



## УСОВЕРШЕНСТВОВАННОЕ УПРАВЛЕНИЕ ТП: ОТ КОНТУРА РЕГУЛИРОВАНИЯ ДО ОБЩЕЗАВОДСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ

П.Л. Логунов, М.В. Шаманин (ООО «ЛУКОЙЛ-Нижегороднефтеоргсинтез»),  
Д.В. Кнеллер, С.П. Сетин, М.М. Шундерюк (ЗАО «Хоневелл»)

*Усовершенствованное управление (УУ) ТП позволяет повысить эффективность производства путем придания АСУТП технологических установок дополнительных функций. При этом системы УУ могут стать фундаментом оптимизационных решений более высокого уровня. В статье представлены основные особенности и преимущества продуктовой линейки УУ и оптимизации Profit® Suite корпорации Honeywell, позволяющей создавать многоуровневые оптимизационные решения. На примере крупного российского НПЗ рассмотрена история создания, эксплуатации и развития систем УУ и оптимизации от контура регулирования до группы технологических установок.*

*Ключевые слова: усовершенствованное управление ТП, управление на основе прогнозирующей модели, динамическая оптимизация группы технологических установок, мониторинг качества регулирования, мониторинг качества усовершенствованного управления.*

### Введение

Усовершенствованное управление (УУ) ТП — одно из магистральных направлений промышленной автоматизации. Основная цель УУ — повышение отдачи от существующих на технологических объектах РСУ. Большинство современных РСУ обладают значительным неиспользованным потенциалом повышения эффективности производства, а средства УУ позволяют этот потенциал реализовать.

В литературе до сих пор отсутствует общепринятое точное определение термина «усовершенствованное управление». Трактовка этого понятия охватывает как относительно простые схемы управления, реализуемые стандартными средствами РСУ, так и разнообразные алгоритмы оптимизации ТП, основанные на результатах классической и современной теории автоматического управления. В качестве примеров первых можно назвать схемы компенсации (управления по возмущению), регулирования соотношения, управления с опережением или запаздыванием, сложные каскады и пр. Ко вторым обычно относят адаптивные и нечеткие регуляторы, системы косвенных измерений (виртуальные анализаторы) на основе регрессионных методов или искусственных нейронных сетей, сложные системы многомерного управления и оптимизации с использованием встроенных математических моделей ТП. Последние, начиная с 1990-х гг., получили наибольшее распространение в крупных многомерных технологических объектах со сложной динамикой и множеством взаимосвязей между переменными. В литературе соответствующую технологию называют английским термином Model-based Predictive Control (MPC), отражающим суть используемого метода — применение прогнозирующей модели ТП в контуре автоматического управления.

Чаще всего под УУ в более узком смысле понимают именно MPC; при дальнейшем изложении будем придерживаться этой терминологии. В немногочисленных российских публикациях последних 10 лет на тему УУ, как правило, используется термин APC — аббревиатура английского Advanced Process Control, что буквально означает «Усовершенствованное управление ТП». Более подробно об основах УУ и его практических применениях можно узнать из работ [1...4].

С учетом вышеприведенных терминологических оговорок под системой усовершенствованного управления ТП (далее СУУТП; в русскоязычных публикациях используют также термин «APC-система») будем подразумевать программно-алгоритмический комплекс, выполняющий функцию автоматического управления многомерным технологическим объектом на основе встроенной прогнозирующей модели последнего. Как правило, СУУТП функционируют на выделенных компьютерах (серверах), интегрированных в ЛВС РСУ технологической установки; некоторые поставщики СУУТП создают их непосредственно внутри «родной» РСУ в виде одного или нескольких сложных каскадных регуляторов.

Для удобства дальнейшего изложения отметим, что СУУТП крупных технологических объектов часто реализуют в виде отдельных блоков, именуемых *многопараметрическими контроллерами* (или просто «контроллерами»), которые не следует путать с обычными «физическими» контроллерами, действующими в РСУ, ПЛК и пр.

Среди достоинств УУ, определяющих его привлекательность для пользователей, отметим следующие.

- *Повышение уровня автоматизации ТП*, выражающееся в снижении нагрузки на оператора. СУУТП берет на себя значительную часть рутинных функций

оператора по управлению ТП и благодаря прогнозирующей модели выполняет их лучше, чем операторы. Если процесс ведет СУУТП, то оператор должен постоянно контролировать значительно меньшее число параметров, чем при ручном управлении: ему остается лишь присматривать за СУУТП и, по мере необходимости, давать ей новые задания.

- *Стабилизация показателей качества продукции*, выражающаяся в снижении:

- числа нарушений спецификаций продуктов,

- изменчивости показателей качества, измеряемой среднеквадратическим отклонением от желаемого значения; снижение составляет 20...30%, но нередки случаи двух- и трехкратного снижения.

- *Повышение надежности производства*. СУУТП ведет процесс в безопасных границах. В результате снижаются число нарушений технологического режима, износ оборудования и регулирующей арматуры.

- *Оптимизация ТП*, на практике выражающаяся в повышении производительности по сырью, увеличении выхода целевого продукта, смещении материального баланса в пользу более ценных продуктов, экономии энергоносителей. Функция оптимизации активизируется в СУУТП, если оператор задаст *диапазоны изменения* технологических переменных более узкие, чем установленные регламентом технологические границы, но настолько широкие, чтобы предоставить СУУТП достаточную свободу действий. В результате процесс получает необходимые степени свободы, позволяющие СУУТП подбирать оптимальный по заданному технико-экономическому критерию режим и поддерживать его.

Корпорация Honeywell — признанный мировой лидер в области УУ: по данным независимых рейтинговых агентств (ARC Advisory Group, Frost & Sullivan) ее доля рынка стабильно составляет около 15% — максимальный показатель среди компаний, специализирующихся в данной области. Особенности технологии УУ Honeywell, обеспечившие ей ведущее место в мире, рассматриваются далее.

Первые СУУТП появились на российских предприятиях чуть более 10 лет назад. Продвижение технологии УУ в российскую промышленность было непростым; тем более впечатляюще выглядят результаты, достигнутые российским отделением корпорации: более 25 выполненных собственными силами проектов при практически полном доминировании на рынке. О том, как УУ прокладывало себе дорогу в российскую нефтепереработку, будет рассказано на примере завода, на протяжении последних 8 лет эффективно реализующего потенциал этой многообещающей технологии.

#### Основные преимущества технологии УУ корпорации Honeywell

Алгоритмы УУ основных поставщиков СУУТП основаны на фундаментальных принципах МРС. В процессе доведения теоретических результатов

до коммерческой технологии и дальнейшего совершенствования последней каждый разработчик постепенно привнес свое «ноу-хау», придавшее готовым продуктам индивидуальные черты.

В настоящем разделе кратко охарактеризованы достоинства программно-алгоритмического комплекса Profit® Controller — основного продукта линейки Profit® Suite корпорации Honeywell. Из всех многочисленных технических особенностей этого ПО, многие из которых скрыты от посторонних глаз и доступны лишь инженерам-разработчикам СУУТП, ниже перечислены те, которые можно считать «визитной карточкой» технологии УУ Honeywell и благодаря которым она лидирует на мировом и российском рынках.

#### Удобный инженерный инструментарий, эффективный аппарат моделирования

Инструментарий Profit® Design Studio (PDS) позволяет провести весь цикл разработки СУУТП от визуального просмотра и предварительной обработки исходных данных до моделирования и конфигурирования исполняемых программных приложений. Благодаря встроенным средствам автоматического построения модели и проверки ее качества PDS легко осваивают и эффективно используют заводские инженеры, прошедшие минимально необходимое для этого обучение. PDS можно сравнить с современной многофункциональной фотокамерой, в равной степени удобной и начинающим фотолюбителям (благодаря наличию автоматической фокусировки, наборов стандартных режимов съемки и т. п.), и опытным профессионалам, предпочитающим тонкую ручную настройку. PDS полностью интегрирован с другими продуктами Honeywell, в частности, с программно-алгоритмическим комплексом Profit® Stepper, который позволяет тестировать технологический объект в режиме РВ с одновременным сбором данных и автоматическим построением математических моделей с автоматическим же оценением их качества. Разработанные в Profit® Stepper модели могут быть импортированы в PDS и доработаны инженером.

Среди множества типов используемых в Profit® Controller моделей наиболее популярны модели в виде передаточных функций линейных объектов благодаря простоте создания и удобству применения в замкнутом контуре. При этом инструментарий PDS автоматически предлагает наиболее простые модели низшего возможного порядка.

#### Робастность алгоритмов многомерного управления

Под робастностью в практике УУ понимается способность СУУТП адекватно управлять технологической установкой даже при неточной прогнозирующей модели; это важнейшее требование к многопараметрическим контроллерам.

Математическая модель для СУУТП разрабатывается на основе данных тестирования объекта, введенного в определенных условиях. Соответственно нет гарантии, что она будет с требуемой точностью отражать его статические и динамические свойства при

работе в других режимах. Сочетание неточной модели с недостаточно робастным «движком» СУУТП может дать разрушительный эффект, выражающийся в потере устойчивости объекта управления. Profit® Controller признан мировым промышленным сообществом самым робастным среди аналогичных продуктов благодаря своим гибким возможностям выбора наиболее подходящей модели и масштабирования переменных, а также использованию запатентованного Honeywell интервального алгоритма управления. Этот уникальный алгоритм не боится делать большие «шаги» в целях быстрой компенсации внешних возмущений или отработки заданий оператора; при этом объект управления сохраняет устойчивость. Проведенные специалистами Honeywell исследования показали, что такой подход более эффективен, чем использование сложных моделей, в том числе с адаптивной подстройкой коэффициентов.

### Минимальное воздействие на ТП

Вышеупомянутый интервальный алгоритм управления воздействует на объект лишь настолько, насколько это минимально необходимо для отработки возмущений. Большинство промышленных многопараметрических контроллеров работают практически непрерывно, неустанно подстраивая режим, «дергая» рычаги управления и расходуя для этого дополнительную энергию. В отличие от них Profit® Controller «дремлет» до тех пор, пока прогноз не покажет возможный выход одного или нескольких параметров ТП за установленные границы. Обнаружив потенциальную опасность, СУУТП включается в работу и плавно возвращает (или переводит) объект в нужный режим.

### Удобство настройки

Простота используемых прогнозирующих моделей и эффективность алгоритма управления дополняется удобством динамической настройки контроллера. Прогнозирующая модель многосвязного объекта управления в сущности представляет собой набор моделей — «модельную матрицу», каждый элемент которой описывает математическую зависимость между одной входной переменной СУУТП и одной выходной. Получив задание на изменение одной из контролируемых ею переменных ТП, СУУТП с помощью алгоритма управления вычисляет необходимые воздействия по одной или нескольким управляющим переменным, связанным математическими моделями с контролируемой. Весь процесс вычисления и передачи в РСУ управляющих

воздействий проходит в режиме РВ при постоянном прогнозировании будущего поведения ТП. При этом амплитуды «шагов» по управляющим переменным могут быть искусственно увеличены (более «агрессивное» управление, направленное на скорейшее достижение цели «любой ценой») или уменьшены (более плавное управление — переходный процесс затягивается, но проходит с менее резкими воздействиями на объект). В Profit® Controller «агрессивность» управления по каждой контролируемой переменной настраивается одним коэффициентом, имеющим оптимальное значение по умолчанию. Отметим, что Profit® Controller снабжен множеством других настроечных параметров, принимающих наиболее характерные значения по умолчанию, что удобно для опытных разработчиков СУУТП и для практикующих заводских инженеров (вспомним сравнение с фотокамерой).

### Встроенный оптимизатор

Встроенный в Profit® Controller оптимизатор позволяет в РВ подбирать и поддерживать оптимальные по тому или иному технико-экономическому критерию режимы при наличии достаточного числа степеней свободы. Критерии (целевые функции) оптимизации могут иметь линейную и/или квадратичную структуру. Скорость оптимизации по отношению к скорости управления ТП задается одним параметром с рекомендуемым значением по умолчанию. При этом имеется множество инженерных коэффициентов для тонкой настройки оптимизатора и выбора оптимизационных схем.

### Подстройка виртуальных анализаторов по данным лабораторно-аналитического контроля

Для оперативного управления показателями качества ТП СУУТП должна в режиме РВ «видеть» их значения (при отсутствии СУУТП они определяются в лаборатории, иногда — поточными анализаторами).

CV №	Описание CV	Состояние	Значение	Значение в будущем	Ист. значение	Ниж. предел	Верх. предел	Уставка
1	Температура КК бензиновой фракции	OKP	309,23	309,23	309,31	208,00	309,00	
2	Температура всасывающей газовой	OKP	91,026	91,186	91,836	64,000		
3	Расход нестабильного бензина на рефл. емкости (I_LFRC)	OKP	128,21	127,62	129,36			
4	Расход газа на прием компрессора C3001 (I_FT_30012)	OKP	223,65	232,43	232,59	120,00		
5	Давление в рефлюксной емкости (I_PRCANL_21135)	OKP	0,3834	0,3713	0,3700	0,3600	0,3800	
6	Уровень в кубе ГФК (I_LRAHL_21035)	OKP	33,636	33,193	34,100	36,000	45,000	
7	Уровень на тарелке легкого газойля в ГФК (I_LRAHL_22)	OKP	51,073	55,290	55,726	35,000	60,000	
8	Температура в кубе ГФК (I_LTRAH_21106)	OKP	350,10	358,98	359,16	352,00	360,00	
9	Отношение орошения к питанию ГФК	OKP	0,3517	0,3504	0,3473	0,2900	0,4500	
10	Скорость куб. продукта в п/г E2005/2 (I_UI_22052)	OKP	0,5258	0,5262	0,5241	0,1000	1,0000	
11	Скорость куб. продукта в п/г E2005/1 (I_UI_22046)	OKP	0,5128	0,5142	0,5142	0,1000	1,0000	
12	Скорость куб. продукта в т/о E2006/1 (I_UI_22025)	OKP	1,4443	1,4747	1,4754	0,5000	1,5000	
13	Скорость куб. продукта в т/о E2006/2 (I_UI_22023)	OKP	1,3653	1,3677	1,3677	0,5000	1,6000	
14	Процент открытия клапана подогрева сырья (I_TRC_210)	OKP	97,448	95,789	95,773		93,000	
15	Средневзвешенный выход регуляторов скоростей ABO E	OKP	47,593	46,030	46,531		38,000	

Рис. 1. Одно из окон операторского интерфейса Profit® Suite Operator Station (PSOS) программно-алгоритмического комплекса УУ Honeywell Profit® Controller

Виртуальные анализаторы (ВА) — «глаза» СУУТП; для поддержания у нее необходимой зоркости зрения качество работы ВА должно регулярно контролироваться, а их математические модели — подстраиваться по мере необходимости на основе данных лабораторно-аналитического контроля. Одна из недавних разработок Honeywell, успешно применяемая на протяжении последних трех лет — система (полу)автоматической подстройки ВА, основанная на методах статистического управления ТП. При поступлении в эту систему по заводской сети из ЛИМС очередного значения лабораторного анализа она оценивает его статистическую состоятельность и целесообразность корректировки модели соответствующего ВА. При совпадении этих условий система подстройки вычисляет поправку и запрашивает у пользователя разрешение на внесение ее в модель ВА либо вносит ее самостоятельно с автоматическим оповещением (сохраняется возможность и полностью ручной подстройки); при этом СУУТП продолжает работать.

#### *Эргономичный пользовательский интерфейс*

Операторский интерфейс Profit<sup>®</sup> Controller (рис. 1), интегрированный с ОС Windows, русифицирован и содержит только те функции, которые необходимы оператору для контроля работы СУУТП и внесения в нее новых заданий. Инженерный интерфейс представляет собой надстройку над операторским. Уровни доступа к СУУТП (оператор, инженер-технолог, инженер сопровождения) конфигурируются при ее создании.

#### *Интеграция с другими решениями Honeywell*

СУУТП на основе Profit<sup>®</sup> Controller прекрасно интегрируются с PCU Honeywell Experion<sup>®</sup> PKS. Удобство интеграции выражается, в частности, в возможности использовать сетевую технологию Honeywell Distributed Server Architecture (DSA), обеспечивающую более экономичное по сравнению со стандартным OPC взаимодействие между серверами СУУТП и PCU Experion<sup>®</sup>. В качестве еще одного интеграционного преимущества отметим использование графического пакета Experion<sup>®</sup> HMI Web, позволяющего легко создавать специальные мнемосхемы СУУТП в едином с остальной операторской графикой стиле.

Упомянем также удобство взаимодействия СУУТП в режиме PB со «строгими» нелинейными моделями, разработанными в среде моделирования Honeywell UniSim<sup>®</sup>, когда использование этого инструментария в проекте СУУТП признано целесообразным. Вычисленные с помощью строгой модели параметры периодически (на практике — 1 раз в 5...10 мин) через специальный интерфейсный модуль Profit<sup>®</sup> Bridge передаются в Profit<sup>®</sup> Controller для подстройки коэффициентов используемых в СУУТП линейных моделей.

Удобство интеграции с PCU Experion<sup>®</sup> не ограничивает возможности взаимодействия СУУТП Honeywell с PCU сторонних производителей: из вышеупомянутых 25 выполненных в России проектов не менее половины были реализованы на «чужих»

*Совершенствовать надо не процесс, а участника процесса.*

Дуглас Энгельбарт

PCU. Взаимодействие организуется на основе OPC-технологии; при этом Honeywell обладает специальным программным продуктом MatrikonOPC Funnel DA, использование которого позволяет существенно снизить стоимость интеграционного решения. Что касается «строгих» моделей ТП, то интерфейс Profit<sup>®</sup> Bridge может успешно использоваться для взаимодействия с моделями других поставщиков. Так, у Honeywell имеется опыт интеграции СУУТП со специализированными моделями процессов пиролиза (ПО SPYRO фирмы Technip), полимеризации пропилена и др.

На протяжении более чем 25 лет Honeywell систематически инвестирует значительные средства в развитие своей линейки Profit<sup>®</sup> Suite. В качестве примеров недавних новшеств укажем расширение функциональности инструментария разработчика и возможность инсталляции нового релиза ПО УУ поверх существующего без необходимости полной переустановки.

#### **История распространения УУ на «отдельно взятом» предприятии**

Преимущества ПО УУ проявляются в полной мере только при создании реальной СУУТП, максимально учитывающей технологическую специфику объекта управления и удобной в эксплуатации и обслуживании. Проект создания и внедрения СУУТП обычно длится до 1 года и требует скоординированных усилий заказчика и исполнителя. Содержание основных этапов проекта охарактеризовано в [1, 3]; в работе [5] проект создания и внедрения СУУТП описан более подробно на примере установки первичной переработки нефти одного из российских НПЗ.

Кратко рассмотрим историю создания, эксплуатации и развития СУУТП в ООО «ЛУКОЙЛ-Нижегороднефтеоргсинтез» (далее «завод» и «ННОС»). За 8 лет, прошедших с начала развертывания первых СУУТП, завод создал и успешно эксплуатирует 10 таких систем (в общей сложности — более 30 многопараметрических контроллеров и 150 ВА). Это результат, выдающийся для российской промышленности и заметный даже в мировом масштабе, — неувиден интерес, который европейские специалисты по промышленной автоматизации неизменно выказывают к достижениям в области УУ и смежных решений, представляемым заводом на ежегодных международных конференциях пользователей продуктов Honeywell. Результаты целенаправленной деятельности ННОС в области применения высокотехнологичных решений для оптимизации производства периодически докладываются на специализированных конференциях и публикуются в отраслевой печати; цель авторов настоящей статьи — представить

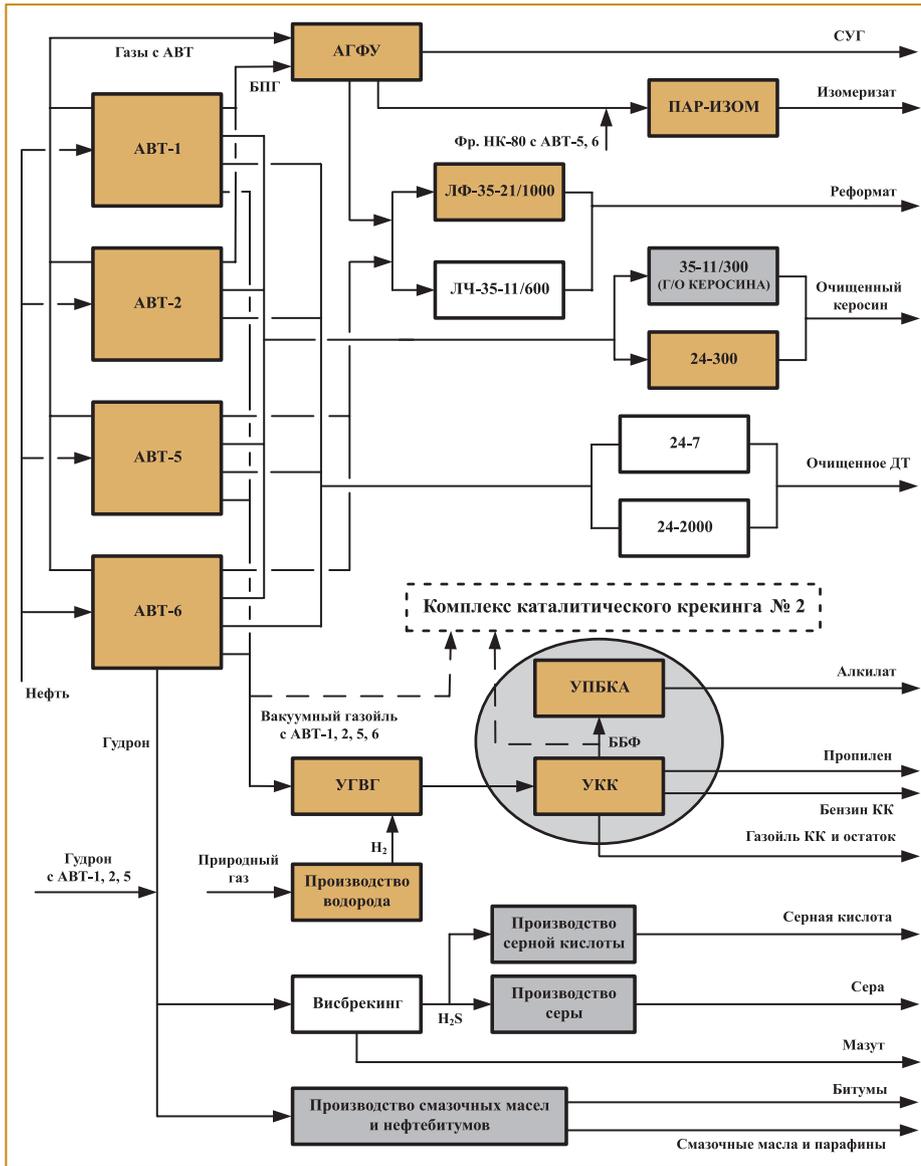


Рис. 2 Блок-схема технологических установок и основных потоков ННОС, где блоками коричневого цвета показаны установки с действующими СУУТП, белого – с запланированными, серым эллипсом показана система динамической оптимизации двух установок, пунктиром – строящийся комплекс каталитического крекинга № 2, на котором также запланировано внедрение СУУТП

читателю общую картину оптимизации производства на заводе в ее ретроспективном развитии.

Для реализации пилотных проектов СУУТП ННОС остановился на установках АВТ-5 и АВТ-6 – выбор, во многом, предсказуемый: среди всех технологических объектов НПЗ крупнотоннажная установка первичной переработки нефти традиционно считается одним из наиболее подходящих кандидатов. АВТ-5 и АВТ-6 в сумме перерабатывали до 75% поступающей на завод нефти (следовательно, даже незначительный эффект от внедрения неизбежно отразился бы практически на всем производстве – что, как ожидалось, и произошло) и представлялись в целом технически готовыми к внедрению. Работы велись в течение 1,5 лет; в результате СУУТП охватили все основные технологические блоки обеих установок: атмосферную

переработку нефти, вакуумную переработку мазута, стабилизацию и вторичную перегонку бензина. Ко времени своего завершения (март 2009 г.) это был самый крупный подобный проект в России. Сравнительно долгий срок внедрения (первоначально предполагалось выполнить проект за 1 год) объяснялся необходимостью преодоления множества технических и организационных сложностей и отработки новых непривычных решений. Первоначальные представления о технической готовности установок к внедрению СУУТП, как оказалось, выглядели несколько оптимистично – тем не менее, все сложности были успешно преодолены благодаря слаженной работе инженерных команд Honeywell и ННОС и конструктивной поддержке руководства завода [6]. Ключевой фактор успеха этого проекта (как и всех последующих) – полное взаимное доверие заказчика и исполнителя, готовность к совместному поиску нестандартных решений.

Дальнейшее распространение УУ в ННОС определялось следующими факторами:

- первоочередное внедрение СУУТП на установках, обеспечивающих потенциально максимальную окупаемость проектов;

- внедрение СУУТП на установках, где окупаемость проектов

не столь очевидна, но которые в совокупности могут образовать фундамент для развертывания оптимизационных решений более высокого уровня;

- невозможность реализации СУУТП более чем на двух установках в год в силу бюджетных и ресурсных ограничений (сдерживающий фактор).

Ввиду этих соображений, развитие СУУТП на заводе в 2009–2014 гг. шло по следующему сценарию (рис. 2):

- установка платформинга ЛФ-35-21/1000 – привлекательна в плане окупаемости плюс ключевое звено в цепочке приготовления бензинов по спецификациям «Евро»;

- блок абсорбции и газодифракционирования (БАГФ) и установка изомеризации бензиновых фрак-

ций (ПАР-ИЗОМ) — шаг к дальнейшей автоматизации и оптимизации цепочки производства бензинов;

– установка каталитического крекинга (УКК) — ядро введенного в эксплуатацию в 2011–2012 гг. комплекса глубокой переработки вакуумного газойля и процесс, наиболее привлекательный (наряду с первичной переработкой нефти) в плане окупаемости СУУТП;

– установка получения бензина кислотным алкилированием (УПБКА) и установка гидроочистки вакуумного газойля (УГВГ) с блоком производства водорода — фундамент оптимизационных решений высокого уровня на комплексе глубокой переработки; кроме того УПБКА интересна в плане окупаемости СУУТП (характеризуется максимальной удельной окупаемостью оптимизационных решений среди ТП нефтепереработки);

– установки АВТ-1 и АВТ-2 — ощутимый (хотя и относительно скромный в силу сравнительно небольшого объема переработки) эффект плюс добавление необходимых «свай» в фундамент глобальной оптимизации.

#### Эффект от внедрения: действительный и «мнимый»

Ожидаемый эффект от внедрения УУ является основной движущей силой соответствующих проектов; краткие соображения об этом представлены в [3]. В развитие темы предыдущего раздела ниже представлена сводка *основных источников эффекта* от внедрения СУУТП на нескольких, наиболее привлекательных в плане УУ, установках ННОС:

- *АВТ-5 и АВТ-6* — увеличение отбора сырья риформинга за счет более легкой фракции и общее увеличение отбора светлых нефтепродуктов за счет мазута;

- *платформинг* — стабилизация октанового числа платформата и возможность оперативного управления им в интересах товарного производства (смешения бензинов);

- *УКК* — увеличение выхода (а) бензина кат. крекинга за счет смежных фракций и (б) пропиленовой фракции за счет смежных;

- *УПБКА* — увеличение октанового числа основного продукта — алкилата.

Перевод зафиксированных в натуральных единицах экономических эффектов от перечисленных выше источников в денежное выражение подтвердил изначальные ожидания перспективности соответствующих проектов — срок окупаемости всех перечисленных в этом разделе систем составил 5...8 мес. Здесь необходимо сделать важную методологическую оговорку. Достигнутый эффект в денежном выражении сравнительно легко определяется для технологических объектов, выпускающих продукт с установленной рыночной стоимостью, тогда как практически все установки НПЗ, включая вышеперечисленные, производят полуфабрикаты, поступающие на дальнейшую переработку и смешение. При всей очевидной

ценности этих полуфабрикатов ее денежное выражение требует привлечения специальных средств анализа. В качестве таковых выступают системы производственного планирования, имеющиеся в арсенале высокотехнологичных решений промышленной автоматизации большинства российских НПЗ, но редко используемые в контексте УУ. Еще на этапе создания первых СУУТП в ННОС дальновидно оценили роль взаимодействия эксплуатируемой с 1995 г. системы производственного планирования RPMS и решений в области УУ, в том числе и для оценивания эффективности последних. В 2008–2009 гг. была разработана методика перевода определенных в натуральных показателях эффектов в денежное выражение с помощью RPMS-модели завода и их последующего периодического мониторинга. Эта методика функционирует и продолжает совершенствоваться и сегодня: результаты, позволившие сделать вывод о хорошей окупаемости проектов СУУТП на перечисленных в этом разделе установках, подтверждены с помощью RPMS-модели по данным функционирования этих систем на протяжении всего срока их эксплуатации.

Таким образом, эффекты от внедрения СУУТП не исчерпываются оптимизацией материального баланса и экономией энергоресурсов, имеющих более или менее обоснованный денежный эквивалент. Часто стабилизация качества продуктов одной установки благотворно сказывается на последующих по технологической цепочке объектах. В качестве примера укажем *систему автоматического компаундирования бензинов* ННОС (созданную на основе ПО Honeywell OpenVPC), которая получает более стабильное по качеству сырье, что дает дополнительный эффект. Далее, СУУТП отдельных установок могут стать фундаментом перспективных общезаводских оптимизационных решений, в которых основная прибыль от УУ «генерируется» на более высоком уровне оптимизационной иерархии. Наконец, более глубокая автоматизация управления повышает эффективность труда операторов и технологов. Все это трудно перевести в «твердый» денежный эквивалент даже с привлечением систем оптимизационного планирования. И, тем более, невозможно количественно измерить повышение культуры производства и смещение парадигмы мышления заводских инженеров от регулярного затыкания технологических «дыр» к систематической оптимизации производства с помощью мощных и гибких инструментов — СУУТП.

#### Сопровождение СУУТП как альтернатива их деградации

О важности правильного и эффективного сопровождения СУУТП подготовлено много публикаций (например, [3,5]), кроме того, существуют дискуссии на профессиональных интернет-форумах (например, [www.APC-network.com](http://www.APC-network.com)).

В ННОС осознали важность сопровождения и дальнейшего развития СУУТП собственными си-

лами еще на стадии их проектирования для АВТ-5 и АВТ-6. Подбор кандидатур будущих *инженеров по УУ*, их «многоступенчатое» обучение, вовлечение в совместную с разработчиком СУУТП деятельность и, что немаловажно, правильное позиционирование в организационной структуре предприятия — сложная задача, которая была решена руководством завода эффективно и своевременно. Уже к началу ввода в действие первых двух СУУТП (осень 2008 г.) завод имел в своем штате обученного инженера по УУ, обладавшего минимально необходимым на тот момент опытом взаимодействия с Honeywell и всячески поддерживаемыми руководством амбициозными намерениями самостоятельного проектирования и внедрения будущих систем. На протяжении последующих лет численность «Группы по внедрению APC» (официальное название подразделения завода) выросла до трех человек. Это не так уж много, учитывая число сопровождаемых действующих систем, организационно-техническую поддержку выполняемых Honeywell на заводе новых проектов по УУ, а также проводимые группой самостоятельные (при незначительной поддержке и авторском надзоре Honeywell) работы по модернизации существующих СУУТП и созданию новых. Последнее заслуживает особого комментария: три из 10 функционирующих на заводе СУУТП (БАГФ, УГВГ и АВТ-1) разработаны и внедрены группой по внедрению APC на базе ПО Profit® Controller при минимальной технической поддержке Honeywell. Силами группы была также проведена существенная модернизация СУУТП установок АВТ-5 и ЛФ-35-21/1000.

Остановимся также на вышеупомянутом позиционировании группы по внедрению APC в организационной структуре завода. Вопрос этот не столь прост, как кажется. СУУТП — это инструмент реализации плановых заданий производством, причем реализации более эффективной, чем без использования УУ. Поэтому сопровождение СУУТП можно рассматривать как оказание помощи операторам и технологам в правильном использовании этих инструментов. Помощь выражается среди прочего в:

- инициализации нужных целевых функций оптимизации (из числа заложенных в СУУТП при их проектировании), адекватных актуальным задачам производства;
- мониторинге «здоровья» систем, выражающегося в адекватности моделей ВА, соответствии прогнозирующих моделей и настроечных параметров состоянию объекта управления;
- консультировании операторов по вопросам эксплуатации систем и оказании помощи в решении возникающих проблем;
- поддержании конструктивного взаимодействия с разработчиком и планировании развития систем.

Завод изначально позиционировал своих инженеров по УУ в *производственно-диспетчерском отделе* (ПДО), то есть на «стыке» плановой и производ-

ственных служб. Дальнейшее развитие программы УУ в ННОС в полной мере подтвердило правильность этого организационного решения. Более того, оно оказалось столь эффективным, что было с успехом растиражировано по нескольким НПЗ группы «ЛУКОЙЛ» и подкреплено созданием соответствующей корпоративной *сетевой группы* (во главе с ведущим специалистом ННОС по УУ) для обмена опытом создания и сопровождения СУУТП внутри компании.

Сопровождение нескольких СУУТП — деятельность трудозатратная, во многом рутинная, требующая среди прочего частого присутствия инженера по УУ непосредственно в операторных технологических установках. Для облегчения работы инженеров по УУ Honeywell и ННОС совместно разработали и внедрили простое и эффективное программное решение для мониторинга состояния СУУТП. Это ПО собирает по корпоративной сети завода необходимые данные из БД РВ Honeywell Uniformance® РНД и заводской ЛИМС и представляет информацию о состоянии всех СУУТП и их основных функциональных элементов в удобном формате. В результате инженеры по УУ видят на экранах своих компьютеров:

- перечни всех СУУТП завода и всех многопараметрических контроллеров и ВА каждой из них;
- статус каждого контроллера и его управляющих, контролируемых и наблюдаемых внешних переменных;
- состояние каждого ВА СУУТП, его статистические характеристики, исторические тренды выхода ВА и соответствующих данных лабораторного контроля;
- копии сообщений, выдаваемых СУУТП операторам непосредственно на технологических установках.

Был разработан простой и удобный пользовательский интерфейс с возможностью фильтрации выдаваемой информации (по установкам, контроллерам, ВА), генерирования отчетов в заданном формате и т. п.

Созданное решение фактически предоставляет лишь «констатирующую» информацию о состоянии СУУТП, не претендуя на лавры развитого аналитического средства. Для целей углубленного мониторинга и анализа эффективности функционирования СУУТП Honeywell имеет в своем арсенале программно-алгоритмический комплекс Control Performance Monitor for APC, позволяющий среди прочего контролировать работу СУУТП на основе *ключевых показателей эффективности* (КПЭ): как стандартных (заложенных в систему разработчиками), так и специализированных, создаваемых непосредственно пользователями с помощью предоставляемого системной инструментальной. Пользовательский интерфейс и принципы построения этого программного комплекса аналогичны ПО Honeywell Control Performance Monitor для мониторинга базового регулирования, речь о котором пойдет ниже.

Приведем несколько собранных группой по внедрению APC *типичных заблуждений* в области созда-

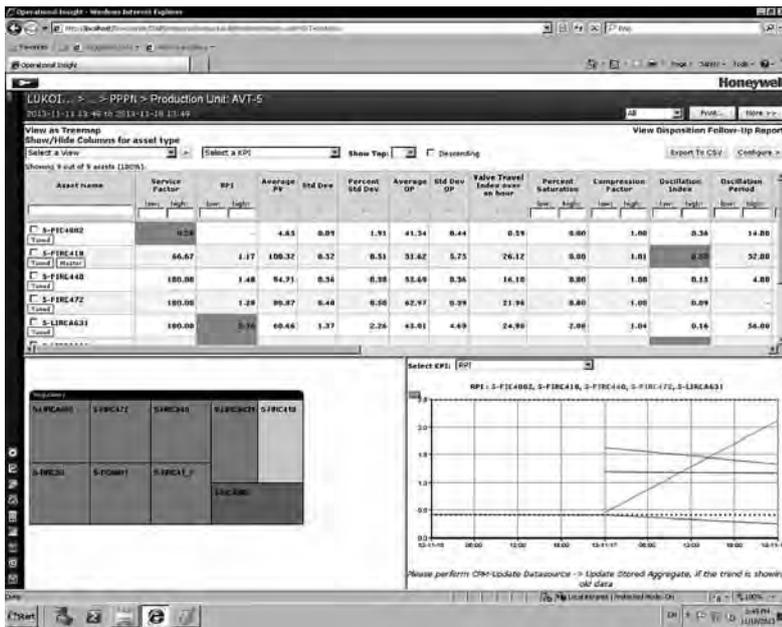


Рис. 3. Окно пользовательского интерфейса системы мониторинга базового регулирования на основе Honeywell Control Performance Monitor

ния и сопровождения СУУТП с их разоблачениями.

- «Использование СУУТП позволяет уменьшить число операторов». Мировая практика использования СУУТП это опровергает: СУУТП облегчает труд операторов, не подменяя их.

- «Все, что требуется от заказчика для создания СУУТП — это заключить договор «под ключ»; остальное сделает исполнитель». Опровержением этого утверждения служит настоящая статья, а также опыт, изложенный в [5, 6].

- «Включил и забыл». «Забытую» СУУТП операторы рано или поздно выключают, причем навсегда — за ненадобностью. Только квалифицированное и систематическое сопровождение СУУТП спасет ее от деградации, а заказчика — соответственно, от потери инвестиций. Все разнообразные средства сопровождения СУУТП от достаточно простых до весьма

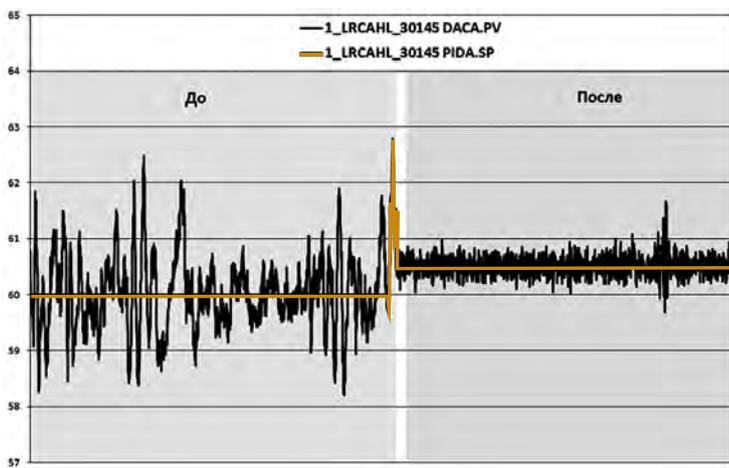


Рис. 4. Пример тренда регулируемой величины до и после настройки ПИД-регулятора с помощью инструментария Honeywell Taiji PID

сложных, даже снабженных средствами дистанционного мониторинга, не могут в полной мере заменить человека. Они призваны лишь помочь ему, освободив от рутинных функций ради более творческой деятельности.

- «Эффективно работающие ВА могут заменить собой лабораторный контроль соответствующих показателей качества». В отдельных случаях ВА позволяют снизить частоту ходового контроля, но в целом он необходим для поддержания зоркости СУУТП. В противном случае слепнувшая СУУТП начнет все чаще наткаться на установленные операторами пределы изменения переменных, за что рано или поздно будет отправлена на пенсию.

- «ВА, демонстрирующие высокую корреляцию с данными лаборатории, могут заменить собой СУУТП».

За редким исключением это не так. Действительно, хороший ВА даже в отсутствие СУУТП поможет оператору вести процесс, поэтому он ценен сам по себе.

Но мировая практика подтверждает, что СУУТП ведет процесс в целом лучше, чем это делают операторы, даже сверяющие свои действия с показаниями ВА — ни один оператор не отработает изменение задания так плавно, как это делает СУУТП. Поэтому систему виртуального анализа, если таковая имеется на установке, целесообразно рассматривать как первую ступень на пути дальнейшей автоматизации — внедрения СУУТП — кроме нетипичных случаев, когда при наличии ВА дальнейшее внедрение СУУТП технически нецелесообразно или слишком дорого.

#### Хорошее качество базового регулирования — необходимое условие эффективности СУУТП

Базовое регулирование — фундамент УУ. По отношению к регуляторам РСУ СУУТП выступает как ведущий регулятор: она дает задания, а ПИД-регуляторы их обрабатывают. Поэтому эффективность СУУТП среди прочего зависит и от качества базового регулирования на технологической установке.

Компания Matrikon разработала удобное и эффективное средство мониторинга качества регулирования в масштабах технологического блока, установки или всего предприятия, именуемое Control Performance Monitor (CPM). За время, прошедшее после покупки этой компании корпорацией Honeywell (2010 г.), были проведены значительные работы по дальнейшему развитию инструментария и его интеграции с другими высокотехнологичными продуктами и решениями корпорации.

CPM позволяет контролировать качество базового регулирования на основе КПЭ. Мо-

нитинг может проводиться как в режиме РВ (по данным, поступающим непосредственно из РСУ), так и по историческим трендам, хранящимся в архивах РСУ или общезаводских БД РВ. Число контролируемых регуляторов и их распределение по технологическим установкам не ограничено, требуется лишь наличие соответствующей сетевой инфраструктуры.

Система обладает удобным интерфейсом (рис. 3), включающим как обзорные кадры, так и различные виды окон с детальной информацией. Генерируются различные типы отчетов по КПЭ, которые могут как автоматически, через заданные пользователем промежутки времени, так и по дополнительному запросу помещаться в выделенные каталоги и/или рассылаться по заранее определенным адресам, в том числе и на мобильные устройства.

СРМ обладает рядом преимуществ, выгодно отличающих его от немногочисленных аналогов. Отметим:

- независимость от поставщика РСУ;
- мониторинг базового регулирования и УУ в едином комплексе (соответствующие модули СРМ имеют одинаковый дизайн пользовательского интерфейса и основаны на общих программно-алгоритмических решениях);
- наличие специального модуля TaiJi PID настройки регуляторов (в том числе нескольких взаимодействующих);
- удобство создания общезаводских решений, гибкость архитектуры и простоту конфигурирования;
- функцию настройки «рабочего потока», позволяющую эффективно держать под контролем критические контуры регулирования;
- обширную базу знаний Honeywell по качеству регулирования.

Благодаря своим достоинствам СРМ был выбран многими мировыми компаниями перерабатывающих отраслей (такими как ExxonMobil, British Petroleum, ConocoPhillips, Qatar Petroleum, BASF, Shell Chemicals и др.), причем некоторыми в качестве корпоративного стандарта; он стабильно удерживает наибольшую долю рынка аналогичных продуктов.

ННОС стал первым российским предприятием, внедрившим СРМ. Поставка включала модули мониторинга и настройки контуров регулирования. Решение реализовано на комплексе каталитического крекинга и охватывает пять технологических установок. Исходные данные для анализа поступают на сервер СРМ из БД РВ Uniformance® PHD посредством заводской сети; параметры настройки регуляторов, вычисленные в TaiJi PID, передаются непосредственно в РСУ. Предусмотрены несколько рабочих мест инженеров АСУТП, эксплуатирующих СРМ. Общий надзор за качеством базового регулирования всех установок, охваченных СРМ, возложен на группу по внедрению АРС. При обнаружении проблем, фиксируемых в соответствующих отчетах, инженеры по УУ самостоятельно перенастраивают регуляторы или информируют заводскую службу АСУТП.

В ходе опытной эксплуатации СРМ с весны 2013 г. были выявлены проблемные контуры регулирования, большую часть которых удалось быстро и эффективно перенастроить с помощью инструментария TaiJi PID (рис. 4). В будущем планируется распространение решения на другие установки завода.

В 2013 г. корпорация Honeywell начала выпуск недорогой упрощенной версии СРМ, предназначенной для мониторинга до 500 контуров одной технологической установки. Продукт СРМ Lite легко интегрируется с любой РСУ и не требует сложного конфигурирования и специального обучения пользователей. Российские инженеры Honeywell успешно используют его в целях ускорения проверки и подготовки базового регулирования к предстоящему внедрению СУУТП. В нескольких российских проектах он включен в поставку наряду с Profit® Controller и другим ПО УУ в целях повышения общей эффективности создаваемых решений.

#### Глобальная оптимизация

Попытки реализовать решения по координации и оптимизации нескольких снабженных СУУТП технологических установок предпринимаются в мировой практике на протяжении приблизительно двадцати лет. Эти решения основаны на сложных («строгих») математических моделях, используемых для расчета оптимальных стационарных состояний и дополненных механизмом перевода управляемых объектов из одного стационарного состояния в другое по простейшей траектории. Результаты соответствующих расчетов загружаются в виде заданий в СУУТП, которые далее обрабатывают их с учетом существующих технологических ограничений. Практика показала ограниченность такого подхода, связанную, главным образом, со значительными затратами на поддержание «боеготовности» строгих моделей. Ввиду этого корпорация Honeywell предложила альтернативный подход к созданию многоуровневых систем оптимизации производства. В его основе лежит уникальная разработка, получившая название «Profit® Optimizer».

Этот программно-алгоритмический комплекс позволяет создать единую оптимизационную надстройку над многопараметрическими контроллерами, входящими в состав одной или нескольких СУУТП. Реализованный в нем механизм оптимизации по линейно-квадратичным критериям аналогичен оптимизатору, встроенному в Profit® Controller. Если контроллеры СУУТП подключены к этому глобальному оптимизатору, то их локальные оптимизаторы блокируются, и Profit® Optimizer осуществляет скоординированную оптимизацию по всем связанным с ним контроллерам с учетом единого набора ограничений этих контроллеров. В результате система работает более эффективно, чем это делали бы все СУУТП вместе взятые без подключения к глобальному оптимизатору. Объяснение этому факту выглядит приблизительно так же, как и для феномена более высокой

эффективности СУУТП по сравнению с обычным базовым регулированием. СУУТП выступает в роли «супер-оператора» по отношению к ансамблю связанных с ней ПИД-регуляторов, каждый из которых «видит» только свою переменную. Аналогично, глобальный оптимизатор выступает в роли «супер-диспетчера» по отношению к нескольким контроллерам, каждый из которых управляет только своим технологическим блоком.

Важно отметить, что Profit® Optimizer осуществляет *динамическую* оптимизацию: в отличие от традиционных решений, основанных на «строгой» модели; он оптимизирует, не дожидаясь стабилизации технологического режима подведомственных ему объектов. Это важное преимущество подхода Honeywell, выражающееся в генерации дополнительного эффекта благодаря проведению оптимизации не только в стационарных, но и в переходных режимах.

Неудивительно, что ННОС выступил пионером российской нефтепереработки в освоении и этого высокотехнологичного оптимизационного решения. В качестве полигона для пилотного проекта был снова выбран комплекс каталитического крекинга. Очевидными аргументами в пользу такого выбора стали наличие: (а) единой операторной (соответственно, централизованного управления всем комплексом) и (б) СУУТП на трех его основных установках. Переданное в промышленную эксплуатацию весной 2014 г. оптимизационное решение на базе Profit® Optimizer охватывает две технологические установки этого комплекса: УКК (пять контроллеров) и УПБКА (три контроллера).

Система призвана решать:

- *общие задачи оптимизации* (включены в работу всегда, когда работает глобальный оптимизатор):
  - стабилизация технологического режима обе-

их установок благодаря согласованному управлению уровнями и показателями качества выпускаемых продуктов,

- минимизация содержания углеводородов C3+ в сухом газе с ограничением по содержанию серы в товарном пропилене,

- максимизация конверсии на блоке C4-изомеризации «Бутамер» УПБКА;

- *задачи оптимизации материального баланса* (единовременно включена в работу только одна из них в соответствии с заданием по выпуску продуктов, поступившим из службы производственного планирования), а именно, максимизации:

- выхода бензина УКК с учетом ограничений по выходу пропилена и ББФ, октанового числа бензина и др.;

- выхода пропилена с учетом ограничений по выходу бензина, ББФ, загрузке секции концентрирования пропилена УКК и др.,

- выхода алкилата с учетом ограничений по загрузке УПБКА и выпуску бензина кат. крекинга,

- общей маржи переработки на УКК.

Необходимо отметить, что весь арсенал средств оптимизации материального баланса комплекса с помощью СУУТП сосредоточен на УКК — многопараметрические контроллеры УПБКА выступают в оптимизационном решении лишь в роли источников дополнительных ограничений.

Для оптимизации отборов продуктов в системе проводится их непрерывный расчет в соответствии с суточными значениями, поступающими из планово-экономической службы. Эта функция реализована в специальном вычислительном блоке («виртуальном» контроллере), в который поступают значения расходомеров с корректировкой по плотностям продуктов и условиям измерения.

Для решения задачи максимизации общей маржи в системе сформирована линейная целевая функция  $(a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_4x_4)$  с коэффициентами  $a_i$  — текущими ценами на выпускаемые комплексом компоненты (крекинг-бензин, алкилат, пропилен и бутан-бутиленовую фракцию), и переменными  $x_i$  — отборами этих компонентов соответственно. Текущие цены поступают из заводской системы производственного планирования RPMS 2...3 раза в месяц (после очередного регулярного расчета заводского производственного плана). В оптимизатор их вносят инженеры группы по внедрению АРС.

Система оптимизации реализована на сервере СУУТП УПБКА и взаимодействует с СУУТП УКК через ОРС-соединение. Основным пользователем системы является начальник

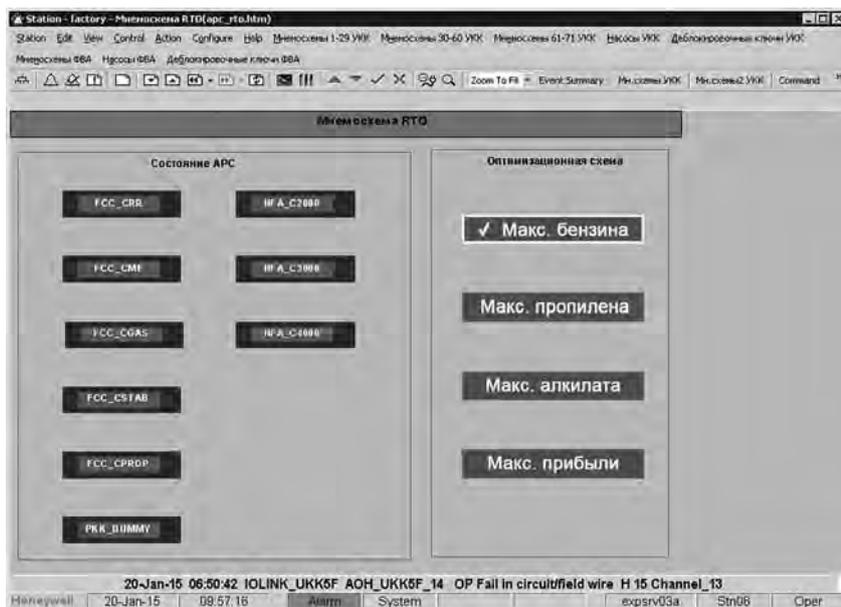


Рис. 5. Окно выбора оптимизационного режима в системе глобальной оптимизации на основе ПО Profit® Optimizer

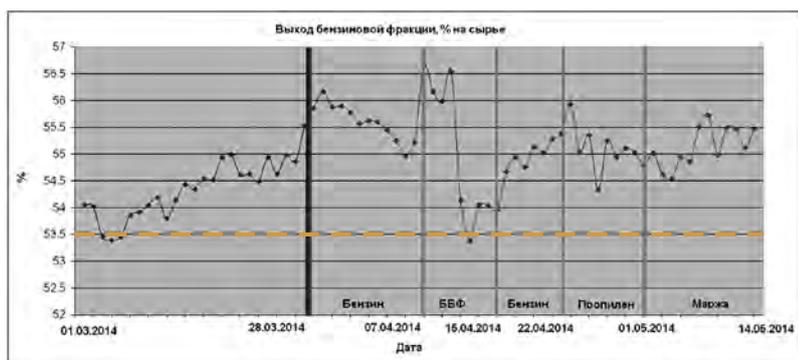


Рис. 6. Тренд выхода бензина каталитического крекинга до и после внедрения системы глобальной оптимизации, свидетельствующий об увеличении отбора

производственной смены. Для переключения задач оптимизации создан простой удобный интерфейс (рис. 5).

Эксплуатация системы на протяжении года продемонстрировала приблизительно 6-месячную ее окупаемость благодаря главным образом увеличению отбора бензина (рис. 6).

Profit® Optimizer допускает наращивание создаваемых на его основе систем оптимизации без ограничения числа подключаемых многопараметрических контроллеров. В качестве примеров предприятий, ранее реализовавших крупные оптимизационные проекты на основе Profit® Optimizer, укажем:

– Sinopec Shanghai Gaoqiao (КНР) — оптимизационное решение на комплексе глубокой переработки мазута охватывает установки первичной переработки нефти, замедленного коксования, три установки каталитического крекинга;

– Chevron (США) — оптимизационное решение на комплексе производства дизельного топлива (ДТ) охватывает установку первичной переработки нефти, висбрекинг, две установки гидроочистки ДТ;

– HellenicPetroleum (Греция) — система оптимизации производства ароматических углеводородов охватывает два блока вторичной ректификации бензина, установки каталитического риформинга, изомеризации, концентрирования бензола.

#### Заключение

Настоящая статья призвана конспективно показать, насколько велики возможности промышленной автоматизации на предприятии, где сочетаются передовые высокотехнологичные продукты, глубо-

кая инженерная экспертиза исполнителя, дополняющая ее столь же глубокая инженерная экспертиза заказчика, творческое взаимодействие специалистов обеих участвующих сторон, своевременная и тактичная поддержка руководством заказчика высокотехнологичных проектов и его неизменная заинтересованность в осмыслении и освоении лучших мировых инженерных практик.

В дальнейших планах ННОС — создание в сотрудничестве с Honeywell СУУТП на установке каталитического риформинга ЛЧ-35-11/600, двух установках гидроочистки ДТ, установке висбрекинга, а также втором

комплексе каталитического крекинга (включая блок вакуумной разгонки мазута ВТ-2), строительство которого находится в стадии завершения. После этого предполагается распространить глобальные оптимизационные решения на оба комплекса каталитического крекинга и на технологические цепочки производства бензинов и т. д. В отдаленной перспективе возможна более глубокая интеграции УУ и системы производственного планирования на основе создаваемых Honeywell продуктов.

О претворении этих планов в жизнь ННОС и Honeywell расскажут в будущих публикациях.

#### Список литературы

1. Дозорцев В.М., Кнеллер Д.В. APC — усовершенствованное управление технологическими процессами // Датчики и системы. 2005. № 10.
2. Захаркин М.А., Кнеллер Д.В. Применение методов и средств усовершенствованного управления технологическими процессами (APC) // Датчики и системы. 2010. № 10.
3. Дозорцев В.М., Ицкович Э.Л., Кнеллер Д.В. Усовершенствованное управление технологическими процессами (APC): 10 лет в России // Автоматизация в промышленности. 2013. № 1.
4. Tatjevsky P. Advanced Control of Industrial Processes: Structures and Algorithms. L.: Springer. 2010.
5. Файрузов Д.Х., Бельков Ю.Н., Кнеллер Д.В., Торгашов А.Ю. Система усовершенствованного управления установкой первичной переработки нефти: создание, внедрение, сопровождение // Автоматизация в промышленности. 2013. № 8.
6. Макарова Т. Прогресс приносит прибыль // iTime. Информационные технологии в ТЭК. 2009. № 1(11).

*Логунов Павел Леонидович — канд. физ.-мат. наук, заместитель генерального директора по экономике и финансам, казначей предприятия,*

*Шаманин Михаил Владимирович — руководитель группы по внедрению APC производственно-диспетчерского отдела ООО «ЛУКОЙЛ-Нижегороднефтеоргсинтез»;*

*Кнеллер Дмитрий Владимирович — канд. техн. наук, руководитель,*

*Шундерюк Михаил Мирославович — канд. физ.-мат. наук, старший инженер отдела систем усовершенствованного управления и оптимизации ТП,*

*Сетин Сергей Петрович — директор самарского представительства ЗАО «Хоневелл».*

*Контактный телефон (495) 796-98-00.*