

А. В. Речкалов, Д. Н. Дунаев, О. Р. Даутова

## РАЗВИТИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНОСТИ ОСНОВНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ ERP-СИСТЕМЫ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ СРЕДНЕСРОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПЛАНИРОВАНИЯ

В настоящей статье рассматриваются цели и задачи системы среднесрочного планирования производственных предприятий. Описывается функциональность основного планирования ERP-систем как инструмента решения задачи среднесрочного планирования. Приводятся ее возможности и недостатки. Рассматривается прототип математической модели, программная реализация которой позволит дополнить функциональность ERP-систем и получать оптимальные планы загрузки оборудования и закупки критических материалов. Вводятся обозначения. Формируется система ограничений, накладываемых на модель, а также приводится целевая функция. Дается алгоритм работы с моделью. Также, на примере самолетостроительного предприятия, производится апробация полученной модели средствами MS Excel. *S&OP; TOC; MPS; ERP; основное планирование; среднесрочное планирование; симплекс-метод; Элияху Голдратт; теория ограничений*

### ВВЕДЕНИЕ

Планирование производства и закупок является неотъемлемой частью деятельности машиностроительного предприятия. Большая номенклатура выпускаемой продукции, количество уровней входимости до 25 уровней, а также значительный объем номенклатуры входящих деталей, сборочных единиц, материалов определяют необходимость использования эффективных информационных технологий в процессе планирования.

Прежде чем формировать оперативные планы производства продукции, необходимо на укрупненном уровне определиться с основными параметрами в объемном выражении, что обеспечивается функцией среднесрочного планирования. При формировании плана на данном уровне разрабатываются среднесрочные планы производства продукции с горизонтом планирования, как правило, от 6 до 24 месяцев – в зависимости от производственного и закупочного циклов, степени детерминированности спроса и возможностей формирования прогноза спроса.

Среднесрочное планирование является необходимой составной частью управления производством, так как оно обеспечивает расчет потребных критических мощностей и материальных ресурсов и согласование их обеспеченности с планом продаж.

При этом объектами планирования на среднесрочном уровне могут быть и товарно-номенклатурные группы, и конкретные модели и типоразмеры готовой продукции. Выбор объекта планирования определяется спецификой

работы предприятия: его размером, политикой предприятия в области стратегии производства продуктов («производство на склад», «сборка на заказ», «производство на заказ»).

В то же время плановые расчеты при большом объеме данных могут занимать значительное время. А учитывая, что в реальной жизни зачастую одного сценария расчета плана недостаточно, расчеты производятся по нескольким сценариям, из которых выбирается наилучший, что, в свою очередь, существенно влияет на время расчета.

Многие оборонные и машиностроительные предприятия используют в своей деятельности ERP-системы. Но стандартная функциональность планирования, присутствующая в системах данного класса, не имеет механизма оптимизации проведения расчетов, а закупка специализированного оптимизационного программного обеспечения может быть нецелесообразна в силу его высокой стоимости.

В настоящей статье рассматривается возможность создания и использования специализированного программного модуля для оптимизации плановых расчетов в рамках стандартной функциональности ERP-системы, приводится математическая модель, программная реализация которой позволит сэкономить на покупке дорогостоящего специализированного ПО и получить адекватные планы закупки материалов и загрузки оборудования.

В качестве математической модели выступает система неравенств, которая описывает ограничения, возникающие в реальной производственной среде, такие как, например доступные машино-часы, опережения на поставку.

В модели описывается и целевая функция, которая в ходе оптимизации принимает максимально или минимально возможное значение. Оптимизация такого рода моделей относится к классу задач линейного программирования. В качестве подхода к решению используется симплекс-метод [1]. Этот метод широко известен и легко программируем.

В настоящей статье основное внимание уделяется построению математической модели, а апробация модели проводится средствами MS Excel. Методика СППиП может быть реализована с помощью присутствующей в ERP-системах функциональности основного планирования и не требует покупки дополнительных программных комплексов.

### ФУНКЦИОНАЛЬНОСТЬ «ОСНОВНОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ»

Объемно-календарный план (MPS) – результат процесса объемно-календарного планирования, целью которого является принятие решения о целесообразной программе деятельности компании на определенный период. Как результат, возникает план, регулирующий производство и закупку изделий, подчиняющихся данному методу планирования [2].

Производственный план, также называемый мастер-планом, опирается, прежде всего, на прогноз спроса, основанный на:

- исторических данных;
- полученных от клиентов заказах;
- анализе рыночной ситуации.

Стоит отметить, что очень часто подтвержденные заказы в общем объеме спроса не достигают 100 % даже на относительно короткий горизонт планирования.

Мастер-план составляется обычно по укрупненным классификаторам продукции и на достаточно длительный срок от 12 до 24 месяцев (называемый горизонтом планирования) с разбивкой по квартальным или месячным периодам, называемыми периодами планирования, в зависимости от динамики деятельности предприятия и сложности изготавливаемой продукции [3].

Данный подход реализуется в модуле планирования ERP-систем функциональностью «основное планирование».

Основное планирование – инструмент планирования критических мощностей и материалов в условиях неопределенной номенклатуры продаж.

При работе с данным инструментарием предполагается выделение из общей массы номенклатуры материалов с длительными циклами поставок, а также выделение ресурсов, являющихся «узкими» местами, и проведения расчетов планов только по ним. Данный прием позволяет ускорить расчет и обеспечить возможность многовариантного планирования.

Задача основного планирования состоит в том, чтобы своевременно определить потребность в критических материалах, оборудовании и найме сотрудников.

Возможности функциональности основного планирования:

- прогнозирование;
- планирование в разрезе номенклатурных семейств;
- планирование критических материалов;
- планирование критических мощностей;
- выравнивание загрузки;
- горизонтальное представление плана;
- интерактивная обработка результата планирования;
- планирование резервного запаса.

Функциональность основного планирования включает в себя механизм согласования загрузки мощностей и доступности ресурсов с планом. Он использует фиксированные времена опережения циклов и учитывает доступные ресурсы (мощности и материалы), выбранные в качестве критических. Если производственный план в определенном периоде планирования создает перегрузку доступной производственной мощности или, если существует дефицит материалов, то данный механизм перемещает часть производственного плана на более ранний или поздний период, в зависимости от заданных параметров (рис. 1).

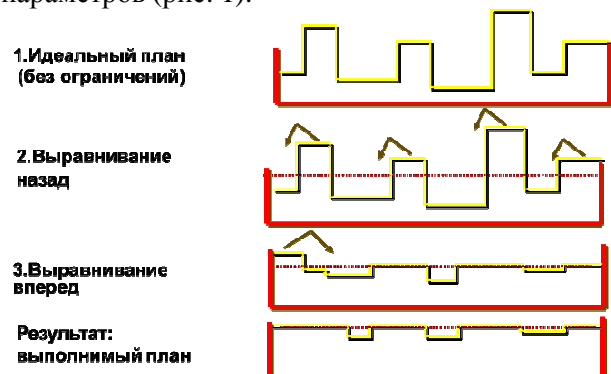


Рис. 1. Выравнивание загрузки

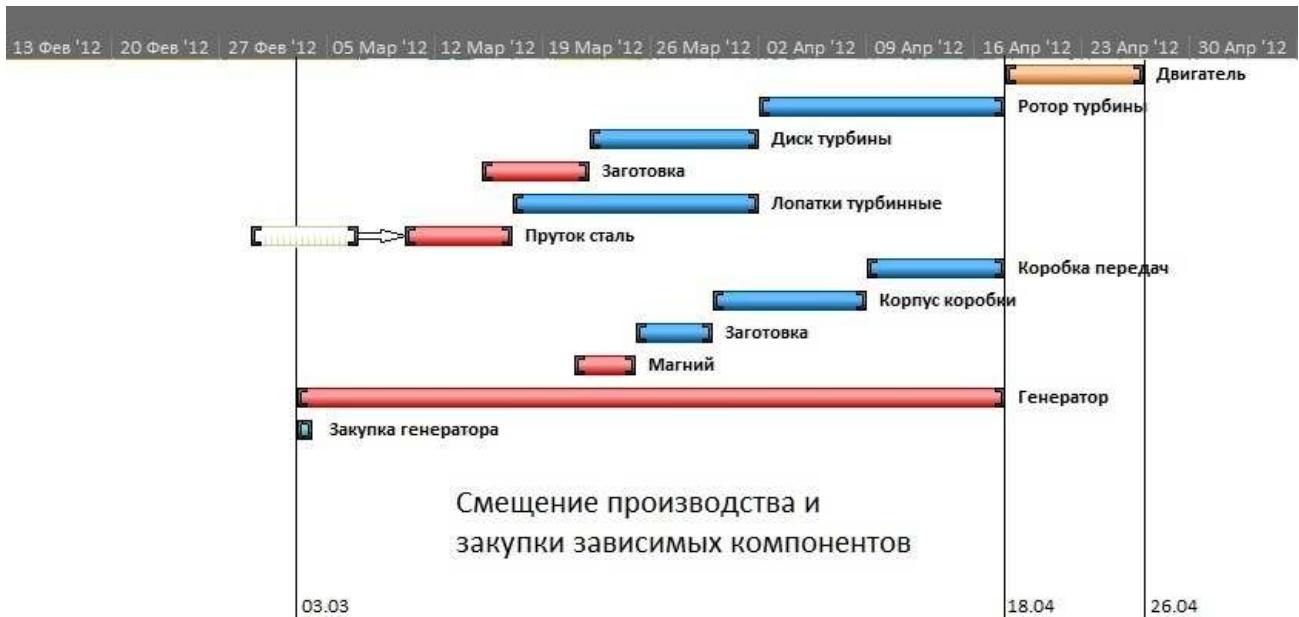


Рис. 2. Смещение производства и закупки зависимых компонентов

Если такое выравнивание не приводит к результату, разрабатываются мероприятия по расширке «узких мест», либо сдвигаются сроки поставки. При этом механизм основного планирования автоматически сдвинет и сроки закупки критических компонентов (рис. 2)

Недостатком данной функциональности является отсутствие встроенных алгоритмов оптимизации, что в свою очередь требует от пользователя проводить многократное сценарное планирование и вручную выбирать наилучший вариант плана. Ниже в статье приводится математическая модель оптимизации процесса планирования, которая позволит устранить данный недостаток. Модель учитывает:

- Ограничения по мощностям
- Ограничения по поставщикам
- Приоритеты товарных позиций
- Периоды планирования
- Нормы расхода

В качестве переменных выступают объемы производства позиций, а в качестве целевой функции – максимизация выпуска товарных позиций в срок с учетом приоритетов.

### МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Подробно познакомиться с основами разработки алгоритмов составления расписаний, методами управления технологическими процессами на стадии их проектирования, имитацион-

ными и стохастическими моделями планирования производственных процессов, моделями и методами управления качеством продукции можно в работах Р. Р. Загидуллина [4], а также в [5, 6].

### Обозначения

- $i$  – Индекс позиции (Item);
- $I$  – Множество всех позиций;
- $i_{\text{род}}$  – Индекс родительской по отношению к  $i$ -й позиции;
- $I_{\text{род}}$  – Множество родительских по отношению к  $i$ -й позиции;
- $t$  – Период планирования (Time);
- $t_{\text{тек}}$  – Текущий период планирования;
- $t_{\text{послед}}$  – Последний период планирования;
- $T$  – Множество всех периодов;
- $e$  – Индекс оборудования (Equipment);
- $E$  – Множество всего оборудования;
- $PT_{ei}$  – Время производства  $i$ -й позиции на  $e$ -м оборудовании (Productiontime);
- $AC_{et}$  – Доступные машино-часы  $e$ -го оборудования в периоде  $t$  (Availablecapacity);
- $Inv_{it}$  – Запасы  $i$ -й позиции в периоде  $t$  (Inventory);
- $F_{it}$  – Совокупный спрос на  $i$ -ю позицию в периоде  $t$  (Forecast);

Таблица 1

## График сборки без ограничений

	Приоритет	Нормочасы	янв	фев	мар	апр	май	июн
			1	2	3	4	5	6
Изделие модели 1 спрос			0	0	10	9	7	10
Изделие модели 2 спрос			0	0	7	10	10	10
Изделие модели 1 план	5	80	0	0	10	9	7	10
Изделие модели 2 план	1	64	0	0	7	10	10	10
Фюзеляж М1	5	50	0	10	9	7	10	0
Фюзеляж М2	1	50	0	7	10	10	10	0
Тех. комплект 1 ФМ1	5	50	10	9	7	10	0	0
Тех. комплект 2 ФМ1	5	32	10	9	7	10	0	0
Тех. комплект 3 ФМ1	5	32	10	9	7	10	0	0
Тех. комплект 1 ФМ2	1	40	7	10	10	10	0	0
Тех. комплект 2 ФМ2	1	30	7	10	10	10	0	0
Тех. комплект 3 ФМ2	1	32	7	10	10	10	0	0
Листовой металл			57	51	60	0	0	0

$ВOM_{i, \text{ирод}}$  – Норма расхода  $i$ -й позиции на позицию  $i_{\text{род}}$  (Billofmaterial);

$Q_{it}$  – Объем производства  $i$ -й позиции в периоде  $t$  (Quantity);

$W_{it}$  – Приоритет  $i$ -й позиции в периоде  $t$  (Weight).

Рассмотрим работу модели на примере самолетостроительного предприятия (табл. 1). В примере присутствуют 2 изделия «Изделие модели 1» и «Изделие модели 2».

Основу изделия составляет фюзеляж. Фюзеляж собирается из трех технических комплектов. Каждый комплект потребляет листовой металл. Норма расхода комплектов каждой спецификации равна единице. Опережение для комплектов по отношению к самолету равно двум периодам. Это означает, что они должны быть произведены за 2 месяца до выпуска самолетов. Опережение потребности листового металла по отношению к выпуску комплекта равно 1 месяцу. Для каждого из самолетов задается спрос по периодам. Зная этот спрос, норму расхода и опережения, определим в какие периоды и в каком объеме должны быть готовы сборочные единицы.

Колонка «Нормочасы» отображает требуемые человеко-часы для производства единицы продукции. Приоритет для «Изделия модели 1» задан выше, чем для «Изделия модели 2». Таким образом, в случае нехватки мощностей для покрытия всего спроса алгоритм в первую очередь удовлетворит спрос «Изделия модели 1».

В табл. 2 и 3 приводятся соответственно требуемые и доступные человеко-часы.

Таблица 2

## Требуемые человеко-часы

	янв	фев	мар	апр	май	июнь
Сборка самолетов	0	0	1248	1360	1200	1440
Сборка фюзеляжа	0	850	950	850	1000	0
Изготовление тех. комплектов	1854	2046	1818	2160	0	0

Таблица 3

## Доступные человеко-часы

	янв	фев	мар	апр	май	июнь
Сборка самолетов	1450	1450	1450	1450	1450	1450
Сборка фюзеляжа	750	750	750	750	750	750
Изготовление тех. комплектов	1300	1300	1300	1300	1300	1300

Данные таблиц в графическом виде представлены на рис. 3.

Из диаграмм загрузки рабочих центров видно, что полученный план запуска производства невыполним, поскольку имеются перегрузки. Задача состоит в том, чтобы выровнять загрузку оборудования, учитывая приоритеты изделия и ограничения по мощностям. Данный тип задач относится к классу задач линейного программирования и хорошо решается средствами ЭВМ.



Рис. 3. Доступные и требуемые человеко-часы

Целевая функция примет вид:

$$\sum_{i \in I} \sum_{t \in T} Q_{it} K_t W_{it} \rightarrow \max,$$

где  $K_t$  – коэффициент периода, чем ближе период к концу горизонта планирования, тем выше коэффициент. Таким образом, оптимизационный алгоритм определит необходимый объем производства каждого изделия в каждом периоде, «стараясь» не создавать запасы в начальных периодах;

$W_{it}$  – приоритет  $i$ -й позиции в периоде  $t$ ;  
 $Q_{it}$  – объем производства  $i$ -й позиции в периоде  $t$ .

В модели существуют следующие ограничения:

- Совокупный объем производства  $i$ -й позиции равен совокупному спросу на нее за вычетом наличного запаса.

$$\forall i \in I \sum_{t \in T} Q_{it} = F_{it} - Inv_{it}.$$

- Оборудование не может быть перегружено.

$$\forall e \in E, \forall t \in T AC_{et} - \sum Q_{it} P_{ei} \geq 0.$$

- Объем производства комплектующих изделий с первого по текущий периоды, с учетом нормы расхода и существующих остатков, не должен быть меньше, чем объем родительского изделия с первого по текущий период плюс опережение. Это необходимо для того, чтобы производство комплектующих изделий не запаздывало.

$$\forall i \in I \sum_{t=1}^{t_{\text{тек}}} (Q_{it} + Inv_{it}) BOM_{i, i_{\text{род}}} \geq \sum_{i_{\text{род}}} \sum_{t=1}^{t_{\text{тек+опер}}} Q_{i_{\text{род}} t}.$$

- Производство товарных позиций не должно быть позже спроса, то есть спрос должен быть удовлетворен вовремя.

$$\forall i \in I, \forall t \in T \sum_{t_{\text{послед}}}^{t_{\text{тек}}} F_{it} \geq \sum_{t_{\text{послед}}}^{t_{\text{тек}}} Q_{it}.$$

Необходимо отметить, что в нашем примере изделия являются неделимыми, поэтому следует применять *целочисленные* методы решения поставленной задачи.

Для проверки модели воспользуемся встроенной в пакет MS Excel надстройкой «Поиск решения». Результаты вычислений приведены в табл. 4. Из таблицы видно, что спрос на «Изделие модели 2» удовлетворен лишь частично, в то время как спрос на «Изделие модели 1» удовлетворен полностью.

Графики загрузки оборудования после оптимизации представлены на рис. 4.

### АЛГОРИТМ РАБОТЫ С МОДЕЛЬЮ

В приведенном примере мы получили выполнимый план, но не смогли удовлетворить часть спроса. На первом шаге необходимо определить рабочий центр, который является узким местом. Из графиков видно, что это рабочий центр сборки технических комплектов.

Таблица 4

График сборки после оптимизации

	Приоритет	Нормочасы	январь	февраль	март	апрель	май	июнь
			1	2	3	4	5	6
Изделие модели 1 спрос			0	0	10	9	7	10
Изделие модели 2 спрос			0	0	7	10	10	10
Изделие модели 1 план	5	80	0	0	10	9	7	10
Изделие модели 2 план	1	64	0	0	0	0	0	10
Фюзеляж М1	5	50	0	10	9	7	10	0
Фюзеляж М2	1	50	0	0	0	5	5	0
Тех. комплект 1 ФМ1	5	50	10	9	7	10	0	0
Тех. комплект 2 ФМ1	5	32	10	9	7	10	0	0
Тех. комплект 3 ФМ1	5	32	10	9	7	10	0	0
Тех. комплект 1 ФМ2	1	40	3	6	1	0	0	0
Тех. комплект 2 ФМ2	1	30	0	0	9	1	0	0
Тех. комплект 3 ФМ2	1	32	0	0	6	4	0	0
Листовой металл			33	37	35	0	0	0



Рис. 4. Доступные и требуемые человеко-часы после оптимизации

Необходимо увеличить доступные мощности узкого места в определенном периоде, что, например, означает запуск второй смены или передачу на аутсорсинг, и произвести повторный расчет. Если это невозможно, то существует возможность запуска алгоритма с возможностью автоматического переноса спроса на более поздние периоды. При данном подходе система на первом шаге находит оптимальный вариант в рамках заданного горизонта, если имеется неудовлетворенный спрос, то система автоматически переносит его на ближайший горизонт и повторно производит расчет, при этом полученное ранее решение фиксирует как входящее ограничение. Алгоритм продолжает свою работу до тех пор, пока не будет удовлетворен весь спрос. Также возможно и ручное перемещение спроса между периодами. Если результаты расчета удовлетворяют требованиям, то полученный результат и является оптимальным планом загрузки оборудования и закупки критических материалов. Если нет, то необходимо перейти к первому шагу.

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В статье приводится математическая модель, способная дополнить функциональность основного планирования ERP-систем и сэкономить на закупке специализированного программного обеспечения. Данная модель позволяет получать оптимальные планы загрузки оборудования и закупки критических материалов. Данный подход отличается от существующей функциональности системы «InforERPIn» по нескольким параметрам:

- используется оптимизационный алгоритм вместо пошагового нисходящего расчета потребности для каждой позиции;
- расчет производится в оперативной памяти, что сильно сокращает время расчета;
- при сдвиге спроса на более поздние периоды, предыдущее найденное решение фиксируется, что также позволяет сократить время расчета.

Планируя в среднесрочной перспективе, предприятия получают возможность своевременно определить потребности в критических ресурсах. Своевременная закупка критических материалов, оборудования, найма сотрудников позволит увеличить процент своевременно удовлетворенного спроса и снизить риски появления дефицита.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Таха Х. А.** Введение в исследование операций. М.: Вильямс, 2005. 912 с.
2. **Колесников С.** MPS [Электронный ресурс] (<http://www.osp.ru/cw/2000/13/4116/>).

3. Планирование ведущих позиций [Электронный ресурс] [http://help.sap.com/saphelp\\_afs64/help\\_data/ru/7d253c44af11d182b40000e829fbfe/frameset.htm](http://help.sap.com/saphelp_afs64/help_data/ru/7d253c44af11d182b40000e829fbfe/frameset.htm).

4. **Загидуллин Р. Р.** Управление машиностроительным производством с помощью систем MES, APS, ERP. Старый Оскол: ТНТ, 2011. 372 с.

5. **Загидуллин Р. Р., Зориктуев В. Ц., Лютов А. Г.** Управление технологическими процессами в машиностроении. Старый Оскол: ТНТ, 2011. 512 с.

6. **Загидуллин Р. Р.** Оперативно-календарное планирование в гибких производственных системах. М.: МАИ, 2004. 208 с.

#### ОБ АВТОРАХ

**Речкалов Александр Васильевич**, профессор кафедры АСУ, д-р техн. наук, директор по развитию бизнеса компания GMCS.

**Дунаев Дмитрий Николаевич**, аспирант той же кафедры.

**Даутова Оксана Римовна**, аспирант той же кафедры.