

Колесникова О. В., Рупинец И. С.
O. V. Kolesnikova, I. S. Rupinets

ВЛИЯНИЕ СЕРИЙНОСТИ НА СТРАТЕГИЮ КОМПЛЕКСНОЙ АВТОМАТИЗАЦИИ УПРАВЛЕНИЯ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫМ ПРОИЗВОДСТВОМ

THE INFLUENCE OF SERIALITY ON THE STRATEGY OF COMPREHENSIVE AUTOMATION OF MACHINE-BUILDING PRODUCTION CONTROL

Колесникова Ольга Валерьевна – кандидат технических наук, доцент департамента компьютерно-интегрированных производственных систем Дальневосточного федерального университета (Россия, Владивосток); 690091, г. Владивосток, ул. Суханова, 8; тел. +7(914)652-97-80. E-mail: miis@mail.ru.

Olga V. Kolesnikova – PhD in Engineering, Assistant Professor, Far Eastern Federal University (Russia, Vladivostok); tel. +7(914)652-97-80. E-mail: miis@mail.ru.

Рупинец Игорь Сергеевич – аспирант Дальневосточного федерального университета (Россия, Владивосток); 690091, г. Владивосток, ул. Суханова, 8.

Igor S. Rupinets – Post-Graduate Student, Far Eastern Federal University (Russia, Vladivostok).

Аннотация. Современное машиностроение представляет собой обширную отрасль, включающую в себя предприятия, серийность выпускаемой продукции которых варьируется от массового характера до единичного. Наиболее изучены подходы к управлению в массовом производстве, что позволило в достаточной степени его автоматизировать. Менее изученные и существенно отличающиеся процессы планирования и управления в единичном производстве не позволяют использовать опыт автоматизации управления массовым производством. В статье авторы раскрывают особенности единичного производства и показывают сложные вопросы, мешающие автоматизации управления. Наиболее проблемными из них, по мнению авторов, являются: нерегулярность поступления заказов, неопределённость частоты их следования, пересечение материальных потоков изготовления детали-сборочных единиц, неопределённость длины цикла изготовления и зависимость его от текущей загрузки оборудования. Для уменьшения влияния этих негативных факторов в статье предложен и обоснован метод формирования плана загрузки оборудования по схеме «вперёд от даты запуска». Показаны и обсуждены результаты проведённых экспериментов при планировании по схемам «вперёд от даты запуска» и «назад от даты выпуска».

Summary. Modern mechanical engineering is a vast industry that includes enterprises, the serial production of which varies from a mass production to a single one. The most studied approaches to management in mass production, which made it possible to sufficiently automate it. Less studied and significantly different planning and management processes in make-to-order production do not allow using the experience of automation of mass production management. In the article, the authors reveal the features of a make-to-order production and show the complex issues that hinder the automation of management. The most problematic of them, according to the authors, are: irregularity in the receipt of orders, the uncertainty of the frequency of their repetition, the intersection of material flows for the manufacture of parts and assembly units, the uncertainty of the length of the manufacturing cycle and its dependence on the current load of equipment. To reduce the influence of these negative factors, the article proposes and substantiates a method for forming the equipment load plan according to the «ahead of the launch date» scheme. Shown and discussed the results of the experiments carried out when planning according to the schemes «forward from the launch date» and «back from the release date».

Ключевые слова: автоматизация управления, интегрированное планирование, мелкосерийное и единичное производство, график работы оборудования, машиностроительное производство.

Key words: automation management, integrated planning, small-scale production, equipment work schedule, engineering production.

Введение. В современных условиях жизненно важной задачей становится управление предприятием. Эта задача касается любого предприятия, любой отрасли. Во многих отраслях вопросы управления решаются с помощью автоматизированных информационных систем, реализующих основные задачи и принципы управления, характерные для данной отрасли.

В свою очередь задачу управления можно представить в виде совокупности двух задач: планирования и регулирования. При этом, как известно, задача планирования определяет основные шаги для достижения цели, а регулирование помогает нивелировать возникающие отклонения на этом пути.

Машиностроение является одной из сложнейших отраслей для планирования и управления. Сложность задач планирования связана с большими объёмами информации о структуре и составе изделия, технологических процессах изготовления, а также с большой размерностью задачи составления расписания для распределения детали-операций по рабочим местам.

Задача оперативного планирования для дискретного машиностроительного производства относится к общей задаче теории расписаний, записанной следующим образом:

$$n|m|G|F_{\max},$$

а именно упорядочить n работ в произвольной системе из m машин так, чтобы минимизировать максимальную длительность прохождения работы [1].

Задача относится к классу экстремальных комбинаторных задач и является одной из сложнейших оптимизационных задач. Интерес к её математической формулировке и решению вызвал значительное число публикаций, однако, несмотря на это, общие алгоритмы поиска оптимальных решений при числе станков, соответствующем реальным предприятиям, не найдены [1; 2; 3].

Обзор исследований в области планирования производства. Несмотря на сложность задач планирования производства, их востребованность приводит к появлению новых постановок задач, учитывающих какие-либо особенности и ограничения методов решения, позволяющих найти допустимые или оптимальные решения по установленным критериям.

При разработке автоматизированных систем управления актуальной темой исследований многих авторов является решение проблемы комплексирования (объединения) двух компонент планирования: интегрированное планирование и составление графиков работы оборудования. В качестве целевых функций рассматриваются: максимизация загрузки отдельных рабочих мест, максимизация общей загрузки всех рабочих мест предприятия, минимизация времени транспортировки и др. В опубликованных работах отмечаются сложность постановки и решения задач планирования, возникающие проблемы при разработке моделей, приближённых к реальному производству.

Для решения задач планирования (IPPS) разработаны, например, такие алгоритмы: SD-NSGA-II, использующий недоминирующий генетический алгоритм сортировки с самоадаптивным декодированием [4]; алгоритм на основе нейтрософного числа [5]; многоцелевой алгоритм MOEA [6]; гибридный алгоритм оптимизации НВМО, который сочетает в себе алгоритм НВМО и поиск переменного окружения (VNS) с критерием продолжительности выдержки [7]; модифицированный алгоритм оптимизации НВМО для планирования процессов с неопределённым временем обработки и нечётким сроком выполнения [8]; гибридный алгоритм для решения задачи загрузки оборудования в обратной области планирования [9].

Особенно в публикациях отмечается сложность задач планирования многономенклатурного мелкосерийного машиностроительного производства. В статьях приводятся попытки учёта таких характеристик производства, как неопределённость времени обработки [5; 8], максимальная рабочая нагрузка станка (MMW) и общая рабочая нагрузка станков (TWM) [6], характеристики отдельных машин, оценки их мощности, эффективности производства и стоимости параллельных машин [10].

Проблемы автоматизации планирования мелкосерийного многономенклатурного производства решаются также российскими исследователями, в частности профессором Е. Б. Фроловым [11; 12], авторами статей [13; 14].

Несмотря на большое количество работ по данной тематике, многие вопросы остаются неразрешёнными. Эффективность планирования многономенклатурного мелкосерийного машиностроительного производства пока не достигает приемлемого уровня. Для разработки качественных алгоритмов и подходов необходимо провести анализ особенностей машиностроительного производства, связанных с изменением серийности.

В статье излагаются результаты исследований влияния серийности на подходы к организации и управлению производством, приводятся различия в планировании и обосновывается необходимость разработки и использования алгоритмов автоматизации планирования в зависимости от характера серийности производства.

Особенности планирования мелкосерийного и единичного производства. Наиболее проработаны алгоритмы и принципы планирования в массовом и крупносерийном производстве. В связи с этим большое количество разработок представляют собой заимствование этих алгоритмов и принципов и применение их в мелкосерийном и единичном производстве. Однако оказывается, что такой подход себя не оправдывает, проверенные алгоритмы не работают или работают крайне неэффективно.

Для анализа отличий планирования массового/крупносерийного и единичного/мелкосерийного типов производства рассмотрим рис. 1. На рисунке используются следующие обозначения: ТП – технологический процесс, представленный последовательностью детали-операций в виде графа цепи, вершины которого обозначены <номер ТП>. <номер операции>, R – рабочие места.

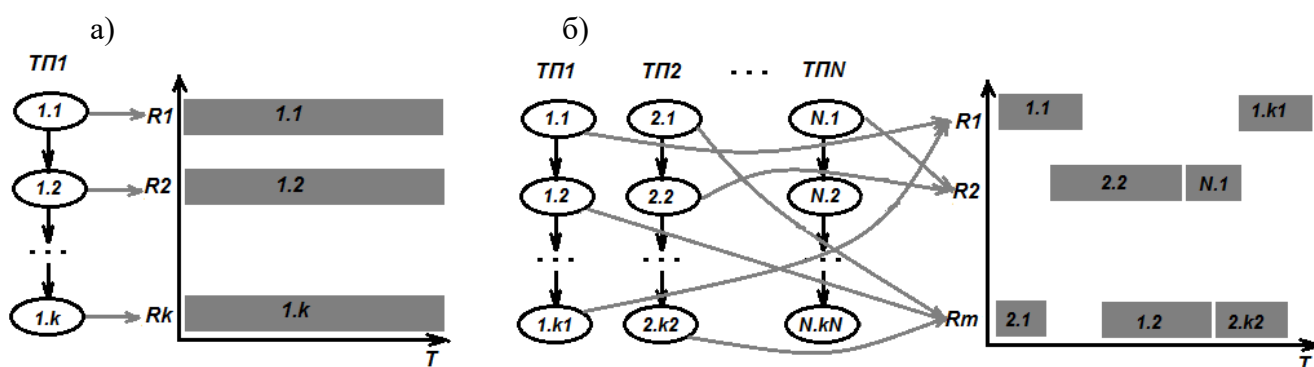


Рис. 1. Схема формирования плана-графика загрузки рабочих мест:
а – в массовом производстве; б – в мелкосерийном и единичном производстве

На рис. 1, а представлена схема расстановки операций при формировании плана-графика загрузки рабочих мест в массовом производстве. При таком характере производства коэффициент закрепления оборудования практически равен единице, что означает закрепление операции за определённым рабочим местом и, соответственно, выполнение этим рабочим местом только одной операции. На рис. 1, а показано, что существует технологический процесс ТП1 из некоторого количества операций, каждая из которых выполняется на своём рабочем месте. В этом случае вполне понятны сроки изготовления изделия, которые складываются из последовательных периодов выполнения детали-операций самой длинной цепи (последовательности детали-операций) в структуре изделия:

$$T = \sum t_i,$$

где T – период изготовления изделия; t_i – период выполнения i -й детали-операции.

Таким образом, материальный поток детали-сборочных единиц изделия в массовом производстве представляет собой параллельные совокупности последовательных потоков изготовления отдельных детали-сборочных единиц. Оптимизация потоков в данном случае выполнена на уровне организации производства. Поэтому построение моделей автоматизации планирования, по сути, сводится к решению систем уравнения в непрерывном метрическом пространстве.

Иная ситуация складывается в мелкосерийном и единичном производстве (см. рис. 1, б). На предприятии имеется m универсальных рабочих мест, каждое из которых может использоваться для выполнения определённого 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. Тогда время выполнения операции при изготовлении партии деталей i -го типа определяется по формуле

$$t_i = t_{пзи} + \sum t_{штi},$$

где $t_{пзи}$ – подготовительно-заключительное время i -й операции; $t_{штi}$ – штучное время выполнения i -й операции для одной детали в партии.

Таким образом, особенностью мелкосерийного и единичного производства является увеличение цикла изготовления изделия за счёт необходимости частой переналадки оборудования, что добавляет значительную долю подготовительно-заключительного времени в периоде времени изготовления изделия.

В соответствии с серийностью рассматриваемого производства размер партии небольшой, а довольно часто равен единице. Исходя из этого за рабочую смену на одном рабочем месте можно выполнить несколько детали-операций, относящихся к разным деталям и изделиям.

При загрузке рабочего места детали-операциями, относящимися к различным деталям, можно отметить, что периоды времени выполнения этих операций существенно отличаются. Причём набор выполняемых операций зависит от того, какие изделия изготавливаются в текущий момент на предприятии. Набор деталей и операций их изготовления складывается из выполняемых предприятием заказов. Соответственно, чем большее количество различных заказов и изделий производит предприятие, тем больше различных возможных комбинаций деталей и детали-операций будет размещаться на одном рабочем месте.

Обозначим $I = \{I^1, I^2, \dots, I^n\}$ множество изделий, изготавливаемых предприятием в течение года. Каждое изделие состоит из определённого набора деталей, т.е. изделие можно представить в виде множества деталей $I^k = \{d^k_1, d^k_2, \dots, d^k_{mk}\}$. Упростим задачу, предположив, что для изготовления детали требуется выполнение только одной детали-операции. Тогда можно сказать, что изготовлению каждой детали соответствует период времени $t(d^k_i)$. Пусть в первом месяце, например январе, предприятие изготавливало изделия I^1 и I^2 . Некоторое рабочее место R_j было занято выполнением операций по изготовлению деталей данных изделий, и его загрузка определялась суммой периодов времени выполнения соответствующих детали-операций $T_{Rj} = \sum t(d^1_i) + \sum t(d^2_i)$. По окончании изготовления изделий можно рассчитать срок изготовления изделия. Например, срок изготовления изделия I^1 будет определяться суммой периодов выполнения операций по изготовлению этого изделия $\sum t(d^1_i)$ и периодов ожидания выполнения операций, связанных с занятостью рабочих мест изготовлением деталей другого изделия $\sum t(p^1_i)$:

$$T(I^1) = \sum t(d^1_i) + \sum t(p^1_i).$$

Если учесть многономенклатурность мелкосерийного и единичного производства, в следующем месяце предприятие будет занято изготовлением других изделий. Предположим, что во втором месяце изготавливаются изделия I^1 и I^3 . Занятость рабочих мест будет определяться выполнением операций по изготовлению этих изделий $T_{Rj} = \sum t(d^1_i) + \sum t(d^3_i)$. Срок изготовления изделия I^1 в этом месяце будет также складываться из периодов выполнения операций по изготовле-

нию изделия $\sum t(d^1_i)$ и периодов ожидания выполнения операций, связанных с занятостью рабочих мест изготовлением деталей другого изделия $\sum t(p^1_i)$:

$$T^*(I^1) = \sum t(d^1_i) + \sum t(p^1_i).$$

Необходимо заметить, что во втором месяце изготавливалось другое изделие I^2 и периоды выполнения операций по изготовлению его деталей отличаются от деталей изделия I^1 . Таким образом, сроки изготовления изделия I^1 в первом и втором месяце будут различны:

$$T(I^1) \neq T^*(I^1).$$

Отличие сроков изготовления заключается в разности периодов ожидания выполнения операции на рабочем месте:

$$\Delta T = T(I^1) - T^*(I^1) = \sum t(p^1_i) - \sum t(p^1_i).$$

Таким образом, одной из важных особенностей мелкосерийного и единичного производства является нестабильность цикла изготовления изделия и зависимость его от текущей загрузки производственных мощностей.

Другой отличительной особенностью мелкосерийного и единичного производства является невозможность полной загрузки производственных мощностей. На рис. 1, б показаны разрывы между операциями, соответствующие периодам простоя оборудования. Простои появляются в связи с необходимостью выдерживания последовательности выполнения операций технологического процесса, а также порядка изготовления детали-сборочных единиц, соответствующего структуре изделия.

Например, на рис. 1, б 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 другой детали по технологическому процессу ТП2. Но период времени выполнения операции 2.1 меньше периода времени простоя оборудования. В результате период простоя занимает не полностью. Таким образом, периоды простоя оборудования накапливаются, не позволяя полностью использовать имеющиеся производственные мощности.

Приведённые выше особенности мелкосерийного и единичного производства, связанные с нерегулярностью поступления заказов, неопределённостью частоты их следования, дискретностью выполнения операций, вносят в материальный поток изготавливаемых изделий элементы стохастичности. Общий материальный поток изготавливаемых изделий и выполняемых заказов разделяется на совокупность пересекающихся потоков одновременного изготовления различных детали-сборочных единиц. Исходя из этого задачей автоматизации планирования становится управление совокупностью материальных потоков с регулированием их взаимодействия, исключением коллизий и конфликтов, т.е. фактически синтез многоконтурной системы подчинённого регулирования. В качестве контуров регулирования здесь могут рассматриваться: контур управления изготовлением отдельной детали-сборочной единицы, контур управления работой отдельного рабочего места, контур управления группой детали-сборочных единиц, входящих в изделие, контур управления группой рабочих мест предприятия.

Анализ особенностей мелкосерийного и единичного производства показал, что для его планирования необходимо существенно перерабатывать методы, используемые в массовом производстве, а также разрабатывать новые принципы и схемы формирования графиков загрузки рабочих мест.

Метод планирования по схеме «вперёд от даты запуска». В современных информационных системах планирования составление графика загрузки рабочих мест осуществляется по аналогии с формированием плана в массовом производстве, т.е. от заданной даты выполнения заказа по схеме «назад от даты выпуска». Хорошо зарекомендовавший себя метод в массовом производстве

оказывается неприменим в мелкосерийном из-за неопределённости производственного цикла изготовления, зависящего от текущей загрузки производственных мощностей.

В связи с этим авторы считают в условиях многономенклатурного мелкосерийного и единичного производства более целесообразным использование схемы формирования графика загрузки от заданной даты вперёд по шкале времени, т.е. «вперёд от даты запуска» (см. рис. 2).

Расстановка операций по рабочим местам начинается с висячих вершин (листьев) структуры изделия в направлении корня [15]. Операции расставляются на указанные в технологическом процессе рабочие места с учётом их занятости. Продвигаясь по временной шкале вперёд, в будущее, производится расстановка всех детали-операций с одновременным расчётом срока изготовления изделия. В данном случае дата выполнения заказа рассчитывается по времени окончания выполнения последней детали-операции. При этом план формируется гарантировано (за один проход), не требуется перепланирования.

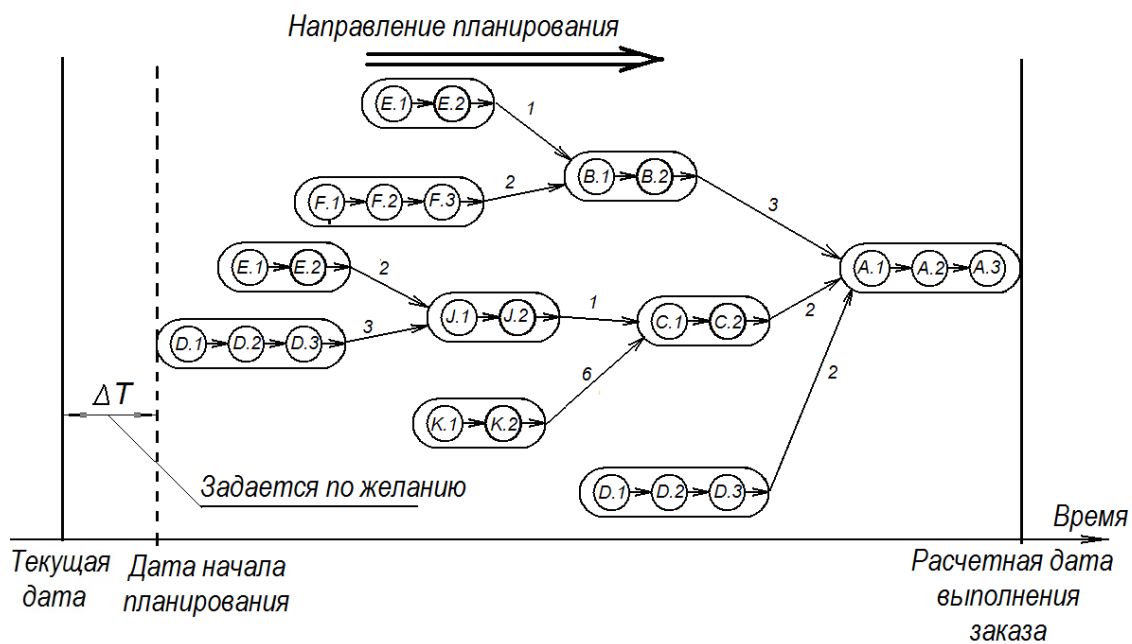


Рис. 2. Схема планирования производства изделия «вперёд от даты запуска»

Постановка задачи может быть выполнена в виде задачи линейного программирования. Требуется найти длину расписания f_p , которая определяется как максимальная длина пути изготовления по графу структуры изделия:

$$f_p = \max_{i=1, \dots, n} f_{p_{v_i}},$$

где $f_{p_{v_j}} = \max_{i=1, \dots, l} f_{v_j}^{oi}$ – максимальная длина пути изготовления множества детали-сборочных единиц v_1, \dots, v_l ; $f_{p_{v_i}}$ – момент окончания изготовления детали-сборочной единицы (вершины) v_i в графе структуры изделия; $f_{v_j}^{oi} = p_{v_j}^{oi} + \sum_{j=1}^z d_j^{rk}$ – момент окончания выполнения технологической операции.

В качестве алгоритмов расстановки операций по рабочим местам в предлагаемой схеме планирования могут использоваться различные алгоритмы. Одним из них является алгоритм «Опадающие листья», разработанный авторами статьи. Алгоритм заключается в определении порядка изготовления детали-сборочных единиц на основе деления дерева структуры изделия на слои и затем ранжирования детали-сборочных единиц слоя по длительности пути их изготовления [16].

Сопоставление применения схем планирования в мелкосерийном и единичном производстве. Методика применения схем планирования машиностроительного производства существенно зависит от серийности и объёма номенклатуры изготавливаемых изделий. Применение схем планирования «вперёд от даты запуска» и «назад от даты выпуска» имеет свои особенности. Использование схемы «назад от даты выпуска» предполагает задание даты выпуска готового изделия или исполнения заказа, и затем начиная с этой даты обратным отсчётом по шкале времени производится расстановка детали-операций изготовления изделия в направлении от корня дерева структуры изделия к листьям.

В мелкосерийном и единичном производстве, как указывалось выше, изготавливаются различные изделия малой серийности, что не позволяет определить срок изготовления конкретного заказа. Исходя из этого первой проблемой при применении схемы планирования «назад от даты выпуска» является определение даты выпуска или срока исполнения заказа.

Обычно эта дата определяется примерно исходя из прошлого опыта и по принципу «чем больше срок – тем лучше». При этом какие-либо расчёты произвести практически невозможно.

Существующие методы расчёта срока изготовления изделия разработаны для массового и крупносерийного производства. Попытка их применения в мелкосерийном и единичном производстве привела к следующим результатам.

В проведённом эксперименте рассматривалось предприятие, имеющее некоторую загрузку производственных мощностей. Требуется сформировать план-график изготовления некоторого изделия Z, изображённого в виде дерева его структуры (см. рис. 3).

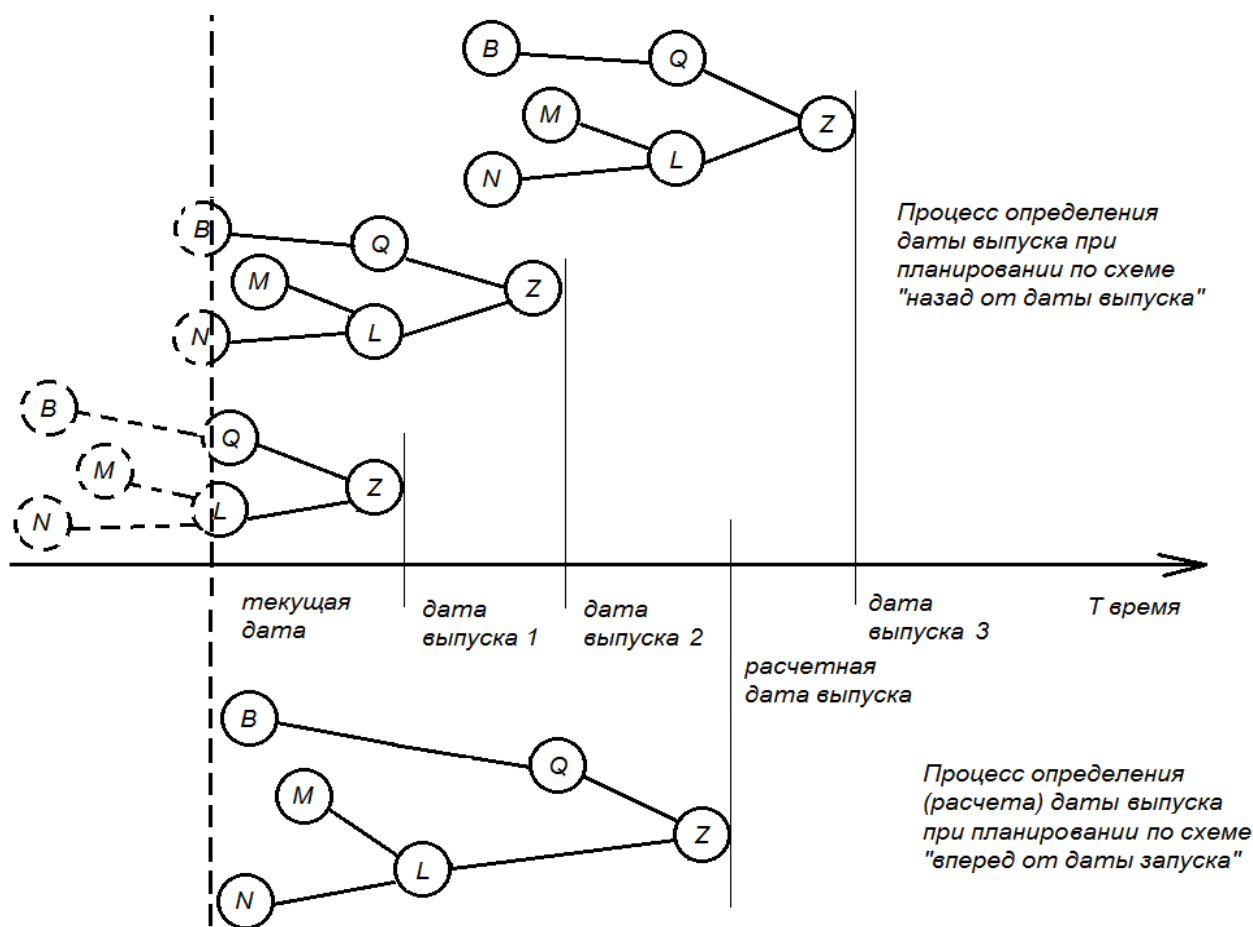


Рис. 3. Процесс определения даты выпуска при планировании по схемам «назад от даты выпуска» и «вперёд от даты запуска»

Расчёт срока изготовления изделия можно осуществить, используя метод определения срока изготовления самой длинной цепи в структуре изделия. На рис. 3 таким методом определена «Дата выпуска 1». При составлении графика загрузки рабочих мест оказалось, что часть из них занята выполнением других деталей-операций, что привело к сдвигу графика. В результате составить план не удалось, так как была перейдена граница текущей даты. Для составления нового плана-графика вновь возник вопрос об определении даты выпуска.

Вторая проблема, возникающая при планировании по схеме «назад от даты выпуска» заключается в решении вопроса: «Насколько надо сдвинуть дату выпуска, чтобы план удалось сформировать»? «Дата выпуска 2» на рис. 3 была определена добавлением нормативного периода времени на изготовление не вошедших в план деталей (B, M, N). В результате второго цикла планирования также график сформировать не удалось (см. рис. 3).

Дальнейшее увеличение срока изготовления («Дата выпуска 3») позволило получить план, однако изготовление изделия начинается значительно позже текущей даты. Незанятый период времени от текущей даты до начала изготовления изделия (см. рис. 3) снижает возможную загрузку производственных мощностей, что приводит к появлению длительных периодов простоя оборудования и неравномерности загрузки.

Использование при разработке автоматизированных систем схемы планирования «вперёд от даты запуска» позволяет начать формирование графика с установленной даты, используя периоды простоя оборудования, встраивать детали-операции в общий план загрузки производственных мощностей, получить план за один проход и рассчитать точную дату изготовления изделия.

Заключение. В статье рассмотрены вопросы влияния серийности производства на стратегию формирования планов производства. Обоснован подход при планировании мелкосерийного и единичного производства, заключающийся в использовании алгоритмов и методов с применением схемы «вперёд от даты запуска».

Как показано в статье, для машиностроительных предприятий с мелкосерийным и единичным характером производства следует принять концепцию планирования «вперёд от даты запуска», позволяющую сократить количество итераций и существенно снизить объёмы обрабатываемой информации, что обеспечит приемлемо допустимое время формирования результатов автоматизированной системой.

Кроме того, использование описанного подхода при разработке автоматизированных систем планирования и управления мелкосерийным и единичным производством позволит учесть его особенности, связанные с серийностью, а также повысить эффективность разрабатываемых планов и управления производством в целом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Конвей, Р. В. Теория расписаний / Р. В. Конвей, В. Л. Максвелл, Л. В. Миллер. – М.: Главная редакция физико-математической литературы изд-ва «Наука», 1975. – 360 с.
2. Красовский, Д. В. Алгоритмы решения минимаксной задачи составления расписания / Д. В. Красовский, М. Г. Фуругян // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2008. – № 5. – С. 69-74.
3. Лазарев, А. А. Методы и алгоритмы решения задач теории расписаний для одного и нескольких приборов и их применение для задач комбинаторной оптимизации: автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук: 01.01.09 / Лазарев Александр Алексеевич. – М., 2007. – 37 с.
4. Li Ba, Mingshun Yang, Xinqin Gao, Yong Liu, Zhoupeng Han, Erbao Xu and Yan Li A Mathematical Model and Self-Adaptive NSGA-II for a Multiobjective IPPS Problem Subject to Delivery. Time Mathematical Problems in Engineering. <https://doi.org/10.1155/2020/6012737>.
5. Liangliang Jin, Chaoyong Zhang, Xiaoyu Wen And George Gershom Christopher A neutrosophic number based memetic algorithm for the integrated process planning and scheduling problem with uncertain processing times. DOI 10.1109/ACCESS.2020.2996496, IEEE Access.
6. Liangliang Jin, Chaoyong Zhang, Xinyu Shao, Xudong Yang, Guangdong Tian A multi-objective memetic algorithm for integrated process planning and scheduling. DOI 10.1007/s00170-015-8037-7, Springer-Verlag London 2015.

7. Liangliang Jin, Chaoyong Zhang, Xinyu Shao An effective hybrid honey bee mating optimization algorithm for integrated process planning and scheduling problems. DOI 10.1007/s00170-015-7069-3, Springer-Verlag London 2015.
8. 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, May-June 2020. <https://doi.org/10.1177/1729881420925236>.
9. Jianhui Mou, Liang Gao, Xinyu Li, Quanke Pan, Jiancai Mu Multi-objective inverse scheduling optimization of single-machine shop system with uncertain due-dates and processing times. DOI 10.1007/s10586-016-0717-z Springer Science+Business Media New York 2017.
10. 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. DOI 10.1109/ACCESS.2020.2982570, IEEE Access.
11. Соломенцев, Ю. М. Оперативное планирование и управление машиностроительным производством на основе исполнительных производственных систем / Ю. М. Соломенцев, Е. Б. Фролов, А. Н. Феофанов // Вестник машиностроения. – 2017. – № 8. – С. 41-43.
12. Соломенцев, Ю. М. Современные методы повышения эффективности машиностроительных производств / Ю. М. Соломенцев, Е. Б. Фролов // Технология машиностроения. – 2015. – № 8. – С. 54-58.
13. Lelyukhin V. E., Kolesnikova O. V. Approach to Determining Order of Production of Parts and Assembly Units of Engineering Products in Production Process Planning. International Conference on Industrial Engineering, ICIE 2017. Procedia Engineering 206 (2017) 1515–1521. DOI 10.1016/j.proeng.2017.10.671.
14. V. E. Lelyukhin and O. V. Kolesnikova Strategy for the Formation of Production Plans for Small-Serial Machine-Building Enterprises, 2019 International Science and Technology Conference «EastConf», Vladivostok, Russia, 2019, pp. 1-6. doi: 10.1109/EastConf.2019.8725334.
15. Лелюхин, В. Е. Планирование мелкосерийного производства с использованием метода «вперёд от даты запуска» / В. Е. Лелюхин, О. В. Колесникова // Информатика и системы управления. – 2018. – № 2 (56). – С. 122-130.
16. Лелюхин, В. Е. Алгоритм планирования дискретного машиностроительного производства «Опадающие листья» / В. Е. Лелюхин, О. В. Колесникова // Автоматизация. Современные технологии. – 2016. – № 1. – С. 15-19.