

Опыт автоматизации планирования шинного производства

С.Б. Артемьев, П.Е. Бородин (ЗАО «Хоневелл»), Е.В. Курьянова (ООО УК «Татнефть-Нефтехим»)

Рассмотрены основные подходы и результаты внедрения автоматизированной системы SOFTYRE компании Honeywell для оптимизационного планирования шинного производства. Изложены принципы работы данной системы и предложены методы ее оптимального использования.

Ключевые слова: MES, оперативное управление производством, оптимальное планирование, производство шин.

Рассматривается опыт использования современных математических методов и программных средств компании Honeywell для решения задач планирования шинного производства. Указанные методы и средства реализованы в автоматизированной системе оптимизационного планирования SOFTYRE, которая внедрена ЗАО «Хоневелл» на предприятии ОАО «Нижнекамскшина» группы компаний «Татнефть» и эксплуатируется с 2003 г [1,2]. В 2010–2013 гг. подобные системы внедрялись в шинной промышленности на предприятиях Michelin и Bridgestone бельгийской компанией OM Partners [3].

Для планирования производства шин в требуемом темпе и на требуемом уровне детальности необходимо решить две основные проблемы:

- сбор, обработка и структурирование большого объема разнородных и одновременно взаимосвязанных технико-коммерческих исходных данных, которые должны быть учтены в плане;
- организация взаимодействия большого числа специалистов на различных уровнях управления предприятием, вовлеченных в бизнес-процессы подготовки, принятия и реализации решений по плану производства, закупок и поставок.

Попытки их решения на основе программных и технических средств общего назначения (до внедрения системы SOFTYRE) оказались несостоятельны: с использованием MS Office/MS FoxPro в ОС MS Windows в локальной вычислительной сети предприятия при требуемом уровне детальности получается реализовать лишь цикл планирования на квартал. При этом точность исходных данных для планирования оказывается низкой, а стоимость владения системой планирования в целом — неприемлемо высокой (в основном из-за низкой устойчивости ПО по отношению к внесению необходимых изменений по вариантам плана).

В связи с этим требовалось разработать систему комплексной автоматизации планирования SOFTYRE. Задача была решена специалистами ЗАО «Хоневелл» на основе создания и внедрения двух основных компонент информационного, математического и программного обеспечения: математической модели оптимизационного планирования шинного производства и программных средств ее реализации; многопользовательской подсистемы сбора, контроля и диагностики исходных данных.

Обе эти компоненты могут быть эффективно использованы не только для поддержки бизнес-процес-

сов планирования производства, но и при решении других задач комплексной автоматизации оперативного управления производством.

Математическая модель планирования

Математически задача планирования заключается в нахождении (расчете) планов производства и поставок готовой продукции, а также размещения заказов на закупки сырья, материалов, комплектующих изделий и энергоносителей, при которых достигается максимум технико-экономического критерия оптимальности (маржинальной прибыли), рассчитанного по условно-переменным затратам — части затрат, зависящей от объемов производства, закупок и поставок. При этом должны учитываться ограничения, вытекающие из плановых заказов на реализацию произведенной продукции (в ассортименте), контрактов на закупку соответствующих ресурсов (сырья, материалов, комплектующих, энергоносителей), ограниченность технологических возможностей имеющегося оборудования, а также ограничения, вытекающие из принятой на предприятии стратегии создания и использования запасов.

Заказы на реализацию готовой продукции

Выручка S от реализации готовой продукции складывается в результате некоторого числа сделок продажи произведенной продукции одному или нескольким покупателям при различных условиях поставок. В качестве параметров по каждой запланированной сделке задается ее цена, минимальный и максимальный объемы и объект продажи, которым могут быть как простые готовые изделия (покрышки, камеры, ободные ленты и пр.), так и состоящие из них комплектные изделия (например автошины).

Допускается продажа любого изделия более чем одному покупателю, а также несколько вариантов поставок данного изделия одному и тому же покупателю, различающихся ценой и пределами объема поставок (например, крупные партии можно планировать к продаже по меньшей цене).

Обычно существует известная неопределенность в объемах поставок на выбранном горизонте планирования (ее величина и оценивается минимумом и максимумом). Однако по некоторым сделкам могут потребоваться строго определенные объемы. В этом случае минимум должен быть равен максимуму.

В дальнейшем в системе SOFTYRE учитываются ограничения, вытекающие из набора данных по продажам:

- объемы продаж по каждой сделке не меньше минимума и не больше максимума;
- объемы изготовленных на производстве изделий плюс убыль запасов готовой продукции на складах должны быть равны объемам продаж по каждой позиции ассортимента с учетом комплектности и взаимозаменяемости изделий в продаже.

Закупки сырья, материалов, комплектующих и энергоресурсов

Закупки P моделируются аналогично продажам: предусматривается возможность закупки каждого вида сырья, материалов, комплектующих и энергоресурсов у одного или нескольких поставщиков. В качестве исходных данных по каждому поставщику и виду ресурса должны быть заданы цена и минимальный и максимальный объемы закупки. При необходимости зафиксировать в плане объем закупок какого-либо ресурса у всех или некоторых поставщиков задается минимум равным максимуму.

Ограничения на план, вытекающие из набора данных по закупкам:

- объемы закупок по каждой сделке не меньше минимума и не больше максимума;
- объемы закупок плюс убыль запасов каждого вида сырья и материалов должны соответствовать плановым потребностям производства, определенным по нормам расхода сырья на единицу объема выпуска готовых изделий;
- объемы закупок энергоносителей должны соответствовать плановым потребностям производства, определенным по нормам затрат всех видов энергоресурсов (электроэнергия, пар, газ технологический) на единицу объема выпуска готовых изделий.

Технологические возможности оборудования

В математической модели рассматриваются два последовательных технологических передела производства шин: производство полуфабрикатов (резиновых смесей, обрешиненных кордов и т. п.) из покупных материалов и производство готовых изделий (покрышек, камер, ободных лент и т. п.) из полуфабрикатов и возможно покупного сырья и комплектующих. Соответственно к первому переделу относятся технологические операции приготовления резиновых смесей и обрешинивания и раскроя всех видов корда, а ко второму — изготовление и вулканизация камер, сборка (в одну или две стадии) и вулканизация покрышек.

При необходимости пользователь имеет возможность вводить любые другие технологические операции, если для них необходимо учитывать ограничения по производительности оборудования. Таким образом, система поддерживает логическое описание технологии производства, разделенного на два передела, не ограничивая назначение и распределение технологических операций между переделами. В период эксплуатации системы сотрудники технических служб завода самостоятельно могут вводить и/или изымать те или иные технологических операции или стадии производства.

Исходным для описания ограничений по технологическим возможностям производства является перечень оборудования (резиносмесителей, протекторных агрегатов, сборочных станков, вулканизаторов и др.), которое может использоваться для производства изделий и полуфабрикатов. Технологические возможности каждого вида оборудования при этом характеризуются плановым фондом рабочего времени (в машиночасах, с учетом числа единиц установленного оборудования каждого типа, за вычетом времени технического обслуживания и исполнения графика планово-предупредительных работ (ППР)).

Предусмотрено, что многие виды изделий и/или полуфабрикатов в шинном производстве могут выпускаться несколькими технологически возможными способами. Для выбора наилучшего способа производства из числа возможных, все такие способы должны быть отдельно представлены как компоненты производственной программы. В этом случае для каждого способа производства изделий/полуфабрикатов должны быть указаны перечень и производительность оборудования (технологическая карта), используемого при производстве.

Ограничения по технологическим возможностям производства заключаются в том, что общие затраты рабочего времени каждого вида оборудования не должны быть больше планового фонда рабочего времени каждого вида оборудования. Пусть, например, производственная программа X_1, \dots, X_i, \dots , где X_i — выпуск изделий по всевозможным вариантам. Тогда общая загрузка (время работы) оборудования некоторого вида, пропорциональна тем объемам производства X_1, \dots, X_i, \dots , технология изготовления которых предусматривает использование этого оборудования. И это суммарное рабочее время, составляющее сумму по всем компонентам производственной программы, при производстве которых используется данный вид оборудования, не должно быть больше фонда рабочего времени каждого вида оборудования.

Ограничения по рабочему времени оборудования в производстве полуфабрикатов также могут быть учтены в плане. Для этого используются нормы расхода полуфабрикатов на единицу объема выпуска готовых изделий, позволяющие привести производственную программу по готовым изделиям к производственной программе по выпуску полуфабрикатов и представить ограничения рабочего времени оборудования в производстве полуфабрикатов аналогично предыдущему.

Относительно логической структуры данных, представляющих производство полуфабрикатов и готовых изделий, в системе принято следующее соглашение. Предполагается, что:

- для каждого готового изделия должна быть указана хотя бы одна технология изготовления;
- объем производства полуфабрикатов, для которых не указана ни одна технология изготовления, ограничивается только материальными ресурсами, но не производительностью оборудования.

Иначе говоря, отсутствие заданных вариантов технологии изготовления изделий и полуфабрикатов трактуется различно: для готового изделия это означает невозможность его изготовления, а для полуфабриката — лишь отсутствие ограничений по производительности оборудования при его производстве.

Сдельная оплата труда

Для каждого изделия могут быть указаны ставки сдельной оплаты труда (в руб./ед. изделий), дифференцированные по стадиям его производства. Общие затраты на оплату L определяются как сумма произведений ставок на объемы производства изделий или дифференцированно на объемы выпуска по вариантам изготовления.

Многопериодное планирование. Математическое описание процессов создания и использования запасов

Переход к многопериодному (МП) планированию [4] позволяет учесть при оптимизации факторы неравномерности, всегда присутствующие в условиях реального производства:

- месячные/сезонные колебания спроса на готовую продукцию и возможностей закупки компонент сырья при квартальном/годовом горизонте планирования;
- график ППР, изменение производительности и/или норм затрат на период пуска/останова технологического оборудования;
- ввод нового и/или вывод из эксплуатации существующего оборудования.

Задача МП-планирования ставится как задача линейного программирования (ЛП): горизонт планирования в целом делится на несколько (не обязательно одинаковых) периодов времени, а в качестве критерия оптимальности используется маргинальная прибыль на горизонте планирования в целом, то есть сумма маргинальных прибылей для всех периодов. При этом для каждого периода могут быть заданы (по выбору пользователя) индивидуальные исходные данные относительно:

- технологических возможностей производства (нормы затрат сырья и полуфабрикатов, производительность оборудования, имеющаяся технологическая оснастка);
- условий реализации произведенной продукции с учетом колебаний спроса и закупки необходимых в производстве ресурсов (сырья, материалов, комплектующих, энергоносителей);
- стоимости Z создания и хранения переходящих (с периода на период) запасов сырья, полуфабрикатов, готовой продукции, зависящей от продолжительности периодов и величины остатков.

Последние являются новыми независимыми переменными, которые должны быть определены в результате решения — т.е. глобальной оптимизации по всем периодам МП-модели. Тем самым МП-план позволяет также получить исходные данные для формирования стратегии управления запасами, в частности — использования имеющихся и/или аренды дополнительных складских помещений.

¹ В качестве программной среды для решения задач оптимизации в описываемом подходе используется система оптимизационного планирования RPMS разработки компании Honeywell.

Методы и результаты решения задачи

Критерий оптимальности — маргинальная прибыль r :

$$r = S - P - L - Z \rightarrow \max, \quad (1)$$

то есть разность плановой выручки от реализации произведенной продукции S , затрат на необходимые для производства закупки сырья, материалов, комплектующих изделий и энергоносителей P , затрат на сдельную оплату труда L и затрат, связанных с созданием и хранением запасов Z . Критерий (1) является линейной функцией переменных задачи — объемов закупок сырья, производства изделий и продаж соответствующих товарных позиций. Ограничения, представляющие технологические возможности производства, также представляют собой систему линейных уравнений и неравенств относительно тех же переменных.

Таким образом, математически задача оптимального планирования шинного производства сводится к достаточно сложной задаче ЛП большой размерности (несколько тысяч переменных), в результате решения которой определяются оптимальные объемы: закупок сырья, материалов, комплектующих изделий, энергоносителей у каждого поставщика; поставок всех видов готовых изделий каждому из покупателей; производства каждого готового изделия и полуфабриката по всем заданным технологически допустимым способам производства, а также двойственные оценки — коэффициенты, выражающие влияние лимитирующих оптимальное решение ограничений любого типа на прибыль.

Реализация модели оптимизационного планирования

Подход к автоматизации процедур ведения исходных данных, актуализации модели планирования, получения решения и его анализа, использованный в системе SOFTYRE основан на технологии RSAND и включает следующий набор основных элементов (рисунок):

- специализированную БД для описания содержательной части задачи (модели) на языке предметной области (включая справочники, варианты исходных данных и результаты решений);
- интерфейс к БД — формы для заполнения справочников, ввода исходных данных, экспресс-анализа полученного решения;
- генератор оптимизационной модели в формате системы RPMS;
- процессоры и решатель системы RPMS¹;
- генератор стандартных отчетов по результатам решения и протокола прогона;
- средства экспорта/импорта, копирования, восстановления и архивирования проектов.

Использование реализованной в системе математической модели в процессе планирования можно представить в виде следующей последовательности шагов:

1. *Ввод текущих данных.* Текущие данные непосредственно вводятся через интерфейс пользователем и/или импортируются из других информационных систем и/или АРМ. В результате определяется проект плана, отражающий некоторый технико-экономический сценарий развития ситуации на горизонте планирования, включая, например, задания по производству новых изделий и/или возможность использования новых технологий для производства отработанных изделий, а также набор вариантов развития ситуации на рынках готовой продукции и покупных ресурсов.

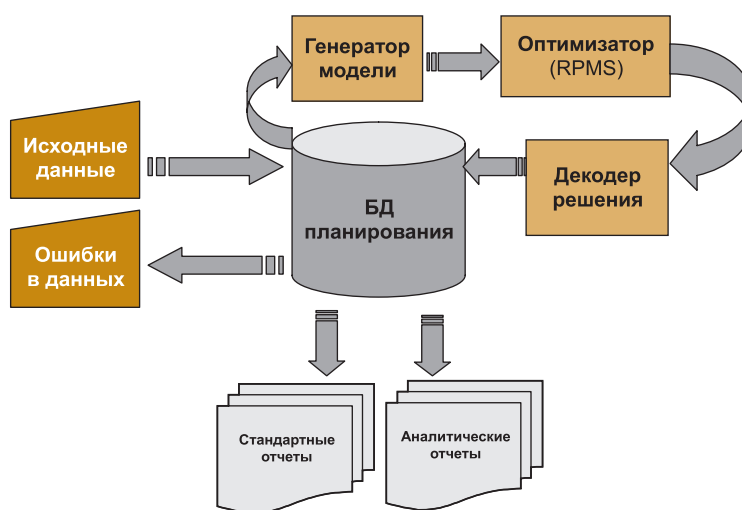
2. *Контроль исходных данных.* Собранные данные автоматически проверяются системой на полноту и непротиворечивость. Обнаруженные ошибки ранжируются на критичные — проект варианта плана не может быть рассчитан; не критичные/информационные — введены излишние данные, которые не будут использоваться в расчете варианта плана. По электронной почте пользователям, ответственным за ввод данных, отсылаются сообщения с перечнем всех обнаруженных ошибок и запросом о внесении изменений в исходные данные (для критичных ошибок) или о возможности провести расчеты по варианту плана (для не критичных ошибок).

3. *Расчет варианта плана.* Запускается генератор оптимизационной модели по варианту плана. Формируется модель, осуществляется поиск решения, которое записывается в БД, подготавливается протокол.

4. *Анализ корректности полученного решения.* По результатам решения формируются стандартные отчеты, имеющие адаптированную структуру и включающие всю необходимую информацию по результатам решения для его анализа. Пользователь использует стандартные отчеты и представление средствами интерфейса для оценки качества решения, опираясь на вычисленные двойственные оценки, указывающие на пределы роста технико-экономической эффективности по каждому варианту (стоимость стратегии). Если решение признается некорректным, то вводятся изменения в исходные данные и процедура повторяется с п. 1, иначе переходят к подготовке аналитических отчетов.

5. *Подготовка аналитических отчетов* и передача их управленческому аппарату предприятия. Если решение требует корректировки, и тем самым определены дополнительные требования к исходным данным, то в них вводятся необходимые изменения и процедура повторяется с п. 1, иначе переходят к реализации решения.

6. *Реализация решения:* результаты расчетов утверждаются в качестве плана, после чего управленческий аппарат осуществляет управление предпри-



Реализация модели оптимизационного планирования

ятием на основе решения, полученного с помощью модели.

Автоматизация сбора и диагностики исходных данных

Исходные данные для подготовки плана имеют большой объем, сложную внутреннюю структуру. Они готовятся большим числом специалистов различных служб управления предприятия. Причем эти данные должны быть согласованы как со справочниками БД, так и друг с другом. Поэтому возникает необходимость автоматизировать и контролировать процессы сбора, перекрестной проверки и диагностики комплекта исходных данных по вариантам плана. Для этого в состав системы включено ПО ESCORT², обеспечивающее организацию и последующее управление процессом подготовки данных.

Управляемой единицей при подготовке данных является проект сбора данных по варианту плана (далее — проект), который представляет собой набор данных, пополняемый пользователями системы по мере подготовки данных к проведению расчетов. Проект создается супервизором — пользователем, ответственным за результаты расчета, и в дальнейшем существует в системе до того момента, пока не пройдет все этапы диагностики данных и преобразуется в вариант расчета плана или будет удален супервизором из системы. В один и тот же момент времени в системе может быть несколько проектов, находящихся в разной степени готовности к расчетам.

Проект имеет обязательные атрибуты статуса, параметров планового периода (начало, продолжительность и число периодов МП-плана), описание (примечание) и может иметь другие (необязательные) атрибуты, указываемые при создании супервизором.

В момент создания проекта ESCORT оповещает пользователей системы по электронной почте о появлении нового проекта — о необходимости приступить к подготовке данных, и затем отражает текущее со-

² Для решения задач автоматизации контроля исходных данных и организации совместной работы пользователей в системе используется решение ESCORT разработки компании Honeywell.

стояние соответствующего комплекта исходных данных в отношении степени готовности к проведению расчетов.

В дальнейшем пользователи (подразделения) с использованием АРМ имеют возможность создавать в системе *документы исходных данных*. В процессе создания документы подвергаются перекрестным проверкам по правилам, заданным в конфигурационном файле ESCORT. О результатах проверок авторы документов извещаются по электронной почте.

Данные документов могут импортироваться в АРМ из *файлов исходных данных* или автоматически в систему из смежных систем подготовки нормативных данных. Каждый тип документа может иметь несколько различных форматов представления данных в файлах (например, MS Excel или XML). При импорте оператор АРМ выбирает формат исходных данных (из числа сконфигурированных) и указывает параметры периода (начало периода и длительность в месяцах), к которому относятся данные.

Использование подсистемы ESCORT позволило резко снизить трудоемкость и повысить скорость и эффективность процессов подготовки данных за счет «распределения» отдельных его функций между многими компетентными в своей области специалистами.

Поэтому автоматизация процессов сбора и диагностики данных на базе ПО ESCORT может быть полезной не только для шинного комплекса, но и в других системах, особенно, когда данные имеют сложную структуру, готовятся в различных службах и должны подвергаться перекрестной проверке. В качестве примера можно указать на подготовку данных планирования в вертикально-интегрированных нефтяных компаниях, где данный процесс выполняется во многих случаях по регламенту вручную с использованием MS Excel и Outlook.

Выводы

1. Применение модельного подхода к описанию шинного комплекса позволяет обеспечить необходимую технологическую прозрачность производства и возможность получения оперативной оценки влияния технико-экономических показателей и ре-

шений на эффективность работы всего комплекса. Это, в частности, позволяет использовать систему SOFTYRE и как инструмент эффективного согласования (иногда противоречивых) интересов всех предприятий шинного комплекса при подготовке текущих и стратегических планов.

2. Система оптимизационного планирования является также инструментом объективного анализа технико-экономической эффективности проектов по модернизации производства, закупок сырья и поставок продукции (инвестиционное планирование). Расчеты в SOFTYRE позволяют получить объективные оценки влияния узких мест на производстве, в закупках и поставках на прибыль шинного комплекса и являются основой при подготовке бизнес-планов реконструкции.

3. Использование системы позволяет получить целый ряд преимуществ за счет автоматизации построения модели планирования и интеграции системы SOFTYRE в существующую программную и организационную среду шинного комплекса. Очевидно, что без автоматизации использовать все необходимые данные при планировании было бы невозможно. В результате создания и внедрения системы SOFTYRE стал возможен переход от квартального планирования к планированию на месяц и даже декаду, что является исключительно важным при меняющейся рыночной конъюнктуре.

Список литературы

1. *Бородин П.Е.* Оптимальное планирование массового производства // Труды XLV научной конференции МФТИ. Т.3. 2002. С. 44.
2. *Артемьев С.Б., Хохлов А.С., Зельдин А.Е. и др.* Автоматизированная система оптимизационного планирования шинного производства // Промышленные АСУ и контроллеры. №10. 2003. С. 27-32.
3. Bridgestone Europe will plan and schedule its production with OMP Plus // ompartners.com/en/news-events/items/2011/Bridgestone-Europe-will-plan-and-schedule-its-production-with-OMP-Plus. 2011.
4. *Бородин П.Е.* Многопериодное оптимальное планирование массовых производств дискретного типа // 20 Международная научная конференция "Математические методы в технике и технологиях" (ММТТ-20). 2007: Сборник трудов. Т.8. С. 233-234.

Артемьев Сергей Борисович — канд. техн. наук, старший консультант,
Бородин Павел Евгеньевич — руководитель группы систем оперативного управления производством
 департамента высокотехнологичных решений и консалтинга ЗАО «Хоневелл»,
Курьянова Елена Владимировна — зам. начальника отдела экономических расчетов и прогнозирования
 ООО УК «Татнефть-Нефтехим».

Контактный телефон (495) 796-98-00.
 E-mail: Sergey.Artemiev@Honeywell.com Pavel.Borodin@Honeywell.com

Оформить подписку на журнал "Автоматизация в промышленности" вы можете:
 через каталоги "Роспечать" 81874 и "Пресса России" 39206 • сайт журнала <http://www.avtprom.ru> • Редакцию
 Адрес редакции: 117997, Москва, ул. Профсоюзная, д. 65, офис 360 Тел.: (495) 334-91-30, (926)212-60-97 E-mail: info@avtprom.ru