

# Информатика, вычислительная техника и управление

УДК 658.514.4

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ОПЕРАЦИЙ: ДИСЦИПЛИНЫ НАЗНАЧЕНИЯ КАК ИНСТРУМЕНТ LP\***

**М.А. Бражников, Е.Г. Сафронов, И.В. Хорина**

Самарский государственный технический университет  
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

E-mail: max.brh@yandex.ru

*В условиях значительного разнообразия производственной номенклатуры ведущая роль отводится определению последовательности запуска-выпуска партий предметов. Разработка методики установления последовательности рабочих заданий является одним из опорных инструментов бережливого производства. Математические модели определения оптимальной последовательности имеют ограниченное применение. Эвристические подходы отличаются простотой и достаточно легко вписываются в ограничения различного характера. Представленные дисциплины назначения позволяют установить комплекс приоритетов в процессе разработки производственного графика. Основная задача менеджмента предприятия – разработка некоторой комбинации приоритетов, обеспечивающих повышение эффективности производственных процессов. Выбор оптимальной последовательности выполнения операций обеспечивает соблюдение принципов рациональной организации производства.*

**Ключевые слова:** дисциплины назначения, правила очередности, производственная система, экономико-математические модели, эвристические подходы, трудоемкость, длительность цикла, приоритет выпуска, бережливое производство.

Одним из важнейших приоритетов современной производственной системы, ориентированной на разработку и внедрение инноваций, является решение задачи установления четкой последовательности производственных заданий. Особую актуальность указанная проблема приобретает в условиях значительного расширения номенклатуры выпуска (разнообразия продукции).

Определение очередности и разработка графика выполнения работ – ключевой инструмент бережливого производства. Формирование производственного

---

*Работа выполнена в рамках гранта РФФИ № 16-36-00334 «Обновление и модернизация основных производственных фондов в машиностроении».*

*LP – lean production – бережливое производство.*

*Максим Алексеевич Бражников (к.э.н., доцент), доцент кафедры «Экономика промышленности и производственный менеджмент».*

*Евгений Геннадьевич Сафронов (к.э.н., доцент), доцент кафедры «Экономика промышленности и производственный менеджмент».*

*Ирина Вениаминовна Хорина (к.э.н.), доцент кафедры «Национальная и мировая экономика».*

графика заключается в упорядочении комплекса запланированных рабочих заданий в условиях некоторого ряда ограничений. Цель решения – оптимизация установленного критерия или совокупности оценочных показателей.

В качестве объекта планирования (производственного задания) могут быть использованы партии предметов труда (деталей или сборочных единиц), отдельные технологические операции или комплекс работ, закрепленные за соответствующим оборудованием или группой взаимосвязанных рабочих мест.

Среди основных показателей единицы планирования следует выделить трудоемкость изготовления, календарный срок выпуска, удельную себестоимость, длительность производственного цикла.

Определение состава ограничений обусловлено специфическими особенностями конкретной производственной системы:

- разработка технологического маршрута, регламентирующего последовательность выполнения производственных операций;

- расчет времени запуска партии предметов на основе графиков поставки сырья и материалов, заготовок и комплектующих с учетом согласования работ смежных подразделений;

- обоснование сроков выполнения работ или длительности производственного цикла в соответствии с установленной производственной программой;

- определение эффективного фонда времени работы технологического оборудования или рабочих мест в пределах исследуемого горизонта планирования;

- выбор способа перемещения партии предметов труда на смежных операциях, по производственным участкам или цехам;

- установление режима работы производственной системы, регламентирующего продолжительность рабочего периода, время необходимых перерывов и естественных процессов;

- уточнение параметров реального функционирования производства – коэффициента выполнения норм, коэффициента сменности.

В целях решения задачи формирования расписаний в каждом конкретном случае (в рамках исследуемой производственной системы) устанавливается соответствующий набор ограничений. Производственное расписание, которое удовлетворяет условиям ограничений, называется допустимым.

Для оценки качества сформированного расписания используется система целевых показателей (критерий оптимальности). Среди целевых показателей наибольшее распространение получили следующие критерии:

- минимизация времени выполнения общего объема работ;
- сокращение суммарного времени простоя рабочих мест;
- уменьшение времени ожидания партией своей очереди на обработку;
- снижение объемов незавершенного производства;
- обеспечение соответствия сроков выпуска предметов установленным плановым календарным датам.

С точки зрения теоретической постановки задачи формирования расписаний математические методы приводят к достижению требуемого оптимума, но вызывают необходимость достаточно «тонкой» настройки учета реальных условий производства. Иначе говоря, в общем случае решения задачи формулировка условий использования математических методов практически невозможна. Оптимизация результата достижима лишь в частных случаях, что ограничивает применение математических моделей.

С практической стороны информационные системы и стандарты управления

производством также содержат различные методы оптимизации последовательности выполняемых работ в рамках оперативно-календарного планирования. В то же время в условиях динамичности производственной системы и решения задачи соответствия выпуска партий предметов срокам завершения работ общие подходы не обеспечивают оптимизации результата [1, с. 547]. Это вызвано тем, что представленные методы исходят из статической постановки задачи с использованием одного критерия – максимизации пропускной способности системы. Однако в условиях реального производства необходимо обеспечить своевременность выполнения работ, скорость исполнения заданий или достижение других показателей. В этом случае определение последовательности работ посредством методов векторной оптимизации приводит к альтернативности вариантов.

В различных производственных процессах при установлении порядка выполнения работ используются эвристические правила очередности [2, с. 548] или дисциплины назначения [3, с. 85], определяющие приоритет выпуска.

Эвристические подходы отличаются простотой, меньшей трудоемкостью вычислений, легко вписываются в ограничения различного характера. Несмотря на то, что подобные подходы не обеспечивают оптимальности расписаний, они способствуют достижению приемлемых результатов решения.

В зависимости от конкретных условий производства и выбранной дисциплины назначения эффективность расписания варьируется. Оценка качества установленной последовательности работ в каждом отдельном случае должна подтверждаться экспериментальным путем.

Группировка приоритетов в виде «правил», регулирующих последовательность предметов и получивших наиболее широкое распространение, может быть представлена следующим образом.

*Правило 1.* Случайный выбор: последовательность выполнения работ определяется на основе цепочки случайных событий (случайных чисел).

*Правило 2.* FIFO «Первый пришел – первый обслужен»: последовательность выполнения комплекса производственных заданий (операций) устанавливается согласно порядку их поступления на рабочее место или в подразделение.

*Обратное правило.* LIFO «Последний пришел – первый обслужен»: последовательность выполнения устанавливается в обратном порядке, последняя операция из списка находится на вершине пирамиды, а значит – с нее надо начинать.

*Правило 3.* Срочный заказ: операция с более высоким приоритетом выпуска, который определяется на основе ранжирования работ по сроку исполнения или степени важности производственного задания, должна быть выполнена первой.

Основное противоречие использования представленной совокупности приоритетов на основе правил 1–3 заключено в неравномерности загрузки станочного парка и производственных площадей. В условиях формирования случайной последовательности выполнения разнообразных работ более продолжительные операции, если они размещены в начале списка, задерживают срок исполнения производственных заданий всех следующих за ними технологических операций. Рассматриваемая ситуация приводит к увеличению потерь времени – простоя на всех следующих рабочих местах в силу необходимости соблюдения технологической последовательности в выполнении заданий на смежных рабочих местах или в подразделениях.

Однако в некоторых ситуациях, если оценка времени выполнения операций

носит прогнозный характер, а значит – невозможно точно установить конкретный срок завершения работ, указанные приоритеты очередности необходимы. Их использование обеспечит «личную справедливость» в размещении производственных заданий (обслуживание «живой» очереди).

Очевидное преимущество представленных подходов заключается в простоте исполнения.

*Правило 4.* Минимальное время выполнения: ранжирование партий предметов осуществляется в соответствии с трудоемкостью их изготовления.

$$t_{ij} \rightarrow \min, \quad (1)$$

где  $t_{ij}$  – время выполнения операции ( $i$ ) по предмету ( $j$ ).

*Обратное правило.* Максимальное время выполнения: самая трудоемкая операция должна быть выполнена в первую очередь.

$$t_{ij} \rightarrow \max. \quad (2)$$

Использование дисциплин назначения (4) в случае минимизации критерия, как правило, способствует сокращению среднего времени обработки партий предметов и уменьшению объемов незавершенного производства. В свою очередь, это обеспечивает рост производительности труда и пропорциональность выполнения работ.

Стержневая проблема заключена в том, что операции с наибольшей длительностью обработки отправляются в конец списка, что вызывает неуклонный рост времени ожидания партиями предметов своей очереди, особенно в тех случаях, когда более короткие операции непрерывно поступают на рабочее место. Решение указанной проблемы лежит в применении различных комбинаций приоритетов «минимальное – максимальное время выполнения». Например, при достижении определенного периода времени (календарной даты) наиболее трудоемкие операции должны быть перемещены в начало последовательности.

*Правило 5.* По установленным срокам: очередность выполнения производственных заданий определяется наименьшим крайним сроком выпуска предметов.

$$k'_j \rightarrow \min, \quad (3)$$

где  $k'_j$  – крайний срок выпуска предмета ( $j$ ).

Дисциплина назначения «установленный срок» ориентирована на минимальное время выпуска, что обеспечивает своевременность выполнения заданий, определяя сферу ее применения. Однако есть и противоречие: трудоемкость выполнения производственного задания не учитывается, что приводит к увеличению перерывов, связанных с ожиданием партией деталей или сборочных единиц своей очереди на обработку. Следовательно, объемы незавершенного производства непрерывно растут. В ряде случаев при значительном увеличении интервала горизонта планирования стремление ранжировать производственные задания на основе сроков выполнения может привести к преждевременному выполнению ряда технологических операций относительно установленного срока выпуска. В этой связи время пролеживания партии предметов труда в ожидании их перемещения по технологическим переделам увеличивается.

*Правило 6.* Минимальная длина «хвоста»: партия предметов с наименьшей

остаточной длительностью цикла должна быть включена в план выпуска первой.

$$(k'_j - t_{ij}) \rightarrow \min. \quad (4)$$

*Обратное правило.* Максимальная длина «хвоста»: партия предметов с наибольшей остаточной длительностью обработки получает приоритет.

$$(k'_j - t_{ij}) \rightarrow \max. \quad (5)$$

*Правило 7.* Критическое отношение: очередность определяется на основе наименьшего отношения установленного срока к трудоемкости обработки.

$$\frac{k'_j}{t_{ij}} \rightarrow \min. \quad (6)$$

Рассмотренные выше правила 6–7 ориентируются на минимизацию остаточной длительности производственного цикла, что позволяет выявить возможный резерв времени осуществления текущей операции в общем потоке планируемых производственных заданий. Цель выражается в минимизации совокупного времени запаздывания работ и обеспечении своевременности передачи партии предметов на следующую стадию изготовления продукции. Совокупность представленных дисциплин назначения будет наиболее актуальной в условиях строгого соблюдения принципа непрерывности производственного процесса на основе ликвидации нерегламентированных перерывов.

Однако в отдельных случаях применение подобных правил приводит к ухудшению оценочных показателей производственной системы, вызывая необоснованное увеличение объемов незавершенного производства и длительности производственного цикла.

*Правило 8.* Напряженность выпуска: порядок выполнения работ определяется по иерархии степени напряженности, которая рассчитывается как отношение длины «хвоста» ко времени, оставшемуся до установленного срока выпуска.

$$\frac{(k'_j - t_{ij})}{(k'_j - k)} \rightarrow \max, \quad (7)$$

где  $k$  – текущий планово-учетный период.

*Правило 9.* Критический запас времени: приоритет запуска устанавливается по минимальной величине запаса времени в среднем на одну операцию.

$$\frac{(k'_j - t_{ij})}{h_j} \rightarrow \min, \quad (8)$$

где  $h_j$  – число операций по предмету ( $j$ ).

Таким образом, в науке и практике существует достаточно большое число эвристических правил определения последовательности производственных заданий или дисциплин назначения, основанных на различных (в некоторых случаях противоположных) содержательных подходах, что обуславливает вариативность возможных результатов.

Представленные приоритеты формирования последовательности работ можно классифицировать по условиям динамичности производства. Особенность статических правил в том, что принятый индекс приоритета остается неизмен-

ным в течение достаточно продолжительного периода времени (пока не возникнет необходимость в определении новой последовательности выполнения работ). В отличие от них в динамических дисциплинах назначения индекс приоритета представляет собой некоторую функцию от времени (установленная последовательность корректируется при поступлении на рабочее место новых производственных заданий).

Как показывают результаты исследования, моделирование последовательности работ и разработка производственных графиков на основе дисциплин назначения не обеспечивают математического оптимума, что требует выбора определенной комбинации правил. Основная задача производственной системы – экспериментальным путем сформировать перечень «удобных» приоритетов, обеспечивающих нормальное протекание процесса производства, и разработать алгоритм составления расписаний на основе эффективной комбинации правил, гарантирующих достижение ключевых показателей или ликвидацию текущих проблем [4, с. 188].

В конечном счете, выбор установления различных вариантов (приоритетов в разработке оперативного плана) определяется общей длительностью выполнения и комбинацией ряда показателей [5, с. 756].

1. Среднее время выполнения работ – определяется как отношение общей суммы продолжительности операций или длительности производственного цикла к числу запланированных операций.

$$\bar{T} = \frac{\sum_{i=1}^{h_j} T_{ij}}{h_j}, \quad (9)$$

где  $T_{ij}$  – общая продолжительность выполнения работ.

Во-первых, общая продолжительность выполнения работ  $T_{ij}$  включает в себя фактическое время исполнения работы. Во-вторых, в структуре величины  $T_{ij}$  отражены перерывы ожидания партиями своей очереди на обработку, а также время на транспортировку предметов. В-третьих, в показателе  $T_{ij}$  учитываются потери времени, обусловленные режимом работы конкретного производственного подразделения, а также возникающие при отклонениях от нормального хода производства (выход оборудования из строя, задержка партии предметов и т. п.). В этой связи расчет величины  $T_{ij}$  выполняется нарастающим итогом.

2. Время запаздывания операций – вычисляется как разница между реальным сроком выполнения операции и его плановым значением. Время запаздывания отражает период времени, величина которого показывает фактическое превышение времени выполнения работ над установленным сроком.

$$\bar{k}_3 = \frac{\sum_{i=1}^{h_j} (k - k'_j)}{h_j}, \quad (10)$$

где  $k$  – установленный планом срок выпуска.

3. Среднее число выполняемых работ – определяется как отношение общей длительности выполнения всех технологических операций к величине времени,

необходимой для завершения всех распределяемых работ. Среднее число работ показывает условную величину оборотных средств, связанных в незавершенном производстве.

$$\bar{h} = \frac{\sum_{i=1}^{h_j} T_{ij}}{\sum_{i=1}^{h_j} t_{ij}}. \quad (11)$$

В целях окончательного выбора условно оптимальной (адекватной конкретным условиям) последовательности назначения работ следует разработать производственный график с учетом реальных параметров функционирования системы – сменный режим, выходные дни и перерывы, коэффициент выполнения норм. Анализ графического материала способствует выявлению уязвимых мест – интервалов времени, характеризующих простой оборудования, и отрезков пролеживания (потерь времени) партий обрабатываемых предметов в ожидании своей очереди обработки [6, с. 56–57].

Таким образом, процесс определения последовательности работ в условиях высокой динамичности производственной системы (выпуск партий неоднородных видов продукции, ориентированных на удовлетворение потребностей разнообразных целевых групп и учитывающих неопределенность уровня рыночного спроса) следует рассматривать как стержневой элемент организации бережливого производства. Задача установления очередности должна быть представлена в упрощенных терминах диспетчирования как установление приоритетов назначения работ в пределах одного рабочего места (группы рабочих мест).

Процесс разработки алгоритма решения и моделирования графика выполнения производственных операций [7, с. 152–153] задает следующие ключевые приоритеты:

- максимальная величина трудоемкости работ на единицу длительности производственного цикла;
- интервал времени, отражающий возможный срок выпуска партии предметов, ограниченный ранней и крайней календарной датой;
- минимальный объем условной потребности в оборотных средствах, вложенных в незавершенное производство.

Установленная на основе разработанного алгоритма последовательность работ должна пройти всестороннюю оценку для уточнения предварительного расписания на основе корректирующего алгоритма.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Производственный менеджмент: учебник / Под ред. В.А. Козловского. – М.: ИНФРА-М, 2003. – 574 с.
2. Чейз Р.Б., Эвилайн Н.Д., Якобс Р.Ф. Производственный и операционный менеджмент / Пер. с англ. О.И. Медведь, А.И. Мороза, О.Л. Пелявского / Под ред. Н.А. Коржа. – М.: Вильямс, 2001. – 704 с.
3. Чудаков А.Д., Фалевич Б.Я. Автоматизированное оперативно-календарное планирование в гибких комплексах механообработки. – М.: Машиностроение, 1986. – 224 с.
4. Бражников М.А. Управление ритмичностью производства: моделирование оперативно-календарных планов. – Saarbrücken: Lambert Academic Publishing, 2013. – 258 с.
5. Стивенсон В. Управление производством / Пер. с англ. под. общ. ред. Ю.В. Шленова. – М.: БИНОМ, 1998. – 928 с.
6. Бражников М.А. Моделирование производственных процессов на основе приоритетов в зада-

че определения последовательности выполнения работ // Высшее образование, бизнес, предпринимательство '2012: Материалы XVII Международной научно-практической конференции «Наука, бизнес, образование» и IV Международной научно-технической конференции «Экономика и управление: теория, методология, практика»: Сборник научных трудов. – Самара: СамГТУ, ПИБ, 2012. – С. 51–57.

7. *Бразжников М.А., Сафронов Е.Г., Мельников М.А., Лебедева Ю.Г.* Стратегические приоритеты машиностроительного комплекса: инновационное развитие предприятий / Под ред. М.А. Бразжникова, Е.Г. Сафронова. – М.: Дашков и К°, 2015. – 212 с.

*Статья поступила в редакцию 17 августа 2016 г.*

## **SIMULATION OF THE OPERATIONS SEQUENCE DISCIPLINES OF THE DESIGNATION AS THE INSTRUMENT LP**

***M.A. Brazhnikov, E.G. Safronov, I.V. Horina***

Samara State Technical University  
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

*In conditions of considerable diversity production range the leading part is removed to the determination of the sequence of the launch-release of the parties of objects. Development of methods of sequence of work tasks is one of the key tools of lean manufacturing. Mathematical model of determining the optimal sequence are of limited use. Heuristic approaches are simple and easy enough to fit into the constraints of a different nature. Represented disciplines of designation make it possible to establish the complex of priorities in the process of development of production schedule. The main objective of the company's management – development of some combination of priorities that enhance the efficiency of production processes. The selection of the optimum sequence of fulfilling the operations ensures the observance of the principles of the rational organization of production.*

***Keywords:*** *discipline of designation, rule of priority, production system, economic and mathematical models, heuristic approaches, labor expense, the duration of cycle, the priority of release, lean production.*

---

*Maksim A. Brazhnikov (Ph.D. (Econ.)), Associate Professor.  
Evgeny G. Safronov (Ph.D. (Econ.)), Associate Professor.  
Irina V. Horina (Ph.D. (Econ.)), Associate Professor.*