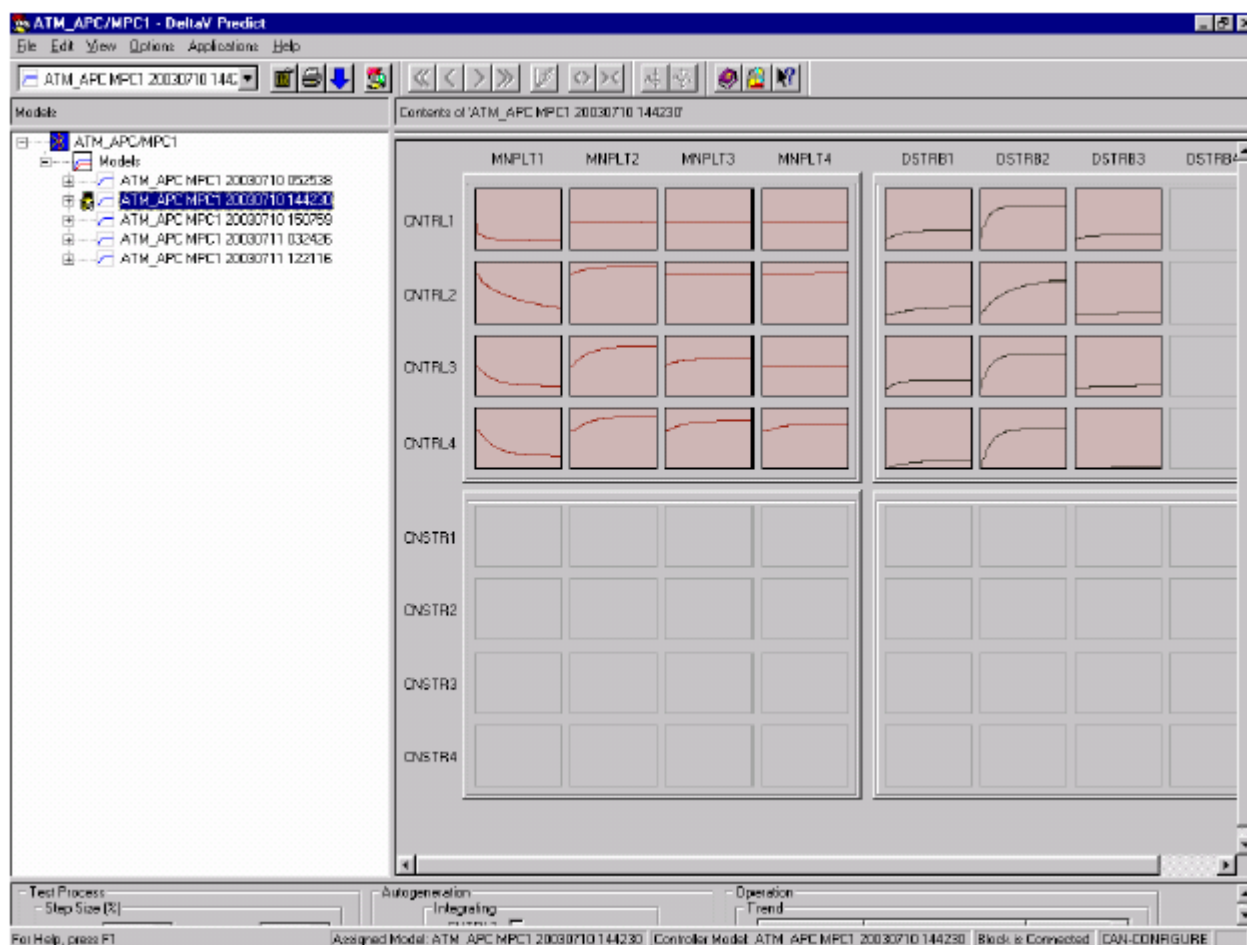


Рисунок 4

Модели для атмосферной колонны

После завершения тестов на ступенчатое возмущение были использованы встроенные средства для идентификации модели по архивным данным процесса и проверки ее адекватности. Окончательные модели, полученные для атмосферной колонны, показаны на рисунке 4.

Результаты проверки адекватности модели, демонстрирующие действительные и предсказанные графики изменения каждой из регулируемых переменных, показаны на рисунке 5. Следует отметить, что смещения между реальным и прогнозируемым поведением, наблюдаемые на графиках некоторых переменных не представляет особых проблем, если коэффициент передачи и постоянная времени определены с разумной точностью. Эти сдвиги показывают влияние неизмеряемых возмущений, которые учитываются на каждом цикле выполнения регулирования.

Во время ожидания завершения тестов реакции на ступеньку все блоки нейронных сетей были обучены с использованием данных процесса и данных лабораторных анализов, хранившихся в заводской системе архивирования истории процесса. Встроенные инструментальные средства работы с нейронными сетями позволяют задать запаздывание по каждому входу. Это запаздывание вычисляется автоматически, исходя из лучшей корреляции между входной и выходной переменной, но иногда требует дополнительной подстройки на основе знаний процесса. Для каждой прогнозируемой переменной была достигнута разумная точность уже на исходном обучающем наборе данных, поэтому вычисления были переведены в режим реального времени при включенной функции обновления по данным лабораторных анализов. На рисунке 6 в качестве примера показаны результаты обучения нейронной сети для прогноза температуры конца кипения нефти.

Результаты проверки модели

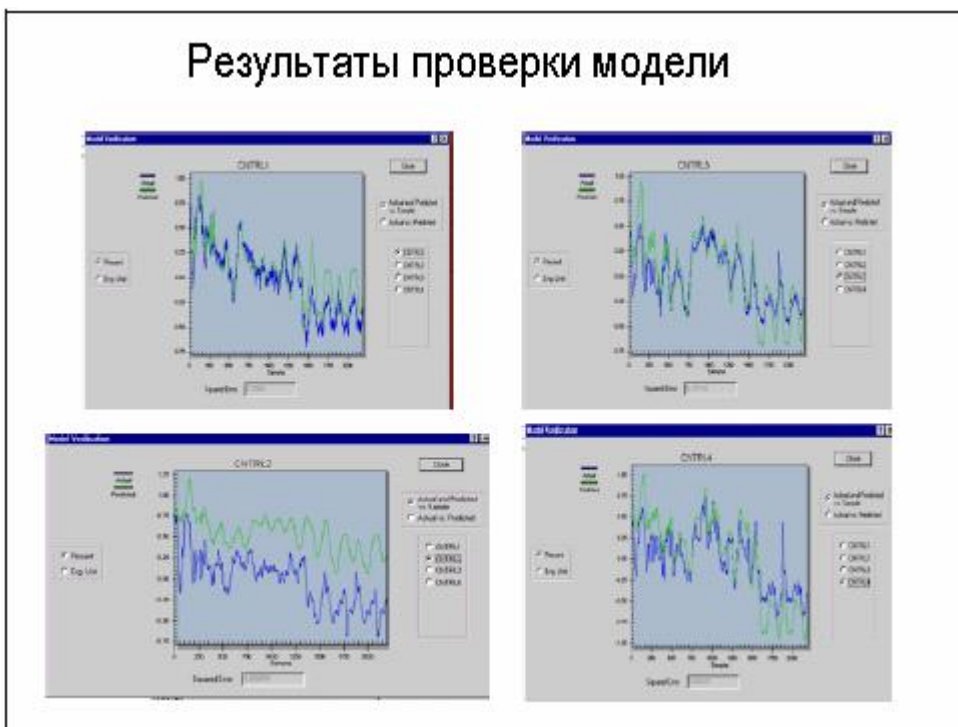


Рисунок 5

Точность модели для темп. конца кипения нефти

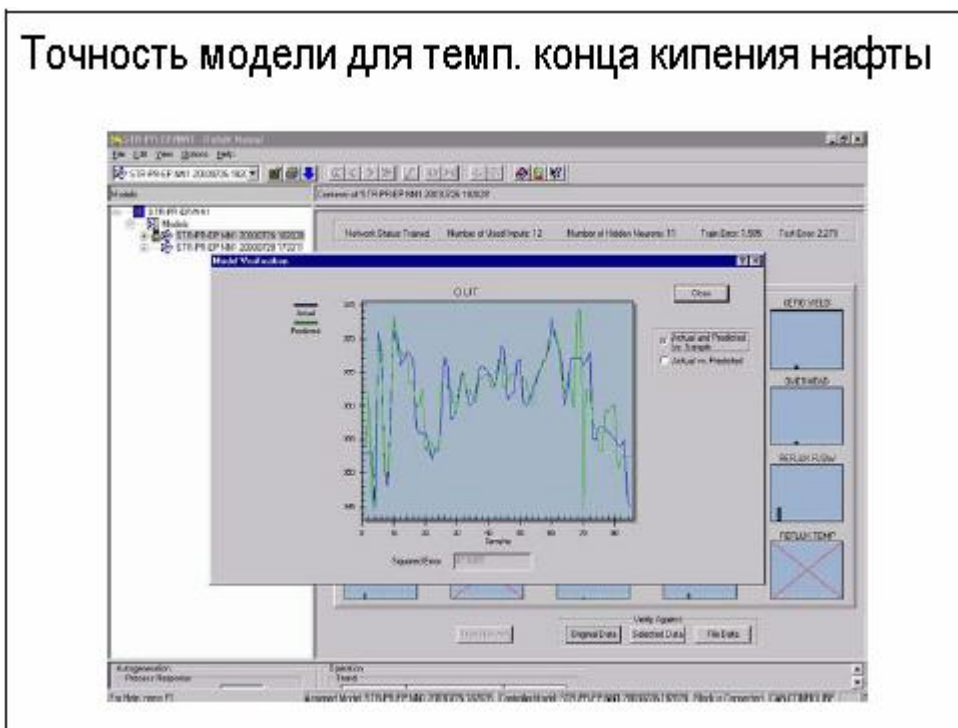


Рисунок 6

Операторский интерфейс к функциям усовершенствованного управления обеспечивается непосредственно со станции PCY. Ключевые вычисленные показатели, прогнозы нейронной сети и уставки контроллера отображаются на мнемосхемах процесса. Ручной ввод заданий блоку MPC также может быть выполнен с этих мнемосхем. Пример обзорной мнемосхемы установки первичной переработки (атмосферная секция) показан на рисунке 7.

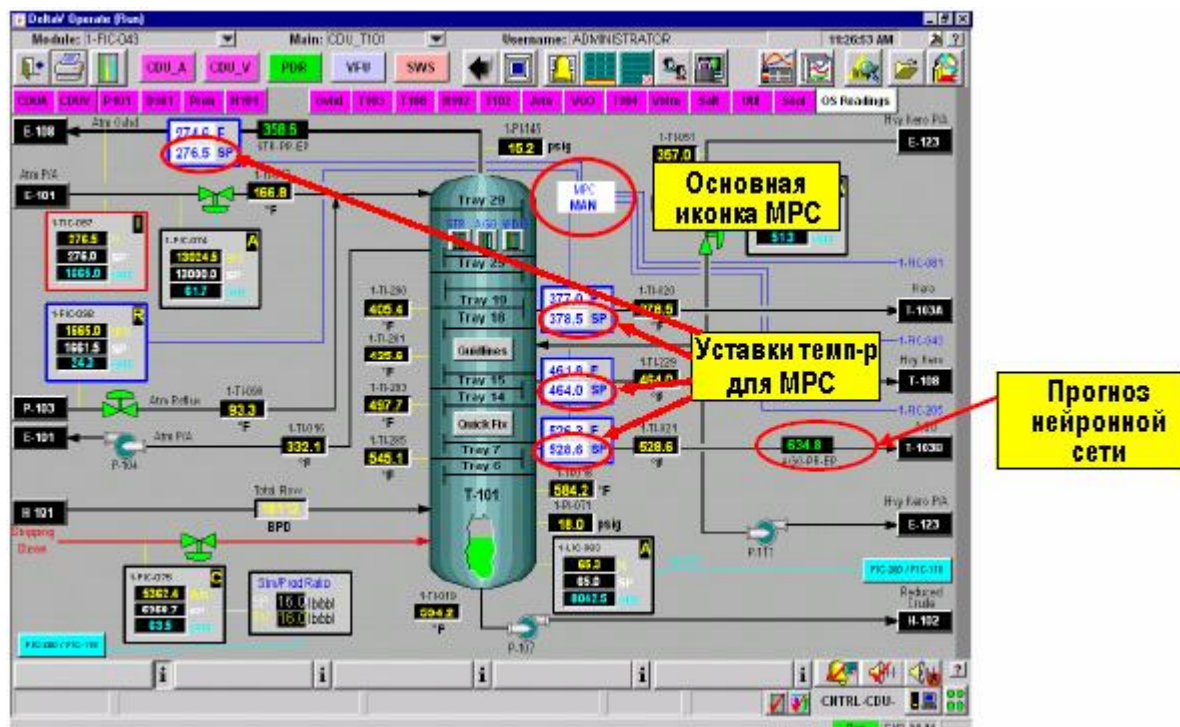
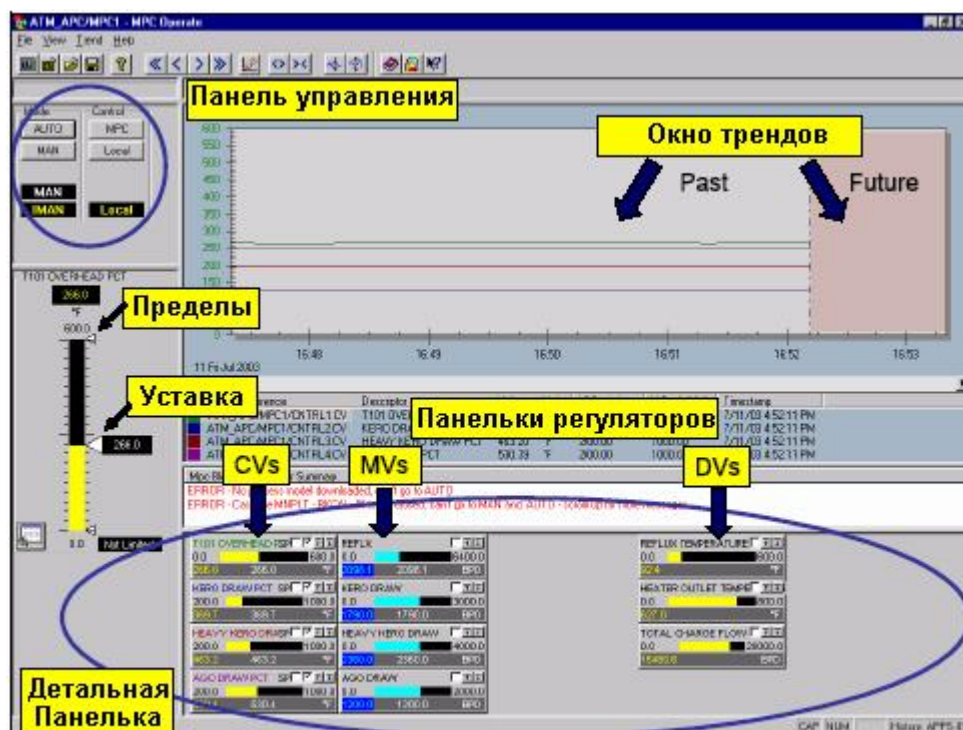


Рисунок 7



Обозначения: CV's - регулируемые переменные; MV's - манипулируемые переменные; DV's - переменные возмущений

Рисунок 8

Стандартный дисплей приложения Управление MPC

Детальный интерфейс к блокам MPC обеспечивают стандартные дисплеи приложения Управление MPC (MPC Operate), которые автоматически конфигурируются на основе конфигурации самого блока. Эти дисплеи включают пять основных окон, как показано на рисунке 8 на примере регулятора атмосферной колонны. В левом верхнем углу отображается режим контроллера. Здесь можно включить или отключить блок MPC от управле-

ния. Изменение режима регулятора на MPC автоматически переводит все контроллеры MV в удаленный каскадный режим (Remote Cascade, RCAS).

Вторым окном, расположенным в правой верхней части дисплея приложения Управление MPC, является окно трендов. Это окно позволяет оператору просматривать тренды (графики) любых переменных MPC. Переменные для отображения в окне трендов выбираются установкой флажка на панельке соответствующего регулятора. Для регулируемых переменных график показывает как историю изменения, так и прогнозируемое поведение (проекцию на будущее).

Под окном трендов располагается окно сводки статусов/ошибок. В этом окне выводятся сообщения об ошибках блока управления и его статус. В нижней части дисплея располагается окно панелек контроллеров. Панельки организованы по столбцам: в первом столбце – панельки регулируемых переменных; в следующем столбце – манипулируемых; в третьем – переменных ограничений; в последнем – переменных возмущений. На панельках отображается статус переменной, ее текущее значение, задание и верхний и нижний пределы ограничений (если имеются), предоставляя полную информацию оператору. Для доступа к одной из переменных регулятора выбирается соответствующая панелька, при этом в окне, расположенном в левой части дисплея, появляется ее детальная панелька. С детальной панельки оператор может вносить требуемые изменения в задание или пределы ограничений задания регулируемых переменных, пределы ограничений манипулируемых переменных, а также допустимые границы переменных ограничений.

Результаты

В сумме, работы, связанные с тестированием (реакция на ступенчатые возмущения), идентификацией и проверкой моделей для атмосферной и вакуумной секций, были выполнены менее чем за десять дней. Это заняло на несколько дней больше планируемого из-за неудовлетворительных результатов теста на атмосферной колонне и некоторых проблем, связанных с регулированием давления вверху колонны вакуумной секции. Кроме того, наблюдаемый разброс в вычислениях компенсированных температур, вызванный скачками давления в колонне, вызвал необходимость перекалибровки коэффициентов РСТ, чтобы обеспечить более реалистичный динамический отклик для этих переменных.

Функции усовершенствованного управления были внедрены на неделе с 17 по 22 июля, всего через несколько дней после завершения тестирования объекта. За два дня оба контроллера были подключены и регулировали температуры, как было предусмотрено. На момент написания данного отчета регуляторы проработали около десяти дней, поэтому еще не накоплено достаточно данных для проведения окончательного анализа. Однако определенные выводы и наблюдения можно сформулировать на основе опыта внедрения и уже накопленных данных, они перечислены ниже.

- n** Контроллеры оказались способны поддерживать ключевые температуры в колоннах на заданных значениях с точностью до 1 – 2 градусов Фаренгейта (менее 1 градуса Цельсия) на протяжении почти всего времени работы. Однако было замечено, что даже при постоянных температурах, ключевые параметры качества продуктов нижней части колонны (температура конца кипения атмосферного газойля, и температуры выкипания 95% для вакуумного дистиллята и тяжелого вакуумного дистиллята) претерпевали значительные изменения. Небольшое изменение температур в колонне похоже приводило к большому изменению показателей качества. Анализ данных истории процесса выявил, что даже при постоянных отборах имелись еще большие колебания показателей качества. Сопоставление данных процесса до и после внедрения показывает снижение стандартных отклонений для всех параметров качества, а также для всех температур на тарелках. Эти данные приводятся в следующей таблице.

	До		После		Уменьшение стандартного отклонения
	Среднее	Стандартное отклонение	Среднее	Стандартное отклонение	
Атмосферная колонна					
ТКК ПГБ	349.55	14.89	347.10	4.30	71.1%
ТКК АГ	636.32	10.54	634.41	6.22	41.0%
Темп-ра верха	253.18	5.01	260.91	1.80	64.1%
Темп-ра отбора керосина	362.59	4.60	366.60	1.86	59.5%
Темп-ра отбора тяж. керосина	459.37	5.65	462.72	2.60	54.0%
Темп-ра отбора АГ	528.14	5.60	530.77	2.55	54.5%
Вакуумная колонна					
Т 95% ВД	934.36	12.28	933.78	8.56	30.3%
Температура ВГ в трубе	358.58	7.32	365.74	3.23	55.8%
Температура ВД	542.47	5.99	599.50	2.29	61.8%
Температура ТВД	651.77	5.39	671.75	3.74	30.7%

Обозначения:

ТКК – температура конца кипения

ПГБ – прямогонный бензин

АГ – атмосферный газойль

Т 95% - температура выкипания 95%

ВГ – вакуумный газойль

ВД – вакуумный дистиллят

ТВД – тяжелый вакуумный дистиллят

- n Как показано на рисунке 4, реакция на ступенчатое возмущение для нижних отборов (MV3 и MV4) колонны оказалась весьма слабой (т.е. низкие коэффициенты передачи). Это приводило к довольно агрессивным изменениям расходов атмосферного газойля, вакуумного дистиллята и тяжелого вакуумного дистиллята для регулирования температур на соответствующих тарелках. В результате для этих переменных мы увеличили штрафной коэффициент на изменение (penalty on move) и снизили штрафной коэффициент на ошибку (penalty on error), чтобы замедлить реакцию контроллера на ожидаемые отклонения температур на нижних тарелках. Даже с такими настройками нижние отборы имели тенденцию медленных осцилляций между границами MV в зависимости от того, были они выше или ниже уставки.
- n Одно из возмущений процесса на атмосферной колонне, как выяснилось, было связано с застреванием клапана регулирования уровня в отпарной колонне керосина. Данный клапан демонстрировал 5% застревание, что приводило к колебаниям температуры на тарелке отбора керосина с амплитудой 3 – 4 градуса, которое распространялось вниз по всей колонне, влияя на все температуры нижних тарелок. Данный клапан в настоящий момент запланирован в ремонт, но это еще раз демонстрирует важность надежной работы стандартных схем регулирования, чтобы внедрение APC могло принести максимальную выгоду.

- n** Во время периода внедрения произошло одно переключение сырьевого резервуара. При переключении операторы оставили регуляторы MPC работать в замкнутом контуре. Для поддержания постоянного профиля температуры в колонне контроллеры внесли существенные изменения в расходы отборов продуктов. На вакуумной колонне при этом наблюдалась одна проблема, когда блок MPC увеличил отбор вакуумного дистиллята до максимально допустимого (до верхнего предела ограничения), так как температура паров на тарелке была по-прежнему ниже заданной. Это привело к попаданию тяжелого вакуумного дистиллята в отбор вакуумного дистиллята. Было замечено, что это связано с тем, что температура жидкости на тарелке повышается, а температура паров – нет. Чтобы преодолеть данную проблему и держать температуру отбора вакуумного дистиллята в регламентных границах, в блок MPC вакуумной колонны была добавлена переменная ограничений.
- n** Изначально блоки нейронной сети были обучены на пятиминутных фрагментах истории процесса, полученных с заводской системы архивирования, поскольку в базе данных системы управления к этому моменту еще не было накоплено достаточно данных. На начальном этапе внедрения была проблема с функцией обновления по данным лабораторных анализов, что не позволило подстраивать смещения (bias) модели по данным лаборатории. К настоящему моменту накоплены данные как реальной истории, так и прогнозов. Эти данные будут проанализированы на следующих совещаниях.
- n** Операторы, в целом, с энтузиазмом приняли новую технологию, в особенности на атмосферной колонне, которая работает в замкнутом контуре 100% времени с момента внедрения APC. На вакуумной колонне показатель использования несколько ниже вследствие проблем идентификации зависимости (или отсутствия таковой) между температурами на тарелках и показателями качества соответствующих продуктов. Если температуры на тарелках по-прежнему не будут реагировать на усилия регулятора, предполагается использовать нейронную сеть для предсказания точки 95% для вакуумного дистиллята, которая в дальнейшем будет использоваться как первичная регулируемая переменная.