

ОРГАНИЗАЦИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ ПЛАНИРОВАНИЯ И МАТЕРИАЛЬНОГО БАЛАНСА

В.И. Кувыкин (ООО «ЛУКОЙЛ-Нижегороднефтеоргсинтез»)

Рассмотрены принципы построения автоматизированных систем планирования и учета для предприятий с непрерывным производством. Приведены результаты использования оптимизационных моделей в нефтеперерабатывающей промышленности.

Ключевые слова: автоматизация производства, ERP, APS, MES, исследование операций, оптимизация, нефтепереработка.

Введение

В настоящее время серьезное внимание уделяется автоматизации процессов планирования и построения материального баланса с целью повышения экономической эффективности, синхронизации производства, отгрузки и сбыта, снижения запасов [1]. Для оптимизации процессов активно используются методы исследования операций, результативность которых была подтверждена как в военной области, так и в самых разнообразных отраслях промышленности [2]. Проблемы с внедрением автоматизированных систем зачастую могут быть решены за счет системного подхода и анализа иерархии целей.

Для консолидации информации различных бизнес-процессов широко используются ERP-системы (Enterprise Resource Planning). Однако архитектура последних, ориентированная на транзакционную работу на основе систем управления БД, не рассчитана на проведение сложных вычислений при решении оптимизационных задач. Исходя из этого, применяются специализированные продукты прикладного ПО. К ним относят APS системы (Advanced Planning & Scheduling), предназначенные для оперативного производственного планирования, и системы класса MES (Manufacturing Execution System) для задач синхронизации, координации, производства продукции и сведения материального баланса. Для промышленных установок оптимальные результаты по заданным критериям с одновременным выполнением требований по качеству получают с помощью систем APC (Advanced Process Control) [3]. Все более широкое применение находят комплексы автоматического смещения продукции.

Важной особенностью автоматизации производства является стремление получить оптимальное решение поставленной задачи (принцип «оптимальности»). Однако на практике такое решение найти для систем различного уровня иерархии и назначения весьма непросто. Проблема заключается как в построении адекватных моделей планирования и управления, так и в согласовании критериев оптимизации.

Для управления производством необходима информационная система, позволяющая в реальном времени сравнить производство продуктов с оптимальным планом, выявить отклонения и помочь принять корректирующие действия. Таким образом, задача планирования должна быть неразрывно связана с анализом фактических данных. Поскольку прибор-

ные данные имеют ошибки измерения, необходимо их согласование по всей производственной цепочке. При этом наиболее достоверную информацию о фактическом движении сырья и продукции получают при помощи материального баланса [4]. Балансовая концепция широко используется для учета ресурсов в машиностроении, строительстве, нефтепереработке и других отраслях.

Целью настоящей работы является исследование принципов построения моделей оптимального планирования и учета для их эффективного взаимодействия с позиций системного подхода. Автор опирался на многолетний опыт по использованию автоматизированных систем планирования и построения материального баланса в нефтепереработке.

Оптимальное планирование

Одной из основных задач управления производством является увеличение маржинальной прибыли. Для этой цели разработаны и успешно применяются методы линейного программирования [2]. В матричном виде задачу линейного программирования для действительных переменных x_1, x_2, \dots, x_n для целевой функции $L(x_1, x_2, \dots, x_n)$ можно сформулировать следующим образом:

$$Ax = b, \quad x \geq 0, \quad (1)$$

$$L_{\max}(x) = c^T x, \quad (2)$$

где A — матрица $\|a_{ij}\|$ размера $m \times n$,

$$c = (c_1, c_2, \dots, c_n)^T, b = (b_1, b_2, \dots, b_m)^T \geq 0. \quad (3)$$

Компоненты векторов c_i и b_i — константы, знаком T обозначено транспонирование. Систему уравнений (1) — (3) назовем LP-моделью.

Отметим, что в последние годы стремление построить более точные модели привело к использованию нелинейных моделей. Усложнение моделей в реальных производственных процессах и их высокая размерность (порядка 10^4 переменных) требует применения специальных программ для решения задачи. Но ключевым вопросом является построение корректных математических моделей. Остановимся на двух основных проблемах автоматизированных систем моделирования и решения задачи (1) — (3), с которыми приходится сталкиваться в практической деятельности и которые определяют их дальнейшее развитие.

Ключевые значения параметров и иерархия целей в задачах линейного программирования

Одним из основных критериев адекватности моделирования выступает структурная устойчивость решений, когда при малых изменениях параметров сохраняются те черты, которые характеризуют поведение реального производства. Мощности вычислительной техники и развитие численных методов позволяют усложнить задачу (1) — (3). На улучшение математической модели можно потратить много времени и сил, но это может оказаться совершенно неоправданным. Учесть все факторы, влияющие на поведение системы, никогда нельзя. Более того, ни один из параметров модели не может оставаться неизменным в реальных процессах.

В работе [5] показано, что существуют так называемые ключевые значения параметров, в которых кардинально меняется структура оптимального решения. Одним из критериев является скачкообразное изменение максимума целевой функции (2). Ключевые значения служат индикатором неточности линейного моделирования. При этом изменение решения может быть настолько велико, что такое моделирование не имеет физического смысла. Важным направлением задач линейного программирования и дальнейшей автоматизации расчетов является возможность анализа модели, позволяющая определить ключевые значения параметров.

Следующим ограничивающим фактором являются детерминированные значения коэффициентов (3). Процесс производства сопровождается действием случайных факторов (колебания спроса и предложение, отказы технических устройств и т. п.) В таких случаях в задачах линейного программирования (1) — (3) берется не сама величина, а ее среднее значение (математическое ожидание). Суточное производство продукции может отличаться от равномерного плана, и, кроме того, велико число случайных факторов, поэтому решение для промежутков времени в интервале до нескольких суток может приводить к значительным отклонениям от оптимального.

Для ликвидации внешних возмущений используются системы с обратной связью, работающие в реальном времени. Оптимизация работы технологического оборудования может быть достигнута применением систем усовершенствованного управления процессами (АРС) [3]. Эти звенья являются подсистемой предприятия. Работая в сложной системе, которая включает большое число систем (относительно самостоятельные подразделения, цеха, установки), для эффективной работы требуется установить иерархию целей оптимизации. На практике «системный подход» сводится к тому, что каждое звено, работа которого оптимизируется, полезно рассмотреть как часть другой более обширной системы, и выяснить, как работа данного звена влияет на ее работу.

Используя АРС и автоматические станции смешения, можно получить больше продукции с высокой

добавленной стоимостью за счет изменения выхода других компонентов. Однако эта продукция может быть не востребована, образуются запасы, транспорт не готов к ее вывозу, нет соглашения с покупателями, и в результате продажа осуществляется по заниженным ценам. Такой подход с локальной оптимизацией может привести к реальным потерям, которые сведут на нет весь выигрыш от решения. На практике каждое звено, работа которого оптимизируется, полезно рассматривать как часть предприятия в целом. На предприятии максимизация прибыли при известных ограничениях задается решением задачи линейного программирования, которая и определяет глобальную цель. С другой стороны, жестко регламентированного планирования быть не должно, необходимо предоставить инициативу, чтобы каждое звено системы, стремясь к достижению своей цели, работало в согласии с целями системы в целом.

Для выполнения этих требований можно предложить алгоритм согласования целей. Известно, что установки могут работать на разных технологических режимах с выпуском отличающегося ассортимента продукции. На первом шаге по результатам работы системы АРС определяется улучшение характеристик при вариантах работы с максимальным выпуском того или иного продукта. Улучшенные варианты встраиваются в LP-модель и используются при оптимальном планировании. Настройка же целевой функции АРС для данной установки осуществляется в соответствии с оптимальным решением LP-модели. Таким образом, осуществляется взаимосвязь целевых функций систем различного уровня.

Для определения реального экономического эффекта от внедрения подсистем типа АРС можно рекомендовать подход, описанный в работе [6]. Осуществляется мониторинг планов производства с учетом ремонтов, изменений ассортимента и цен за некоторый период. Эффект определяется как разность операционного дохода до и после изменений LP-модели за этот период.

Эффективность автоматизированных систем линейного программирования

Зададимся вопросом, что дают автоматизированные системы, основанные на оптимизации методами линейного программирования. Воспользуемся экспертным методом, который разработан в медицинской диагностике, когда процесс принятия решения об использовании автоматизированных систем является жизненно важным для человека. Диагноз производится группой экспертов и сравнивается с результатом расчета. Если такая программа с достаточно хорошей вероятностью дает диагноз на уровне квалифицированного врача, то можно ее использовать в практической деятельности.

Чтобы сравнивать между собой разные решения в промышленности, нужно иметь показатель, который отражает целевую направленность операции.

Для оценки эффективности планирования автоматизированными системами введем критерий точности планирования:

$$E = [1 - (|P - F|) / P], \quad (4)$$

где P — плановое значение, F — фактическая величина.

При оценке эффекта от автоматизации обычно рассматриваются средние значения целевой продукции и величины среднеквадратических отклонений [7]. При идеальном планировании отклонения отсутствуют, поскольку управление производством и отгрузкой синхронизированы, нет сверхнормативных запасов и маржинальная прибыль (1) достигает максимума. Чем больше среднеквадратическое отклонение, тем больше запас по качеству, который характеризуется верхней границей доверительного интервала. Автоматизация позволяет стабилизировать процесс, уменьшить дисперсию, увеличить выход целевой продукции и приблизиться к идеальному результату.

Проведем оценку для нефтеперерабатывающего завода по первичной переработки нефти мощностью 17 млн. т. Сравним расчет планов производства нефтепродуктов вручную до введения моделирующей системы и через несколько лет после внедрения системы оптимального планирования, когда уже имелся успешный опыт эксплуатации.

Ручной расчет проводился двумя квалифицированными работниками со стажем работы на НПЗ в области планирования > 15 лет. Сравнились результаты расчета на модели оптимизационного планирования RPMS (Honeywell), предназначенной для построения модели нефтехимического производства и решения задач линейного программирования. Проводилась статистическая оценка результатов расчета светлых нефтепродуктов по формуле (4). Оказалось, что автоматизированная система позволяет получить дополнительный операционный доход >1,7 долл. США на каждой тонне переработанного сырья. Безусловно, данный эффект зависит от квалификации специалистов по планированию, качества LP-модели и сложности завода.

Ряд факторов не вошел в формализованную оценку, но некоторые из них оказывают существенное влияние на эффективность работы. Так, высокая скорость расчетов позволяет разработать несколько вариантов планов при разных ограничениях и принять наилучшее управленческое решение. В автоматизированных программах скорость планирования по сравнению с ручным расчетом возрастает более чем на порядок. Кроме того, преимущество экономико-математической модели состоит в том, что она определяет не только оптимальный результат, но и позволяет дать оценку имеющихся ограничений.

В настоящее время во многих отраслях стоит проблема подготовки кадров. Важным преимуществом автоматизированных систем является возможность

в более короткий срок организовать передачу знаний среди персонала предприятия, поскольку существует доступная для обучения формализованная математическая модель (так называемые кодифицированные знания). При этом требования к стажу работы обучающихся работников многократно уменьшаются.

Модель материального баланса

Для повышения точности планирования исключительно важным являются фактические данные, которые неразрывно связаны с построением материального баланса. Автоматизация расчета баланса позволяет рационально выбрать число и точность приборов, выявить источники потерь [4]. Кроме того, материальный баланс является инструментом оценки эффективности производства и конкурентного анализа предприятия. Для его формирования задействованы значительные информационные ресурсы, системы измерений и квалифицированный персонал. При анализе отклонений фактических показателей от плановых принимаются соответствующие решения по управлению производством и достигается значительный экономический эффект за счет оптимизации производственных процессов.

Под материальным балансом понимается концепция описания, основанная на законе сохранения масс, согласно которой извлеченная масса равна сумме изменения первоначальной и привнесенной в динамическую систему массы. При построении материального баланса применяются статистические методы обработки и анализа данных. Для производственных предприятий, где потоков и узлов смешения насчитывается порядка 10^3 , приходится использовать специальные программные комплексы.

Математическая модель может быть записана следующим образом:

$$By = 0, \quad (5)$$

где y — вектор переменных, описывающий потоки, остатки продукции на складе, потери и расход на технологические нужды; B — матрица балансовых уравнений.

Балансовые составляющие измеряются с определенной точностью. Обозначим подмножество измеряемых величин $\bar{y} \in y$, а сами измерения y_0 . В качестве критерия оптимизации рассматривается минимизация квадратичной формы, выражающей отклонения измеренных и получаемых в результате решения значений

$$l_{min}(y) = (\bar{y} - y_0)^T K (\bar{y} - y_0). \quad (6)$$

Здесь K — диагональная матрица, характеризующая погрешности соответствующих измерений. Физический смысл критерия (6) заключается в том, что решения системы (5), которые называются согласованными, должны как можно меньше отличаться от измеренных значений.

Значительно упростить математическое моделирование балансовых потоков (5) возможно используя

систему уравнений оптимального планирования (1). Эти модели имеют общую часть, которая соответствует закону сохранения масс. Общность моделей позволяет построить интегрированное информационное пространство и обеспечить план-факт анализ по общим потокам и продуктам [1].

Декомпозиция системы материального баланса

Большая размерность и сложность интуитивного восприятия решения громоздкой системы (5) — (6) затрудняет эксплуатацию автоматизированных программ. Для практического внедрения автоматизированного сведения материального баланса целесообразно применять приемы декомпозиции сложной системы с большим числом элементов на более удобные для анализа небольшие подсистемы.

Для расчета баланса по предприятию в целом нет необходимости определять все компоненты вектора u . Для этого требуется лишь система уравнений, которая описывает внешние для системы входящие/выходящие потоки. Число таких потоков на порядок меньше, чем в полной системе уравнений (5).

Пусть входящие потоки числом k поступают в систему, преобразуются в h выходящих потоков, при этом изменяются s остатков продукции на складе, часть ресурсов с числом потоков f теряется в виде безвозвратных потерь и расходуется на технологические нужды (например, на топливо).

Закон сохранения массы для динамической системы для отрезка времени $[0, t]$ приобретает вид:

$$\int_0^t Q(t) dt = \int_0^t H(t) dt + \int_0^t S(t) dt + \int_0^t F(t) dt. \quad (7)$$

Здесь $Q(t) = \sum_{i=1}^k y_i$ — входящие потоки, $H(t) = \sum_{i=1}^h y_i$ — выходящие потоки, $S(t) = \sum_{i=1}^s y_i$ — движение остатков, $F(t) = \sum_{i=1}^f y_i$ — безвозвратные потери и топливо.

Отметим, что в балансе (7) содержатся два типа составляющих, а именно: консервативные, описывающие преобразования поступающего сырья в продукцию на выходе, и неконсервативные $F(t)$ — безвозвратные потери и расход на технологические нужды.

При этом появляются случайные и систематические ошибки измерений как массы, так и интегрирования по времени. Причем практически ошибки интегрирования могут оказаться весьма значительными и ими нельзя пренебречь. Разность между измерениями поступающих и выходящих величин назовем дебалансом D . Балансовое уравнение (7) при интегрировании на интервале можно преобразовать к виду:

$$D = \bar{q} - \bar{h} - \bar{s} - \bar{f}, \quad (8)$$

где \bar{q} — масса сырья, \bar{h} — масса продукции, \bar{s} — изменение остатков, \bar{f} — масса на технологические нужды

и величина потерь. Балансовый подход предполагает процедуру согласования, когда в соотношении (8) дебаланс $D = 0$:

$$q_r = h_r + s_r + f_r. \quad (9)$$

Здесь индексом r обозначены согласованные значения.

Далее можно решать полную задачу с учетом внутренних потоков по всем установкам (5) с минимизацией отклонений (6) при фиксированных значениях согласованных величин балансового равенства (9). Таким образом, задача решается в два этапа, а именно: определяется баланс для системы в целом (7) — (9) с учетом только внешних потоков, затем решается для внутренних потоков.

Необходимо отметить, что в системе уравнений (5) элементами матрицы B могут быть и качественные характеристики. В нефтепереработки к таким характеристикам относятся, например, октановые числа потоков на узлах смешения, связанные соответствующими уравнениями. Это обстоятельство позволяет существенно расширить сферу применения автоматизированных систем сведения материального баланса.

Нельзя обойти вопрос о погрешности сведения баланса, которая характеризует учет на предприятии и возможность определения источников потерь. Измерения y_0 в системе баланса имеют разную точность. Ввиду высокой стоимости наиболее точные приборы используются лишь на самых ответственных учетных позициях. Кроме того, измерения неконсервативных составляющих, как правило, имеют большую погрешность, чем консервативных, а величина потерь зачастую не поддается измерениям и определяется экспертным путем на основе статистических данных.

Задача существенно упрощается при использовании балансового равенства (8), которое учитывает лишь внешние потоки. Получить оценку точности сведения баланса можно не прибегая к громоздким вычислениям. Для статистической обработки результатов рассмотрим лишь консервативную часть, а неконсервативную рассчитаем по существующим плановым нормативам. Для определенного промежутка времени, обозначенного индексом i (например, сутки), введем безразмерную величину

$$M_i = [(h_i + s_i) / q_i] + \alpha_i, \quad (10)$$

где q_i , h_i , s_i — измеренная масса сырья, продукции и изменения остатков соответственно; M_i — безразмерный параметр, первое слагаемое которого характеризует выход товарной продукции по отношению к сырью; $\alpha_i = f_i / q_i$ — плановое значение топлива и потерь. Для набора данных можно определить среднее значение безразмерного параметра (10), доверительный интервал, коэффициент вариации, дисперсию, другие статистические характеристики и оценить погрешность измерений.

Дальнейшая декомпозиция на балансовые группы существенно ускоряет процесс сведения баланса

и его анализ, способствует разделению труда. Общая модель потоков задачи оптимального планирования и сведения баланса, включая качественные характеристики потоков, дает возможность одним и тем же специалистам работать в обеих системах, улучшая качество планирования.

Заключение

Предложенная методика декомпозиции и интеграции математических моделей планирования и учета позволяет улучшить экономику производства за счет оптимизации ассортимента и затрат, а также управления мощностями. Показано, что для оценки качественных характеристик продуктов можно успешно использовать систему сведения баланса, тем самым повысить достоверность данных.

Организация систем планирования и сведения материального баланса на основе методов исследования операций обеспечивают оперативное формирование достоверной информации о состоянии производства и согласование иерархии целей, что в свою очередь расширяет возможности принятия эффективных управленческих решений и оптимизации производства.

Приведенные в статье методы и подходы были применены на ООО «ЛУКОЙЛ-Нижегороднефтеоргсинтез» при интегрировании систем планирования, материального баланса и формирования отчетности. Использовались программные продукты фирмы Honeywell (для производственного планирования — система RPMS, при управлении установками — APC, для согласования фактических данных — Production Balance) и некоторые другие системы. Несомненно, предложенные решения справедливы не только для

нефтепереработки, но и для других промышленных предприятий с непрерывным производством.

Показано, что анализ результатов расчета дает возможность разработать практический подход к оценке экономической эффективности автоматизированных систем.

Список литературы

1. *Кувькин В.И., Петухов М.Ю.* Построение моделей бизнес-процессов в системах автоматизации НПЗ // Автоматизация в промышленности. 2012. № 10. С. 39-42.
2. Вентцель Е.С. Исследование операций. М.: Советское радио. 1972. 552 с.
3. *Дозорцев В.М., Ицкович Э.Л., Кнеллер Д.В.* Усовершенствованное управление технологическими процессами (АРС): 10 лет в России // Автоматизация в промышленности. 2013. № 1. С. 12-19.
4. *Гребенюк Е.А., Ицкович Э.Л.* Особенности построения системы материального баланса в производстве технологического типа // Автоматизация в промышленности. 2014. № 1. С. 5-12.
5. *Кувькина Е.В., Кувькин В.И., Петухов М.Ю.* Параметрический анализ математических моделей в задачах линейного программирования // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2010. №3. С.168-172.
6. *Logunov P., Kuvykin V., Balashov S.* Advanced Process Control Benefits Calculation Using Honeywell's Refining and Petrochemical Modeling System at LUKOIL's Norski Refinery // 21st Annual EMEA Users' Group Conference in Lisbon, Portugal. 2009. <https://www.honeywellprocess.com/en-US/news-and-events/Pages/events.aspx>.
7. *Злотникова Л.Г., Колосков В.А., Лобанская Л.П. и др.* Организация и планирование производства. Управление нефтеперерабатывающими и нефтехимическими предприятиями. М.: Химия. 1998. 320 с.

Кувькин Вячеслав Иванович — д-р физ.-мат. наук, начальник планово-экономического отдела ООО «ЛУКОЙЛ-Нижегороднефтеоргсинтез».

Контактный телефон 83145-53252.

E-mail: Vyacheslav.Kuvykin@lukoil.com

Bentley Systems и НЕОЛАНТ создали для Госкорпорации «Росатом» инновационную систему вывода реакторов из эксплуатации

На ФГУП «ПО «Маяк», предприятии Госкорпорации «Росатом», за 4 года создана информационная система поддержки вывода из эксплуатации уран-графитовых реакторов. В ее основе — ИТ-решение, разработанное ЗАО «НЕОЛАНТ» на базе технологий Bentley Systems.

Информационная система «База данных вывода из эксплуатации ПУГР» представляет собой централизованное хранилище данных, собираемых в ходе подготовки к выводу из эксплуатации промышленного реактора и практических работ по демонтажу реактора. В систему вносятся вся проектно-конструкторская, эксплуатационная и справочная документация по объекту.

Новая система, основанная на использовании САПР Bentley MicroStation для создания трехмерных моделей и системы инженерно-технического документооборота Bentley ProjectWise, обеспечивает полноценное управление проектными и эксплуатационными данными, а также доступ к документации через 2D- и 3D-модели объектов.

Ключевые преимущества ИС ВЭ ПУГР

- Экономия времени на поиске, проверке и доступе к данным проекта.

- Управление как архивными, так и новыми данными, которые появляются в процессе вывода реакторов из эксплуатации. Поддержка разработки проектно-конструкторской и технологической документации с последующей верификацией всех ТП и решений. Создание на основе 3D-моделей имитационных моделей, электронных тренажеров для полномасштабной имитации и отработки слож-

ных ТП, оборудования и инструмента по демонтажу оборудования, созданию защитных барьеров и т.п. в помещениях с высокими дозовыми нагрузками на персонал либо в недоступных для персонала пространствах.

- Прогнозирование объемов радиоактивных отходов для каждого реактора и повышение безопасности проектов ВЭ. Перспективное и оперативное планирование и контроль над выполнением работ по выводу из эксплуатации ПУГР.

- Снижение проектных рисков за счет единого источника достоверной информации для всего проекта.

- Повышение качества и оптимизация алгоритма проекта.

- Соблюдение сроков и устранение рисков штрафных санкций.

- Эффективное использование трудовых ресурсов и распределение работ. Автоматизация формирования отчетов о состоянии ПУГР при выводе из эксплуатации.

ИС БДВЭ ПУГР открыта к расширению функций: концепция предусматривает, например, доступ к информации через трехмерные модели ЯРОО, вычисление затрат и поддержку возможностей инженерных расчетов и имитационного моделирования.

Таким образом, система ФГУП «ПО «Маяк», разработанная компанией НЕОЛАНТ на основе технологий Bentley Systems, — это не только информационная база данных, но и гибкий инструмент, способствующий принятию максимально эффективных решений по выводу из эксплуатации промышленных реакторов.

[Http://www.neolant.ru](http://www.neolant.ru)