

Особенности моделирования заготовительного производства

В.А. ШИРОЧЕНКО, Н.П. СКРЫЛЕВ, Н.А. СЫСОЕВ

В статье рассмотрены вопросы математического моделирования заготовительного и основного производств многономенклатурных промышленных предприятий. Выявлены недостатки раздельного моделирования и предложена расчетная схема совместного анализа всех производственных процессов. Предложенная расчетная схема позволяет применять быстродействующие математические методы при решении задач реального производства с высокой размерностью.

Ключевые слова: производственные процессы, заготовительное и основное производство, математическое моделирование, загрузка оборудования, оптимизация производства.

The article considers the issues of mathematical modeling of procurement and main production of multi-nomenclature industrial enterprises. The disadvantages of separate modeling are revealed and a computational scheme for the joint analysis of all production processes is proposed. The proposed calculation scheme allows the use of high-speed mathematical methods in solving real-world production problems with high dimensionality.

Keywords: production processes, procurement and main production, mathematical modeling, equipment loading, production optimization.

Введение. Задачей заготовительного подразделения является подготовка заготовок для изготовления всех необходимых деталей, используемых в производстве конечного изделия. Заготовки обычно выкраиваются из листа металла или отрезаются из проката в соответствии с заданными размерами. В связи с требованием минимизации отходов разрабатывается несколько схем раскюя. При этом на одном листе стараются расположить как можно больше выкраиваемых заготовок и как правило разных. В некоторых случаях удается создать комплект схем раскюя, обеспечивающий получение заготовок на определенное количество изделий. Например, комплект из двух или трех схем, по каждой из которых необходимо взять фиксированное количество листов, чтобы получился комплект заготовок на определенное количество изделий.

Решению задачи оптимизации заготовительного производства посвящено множество научных исследований [1], [2], в которых рассмотрены различные подходы к его организации и минимизации отходов при раскюе заготовок. Большинство исследований направлены на его моделирование и анализ, рассматривая его как самостоятельное подразделение. Такой подход приводит к необходимости применения нелинейных математических методов для анализа производственной мощности предприятия, которые отличаются высокими вычислительными затратами. Использование более быстрых линейных методов решения задачи оптимизации возможно проводить в виде отдельных этапов для заготовительного и основного производств. Однако это разрывает логику анализа, делает ее более сложной и трудоемкой.

Определенная сложность в управлении заготовительным производством прежде всего заключается в том, что на экономически выгодный объем производства, который будет запланирован на соответствующий период, может потребоваться не целое количество листов при имеющихся схемах раскюя. В этом случае придется либо изготавливать лишнее количество заготовок, раскраивая листы полностью, либо вырезать только требуемое количество, оставляя остаток листов для будущих периодов.

Если в каждом плановом периоде производится разное количество изделий, то целесообразно выбирать формы и количества листов на основе решения задачи оптимизации с минимизацией лишних заготовок и учетом их наличия с прошлых периодов. В этом случае суммарная перегрузка оборудования за длительный период (например, за год при плановых периодах месяц или квартал) будет минимальной.

Однако возможен вариант вырезки для планового периода только необходимого количества заготовок с применением одних и тех же схем раскюя и снятием с раскюя оставшихся частей листа. В этом случае в длительном периоде будут накапливаться лишние затраты на снятие и загрузку неполных листов на оборудование для разрезки.

Из сказанного следует, что заготовительное производство является самостоятельной частью производственного процесса. Его ритм работы не совпадает с ритмом работы механикообрабатывающих и сборочных подразделений и анализ его производственной мощности вместе с остальным производством довольно сложная задача.

Основная часть. При анализе эффективности производства первичными являются конструктивные особенности изготавливаемого изделия. Его иерархия, как правило, имеет множество уровней, представляющих собой сборочные единицы и висячие вершины, с помощью которых отображаются детали изделия. Их количество однозначно определено количеством изделий. Упрощенно это может быть представлено в виде схемы, показанной на рисунке 1.

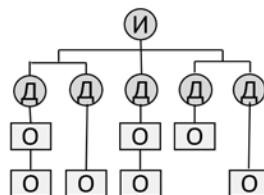


Рисунок 1 – Схема конструкторской иерархии и технологических маршрутов

На рисунке кружком «И» обозначено само изделие, а кружками «Д» – его детали. Промежуточные сборочные единицы для простоты на схеме не показаны.

Для производства каждой отдельной детали существует свой технологический маршрут в виде технологических операций, которые представляют собой определенные действия, объединяемые возможностями специального оборудования. Количество операций в технологическом маршруте определяется количеством применяемого оборудования. На рисунке они обозначены прямоугольниками «О». Эти операции выполняются последовательно с переходом незавершенной детали от одной единицы оборудования до следующей, преобразовываясь из заготовки в готовое исполнение.

Моделирование основного производства осуществляется на основе линейного программирования [3], и его модель схематично представлена на рисунке 2. На схеме четко выделены три матрицы, первая из которых описывает длительности технологических операций, вторая – количество повторений выполняемых операций и третья – суммарное время, затрачиваемое на выполнение операций при изготовлении готовой продукции. Все три матрицы имеют одинаковую размерность по количеству технологических операций по каждой детали (это количество строк) и количеству оборудования, задействованного в этих операциях (количество столбцов).

Количество операций и соответственно строк в матрицах определяется структурой конструкции и технологических маршрутов изготовления деталей изделий. Матрица длительности операций является исходными данными. Матрица закрепления операций за оборудованием наряду с вектором количеств изготавливаемых изделий является матрицей внутренних управляемых параметров.

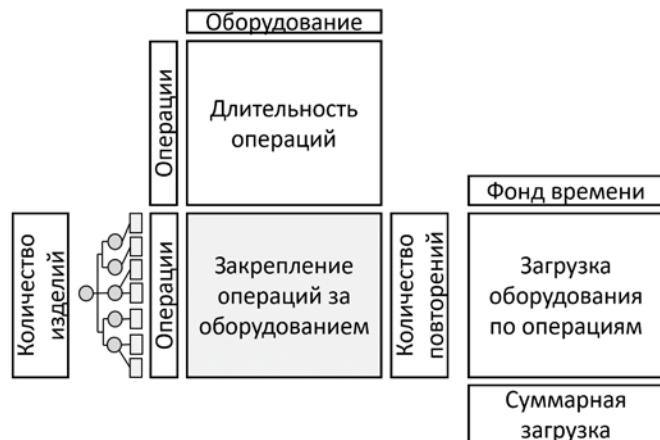


Рисунок 2 – Схема постановка задачи оптимизации загрузки оборудования

С помощью матрицы загрузки оборудования по операциям и вектора фондов времени по каждой единице оборудования формируются ограничения на управляемые параметры в виде неравенств. Еще одна группа ограничений – это равенство суммарных значений по строкам матрицы управляемых параметров количеству повторений, определяемому исходя из количества изготавливаемых изделий. В качестве целевой функции используется зависимость $y = \sum_{i=1}^n C_i x_i$, где x_i – объем производства, а C_i – трудоемкость i -го изделия, n – количество номенклатурных позиций производства.

Отправной точкой производства является заготовка, которая должна быть изготовлена в рамках заготовительного производства. Между заготовительным и основным производством, как отмечалось ранее, не существует линейных связей. Количество листов раскроя не совпадает с количеством изделий или деталей. Схематично это представлено на рисунке 3, где «Л» обозначены отдельные листы металла.

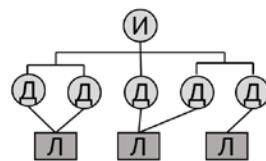


Рисунок 3 – Схема расположения заготовок на листах для раскроя

Для определения необходимых схем раскроя и количества листов для изготовления определенного количества изделий необходимо решать оптимизационную задачу [4], постановка которой схематично представлена на рисунке 4. Данные по схемам раскроя представлены матрицей (см. рисунок 5), столбцами которой описываются листы металла, а строками – принадлежность к деталям. Значения матрицы – это количество соответствующих заготовок на том или ином листе. Внизу приведено время на раскрой листа полностью, а справа – на выкройку одной заготовки для соответствующей детали. Для изготовления заготовок выполняется ряд технологических и вспомогательных операций. Для примера на рисунке 6 представлено описание операций, выполняемых в рамках заготовительного производства.

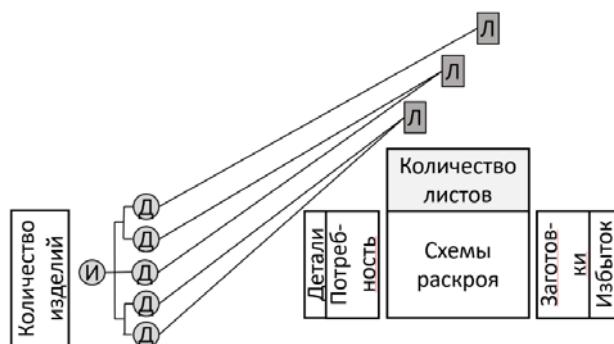


Рисунок 4 – Схема постановки задачи оптимизации раскроя

Деталей на листе					Время на деталь
Лист 1	Лист 2	Лист 3	Лист 4	Лист 5	
14					2
7					1
	14				1,5
	2	5			2,3
		7			1,8
			5		3,2
			5	5	2
				5	1

Время на лист 35 25,6 24,1 26 15

Рисунок 5 – Схема раскроя листов на заготовки

Перед раскроем каждого листа его необходимо очистить от грязи и ржавчины. Для этого осуществляется операция на дробеструйном оборудовании, на которое лист транспортируется краном 1 (см. рисунок 6). Во время загрузки заняты и кран, и дробеструйное оборудование. При очистке занято только дробеструйное оборудование.

Элемент	Кол-во в изделии	Кол-во	Операция	Заготовительное производство					
				Кран 1	Кран 2	Кран 3	Дробеструйка	Плазма 1	Плазма 2
Лист 1	0,29	10	Транспорт 1	3					
		10	Загрузка Д	1			1		
		10	Очистка				9		
		10	Выгрузка		1	1	1		
		10	Транспорт 2		6	6			
		10	Загрузка П		1	1		1	1
		10	Выкрайка				35	35	
Лист 2	0,14	5	Транспорт 1	3					
		5	Загрузка Д	1			1		
		5	Очистка				11		
		5	Выгрузка		1	1	1		
		5	Транспорт 2		6	6			
		5	Загрузка П		1	1		1	1
		5	Выкрайка				25,6	25,6	

Рисунок 6 – Описание операций заготовительного производства

После очистки другой кран 2 или 3 разгружает дробеструйное оборудование, где они заняты совместно, и затем перевозит очищенный лист на газоплазменное оборудование для раскroя. При этом во время транспортировки занят только кран. Во время загрузки листа на раскрай заняты и кран, и оборудование раскroя. После загрузки работает только раскрай. Поскольку для раскroя предусмотрено две единицы оборудования, то для их обслуживания предусмотрено два крана. Указанное оборудование может работать одновременно, и ввиду одинаковой производительности время выполнения операций одинаково. В операциях загрузки и выгрузки задействовано различное оборудование, но поскольку они работают одновременно, то время выполнения этих операций для них также совпадает.

Исходным в данной задаче является количество изделий, которые необходимо произвести и количество необходимых заготовок, определяемых иерархией изделия и выраженное в виде потребности для операций раскroя. В качестве управляемых параметров выступает количество листов, определяемых принятыми схемами раскroя. Ограничениями является требование того, что количество заготовок должно быть не меньше потребности в них. В результате раскroя будет получено некоторое количество заготовок, которое в общем случае будет не совпадать с потребностью, образуя избыток. Исходя из того, что схемы раскroя разработаны таким образом, чтобы минимизировать отходы металла, критерием оценки является избыток заготовок или суммарное время выкраивания этого избытка. Оба критерия абсолютно равнозначны и нуждаются в минимизации.

Данное обстоятельство делает задачу нелинейной. В связи с этим для ее решения необходимо использовать известные нелинейные методы оптимизации или разрабатывать собственные оптимизационные алгоритмы. Однако при моделировании крупного предприятия размерность такой задачи является достаточно большой и это приводит к весьма значительным вычислительным затратам. Целью данных исследований является построение наиболее простой и быстродействующей математической модели производственного процесса с учетом заготовительного производства. Для этого проведен анализ различных подходов, которые можно использовать для описания заготовительного производства с высокой точностью и максимально простыми средствами без применения нелинейных методов и без переделки алгоритмов линейного программирования в существующих библиотеках.

В первую очередь рассмотрена постановка задачи оптимизации производства без заготовительного производства с последующей проверкой его возможностей. Несомненно, такой подход имеет право на существование, но процедура становится многоэтапной и в случае многовариантного анализа неудобной.

Далее рассмотрена модель, в которой общие затраты заготовительного производства разделены на части и отнесены к каждой отдельной детали. Таким образом в затратах на изготовление заготовки отдельной детали учитывается соответствующая часть времени на

транспортировку листа, часть времени на его очистку и часть времени на раскрой. Предполагается, что, рассматривая данные процедуры подетально, суммарные их затраты будут равны затратам заготовительного производства. Процедура оптимизации производства в этом случае становится одноэтапной и удобной для многовариантного анализа.

Однако в связи с разбиением единой процедуры раскроя листа на части размерность модели существенно возрастает. К тому же процесс подготовки данных для анализа, который заключается в выделении затрат времени на деталь, является достаточно сложным. В связи с нарушением дискретности заготовительного производства появляются погрешности в определении загрузки его оборудования. И, наконец, анализ загрузки в некоторых случаях теряет смысл, т. к. получается, что операции по получению заготовок разных деталей, но расположенных на одном листе, могут быть отнесены к разным единицам оборудования.

Устранение указанных недостатков возможно путем учета затрат заготовительного производства целиком на лист и с заданием количества листов на одно изделие. При таком подходе в модели заготовительного производства в зависимости от количества изготавливаемых изделий будет определено соответствующее количество различных листов, обеспечивающих получение необходимых заготовок, причем их количество в общем случае будет не целое число.

Такая модель имеет значительно меньшую размерность и, следовательно, менее затратной с точки зрения вычислений при решении задачи оптимизации. Полученные результаты по закреплению операций за оборудованием раскроя получаются точнее, но в связи с дробностью листов, когда транспорт осуществляет перевозку не полного листа, он затрачивает и время для не полной перевозки. Однако это противоречит здравому смыслу и дает погрешности в оценке затрат времени транспортного оборудования.

Для устранения этих погрешностей в перевозке должно участвовать целое число листов, а вот в раскрое число листов может оставаться не целым. Однако правильное распределение загрузки операций между транспортом и оборудованием раскроя будет получаться далеко не всегда, и в этом случае задача не будет давать решения. Это связано с тем, что у целого числа перевозок и нецелого числа листов раскроя не будет наименьшего общего кратного, что не позволит составить пропорцию.

Таким образом, проведенные исследования однозначно говорят о том, что, чтобы соблюсти линейность системы и использовать методы линейного программирования, необходимо в заготовительном производстве рассматривать только целое количество листов и в транспортных перевозках и операциях раскроя. Однако в этом случае заготовительное производство будет изготавливать лишние заготовки и его загрузка будет определена с избытком, а это в свою очередь может привести к ошибкам определения экстремума по объему выпускаемой продукции.

Для устранения возможности такой ошибки целесообразно выделить затраты на изготовление лишних заготовок и вычесть их из затрат заготовительного производства или наоборот добавить их к фонду времени соответствующего оборудования.

Схема такой математической модели приведена на рисунке 7. Как видно из схемы, заготовительное и основное производство моделируется совместно, но разными потоками, каждый из которых представлен триадой матриц аналогично схеме на рисунке 3. Загрузка заготовительного оборудования контролируется количеством заготовок, необходимых для производства соответствующего количества изделий, с помощью ограничений типа неравенства. Заготовок должно быть не меньше, чем необходимо деталей. Производство лишних деталей выносится за рамки анализируемого периода.

Основное производство контролируется количеством повторений технологических операций, которое должно строго соответствовать количеству, задаваемому технологическому маршруту конструктивных элементов, соответствующих изделию с помощью ограничений типа равенства.

Данная расчетная схема обладает абсолютной линейностью и позволяет использовать для решения задачи максимизации объемов производства с учетом заготовительного и основного оборудования методы линейного программирования. Тестирование программного обеспечения, реализующего данную вычислительную схему, показывает вполне допустимые затраты времени на решение задачи с размерностью более тысячи управляемых параметров и таким же количеством ограничений.

Выводы и заключение. 1. Изготовление заготовок является самостоятельной частью производства и при его оптимизации на основе математического моделирования требует собственной постановки задачи. При попытке объединения заготовительного и основного производства при решении оптимизационной задачи в единую модель она получается нелинейной и требует применения методов нелинейного программирования.

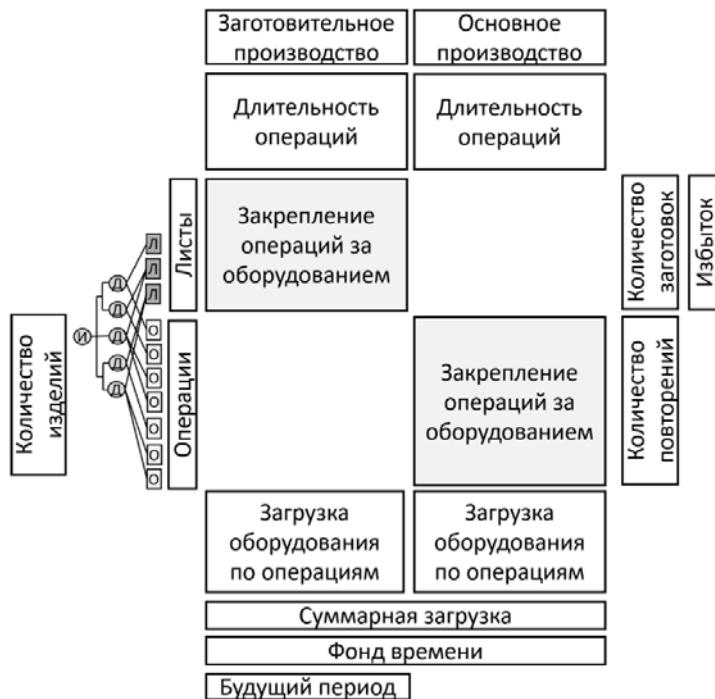


Рисунок 7 – Схема постановки задачи оптимизации производства с учетом заготовительного производства

2. Упрощенный подход к моделированию заготовительного производства на основе приведения затрат к детали или листу упрощают задачу, но обладают существенными недостатками. Такой подход не позволяет исключить из производства заготовок для деталей, которые передаются на изготовление другим предприятиям.

3. Предложенная в работе расчетная схема вычислительного процесса позволяет объединить заготовительное и основное производство в единой модели без нарушения линейности и применить для анализа методы линейного программирования.

4. Разработанная математическая модель позволяет в единой процедуре проводить решение задачи оптимизации объема выпуска многономенклатурной продукции с максимально эффективной загрузкой оборудования и решать задачи с большой размерностью. При этом время ожидания решения является весьма комфортным для пользователя, т. к. не превышает 1–2 секунд.

Литература

1. Растворгувєв, Г. Л. Математическая модель оптимизации раскроя листовых заготовок / Г. Л. Растворгувєв // Заготовительные производства в машиностроении. – 2008. – № 9. – С. 49–51.
2. Бабаев, Ф. В. Оптимальный раскрой материалов с помощью ЭВМ / Ф. В. Бабаев. – М. : Машиностроение, 1982. – 168 с., ил.
3. Новиков, А. И. Исследование операций в экономике : Учебник для бакалавров / А. И. Новиков. – 2-е изд. – М. : Издательско-торговая корпорация «Дашков и Ко», 2020. – 352 с.
4. Юдин, Д. Б. Линейное программирование : теория, методы и приложения / Д. Б. Юдин, Е. Г. Гольштейн. – Изд.2-е. – М. : КРАСАНД, 2012. – 424 с.