

УДК 004.021:65.011.5:658.51

ПРОБЛЕМЫ ПЕРЕПЛАНИРОВАНИЯ ПРИ АВТОМАТИЗАЦИИ УПРАВЛЕНИЯ МНОГОНОМЕНКЛАТУРНЫМ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫМ ПРОИЗВОДСТВОМ

Колесникова О.В., Рупинец И.С., Лелюхин В.Е.

ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет», Владивосток, e-mail: miis@mail.ru

В статье рассматриваются вопросы, связанные с особенностями управления мелкосерийным и единичным машиностроительным производством. В практике автоматизированного планирования и управления производством принято использование оптимизационных алгоритмов, проведение перепланирования графика загрузки производственных мощностей с целью его оптимизации по выбранным критериям. В статье авторы анализируют особенности мелкосерийного и единичного производства, оказывающие существенное влияние на формирование производственного плана. Показано, что задача автоматизации планирования в данном случае представляет собой синтез многоконтурной системы подчиненного регулирования. Ядром системы является график загрузки производственных мощностей. Его перепланирование приводит к необходимости перепланирования подчиненных контуров системы с повторным синтезированием и синхронизацией совокупности межконтурных связей. В результате процесс перепланирования не только занимает значительный период времени, но, что самое главное, вносит дезорганизацию в работу всех подразделений предприятия. Авторы показывают и доказывают необходимость исключения процедуры перепланирования из процесса управления многономенклатурным машиностроительным производством. В качестве эффективной альтернативы в статье предложен подход к управлению производством, основанный на использовании конструктивных алгоритмов планирования, учитывающих особенности мелкосерийного производства, например «Опадающие листья», и процедуры актуализации плана посредством оперативной корректировки, заключающейся во встраивании невыполненных операций в периоды простоев оборудования.

Ключевые слова: машиностроение, планирование производства, мелкосерийное и единичное производство, перепланирование

PROBLEMS OF RESCHEDULING IN THE AUTOMATION OF MANAGEMENT OF MULTI-NOMINAL ENGINEERING PRODUCTION

Kolesnikova O.V., Rupinets I.S., Lelyukhin V.E.

Far-Eastern Federal University, Vladivostok, e-mail: miis@mail.ru

The article deals with issues related to the peculiarities of managing small-scale and one-off engineering production. In the practice of automated planning and production management, developers use optimization algorithms and rescheduling the production capacity load schedule in order to optimize it according to the selected criteria. In the article, the authors analyze the features of small-scale and one-off production, which have a significant impact on the formation of the production plan. The authors show that the task of planning automation in this case is a synthesis of a multi-loop system of subordinate regulation. The core of the system is the capacity utilization schedule. Rescheduling the schedule leads to the need to reschedule the subordinate loops of the system with re-synthesizing and synchronization of the set of inter-loop links. As a result, the process of rescheduling takes a significant period of time, introduces disorganization in the work of all divisions of the enterprise. The authors show and prove the need to exclude the rescheduling procedure from the process of managing diversified machine-building production. As an effective alternative in the article, the authors propose an approach to production management based on the use of constructive planning algorithms that take into account the peculiarities of small-scale production, for example, «Falling Leaves», and the procedure for updating of the plan through operational adjustments, which consists in embedding outstanding operations during periods of equipment downtime.

Keywords: engineering, production planning, small-scale and one-off production, rescheduling

Одной из проблем многономенклатурного машиностроительного производства является повышение загрузки производственных мощностей. Большое разнообразие номенклатуры изготавливаемой продукции обычно свойственно предприятиям с мелкосерийным и единичным характером производства. Особенностью этих типов производства является использование универсального оборудования, большой коэффициент закрепления операций ($K_{30} > 40$), необходимость высокой квалификации рабочих, существенные непроизводительные простои оборудования. Все эти фак-

торы снижают эффективность работы предприятия.

Решение вопроса повышения эффективности производства связывают с разработкой и использованием различных методов устранения непроизводительных потерь рабочего времени и, соответственно, повышением загрузки оборудования. Одним из таких методов является составление и постоянное поддержание графика распределения работ в оптимальном состоянии. С этой целью используют алгоритмы формирования оптимального расписания загрузки производственных мощностей,

алгоритмы перепланирования составленного расписания при изменении условий (например, появлении нового заказа, выходе из строя оборудования и т.д.).

В статье рассматриваются проблемы, возникающие при применении процедур перепланирования в условиях мелкосерийного и единичного машиностроительного производства, а также предлагается подход к планированию, исключающий процедуры перепланирования.

*Методы и алгоритмы автоматизации
производственного планирования*

Задачи формирования плана загрузки производственных мощностей относят к задачам теории расписания (MS – *Machine Scheduling*). Подавляющее количество задач, исследуемых в теории расписаний, являются NP-сложными. Несмотря на трудности, связанные с большим количеством перестановок, предлагается несколько методов и алгоритмов для решения этих задач с рядом значительных упрощений [1, 2].

Методы решений условно можно разделить на две группы: конструктивные и улучшающие. Конструктивные методы последовательно формируют частичные расписания, на каждом шаге добавляя планируемую операцию в соответствии с определенными правилами. На выходе метода всегда получается допустимое расписание [1].

Улучшающие методы используют в качестве начального решения некоторое допустимое расписание. Задачей методов является улучшение или оптимизация расписания в соответствии с установленными критериями [2].

Задачи формирования расписаний находят широкое практическое применение. В связи с их актуальностью, несмотря на сложность, существует довольно большое количество алгоритмов, реализующих различные оптимизационные методы, как в нашей стране, так и за рубежом. Анализ работ показал, что многие исследователи отмечают сложность задач планирования многономенклатурного мелкосерийного машиностроительного производства. В статьях приводятся попытки учета таких характеристик производства, как неопределенность времени обработки [3, 4], максимальная рабочая нагрузка станка (MMW) и общая рабочая нагрузка станков (TWM) [5], характеристики отдельных машин, оценки их мощности, эффективности производства и стоимости параллельных машин [6].

Большинство методов планирования создавалось для массового и крупносерий-

ного производства, и их применение дало возможность существенно повысить эффективность производства. В связи с этим такие же методы и подходы планирования производства стали применяться в условиях многономенклатурного мелкосерийного и единичного производства [7, 8]. Однако слепое копирование методов не дает желаемых результатов. Причиной является наличие особенностей многономенклатурного производства, не учитываемых в методах планирования для массового и крупносерийного производства.

*Особенности производственного
планирования в многономенклатурном
машиностроительном производстве*

Особенности мелкосерийного и единичного производства накладывают определенные требования и ограничения при формировании графика загрузки рабочих мест. На рис. 1 представлен фрагмент схемы составления расписания. На рисунке используются следующие обозначения: ТП – технологический процесс, представленный последовательностью деталей-операций в виде графа цепи, вершины которого обозначены <номер ТП>. <номер операции>, R – рабочие места. На предприятии имеется m универсальных рабочих мест, каждое из которых может использоваться для выполнения определенного типа детали-операций. Например, на универсальном токарном станке могут изготавливаться различные осесимметричные детали: валы, оси, втулки, болты и т.д. Для каждой такой детали токарная операция имеет свою длительность, а также подготовительно-заключительное время для настройки станка, изучения чертежа, выбора инструмента.

С учетом типа производства график загрузки рабочего места составляется так, что за рабочую смену на одном рабочем месте выполняется несколько деталей-операций, относящихся к разным деталям, изделиям и заказам. Однако при этом необходимо учитывать последовательность выполнения операций технологического процесса, а также порядок изготовления детали-сборочных единиц, соответствующий структуре изделия.

Например, на рис. 1 показана последовательность выполнения операций технологического процесса ТП1. Первая операция 1.1 выполняется на рабочем месте R_1 . Вторая операция 1.2 выполняется на рабочем месте R_m , но она может начаться только после окончания первой операции, несмотря на то, что рабочее место R_m свободно. Свободное время рабочего места R_m может быть использовано для изготовления дру-

гой детали по технологическому процессу ТП2. Но период времени выполнения операции 2.1 меньше периода времени простоя оборудования, что приводит к появлению периодов простоя оборудования.

Таким образом, план-график загрузки производственных мощностей формируется в соответствии со следующими условиями: последовательность изготовления детали-сборочных единиц должна соответствовать структуре изделия; последовательность выполнения технологических операций изготовления детали-сборочной единицы должна соответствовать технологическому процессу; не допускается размещение более одной технологической операции на одном рабочем месте; размещение технологических операций допускается только на соответствующих рабочих местах.

Рассмотренные особенности мелкосерийного и единичного производства дополняются нерегулярностью поступления заказов, неопределенностью частоты их следования, и вносят в материальный поток изготавливаемых изделий элементы стохастичности. Общий материальный поток изготавливаемых изделий и выполняемых заказов представляет собой совокупность пересекающихся потоков одновременного изготовления различных детали-сборочных единиц. Поэтому задача автоматизации планирования заключается в управлении совокупностью материальных потоков с регулированием их взаимодействия, иными словами, представляет синтез многоконтурной системы подчиненного регулирования. В качестве контуров регулирования здесь могут выступать: контур управлением изготовления отдельной детали-сборочной еди-

ницы, контур управлением работы отдельного рабочего места, контур управления группой детали-сборочных единиц, входящих в изделие, контур управления группой рабочих мест предприятия.

Перепланирование в мелкосерийном и единичном производстве

Эффективность производственного планирования в многономенклатурном производстве во многом определяется степенью «слаженности» работ не только основных цехов и участков, но и служб обеспечения. В этом случае синхронизация планов всего комплекса подразделений является важным фактором. В работе [9] предложена схема централизованной подготовки производственного плана, основу которой составляет ядро планирования. Соответственно, изменение производственного плана влечет за собой изменение планов всех остальных подразделений.

Например, в соответствии с составленным планом производства, отдел материально-технического обеспечения заказал необходимые материалы и комплектующие, с определенными сроками поставки. Изменение плана производства может привести к тому, что заказанные материалы окажутся невостребованными, но срочно потребуются другие, которые еще либо не были заказаны, либо не поступили. Это приведет к необходимости дополнительных материальных затрат на ускоренную поставку необходимых материалов, к напряженности и дезорганизации в работе отдела снабжения, к повышению вероятности появления ошибок. Аналогичная ситуация будет наблюдаться во всех остальных подразделениях.

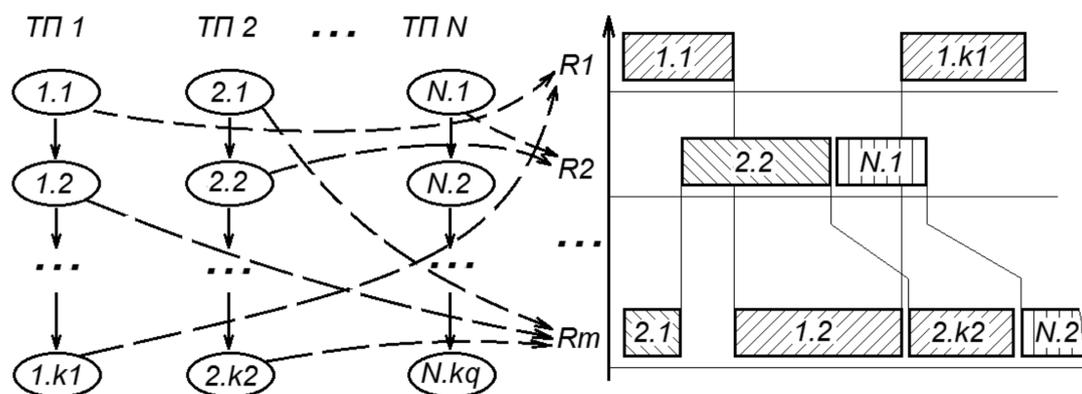


Рис. 1. Схема формирования плана-графика загрузки рабочих мест в мелкосерийном и единичном производстве

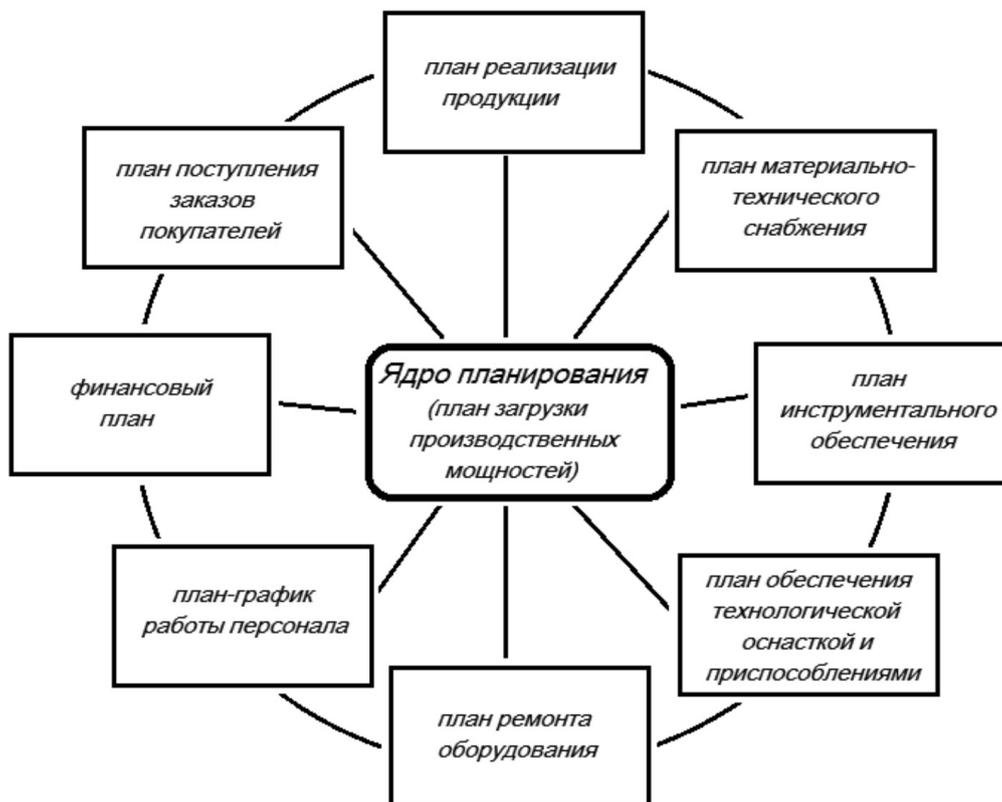


Рис. 2. Схема взаимодействия планов подразделений машиностроительного предприятия

Кроме того, перепланирование негативно сказывается на работе самого производственного подразделения. Изменение плана вызывает нарушение установленного порядка работ, дезорганизацию в подготовке к выполнению операций технологического процесса.

Описанные негативные явления усиливаются в мелкосерийном и единичном производстве за счет большого количества заказов, различных сроков их выполнения, нерегулярностью и неопределенностью их появления.

Таким образом, перепланирование в производстве приводит к появлению следующих проблем в управлении предприятием:

- дезорганизация работы основного производства;
- дезорганизация работы обеспечивающих подразделений;
- повышение риска появления ошибок, нестыковок и невязок во взаимодействии подразделений предприятия;
- повышение риска невыполнения производственных заказов.

Исходя из этого, при разработке алгоритмов автоматизированного управления производством целесообразно исключить

процедуру перепланирования, особенно в мелкосерийном и единичном производстве. Учитывая необходимость регулирования плана производства в связи с влиянием внешней среды и возникающими в связи с этим отклонениями, авторы предлагают подход к актуализации плана производства без процедуры перепланирования.

Подход к управлению мелкосерийного и единичного машиностроительного производства

На основе анализа особенностей мелкосерийного и единичного производства, существующих алгоритмов и подходов к планированию авторы статьи предлагают собственный подход к управлению.

В основе планирования лежит организация на предприятии единого информационного пространства, содержащего необходимый и достаточный объем информации о обеспечении о структуре заказа, структуре изделия, технологических процессах изготовления детали-сборочных единиц, структуре парка оборудования, а также текущего состояния загрузки производственных мощностей.

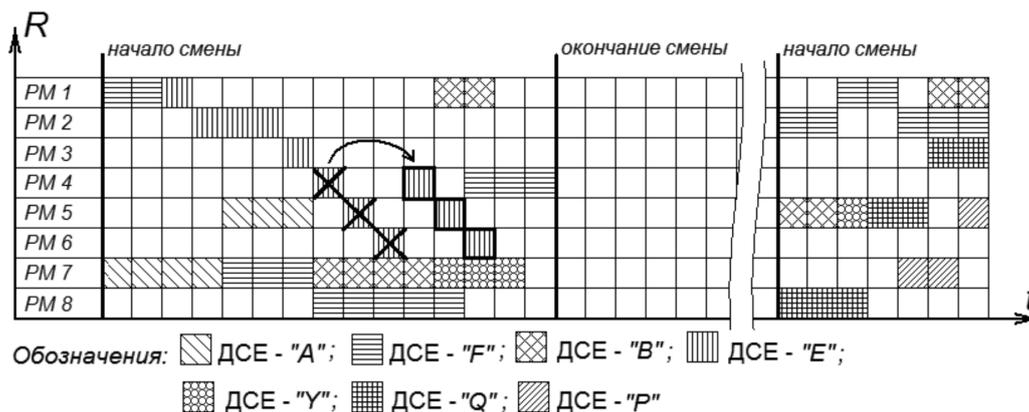


Рис. 3. Корректировка производственного плана в пределах рабочей смены

В едином информационном пространстве формируется двумерное ядро управления, базисом которого являются координаты времени и рабочих мест, отражающее преобразование материальных потоков деталей-сборочных единиц посредством технологических операций. В соответствии с текущим состоянием ядра управления для каждой службы формируется график выполнения работ, учитывающий её функциональные задачи и особенности. Для формирования графика (или расписания работ) используются конструктивные методы и алгоритмы, учитывающие особенности мелкосерийного производства. Примером такого алгоритма может служить алгоритм «Опадающие листья», разработанный В.Е. Лелюхиным и О.В. Колесниковой [10]. Сформированные таким образом планы работ всех служб предприятия являются сбалансированными и составленными в соответствии с графиком работы основного производства.

В случае возникновения отклонений от разработанного плана-графика производства выполняется его актуализация посредством оперативной корректировки, заключающейся во встраивании невыполненных операций в периоды простоев оборудования (рис. 3).

Ситуация, когда при изготовлении детали «Е» на рабочем месте *PM4* операция не выполнена, представлена на рис. 3. Вследствие этого не были выполнены последующие операции технологического процесса изготовления этой детали, а именно операции на рабочих местах *PM5* и *PM6* (на рис. 3 эти операции перечеркнуты). Оперативное выявление возникшего отклонения дает возможность разместить в графике эти операции позже. Наличие незанятых периодов времени в графике рабо-

ты оборудования в данном примере позволило добавить невыполненные операции в пределах рабочей смены (на рис. 3 выделены толстой линией) [11].

Использование предлагаемого подхода позволяет избежать операций перепланирования и связанных с ними негативных факторов.

Заключение

В процессе управления в мелкосерийном и единичном производстве серьезной проблемой является перепланирование, выполняемое как с целью ликвидации отклонений в случае невыполнения отдельных операций, так и в случае оптимизации графика в соответствии с новыми критериями. Это приводит к кардинальным изменениям всей структуры плана производства, что практически дезорганизует работу всех подразделений предприятия, включая само производство.

В статье рассмотрен подход, обеспечивающий решение задач оперативного управления для достаточно специфических производственных условий многономенклатурного производства.

Предложенный авторами подход может быть использован при разработке автоматизированной системы управления машиностроительным производством, учитывает особенности работы предприятий с мелкосерийным и единичным характером.

Список литературы

1. Demeulemeester Erik L., Herroelen Willy S. Project Scheduling: a Research Handbook. New York; Boston; Dordrecht; London; Moscow: Kluwer Acad. Publ., 2002. 685 p.
2. Лазарев А.А., Гафаров Е.Р. Теория расписаний. Задачи и алгоритмы. М.: Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова (МГУ), 2011. 222 с.
3. Liangliang Jin, Chaoyong Zhang, Xiaoyu Wen And George Gershom Christopher A neutrosophic number based me-

metic algorithm for the integrated process planning and scheduling problem with uncertain processing times. IEEE Access 2020. Vol.8. P. 96628–96648. [Electronic resource]. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9097863> (date of access: 18.03.2021).

4. Xiaoyu Wen, Xinyu Li, Liang Gao, Kanghong Wang and Hao Li Modified honey bees mating optimization algorithm for multiobjective uncertain integrated process planning and scheduling problem. International Journal of Advanced Robotic Systems. 2020. DOI: 10.1177/1729881420925236.

5. Liangliang Jin, Chaoyong Zhang, Xinyu Shao, Xudong Yang, Guangdong Tian A multi-objective memetic algorithm for integrated process planning and scheduling. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2016. Vol. 85. P. 1513–1528.

6. Lin Kong, Liming Wang, Fangyi Li, Geng Wang, Yan Fu, Jing Liu A New Sustainable Scheduling Method for Hybrid Flow-shop Subject to the Characteristics of Parallel Machines. IEEE Access. 2020. Vol.8. P. 79998–80009 [Electronic resource]. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9044336> (date of access: 18.03.2021).

7. Зак Ю.А. Построение расписаний работы сборочных конвейеров в мелко- и среднесерийном производстве // Проблемы управления. 2019. № 2. С. 54–59.

8. Сидоренко А.М., Хоботов Е.Н. Агрегирование при планировании работ на машиностроительных предприятиях // Известия РАН. Теория и системы управления. 2013. № 5. С. 132–144.

9. Лелюхин В.Е., Колесникова О.В. Цифровое информационное пространство управления производством морской техники // Морские интеллектуальные технологии. 2019. № 2 (44) Т. 2. С. 45–49.

10. Lelyukhin V., Kolesnikova O. Approach to Determining Order of Production of Parts and Assembly Units of Engineering Products in Production Process Planning. Procedia Engineering. 2017. Vol. 206. P. 1515–1521.

11. Лелюхин В.Е., Колесникова О.В., Кузьминова Т.А. Оперативная корректировка планов мелкосерийного и единичного производства с использованием механизма диспетчирования // Автоматизация в промышленности. 2016. № 12. С. 32–35.