

## ОСОБЕННОСТИ ОПЕРАТИВНО-КАЛЕНДАРНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ МЕЛКОСЕРИЙНОГО-ПРОИЗВОДСТВА

### FEATURES OF OPERATIONAL AND CALENDAR PLANNING OF SMALL-SCALE PRODUCTION

S. Savinov

*Summary.* The process of operational-calendar small-scale production of radio-electronic products is considered, and the analysis of possible options for organizing the production process is made.

*Keywords:* operational and calendar planning, swarm intelligence, automated production process management.

**Савинов Сергей Владимирович**

Аспирант, ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»  
conf-mail@bk.ru

*Аннотация.* Рассматривается процесс оперативно-календарного мелкосерийного производства радиоэлектронной продукции, производится анализ возможных вариантов организации производственного процесса.

*Ключевые слова:* оперативно-календарное планирование, роевой интеллект, автоматизированное управление производственным процессом.

**П**овышение эффективности производственного процесса предприятия является первоочередной целью производства. Выполнение данной цели достигается за счет оптимального распределения производственных ресурсов в процессе выполнения технологических операций.

Решением задачи по сокращению времени производственного цикла может являться создание автоматизированной системы минимизации производственных циклов, то есть создание системы автоматизированной разработки оперативно-календарного плана, создание виртуального продукта в виде алгоритма и программного обеспечения, интегрированного в программное обеспечение АСУП. При этом план не обязательно представлять на твердой копии. Особенно актуальным является решение задачи по созданию системы автоматизированной минимизации производственных циклов, по созданию программного обеспечения системы автоматизированной разработки оперативно-календарных планов.

Известно, что задачи оперативно-календарного планирования традиционно решаются в системах класса APS (Advanced Planning & Scheduling) и MES (Manufacturing Execution System). Существующие на рынке APS и MES решения обеспечивают оперативно-календарное планирование для крупных производств дискретного типа и не всегда в состоянии отслеживать динамику изменения условий организации производства, характерную для предприятий мелкосерийного производства радиоэлектронных изделий. Кроме того, при построении оперативно-календарного плана для указанного вида производств должны учитываться следующие особенности технологических процессов (ТП): разделение ТП на технологические операции, наличие ограничений

на очередность выполнения технологических операций, реализуемых на специализированных станциях, работа с партиями изделий, необходимость учета времени перепрограммирования станции на выпуск новой партии продукции и так далее [1].

Таким образом, из всего многообразия систем класса APS и MES, представленных на рынке, ни одна не решает задачи оперативно-календарного планирования для мелкосерийного предприятия по производству радиоэлектронных изделий в полном объеме. Применение известных решений потребует доработки готового ПО под нужды мелкосерийного производства предприятия.

Поэтому актуальной является разработка автоматизированной системы составления оперативно-календарных планов на примере производства радиоэлектронных изделий, которая адаптивно с высоким быстродействием учитывает динамику изменения условий в организации производств на основе методов минимизации времени производственных циклов и с учетом всех особенностей ТП.

При решении задач календарного планирования находят применение эвристические методы. Данные методы основаны на алгоритмах построения производственных планов без проведения полного или частичного перебора вариантов, то есть по правилу, которое называется «снижением требований». Оно заключается в отказе от поиска оптимального решения и нахождения вместо этого «хорошего решения» за приемлемое время. Однако методы, применяемые для построения алгоритмов такого типа, значительно зависят от специфики задачи. Таким образом, универсального алгоритма построения производственных планов не существует

и поэтому предварительно решать задачу по построению последних целесообразно с применением разных методов и затем выбрать наиболее приемлемое решение согласно экспертным оценкам с учетом критериев оптимальности.

Для реализации вопроса по минимизации производственного цикла мелкосерийного производства генетическим методом, путем автоматизированного создания оперативно-календарных планов, сокращается технологический процесс, при этом технологический процесс разделяется на технологические операции изготовления радиоэлектронных изделий.

Рассматриваемый тип производства радиоэлектронных изделий определяется возможностью изготовления на одной и той же линии различного рода как простой, так и сложносоставной продукции. Оперативное переоборудование производственных мощностей для производства изделий с более высокими техническими характеристиками, обеспечение высокого качества и экономической эффективности — все это связано с автоматизацией производства и систем управления.

В результате функционирования автоматизированной системы технологической подготовки производства формируется необходимая документация (технологическая документация, нормы времени, и т.п.), которая является директивной основой для выполнения технологических операций, в части последовательности выполнения действий и характера выполнения процедур при изготовлении продукции. Использование подсистемы управления и планирования позволяет сделать систему АСТПП/АСУП более гибкой и динамичной [4].

Поэтому наиболее актуальной задачей является организация функциональной структуры подсистемы автоматизированного управления и оперативно-календарного планирования, а также разработка и описание новых методов и подходов организации системы управления и планирования.

Для создания новых методов организации системы управления и планирования технологической подготовкой необходимо разработать модель подсистемы управления и оперативно-календарного планирования, разработать новый эффективный алгоритм автоматизированного планирования и управления производственными процессами, разработать функциональную модель системы управления и планирования с учетом организации обмена данных с системами АСУП, АСТПП, АСУ ТП.

Существующие системы построения и оптимизации оперативно-календарного планирования используют

различные методы минимизации временных затрат на производственный цикл.

Одним из методов организации мелкосерийного производства, составления оперативно-календарного плана мелкосерийного производства с минимизированным производственным технологическим циклом используется метод ветвей и границ, представляющей из себя наиболее улучшенную версию метода перебора. Принцип работы состоит в упорядоченном переборе различных вариантов и анализе только тех из них, которые являются наиболее перспективными, остальные варианты отбрасываются. Но при использовании данных методов составления оперативно-календарного плана возникает проблемы обеспечения необходимого уровня быстродействия, так как в след за усложнением решаемой задачи резко возрастает длительность проведения необходимых вычислительных операций.

Метод имитационного моделирования оперативно-календарного планирования как правило используется на применении аппарата сетей Петри и/или других способов представления дискретных состояний системы. Сеть Петри представляется через ориентированный граф, формирующейся из вершины позиции и вершины перехода, связанные между собой дугами — путями графа, при этом невозможно соединение вершин одного и того же типа напрямую. Каждая позиция может хранить в себе маркеры сети, которые в процессе работы перемещаются по сформированной сети. Однако для формирования четкой модели сети требуется большой объем статических данных для моделирования, кроме того, точность результирующих данных не всегда хватает для оптимального решения требуемой задачи [6].

Оперативно-календарное планирование, сформированное с помощью математического программирования, применяет методы динамического и линейного программирования. Линейное программирование используется для определения наиболее эффективного времени обработки деталей на единицах производственных мощностей (например, реализация технологических операций на двух станках). В качестве основного параметра выступает время выполнения задания на конкретной технологической единице. В начале выбирается самое короткое время выполнения операции, и если оно относится к первой технологической единице, планируется выполнение операции на первой технологической единице, а если более короткое время выполнения технологической операции относится ко второй — то выполняется операция на второй единице. Данный процесс повторяется до тех пор, пока не будут рассмотрены и перебраны все необходимые операции на технологических единицах. Кроме того, существует ряд правил для различного рода случаев

трехстадийной обработки деталей. Однако применение данного алгоритма на реальном производстве является затруднительным, так как выполнение различного рода технологических операций осуществляется на большом количестве технологических единиц. При использовании динамического программирования обеспечивается исследование многоэтапных задач для формирования эффективных и оптимальных решений. Этапы выполнения задач представляют собой действительное выполнение процесса принятия решений во времени, или обеспечивается многоэтапность представляется как часть разделенного единого процесса для выполнения технологической операции. Введение многоэтапности позволяет произвести переход от решения одной сложной задачи к решению множества, полученных разделением, более простых задач, суммарные результаты которых формируют общий результат решения сложной задачи технологической операции.

Как и линейное так и динамическое программирование по аналогии с комбинаторными методами может предоставить наиболее точные результаты степени оптимальности распределения технологического процесса, но при этом резко увеличивают сложность и длительность выполнения необходимых вычислительных операций для достижения результата.

Эвристические методы оперативно-календарного планирования имеют в своем составе принцип организации плана технологического процесса, не используя при этом возможность перебора всех возможных вариантов (или частичного перебора). То есть применение данных методов подразумевают нахождение наиболее правильного решения вместо наиболее оптимального, но при этом обеспечивается высокое быстродействия нахождения решения.

Таким образом, рассмотрев существующие методы построения оперативно-календарных планов, можно прийти к выводу, что существует алгоритм, позволяющий решить задачу построения производственного плана с минимизированным производственным технологическим циклом.

Предположим, на производственном участке требуется организовать изготовление  $i$  радиоэлектронных изделий, где  $i = 1, 2, \dots, N$ . Для этого используются  $m$  технологических центров, где  $m = 1, 2, \dots, l$ .

На каждом технологическом центре выполняется маршрут изготовления изделия, состоящего из  $j$  технологических операций,  $j = 1, 2, \dots, q$ .

В общем случае если время начала  $j$ -той технологической операции  $i$ -того изделия  $T_{jstart}$  и время завершения

выполнения этой технологической операции  $T_{jend}$ , тогда время выполнения  $j$ -той технологической операции  $i$ -того изделия

$$T_j = T_{jend} - T_{jstart} \tag{1}$$

Если обозначить время начала следующей технологической операции  $T_{(j+1)start}$ , то необходимым условием производственного цикла является выполнение равенства неравенства:

$$T_{jend} \leq T_{(j+1)start} \tag{2}$$

Для изготовления одного  $i$ -того изделия в производственном процессе из  $q$  технологических операций затрачивается время  $T_i$

$$T_i = \sum_{j=1}^q T_j \tag{3}$$

Для изготовления партии изделий, состоящей из  $N$ -изделий, на одном технологическом центре затрачивается время  $T_N$

$$T_N = \sum_{i=1}^N T_i = \sum_{i=1}^N (\sum_{j=1}^q T_j) \tag{4}$$

При этом  $T_N$  должно быть меньше фонда времени технологического центра  $\varphi_m$ , т.е. требуется выполнение условия:

$$T_N \leq \varphi_m \tag{5}$$

В случае если затраты времени изготовления партии из  $N$  изделий на одном технологическом центре  $T_N$  превышающим фонд времени работы центра  $\varphi_m$ , то есть если  $T_N > \varphi_m$ , то требуется введение  $l$  технологических центров.

Таким образом, при изготовлении партии из  $N$  изделий на  $l$  технологических центрах, затрачивается время  $T_{Nl}$

$$T_{Nl} = \frac{1}{l} \sum_{i=1}^N T_i \tag{6}$$

что позволяет достичь выполнения неравенства  $T_{Nl} \leq \varphi_m$ .

Время, затраченное на выполнение технологических операций по изготовлению  $N$  изделий на  $l$  технологических центрах  $T_\Sigma$

$$T_\Sigma = \sum_{m=1}^l T_{Nl} \tag{7}$$

$$T_{\Sigma} = \sum_{m=1}^l T_{Nl} = \sum_{m=1}^l \frac{1}{l} \left( \sum_{i=1}^N T_i \right) = \sum_{m=1}^l \frac{1}{l} \left\{ \sum_{i=1}^N \left( \sum_{j=1}^q T_j \right) \right\}. \quad (8)$$

Для обеспечения эффективного функционирования производственного процесса по изготовлению партии из  $N$  изделий, суммарное время  $T_{\Sigma}$  не должно превышать суммарный фонд времени работы  $l$  технологических станций на горизонте планирования, т.е. должно выполняться условие:

$$T_{\Sigma} \leq \sum_{m=1}^l \varphi_m. \quad (9)$$

Из модели (8) производственного цикла можно выделить критерий минимизации длительности цикла, который определяется как:

$$\sum_{m=1}^l \frac{1}{l} \left\{ \sum_{i=1}^N \left( \sum_{j=1}^q T_j \right) \right\}_{\min} \leq \sum_{m=1}^l \varphi_m, \quad (10)$$

$$T_{\Sigma \min} \leq \sum_{m=1}^l \varphi_m. \quad (11)$$

Таким образом задача оперативно-календарного планирования сводится к построению графа, который удовлетворяет условию (10, 11). В этом случае критерий минимизации длительности производственного цикла  $T_{\Sigma \min}$  достигает своего экстремального значения.

Тогда задача составления эффективного оперативно-календарного плана состоит в применении наилучшего метода для нахождения кратчайшего пути в графе, который проходит через все события только один раз и имеет наименьшую продолжительность.

Если рассмотреть алгоритм мелкосерийного производства радиоэлектронных изделий на  $l$  специализированных по технологическим операциям центрах, то вычисление временных затрат принимает другой вид. В этом случае время, затраченное на изготовление одного  $i$ -того изделия на  $l$  специализированных по технологическим операциям центрах, определяется выражением:

$$T'_i = \sum_{j=1}^{a-1} T'_j + \sum_{j=a}^{b-1} T'_j + \dots + \sum_{j=p}^q T'_j. \quad (12)$$

Тогда суммарное время на выполнение партии из  $N$  изделий на  $l$  специализированных по технологическим операциям центрах вычисляется по выражению вида:

$$T_{\Sigma ml} = \sum_{m=1}^l \left( \sum_{j=1}^{a-1} T'_j \right) +$$

$$+ \sum_{\substack{i=2 \\ m=2}}^N \left( \sum_{j=a}^{b-1} T'_j \right) + \dots + \sum_{m=l}^N \left( \sum_{j=p}^q T'_j \right), \quad (13)$$

где  $m$  — номер специализированного по технологическим операциям центра;  $l$  — всего специализированных технологических центров.

Так как время изготовления  $i$ -того изделия на специализированном по технологическим операциям центре  $T'_i$  существенно меньше времени изготовления изделия на универсальных центрах  $T_i$ , то в соответствии с моделью (13) модель (8) имеет существенно большие временные затраты на один производственный цикл, т.е.

$$T_{\Sigma} > T_{\Sigma ml}. \quad (14)$$

Таким образом, можно принять, что модель (13) является минимизированной по затратам времени на один производственный цикл по сравнению с другими моделями.

Таким образом, представлены три модели временных затрат производственного цикла мелкосерийного производства: это модель (4) изготовления партии из  $N$  изделий на одном технологическом центре. Это модель (8), в этом случае партия из  $N$  изделий изготавливается на  $l$  технологических центрах. По представленной модели (13) партия из  $N$  изделий изготавливается на  $l$  специализированных по технологическим операциям центрах.

Для исследования вопросов по составлению оперативно-календарного плана мелкосерийного производства с наименьшим производственно-технологическим циклом рассматриваются различные методы формирования структуры организации производств, рассматриваются методы оценки временных затрат построением графов, которые учитывают наличие сложных технологических комплексов и изделий со значительным числом технологических операций при изготовлении.

При проведении сравнительных исследований различных мелкосерийных производств, созданных по различным методам, при исследовании оперативно-календарных планов мелкосерийных производств с сокращенными производственными циклами были рассмотрены методы построения производств по алгоритмам табуированного поиска, генетического алгоритма, алгоритма роевого интеллекта или алгоритма пчелиного роя.

Результаты полученных данных представлены в таблице 1 характеризуют основные параметры исследованных технологических процессов, характеризуют

Таблица 1. Сравнительные данные длительности производственного цикла от вида модели организации производства.

Число техн. операций	Генетический алгоритм		Алгоритм муравьиной колонии		Алгоритм роевого интеллекта	
	Время техн. цикла, мин	Время расч. плана, с	Время техн. цикла, мин	Время расч. плана, с	Время техн. цикла, мин	Время расч. плана, с
5	23	9	19	10	17	12
25	58	16	61	15	63	18
50	124	44	103	61	116	57
100	249	141	248	145	226	120

численные значения количества технологических операций, представляется суммарное время выполнения всего цикла технологических операций, необходимое время расчета плана для выполнения процесса, число имеющегося в наличии множества специализированных по технологическим операциям центров.

Из таблицы 1 видно, что оперативно-календарный план, составленный на основе алгоритма роевого интеллекта, выигрывает во времени, которое тратиться на производство единицы продукции в течение всего технологического цикла. Данный алгоритм принадлежит к категории стохастических бионических алгоритмов, в основе которых лежит поведение колонии роя, например, пчел при сборе нектара. В основе алгоритма пчелиного роя, или алгоритма роевого интеллекта является обеспечение максимального сокращения пути доставления или пути перемещения. Применение такого метода при составлении оперативно-календарного плана мелкосерийного производства радиоэлектронных изделий со множественной комплектацией при-

водит к получению наименьшего производственного цикла.

Рассмотренные методы создания алгоритма автоматизированного оперативно-календарного планирования мелкосерийного радиоэлектронного производства, методы построения алгоритмов организации мелкосерийного производства с минимизированным производственным циклом показывают, что при решении проблемы максимального сокращения временных затрат при мелкосерийном производстве имеется множество решений в зависимости от наличия специализированного оборудования, вида технологических центров и вида изделий с множественным значением номенклатуры составных частей и компонентов. При этом из результатов в работе можно отметить, что одним из наиболее эффективных методов являются генетические методы построения алгоритмов организации мелкосерийного производства, в частности такие как алгоритм роевого интеллекта, алгоритм пчелиного роя и алгоритм муравьиной колонии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Антонов, А. М. Основы современной организации производства / А. М. Антонов. — М.: ИНФРА-М., 2004. — 432 с.
2. Зориктуев В.Ц., Загидуллин Р.Р. Оперативно-календарное планирование в гибких производственных системах. Учебное пособие. Изд.УГАТУ, — Уфа, 2004. — 106 с.
3. Водолазский И.А., Егоров А. С., Краснов А. В. Роевой интеллект и его наиболее распространённые методы реализации // Молодой ученый. — 2017. — № 4. — С. 147–153. — URL <https://moluch.ru/archive/138/38900/Malarenko>
4. Коренюшкин, А. Генетические алгоритмы / А. Коренюшкин // Программист. № 2. — 2003. С. 74–80
5. Елисеев В.Г., Козырева Н. А. Алгоритм построения расписания загрузки производственных ресурсов// Новые промышленные технологии. 2009. № 1. С. 13–16
6. Безгинов, А. Н. Обзор существующих методов составления расписаний / А. Н. Безгинов, С. Ю. Трегубов // Информационные технологии и программирование выпуск 2(14), 2005г, с. 5–19.
7. Никитин, А. В. Управление предприятием с использованием информационных систем/ А. В. Никитин. — М.: ИНФРА-М, 2007. — 188 с.
8. Бухалков, М. И. Внутрифирменное планирование: Учебник. — М.: Инфра- М., 1999.-392с.
9. Кузин Б.И., Юрьев В. Н., Шахдинаров Г. М. Методы и модели управление фирмой. — Спб.: Изд-во Питер, 2001. — 432 с.
10. Файнгольд М.Л., Кузнецов Д. В. Методика расчета длительности производственного цикла и календарных планов выпуска продукции/ Под научной ред. М. Л. Файнгольда. — Владимир: Изд-во ВГПУ, 2003. — 111 с.