

## Комплексный подход к планированию непрерывного производства

А.С. Хохлов, А.И. Коннов, Р.А. Шайдуллин (ЗАО «Хоневелл»)

*Рассматриваются задачи планирования непрерывного производства, методы их решения с использованием оптимизационных и имитационных моделей, а также интеграция систем планирования для эффективного решения комплекса задач. Формулируются принципы разработки и модификации моделей, входящих в комплекс планирования.*

*Ключевые слова: APS/MES, оперативное и календарное планирование, расписание, управление производством, интеграция систем планирования, непрерывно-дискретное производство, нефтепереработка.*

### Введение

Автоматизация производственного учета класса MES позволяет перейти к созданию эффективно функционирующих систем планирования APS (Advanced Planning and Scheduling) в виде комплекса взаимосвязанных систем/моделей для расчета планов от текущих до календарных, текущие планы с горизонтом год/квартал/месяц [1–3]; оперативно-календарные планы на месяц по неделям/суткам [5–8]; составление расписаний по сменам и внутри смен по часам [8].

Ключевая проблема в этом случае заключается в необходимости создания эффективных средств интеграции различных систем/моделей планирования между собой и с источниками/потребителями данных для актуализации моделей и представления результатов. Перемены вовне и внутри предприятия влияют на производство и должны оперативно отражаться в моделях комплекса. Опыт показывает, что без наличия средств генерации моделей и их интеграции отразить изменения в моделях в требуемые сроки нереально, и применение моделей малоэффективно, а результаты моделирования просто игнорируются на предприятии после «внедрения» систем.

Рассмотрим комплексный подход к планированию, структуру комплекса и сформулируем ряд взаимосвязанных принципов, которыми должны руководствоваться разработчики/пользователи при создании и модификациях моделей, входящих в комплекс планирования.

### Задача текущего планирования

Задача текущего планирования непрерывного производства состоит в получении плана с учетом данных о структуре производства, ресурсах и качестве сырья, мощности основных и вспомогательных установок, материальных балансов, технологических ограничений, количественных и качественных показателей потоков, рецептур смесений и спецификации готовых продук-

тов, потребности рынка и т. д. Эти данные имеют разную степень достоверности, как правило, утверждаются экспертно как сценарные условия для выбранного горизонта планирования.

Модели текущего планирования производства НПЗ — это ЛП-модели с разным уровнем агрегирования и выбранным способом актуализации [1,2]. ЛП-модели этого класса нелинейные, и решение (план на месяц, квартал, год) находят с применением алгоритмов последовательного линейного программирования. Применение систем типа RPMS R510<sup>1</sup> для автоматизации планирования работы НПЗ, например, с мощностью 17 млн. т. по первичной переработке нефти позволяет получить дополнительный операционный доход более 27 млн. долл. США в год [3]. Дополнительный доход от реализации плана заключается в эффективном использовании качества перерабатываемой нефти и возможностей технологических установок при получении требуемого ассортимента товарных нефтепродуктов согласно принятым сценарным условиям. Нарушение сценарных условий в ходе выполнения плана на месяц требует их уточнения по фактическим данным, последующей актуализации ЛП-модели и оперативной корректировки плана. Подобная практика распространена повсеместно.

### Задача оперативного планирования

Задача оперативного планирования производства при горизонте в 1 мес. формулируется как нахождение плана на ближайший период (например, с момента пересчета на 7...10 дней) и до конца месяца. В частности, на основе текущей RPMS-модели и ряда исходных данных в автоматизированном режиме генерируется обновленная RPMS-модель для варианта корректировки текущего плана. В качестве исходных данных используются:

1) утвержденный или ранее скорректированный текущий план;

<sup>1</sup> Новейшая версия системы текущего оптимизационного планирования разработки корпорации Honeywell.

2) фактические данные (выделено серым цветом на рис. 1):

- при расчете до начала планового периода: фактические балансы установок и рецепты смешения продуктов на основе «исторических» данных, ожидаемые запасы нефтепродуктов на начало планового периода (в случае их учета);

- при расчете внутри планового периода: фактическое выполнение плана производства с начала месяца в виде факта работы НПЗ, загрузка установок, режим работы в виде коэффициентов отбора, рецепты смешения продуктов, потоки между установками, остатки нефтепродуктов;

3) график регламентного обслуживания установок на плановый период;

4) график поставки сырья и отгрузки продуктов на ближайший период.

Текущий план производства, как правило, многопериодный, и обновленная RPMS-модель для оперативного планирования должна поддерживать многопериодность, что позволит отразить следующие аспекты работы производства: отключение установок или изменение их режимов; выпуск конкретного продукта в определенный период; накопление компонентов и полуфабрикатов [2].

Критерием оптимизации для получения варианта корректировки плана в обновленной RPMS-модели является минимизация отклонения от показателей выпуска готовой продукции из утвержденного текущего плана. При существенном нарушении принятых сценарных условий именно обновленная RPMS-модель используется для коррекции ранее утвержденного плана.

План на ближайший период рассчитывается с учетом фактических данных с производства (пп. 2–4 выше), что позволяет перейти к последующей его детализации в виде календарного плана и производственного расписания.

#### Задача календарного планирования

Задача календарного планирования (КП) на горизонте месяц или менее представляет собой последующую детализацию текущего или оперативного плана по суткам или сменам на ближайший период, а при необходимости и до конца месяца.

Детализация плана в моделях КП предполагает существенно более низкую степень их агрегирования, чем в моделях текущего и оперативного планирования. В моделях КП требуется учитывать данные о структуре производства в части технологии и резервуарных парках, переключение режимов работы установок и движение потоков, фактиче-

ские остатки сырья и продуктов в конкретных резервуарах, выполнение плана поставки сырья и отгрузки готовой продукции и т. д.

Календарный план по суткам суммарно (аддитивно) должен приближаться к текущему и оперативному плану производства (ситуация план-план) и факту (ситуация план-факт) при незначительном отличии плана от факта, иначе — только к факту. В последнем случае потребуются определить момент пересчета, например, текущего или оперативного плана производства, что фактически происходит несколько раз в месяц как реакция на существенные изменения сценарных условий.

Модель планирования, решение которой сильно отличается от фактической работы производства, не представляется адекватной, однако расчет модели не может полностью совпадать с фактической работой. Таким образом, необходимо определить степень асинхронности — допустимого различия плана от факта. То есть необходимо иметь средство анализа и регламент планирования, что позволит проводить план-факт анализ и определять указанную степень различия.

Подзадачей КП является оценка времени, необходимого для компенсации возникших изменений в графике работы установок, поступления сырья, и отгрузки продукции и выхода на ритмичный режим работы предприятия.

Данные, необходимые для актуализации моделей, обновляются с разной периодичностью. К ним относятся данные ручного ввода, результаты решения специализированных моделей, результаты обработки в системах класса MES/ERP, данные производственного учета (БД РВ). Так, расчет модели согласования балансов [4] и данные ЛИМС используются для получения факта по объему и качеству потоков, а системы SAP/IC — для введения поставок сырья и заявок на отгрузку (рис. 2).

Имеется два основных модельных подхода к решению задачи КП: *оптимизационный* и *имитационный*.

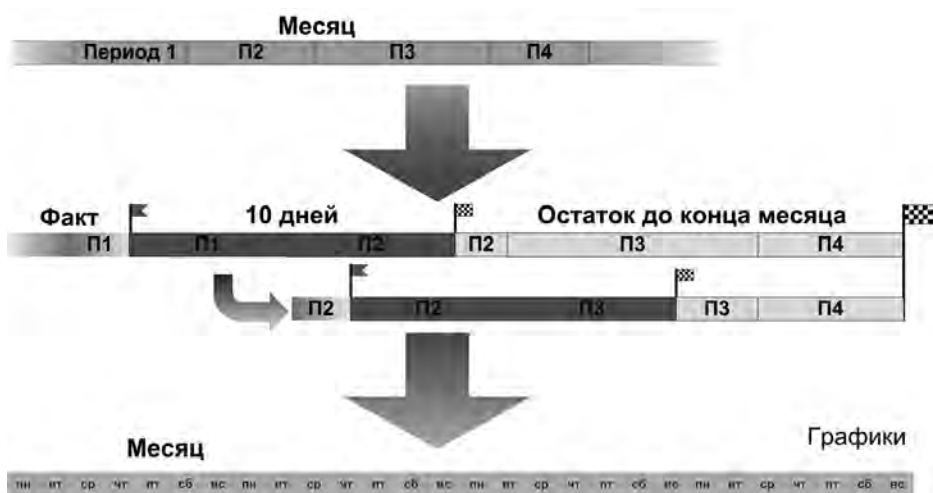


Рис. 1. Построение календарного плана

*Оптимизационный подход* [5–7] обладает тем достоинством, что решение зависит только от исходных данных и критерием оптимизации, помимо минимизации отклонения от плана, в таких моделях является минимизация числа переключений режимов и потоков.

По своему назначению модели КП должны указывать значения времени начала и окончания технологических операций, начало и окончание движения потоков между узлами производства и хранения. Поэтому временные параметры также являются ограничением, а в некоторых случаях критерием оптимизации (например, время работы определенного режима).

Сложность оптимизационной модели затрудняет ее применение на объекте внедрения, что требует ее упрощения, например, исключение части ограничений из модели. Так, календарный план строится без учета качества потоков из предположения, что качество потоков соответствует плановым на ближайший период.

Другим способом упрощения является решение задачи в несколько этапов: на одном этапе учитываются объемные показатели и ограничения на качество потоков, а на другом — объемные показатели пересчитываются с учетом требований к переключениям. Модель без качества является чисто логистической и решается методами целочисленного программирования.

Для среднего НПЗ оптимизационная модель КП при расчете плана на 31 день можно разбить на две части:

- производственный блок — матрица ограничений задачи ЛП имеет 220 тыс. ненулевых элементов (80 тыс. ограничений и 50 тыс. переменных), из них 3 тыс. являются целочисленными;
- товарный парк с 50 резервуарами и 7 эстакадами налива, матрица ограничений задачи ЛП имеет 140 тыс. ненулевых элементов (50 тыс. ограничений и 35 тыс. переменных), из них 5 тыс. являются целочисленными.

В имитационном подходе [8] имеется возможность вводить в модель любые допустимые управляющие воздействия, а также настраивать режимы работы установок и правила переключения режимов работы. В этом случае после каждого изменения управляющих воздействий модель пересчитывает календарный план и имитирует его исполнение, указывая на нарушения технологических ограничений, если такие имеются.

Имитационная модель производства определяется совокупностью взаимодействующих функциональных зависимостей переменных и параметров. Переменными имитационной модели обычно являются ежедневно принимаемые решения, а с помощью параметров задаются ограничения задачи КП. Искомым состоянием системы при имитационном подходе к задаче КП является такой набор значений переменных, который в каждый момент времени не нарушает заданные ограничения модели. При этом для решения задачи КП достаточно найти допустимое состояние системы, то есть первое не нарушающее ограничения.

*Не старайся идти в ногу со временем,  
от времени никогда не денешься. Все  
мы — что бы ни сотворили — поневоле  
современны.*  
Сальвадор Дали

Производство в такой имитационной модели описывается аналогично балансовой модели предприятия — в виде тегов, которые соответствуют параметрам работы установок или параметрам потоков между установками, и функциональных зависимостей между ними. Теги могут быть сгруппированы в соответствии с группировками показателей установок или потоков.

Отличительной особенностью и преимуществом использования имитационного подхода к задаче КП является возможность относительного простого ручного исправления найденного решения и возможность прогноза развития ситуации по старому решению на основе новых фактических сбалансированных данных. Последняя особенность требует на постоянной основе осуществлять актуализацию имитационных моделей сбалансированными фактическими данными для автоматизированного план-факт анализа.

К недостаткам имитационного подхода относится то, что построение модели календарной работы предприятия является достаточно сложным, и введение всех управляющих воздействий (а их может быть до нескольких сотен) в каждый период (день, смена) ложится на плечи пользователя модели.

Способом сокращения объема работ является разделение ответственности за ввод параметров управления между несколькими пользователями, эвристические алгоритмы поиска решения, а также использование планов, подготовленных предварительно.

Для среднего НПЗ имитационную модель КП при расчете плана на 31 день по часам разобьем на две части:

- производственный блок составляет до 3000 тегов, 700 из которых — управляющие;
- товарный парк с 50 резервуарами и 7 эстакадами налива при расчете плана на 31 день содержит до 2000 тегов, из которых около 500 — управляющие.

Выделение в задаче КП отдельных моделей производственной части и части, отвечающей за хранение и отгрузку готовой продукции, обусловлено тем, что модель текущего планирования, например, в нефтепереработке, определяет решение для производственной части, не затрагивая логистику потоков и запасы хранения материалов, а тем более ограничения на отгрузку продуктов. Это разбиение позволяет упростить решение как для оптимизационных, так и для имитационных моделей.

При таком разделении представляется возможным следующее совместное использование моделей оптимизационного и имитационного характера. Производственная часть охватывается оптимизационной



моделью КП с горизонтом, равным горизонту модели текущего или оперативного планирования, и с периодом планирования по суткам/сменам. Имитационная модель охватывает хранение и отгрузку продукции. При необходимости оптимизационный подход может быть применен для логистики в части хранения и отгрузки продукции, например, для построения расписания на 2...3 сут. с периодом в 2...4 ч.

Комбинирование этих двух подходов определяет требуемый уровень агрегирования, учитывающий необходимые ограничения и параметры производства. Исходя из выбранного уровня агрегирования, необходимо определить взаимодействие моделей комплекса планирования и соответствующий способ их актуализации. Решение, полученное в оптимизационной модели, может быть использовано как исходный план в модели имитационного КП для ручной корректировки и отслеживания выполнения плана.

Актуализация моделей КП из-за дефицита времени возможна в оперативном режиме только автоматизированными средствами. Ключевая проблема состоит в обеспечении автоматизированного режима взаимодействия между моделями и с системами производственного учета как источниками данных. Эта проблема решается применением конверторов данных для обмена данными между моделями и специализированных шин.

#### Средства интеграции

Для успешной интеграции отдельных систем комплекса необходимо преобразовать модели отдельных систем к общему формату описания моделей. В качестве такого формата используется структурная потоковая модель производства. Такая возможность необходима для эффективного обмена данными между отдельными моделями комплекса планирования, как правило, имеющими следующие характеристики:

- отдельные модели могут описывать различные части производственного процесса;
- различные модели имеют на входе данные в различных форматах, с разными интервалами планирования, описывают процесс с разным уровнем детализации; при этом нельзя выделить более/менее детальную модель;
- данные могут быть не полны, противоречить друг другу, содержать только часть всего набора данных и иметь разный уровень детализации во времени.

Благодаря использованию единого формата описания моделей имеется возможность сформировать единую глобальную модель предприятия на основе отдельных моделей комплекса и обеспечить взаимодействие с информационным окружением предприятия.

Взаимодействие с информационным окружением предприятия должно [9]:

- обеспечить обмен данными с другими системами, серверами или пользователями, обращаться к Web-сервисам/процедурам БД, заполнять таблицы БД, приостанавливать обработку данных до получения ответа и проверять ответ на корректность;
- формировать файлы для других систем;
- уведомлять пользователей о происходящей работе и возникающих ошибках по электронной почте.

Центральное место средств интеграции в общей структуре на рис. 2 определяет степень их важности в создании и работе комплекса планирования. Именно эффективные средства интеграции позволят перейти к автоматизированной работе всего комплекса планирования и внедрить его на объекте.

#### Взаимосвязь моделей и планов в комплексе планирования

Из опыта внедрения следует, что при построении моделей комплекса и каждой модели в отдельности, а также при внедрении на предприятии целесообразно руководствоваться рядом взаимосвязанных принципов, которые сводятся к ответам на пять ключевых вопросов:

1. Принцип *агрегирования*. Какой уровень агрегирования принять, чтобы учесть необходимые ограничения и определить модель, позволяющую решать поставленную задачу?

2. Принцип *актуализации*. Как актуализировать модель для выбранного уровня агрегирования: настраивать на текущую производственную ситуацию и наполнять плановыми/фактическими данными?

3. Принцип *адаптации*. Как адаптировать пользователей к выбранному уровню агрегирования модели и способу ее актуализации: гарантированно обеспечить выполнение регламента планирования, когда пользователь осмысленно и в требуемые сроки настроит модель, рассчитает план и интерпретирует его для последующего использования в управлении?



Рис. 2. Комплекс планирования

4. Принцип *аддитивности*. Как обеспечить аддитивность планов для вложенных временных интервалов: соотнести модели между собой и выстроить эффективное их взаимодействие?

5. Принцип *асинхронности*. Какая степень асинхронности допустима между планом и фактом: насколько результаты решения моделей могут отличаться от реальности?

Отметим, что первые три принципа применены для отдельной модели и описаны в [1]. Два последних принципа необходимы для анализа моделей на предмет выполнения соотношений (план-план) и (план-факт).

Настоящая статья представляет собой проработку указанных взаимосвязанных принципов 5 А, которыми должны самостоятельно руководствоваться специалисты, начиная разработку и внедрение подобного комплексного решения. При этом принципиальным является вопрос, какой уровень агрегирования модели выбрать, чтобы пользователи в соответствии с требованиями регламента справились с актуализацией, соотнесли планы на условия аддитивности (например, год по месяцам, месяц по суткам) и отслеживали соотношение план-факт для проведения оперативной корректировки моделей.

#### Заключение

На многих предприятиях НПЗ/НХК с разной эффективностью эксплуатируются ЛП-модели текущего планирования в основном в системах типа RPMS [1–3]. Наличие функционирующего MES-окружения на предприятии позволяет перейти к внедрению представленного в статье комплекса планирования для расчета планов от текущих до календарных. Перечислим ключевые особенности внедрения.

1. Над проектом должны работать совместно специалисты исполнителя и заказчика. В команды должны войти специалисты, непосредственно работающие с ЛП-моделями и ИТ-окружением предприятия.

2. Проект длится  $\geq 15$  мес., где примерно 9 мес. уходит на уточнение функциональных требований и построение моделей, а остальные 6 мес. — на опытную эксплуатацию системы. В период опытной эксплуатации уточняются требования, проводится настройка ПО, корректировка моделей, средств интеграции и ИТ-окружения.

3. Процесс обучения специалистов заказчика проводится в несколько этапов: в начале проекта — для совместного осмысления функциональных требований; в ходе создания моделей; в начале опытной эксплуатации; после устранения замечаний; при отработке регламента работы с комплексом моделей.

4. Наиболее трудоемкая часть проекта состоит в корректировке и настройке средств интеграции моделей и ИТ-окружения, что может потребовать для

последнего расширения его функциональности и автоматизации.

5. В силу объективных причин задача КП для всего НПЗ существенно менее проработана, чем текущее планирование. Это требует детализации проекта регламента планирования и его корректировки/согласования/утверждения на стадии опытной эксплуатации с руководством ключевых служб и всего предприятия.

6. После запуска комплекса в эксплуатацию исполнителю необходимо предоставить заказчику следующие услуги по сопровождению: техническая поддержка ПО, консультации по настройке и модификации моделей, средств интеграции и отчетов, переподготовка специалистов.

Таким образом, проблемы внедрения заключаются далеко не в качестве ПО, а в наличии команды исполнителя, готовой решать поставленную задачу совместно со специалистами заказчика и, руководствуясь указанными принципами, последовательно доводить системы/модели комплекса планирования до эффективной эксплуатации на этапе опытной, а часто и промышленной эксплуатации.

#### Список литературы

1. Хохлов А.С., Коннов А.И., Зельдин А.Е. Системы оптимизационного планирования и опыт внедрения и эксплуатации их в ВИНК // Автоматизация в промышленности. 2009. №9. С.50-56.
2. Баулин Е.С., Боронин А.Б., Хохлов А.С. Скользящая детализация текущего плана НПЗ/НХК и актуализация оптимизационных моделей // Автоматизация в промышленности. 2012. №10. С. 8-14.
3. Кувыкин В.И. Организация автоматизированных систем планирования и материального баланса // Автоматизация в промышленности. 2014. №8. С.29-33.
4. Петухов М.Ю., Закиев А.Р., Бородин П.Е. и др. Автоматизация процесса согласования материального баланса на НПЗ — система Production Balance // Автоматизация в промышленности. 2014. №8. С.22-28.
5. Kelly J.D. Formulating Production Planning models // Chemical Engineering Progress. 2004. January. p. 43-50.
6. Zyngier D. and Kelly J.D. Multi-Product Inventory Logistics Modeling in the Process Industries. Optimization and Logistics Challenges in the Enterprise. 2009. USA: Springer. p.61-95.
7. Хоботов Е.Н. Модели планирования и управления работой систем по смешению масел // Автоматика и телемеханика. 2008. № 11. С. 187-189.
8. Шайдуллин Р.А., Хохлов А.С., Проказина М.В. Имитационные модели в комплексе календарного планирования производства НПЗ // Автоматизация в промышленности. 2012. №10. С. 15-21.
9. Вейбер В.В., Богдан С.А., Кудинов А.В., Марков Н.Г. Концепция построения платформы для интеграции производственных данных нефтегазодобывающей компании // Известия ТПУ. 2011. Т.318. №5. С. 126-131.

*Хохлов Александр Сергеевич — д-р техн. наук, руководитель отдела систем планирования и оперативного управления производством, Коннов Александр Иванович — канд. физ.-мат. наук, старший консультант, Шайдуллин Ренат Анварович — инженер ЗАО «Хоневелл».*  
 Контактный телефон (919) 102-67-42.  
 E-mail: renat.shaidullin@honeywell.com