



РЕШЕНИЯ И ПОДХОДЫ КОМПАНИИ ЭМЕРСОН К УСОВЕРШЕНСТВОВАННОМУ УПРАВЛЕНИЮ ТП

В.Н. Куликов (Компания Эмерсон)

Изложены подходы и решения компании Эмерсон в области технологий усовершенствованного управления, которые позволяют получить экономический эффект за счет повышения качества управления и оптимизации ТП.

Ключевые слова: автоматизация, усовершенствованное управление, повышение качества регулирования, оптимизация, оценка экономического эффекта.

Усовершенствованное управление — цели и задачи

Усовершенствованное управление ТП (Advanced Process Control, APC) — это совокупность современных технологий в области автоматизации, позволяющих получать экономический эффект от внедрения современных цифровых систем управления за счет максимального использования их технических возможностей при сравнительно небольших вложениях.

Системы усовершенствованного управления технологическими процессами (СУУТП) включают множество технических решений за пределами стандартных схем регулирования, которые решают две смежные и взаимосвязанные задачи [1]: повышение качества управления ТП с целью достижения заданных значений параметров процесса или соблюдения регламентированных ограничений, и оптимизация ТП.

В нормальном режиме ТП оперативный персонал осуществляет управление таким образом, чтобы, с одной стороны, обеспечить безопасность и соблюдение технологических ограничений, с другой, — добиться получения заданного количества продукции с регламентными показателями качества. Операторы контролируют параметры ТП, измеряемые приборами КИП (температура, давление, расход и уровень фаз), устанавливают задания контуров регулирования (например, расхода) и значения параметров, регулируемых в ручном режиме (например, положение клапана байпаса). Как правило, операторы следят за показателями качества продукции по данным лабораторного контроля, которые измеряются вручную с интервалом от нескольких часов до суток и выше. Успешное решение поставленных задач во многом определяется знаниями и опытом операторов. Нередко, чтобы не допустить нарушения спецификации продукта или технологических ограничений, операторы допускают существенный запас по качеству продукции относительно заданной спецификации. Это обеспечивает требуемое качество и снижает вероятность брака, но достигается обычно за счет уменьшения выхода продукции, роста потерь или повышенной затраты энергии. Операторы неохотно идут на сокращение запаса по качеству и чувствуют себя неуверенно в ситу-

ации, когда по указанию диспетчера они должны одновременно обеспечивать заданные качество и выход продукции, что требует непрерывного поиска оптимального режима процесса. Ситуацию усложняет то, что по мере модернизации предприятий руководство требует повышения эффективности работы операторов, с тем, чтобы каждый оператор отслеживал все большее число параметров; между тем смена поколений на заводах ведет к замещению опытных операторов новичками, которые не обладают достаточной квалификацией для решения поставленных задач.

Системы усовершенствованного управления призваны помочь оперативному персоналу решать эти задачи, рассчитывая оптимальный режим процесса и выполняя управляющие воздействия, необходимые для его поддержания. Разгружая оператора от рутинной работы, они позволяют ему сосредоточиться на других задачах, которые не могут быть выполнены без его участия.

Основной эффект от систем усовершенствованного управления на уровне предприятия возникает от непрерывной оптимизации работы установок. Благодаря непрерывной корректировке технологического режима в сторону заданных целей оптимизации и контролю ограничений режим работы установки приближается к наилучшему настолько, насколько это возможно, что дает ежедневный экономический эффект. Так, при внедрении СУУТП на установке первичной переработки нефти система непрерывно рассчитывает, насколько можно повысить выход легких нефтепродуктов и при наличии такой возможности увеличивает их выход, стремясь приблизиться к регламентному ограничению качества продукции, но не нарушить его. За счет этого возникает измеряемый экономический эффект в виде дополнительного объема легких нефтепродуктов, получаемых из сырой нефти.

Практика внедрения подобных систем позволяет ориентировочно оценить эффективность реализации систем усовершенствованного управления на различных ТП. Так, по опыту компании Эмерсон, применение СУУТП в нефтепереработке позволяет увеличить степень или глубину отбора светлых нефтепродуктов

на величину 0,1...0,8%. В процессах ректификации возможно либо снизить расход энергоресурсов на величину 2...10%, либо увеличить выход более ценного продукта на величину 0,5...5%. Применение СУУТП на печах или котлах за счет оптимизации процесса горения позволяет снизить расходы топлива на величину 0,5...2%. Потенциальный экономический эффект от внедрения СУУТП на каждой установке индивидуален и зависит как от особенностей ТП, так и от организации работы и опыта операторов. В среднем, по данным различных источников, окупаемость СУУТП варьируется от полугода до полутора лет [2].

Технологии встроенного усовершенствованного управления в АСУТП DeltaV

Архитектурное решение

К усовершенствованному управлению относят множество технических решений, но чаще всего этот термин применяют к технологии многопараметрического управления с прогнозирующей моделью (Model Predictive Control, MPC). В настоящее время общепринятой в промышленности является технология MPC на основе линейных моделей процесса с линейным или квадратичным критерием оптимизации.

Компания Эмерсон разработала и реализует технологию усовершенствованного управления на программно-технической базе современной АСУТП DeltaV.

СУУТП компании Эмерсон состоит из функциональных модулей усовершенствованного управления, которые выполняются в программно-технических средствах АСУТП DeltaV и осуществляют непосредственное автоматическое управление и оптимизацию ТП и приложений инженерного и операторского интерфейса, предназначенных для конфигурирования и операторского управления (рис. 1).

Алгоритмы усовершенствованного управления реализованы внутри функциональных модулей DeltaV на языке диаграмм библиотечных блоков. Функциональные модули усовершенствованного управления в составе СУУТП включают модули:

- многопараметрических регуляторов с прогнозирующей моделью и встроенным оптимизатором;
- виртуальных анализаторов показателей качества;
- связи, расчета ключевых показателей эффективности (КПЭ) системы, улучшенных алгоритмов регулирования (Advanced Regulatory Control) и т. д.

Многопараметрические регуляторы

Важнейшим функциональным блоком усовершенствованного управления является блок многопараметрического регулятора с прогнозирующей моделью, существующий в двух вариантах: блок регулятора MPC-PRO (для работы в контроллере DeltaV вер. 8 и выше) и блок регулятора-координатора MPC-PLUS (для работы на рабочей станции DeltaV вер. 12 и выше).

Функциональный блок MPC-PRO/MPC-PLUS содержит математическую модель процесса в виде матрицы откликов входных параметров регулятора

(управляемых переменных CV, переменных ограничений LV) на ступенчатые изменения выходных параметров (регулируемых переменных MV) и возмущений (DV), которые представлены в виде модели конечного отклика во времени (Finite Impulse Response, FIR) или передаточных функций звеньев 1- и 2-го порядка с запаздыванием. Предельная размерность матрицы — до 80 параметров входа и 40 параметров выхода, но на практике число выходов обычно не превышает 10...15 ед.

На основании модели функциональный блок MPC-PRO/MPC-PLUS вычисляет прогноз поведения процесса на горизонте прогнозирования и осуществляет расчет такого управляющего воздействия, которое обеспечит достижение целей управления и оптимизации.

Оптимизатор реального времени встроен в функциональный блок MPC-PRO/MPC-PLUS и работает совместно с многопараметрическим регулятором. Оптимизатор рассчитывает стационарную точку оптимума, а многопараметрический регулятор рассчитывает план управляющих воздействий для достижения указанной точки оптимума на горизонте прогнозирования. Цели оптимизации определяются заданным критерием оптимальности, который принимает форму взвешенной суммы факторов и может учитывать как технологические, так и экономические показатели. Блок учитывает заданные ограничения и стремится найти точку оптимума, удовлетворяющую всем ограничениям; если это одновременно невозможно, допускается нарушение ограничений, имеющих наименьший приоритет.

Скорость достижения точки оптимума определяется коэффициентами настройки регулятора (Penalty on Move и Penalty on Error), значения которых, как и в случае ПИД-регуляторов, являются компромиссом между требованиями робастности, скорости регулирования и компенсации возмущений.

Блок компенсирует измеряемые возмущения по модели, а неизменяемые возмущения — за счет обратной связи.

Управляющие воздействия вычисляются непрерывно с частотой сканирования модуля, которая варьируется от 1 раза в секунду для быстрых регуляторов малого размера до 1 раза в несколько минут для многопараметрических регуляторов инерционных аппаратов с горизонтом прогнозирования в несколько часов.

Блок MPC-PRO применяется для задач прогнозирования и оптимального управления технологическими аппаратами малой и средней размерности. Функциональные модули, содержащие этот блок, как правило, выполняются в контроллере DeltaV. Блок MPC-PLUS преимущественно предназначен для больших и нелинейных задач и выполняется на рабочей станции Приложений DeltaV, имеющей большие вычислительные возможности. При построении СУУТП установки модули многопараметрических регуляторов могут объединяться друг с другом в каскад

многопараметрических регуляторов, учитывать ограничения, общие для всех модулей или обусловленные действиями параллельно выполняющихся модулей. Это позволяет строить многоуровневую СУУТП, которая сможет решать задачи, начиная от управления отдельным аппаратом до координации режима всей установки с возможностью дальнейшей интеграции с системами более высокого уровня.

Виртуальные анализаторы показателей качества

Виртуальные анализаторы предназначены для оценки показателей качества продуктов по математическим моделям и реализуются в виде функциональных модулей DeltaV, содержащих уравнения регрессий, эмпирических зависимостей или физико-химических моделей, а также специальные функциональные блоки, базирующиеся на теории нейронных сетей (NN) и позволяющие идентифицировать неявные и нелинейные зависимости. Тип модели виртуальных анализаторов определяется на этапе проектирования для каждого виртуального анализатора по отдельности.

Функциональные модули виртуальных анализаторов поддерживают обновление моделей по сигналам поточных анализаторов или данных лабораторного контроля

Творчество - это вечный поиск и вечное усовершенствование.

Ремейк по фразе Н. Бондарева

в автоматическом режиме, которое, как правило, осуществляется путем корректировки коэффициента смещения. При одновременном наличии данных лабораторного контроля и поточных анализаторов может осуществляться перекрестный контроль достоверности данных поточных анализаторов и данных лабораторного контроля.

Диагностика состояния СУУТП (контроль коммуникации, статус сигналов измерений) осуществляется собственными функциями АСУТП DeltaV. Специальные функциональные модули контроля состояния параметров предназначены для идентификации проблем, не отображаемых средствами диагностики ПТК и статусами сигнала.

Для конфигурирования и работы с СУУТП применяются приложения ПТК DeltaV.

- Проводник DeltaV используется для управления конфигурацией СУУТП, создания новых функциональных модулей, передачу функциональных модулей на выполнение на рабочие станции, вызова других приложений СУУТП.

- Студия управления используется для конфигурирования и реализации алгоритмов управления в функциональных модулях СУУТП.

- DeltaV PredictPro является основным инженерным приложением конфигурирования блоков многопараметрических регуляторов MPC-PRO/MPC-PLUS и выполняет функции автоматизированного пошагового тестирования, идентификации моделей, настройки и генерации многопараметрического регулятора. Идентификация моделей выполняется по результатам тестирования на основе собранных исторических данных.

- Для СУУТП разрабатываются специальные экраны операторского интерфейса АСУТП в среде DeltaV Operate.

Система усовершенствованного управления DeltaV использует рабочие станции, программное обеспечение и внутренние интерфейсы связи ПТК DeltaV.

Реализация СУУТП на существующей АСУТП DeltaV позволяет исключить закупку

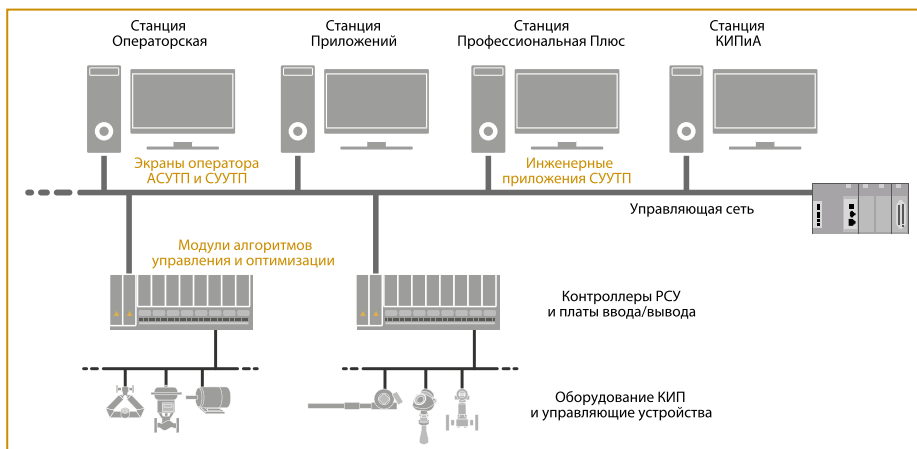


Рис. 1. Архитектура СУУТП DeltaV

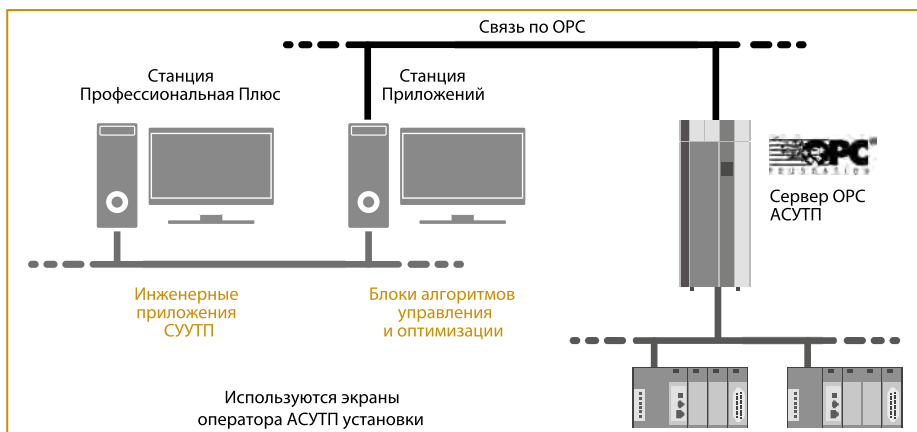


Рис. 2. Архитектура СУУТП на АСУТП другого производителя

дополнительного оборудования, лицензий ПО (необходимо только расширение лицензий на блоки MPC) и выполнение работ по интеграции с АСУТП.

При реализации СУУТП над существующей АСУТП другого производителя она ставится на выделенных рабочих станциях ПТК DeltaV в минимальной конфигурации и интегрируется с АСУТП средствами открытого протокола передачи данных OPC.

Особенности выполнения проектов СУУТП

Усовершенствованное управление находится «на стыке» автоматизации и технологии. Успешность проектов внедрения усовершенствованного управления в большей степени, чем в традиционных проектах АСУТП является результатом совместной работы специалистов компании Эмерсон и сотрудников структурных подразделений предприятия.

На период реализации проекта формируется рабочая группа, включающая специалиста-технолога (начальника установки, начальника смены) и специалистов по АСУТП. Участие технолога необходимо на всех этапах проекта и позволяет учесть в проекте особенности ТП, задачи управления, показатели качества, регламентные и технологические ограничения. Специалисты по АСУТП также участвуют на всех этапах проекта и принимают участие в интеграции СУУТП с существующей АСУТП, отладке базового уровня управления, настройке регуляторов, внедрении экранов оператора СУУТП, обучении операторов новым средствам управления. Часть задач решается с привлечением персонала лаборатории и производственного отдела. Взаимодействие подразделений предприятия и специалистов компании Эмерсон описывается в программах работ.

Реализация СУУТП проходит в несколько этапов, которые имеют существенные отличия по содержанию от проектов АСУТП.

Первоочередным этапом перед внедрением СУУТП является предварительное обследование установки. Обследование включает ознакомление с технологической документацией, архитектурой АСУТП установки, интервью с технологическим персоналом и персоналом АСУТП, сбор данных по истории процесса и данным лабораторного контроля. Целью этого обследования является выработка основных проектных решений по архитектуре, определение целей и задач управления, ключевых показателей качества продуктов, идентификация проблем и факторов, которые могут ограничивать возможности и качество работы СУУТП, и выработка рекомендаций по их устранению. С разрешения персонала установки могут быть проведены пробные пошаговые тесты, что позволит еще на этапе проектирования увидеть отклики ТП и поможет формированию структуры многопараметрических регуляторов. Отчет по обследованию включает оценку состояния АСУТП установки и условий для внедрения СУУТП, средств КИП, клапанов и управляющих устройств, наличия и качества

работы поточных анализаторов, наличия и полноты архива истории процесса и данных лабораторного контроля. Производится оценка качества работы контуров регулирования и их настройка. На этом же этапе проводится предпроектная оценка экономического эффекта от внедрения СУУТП.

Выполнение или невыполнение рекомендаций, сформулированных в отчете, является решением предприятия и обычно влияет не на саму возможность реализации СУУТП, а на архитектуру регуляторов, достижимые возможности и потенциал оптимизации.

Проектирование СУУТП следует за этапом предварительного обследования и включает определение архитектуры системы, структуры многопараметрических регуляторов и их параметров, перечня виртуальных анализаторов, настроек оптимизатора, вспомогательных модулей, а также проектные решения по интеграции с АСУТП, если она необходима.

Важнейшим этапом проекта является пошаговое тестирование ТП. Целью тестирования является определение точных математических моделей откликов параметров процесса на единичные управляющие воздействия и возмущения. Тестирование проводится на действующей установке, находящейся в нормальном режиме, по подготовленной и утвержденной предприятием программе тестирования. По каждому аппарату и каждому параметру в программе указывается амплитуда и продолжительность шага тестирования (управляющего воздействия или возмущения), число шагов, а также требования к выполнению дополнительных лабораторных анализов в период тестирования. Тестирование процесса может проводиться автоматизированно с использованием возможностей ПО DeltaV PredictPro, но чаще технологический персонал выполняет тестирование вручную.

На основании данных, собранных при тестировании, с помощью алгоритмов идентификации определяется матрица моделей многопараметрического регулятора, которая проверяется на контрольном наборе данных. Модели виртуальных анализаторов показателей качества идентифицируются по архиву истории процесса и лабораторных измерений и подтверждаются с использованием дополнительных анализов, собранных в период пошагового тестирования.

Существует практика проведения первичной идентификации и проверки математических моделей СУУТП на моделях высокой точности, разработанных в специализированном ПО моделирования (HYSYS, Petro-SIM). Это требует дополнительного времени на разработку такой модели и обычно не приводит к сокращению продолжительности проекта в целом, но в некоторых случаях позволяет сократить продолжительность тестирования.

Перед этапом пусконаладочных работ СУУТП могут быть предусмотрены модельные испытания, в ходе которых моделируется работа многопараметрических регуляторов, виртуальных анализаторов и отклик объекта управления.

Пусконаладочные работы (ПНР) производятся на площадке после завершения разработки конфигурации СУУТП и моделей. Если СУУТП внедряется на установке под управлением АСУТП DeltaV, многопараметрические регуляторы и виртуальные анализаторы могут быть сразу же загружены в контроллеры или рабочие станции. Если на установке функционирует АСУТП других производителей, необходимым первоочередным этапом ПНР является интеграция СУУТП и АСУТП, проверка коммуникации и алгоритмов действий СУУТП при отказе связи.

Многопараметрические регуляторы вводятся в работу поэтапно, один за другим. В каскадных схемах СУУТП подчиненные регуляторы каскада вводятся в работу первыми. При первых пусках проверяется адекватность модели и управляющих воздействий, а степень свободы регулятора жестко ограничивается. В дальнейшем пределы ограничений регулятора постепенно расширяются до пределов диапазона штатного режима работы СУУТП, предусмотренных проектом. В период ПНР корректируются коэффициенты математических моделей, параметры настройки и оптимизации, могут быть введены дополнительные ограничения или возмущения, если необходимо, отрабатываются замечания операторов и технологов для достижения требуемого качества управления. Все изменения относительно проектных решений отражаются в финальной проектной документации.

Многопараметрические регуляторы принимаются в опытную эксплуатацию после определенного периода (1...2 недели) круглосуточной работы в период ПНР под наблюдением специалистов разработчика. По результатам опытной эксплуатации, отработки замечаний и прохождения приемочных испытаний СУУТП принимается в промышленную эксплуатацию.

Экономический эффект от внедрения СУУТП

В отличие от базовой автоматизации, целью внедрения СУУТП является получение экономического эффекта от оптимизации ТП. Для его подтверждения выполняется предпроектная и послепроектная оценки экономического эффекта, которые осуществляются по различным методикам.

Предпроектная оценка экономического эффекта предназначена для прогноза ожидаемых результатов внедрения СУУТП и осуществляется до начала работ по проекту, как правило, в период обследования установки. В некоторых случаях такая работа проводится еще на этапе подготовки технико-коммерческого предложения.

Для осуществления оценки на этапе обследования определяются цели оптимизации, целевые показатели и ограничения. Так, для установки первичной переработки нефти оптимизация будет производиться в отношении выхода более ценных легких нефтепродуктов и оптимизируемых целевых фракций, например, тяжелого бензина, в атмосферном блоке, выхода вакуумного дизельного топлива и газойля в вакуум-

ном блоке и потребления энергии на печах. Для оценки используются измерения расходов продуктовых фракций и топлива. Потенциал оптимизации ограничен требованиями спецификации качества продукции, которые измеряются лабораторными анализами и обычно представлены в виде ограничений по фракционному составу: температура начала и конца кипения для бензинов, точка 95% выкипания для дизельного топлива и вакуумных фракций.

Методика предпроектной оценки экономического эффекта основана на определении отклонения параметров процесса от заданных спецификаций качества продукции — запаса по качеству, и возможного сокращения этого запаса, позволяющего оптимизировать процесс без нарушения ограничений. Производится статистический анализ данных истории процесса и лабораторного контроля за 3...6 мес. нормальной работы установки, обычно отдельно для летнего и зимнего периода, расчет средней величины, среднеквадратичного отклонения (СКО) от среднего и от спецификации по каждому из показателей. СКО относительно среднего является мерой качества управления процессом, чем ниже это значение, тем лучше управление. СКО относительно спецификации по качеству является мерой максимального потенциала оптимизации.

Практически достижимый потенциал оптимизации будет всегда меньше максимально возможного. Для его определения можно воспользоваться одним из нескольких распространенных методов [3]. Например, метод «лучшего оператора» основан на том, что качество управления процессом с помощью СУУТП не хуже, чем качество работы квалифицированного оператора при тех же условиях, что позволяет постоянно вести процесс в наилучшем из режимов, ранее достигнутых квалифицированным оператором. Экономический эффект рассчитывается по разнице параметров наилучшего режима и их средних значений за рассматриваемый период через корреляцию с выходом целевой продукции, энергозатратами или другими показателями, по которым ведется оптимизация.

Метод «лучшего оператора» дает консервативную оценку потенциала оптимизации. Другие методы основаны на оценке достигаемого сокращения СКО в результате внедрения СУУТП и смещения прогнозируемого значения показателя качества ближе к пределам спецификации на соответствующую величину. Если СКО относительно спецификации меньше, чем СКО относительно среднего, то потенциал оптимизации ограничен низким запасом по качеству, и для оценки предпочтительно воспользоваться методом «процента выхода за ограничение», при котором при работающей СУУТП достигаемое значение показателя качества обеспечит нарушение ограничения не чаще, чем достигнутое ранее операторами. Если СКО относительно спецификации выше, чем СКО относительно среднего, это говорит о наличии неиспользуемого потенциала оптимизации даже при текущем качестве управления, который можно добавить

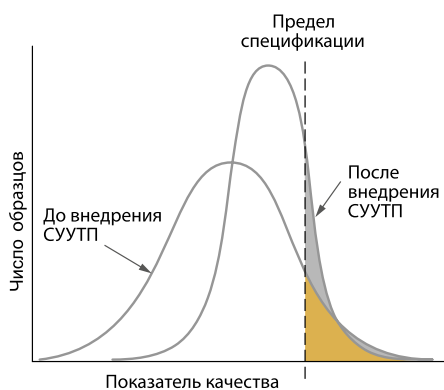


Рис. 3. Методы оценки потенциала оптимизации

к потенциалу, возникающему за счет сокращения запаса по качеству (рис. 3).

«Шум» датчиков, проблемы с клапанами, плохо настроенные контуры ПИД-регулирования сокращают потенциал оптимизации, не позволяя сократить колебательность и СКО по показателям качества. Поэтому важно иметь хорошо функционирующий уровень базовой автоматизации при внедрении СУУТП. Не менее важна точность лабораторного контроля: точность ведения процесса с использованием СУУТП и СКО по показателям качества, измеряемым лабораторией, не может быть выше точности лабораторных измерений.

Послепроектная оценка проводится в период завершения проекта СУУТП и подтверждает получение экономического эффекта. В ней используется другая методика, основанная на сравнении данных контрольного периода до внедрения СУУТП и периода опытной эксплуатации СУУТП, выбранных так, чтобы условия работы установки были по возможности одинаковыми. Это позволяет рассчитать практически полученный экономический эффект на реальных данных по оптимизируемым показателям, таким как выход более ценных продуктов или потребление энергии.

На практике условия и режимы работы установки нередко меняются, и для подтверждения экономического эффекта необходимо вводить корректировки. Так, при изменении производительности установки необходим пересчет полученного экономического эффекта на новый расход сырья через удельные величины. В более сложных случаях, например, при изменении состава сырья, подаваемого на установку первичной переработки нефти, или спецификации целевых продуктов, необходимо разработать и утвердить методику корректировки. В приведенном примере корректировка осуществляется через вычисление теоретического выхода нефтепродуктов по кривой истинных температур кипения (ИТК) и сравнение выхода целевой продукции относительно теоретически возможного при разных составах нефти.

Методика расчета экономического эффекта с необходимыми корректировками на состав сырья, изменение спецификации и другие внешние факторы раз-

Куликов Вячеслав Николаевич — Dr.-Ing, руководитель группы высокотехнологичных решений компании Эмерсон.

Контактный телефон (495) 995-95-59, доб. 502.

E-mail: Viacheslav.Kulikov@emerson.com

рабатывается и утверждается на этапе проектирования СУУТП.

Сопровождение СУУТП

Системы усовершенствованного управления показывают тем более высокое качество работы, чем ближе модель к реальному ТП. С течением времени вследствие старения оборудования, ремонтов, модернизации установки ТП меняет свои характеристики, модель начинает отклоняться от процесса, и характеристики управления ухудшаются. Поэтому для поддержания постоянного экономического эффекта от СУУТП важна поддержка и актуализация моделей. СУУТП компании Эмерсон предоставляет открытые инструменты для решения этих задач.

Компания Эмерсон предлагает двухуровневую техническую поддержку:

- ежедневная техническая поддержка, контроль качества работы СУУТП и внесение небольших корректировок, которая может осуществляться сотрудниками предприятия, прошедшими обучение по технологиям усовершенствованного управления;

- расширенная техническая поддержка, подразумевающая детальную проверку качества моделей, их корректировку и настройку, которая осуществляется специалистами компании Эмерсон с определенной периодичностью (например, один раз в год).

Заключение

Системы усовершенствованного управления являются перспективным направлением развития автоматизации, позволяющим получать экономический эффект за счет оптимизации ТП. Компания Эмерсон предлагает СУУТП на базе технологий, встроенных в АСУТП DeltaV и обеспечивает полную реализацию проекта от предварительного обследования и проектирования до послепроектного подтверждения экономического эффекта.

Многочисленные примеры успешных внедрений СУУТП как во всем мире, так и в России, приводят к значительному росту интереса к СУУТП со стороны предприятий, стремящихся повысить эффективность производства путем внедрения новых технологий. Сегодня многие предприятия России и СНГ либо уже реализуют программы внедрения СУУТП, либо рассматривают возможность их реализации на своих технологических объектах.

Список литературы

1. Blewins T., McMillan G., Wojsnis W., Brown M. Advanced Control Unleashed. McGraw-Hill. 2003.
2. Оптимизация управления технологическими процессами на заводе по производству этанола // Control Engineering Россия. 2014, №3 (51). с. 90-91.
3. Latour P.L., Sharpe J.H., Delaney M.C. Estimating benefits from Advanced Control // ISA Transactions, Vol. 25. No. 4. 1986. p. 13-21.