

УДК 621.791.03-52

ФОРМАЛИЗАЦИЯ ЗАДАЧИ СОСТАВЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНОГО РАСПИСАНИЯ РАБОТЫ МЕХАНООБРАБАТЫВАЮЩЕЙ СИСТЕМЫ В МНОГОНОМЕНКЛАТУРНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

А. А. Иванов, П. Ю. Бочкарев

Саратовский государственный технический университет

Дается содержательная постановка и формализация задачи планирования в многономенклатурной производственной системе механообработки. Рассматривается общая математическая модель рассматриваемой задачи. Описываются критерии оптимальности получаемых расписаний. Предлагается новый Парето-оптимальный метод решения на базе метода модельной «закалки».

Informative definition and formalization of the scheduling problem in the multinomenclature industrial system of machining process is given. A general mathematical model of the problem is considered. Optimality criteria of schedules are described. A new Pareto-optimal method based on Simulated annealing is proposed.

Ключевые слова: многокритериальное планирование; планирование производства; многономенклатурное производство механообработки; реализация технологических процессов; автоматизированное планирование.

Keywords: job shop; multicriteria scheduling; production scheduling; multinomenclature production of machining process; implementation of technological process; automated manufacturing planning.

Повышение эффективности производственных процессов – задача сложная и многоплановая. Ее решение связано с совершенствованием организации труда, применением научно обоснованных методов управления производством и внедрением автоматизированных систем управления на основе широкого использования современных средств вычислительной техники и последних достижений в области разработки программно-алгоритмического обеспечения.

Одним из наиболее важных методов повышения эффективности производства является уменьшение времени производственного цикла, или, другими словами, уменьшение времени выполнения заказа. Уменьшения времени производственного цикла можно добиться разными путями, например, повышением производительности оборудования, снижением времени на подготовку производства. Однако не оптимально составленное расписание работы станочного оборудования может свести к нулю эффект от применения остальных методов, поэтому составление оптимального плана работы оборудования является одним из ключевых моментов повышения эффективности производства.

Для серийного и мелкосерийного производства задача составления оптимального расписания является наиболее актуальной [1, 2]. При таком типе производства сравнительно быстро прекращается изготовление одних видов выпускаемой продукции и налаживается освоение новых. Это приводит к увеличению номенклатуры изделий, и, как следствие, большую роль в составлении расписаний начинает играть время переналадки оборудования. Характерными особенностями таких производственных систем также являются: работа по заказам на большинстве предприятий независимо от ведомственной подчиненности и формы собственности; установленные сроки изготовления; возможность остановки работы производства для смены выполняемого заказа или др.; выделение приоритетных заказов из общего числа, с возможностью их обработки без прерываний.

Составление расписания для такого типа производства является сложной задачей. Ее выполнение для реального производства состоит не просто в создании адекватной модели производства, учитывающей все вышеперечисленные характеристики, и создании методов нахождения оптимального расписания для полученной модели. Важно также создание целой системы планирования, позволяющей получать все исходные данные о производственной системе (ПС) и имеющихся заготовках, учитывающей реальное состояние производственной ситуации и способной анализировать все эти данные для создания оптимальных технологических процессов (ТП) для каждой детали (включающих маршрут

обработки, время обработки, время переналадки в созданном маршруте). Из полученных таким образом ТП должно строиться расписание работы станочного оборудования. Такой подход позволит главным образом учитывать при планировании прерывания работы производства и практически без задержек создавать новое расписание для новой производственной ситуации.

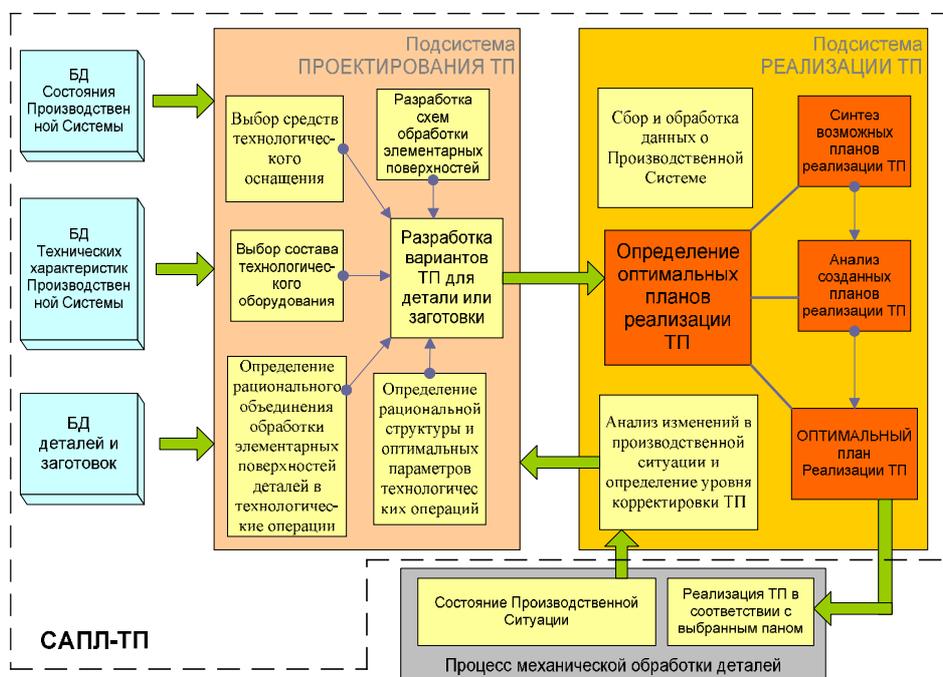
Для решения поставленной задачи авторами была начата работа по созданию системы автоматизированного планирования технологических процессов (САПЛ-ТП). САПЛ-ТП полностью удовлетворяет требованиям к указанной выше системе планирования [2].

На рисунке представлена организационная структура создаваемой системы планирования, а также указаны все внутренние и внешние информационные потоки САПЛ-ТП. Внутри системы предполагается функциональное деление на подсистемы «Проектирования ТП» и «Реализации ТП». Особенностью указанной системы является также возможность учета влияния изменений производственной ситуации.

В рамках действий, отнесенных к подсистеме «Проектирования ТП», выполняется оценка конструкторско-технологических особенностей деталей и формирование рационального варианта их изготовления, обеспечивающих возможность изготовления заданной номенклатуры деталей в конкретной производственной системе.

Подсистема «Реализации ТП» осуществляет (I) Сбор и обработку данных о Производственной системе, (II) Анализ изменений в Производственной Ситуации и (III) Определение оптимальных планов реализации ТП. В свою очередь, как видно из рисунка, (III) делится на три подзадачи: (а) Синтез и (б) Анализ возможных планов реализации технологических процессов, а также (в) Выбора Оптимального плана реализации технологического процесса.

Основной задачей подсистемы «Реализации ТП» является определение оптимального плана реализации ТП (оптимального расписания работы механообрабатывающего оборудования) на основе полной информации о технологическом процессе обработки каждой детали, поступающей из подсистемы «Проектирования ТП». Таким образом, процесс построения расписания работы механообрабатывающего оборудования становится полностью автоматизированным.



Организационная структура САПЛ-ТП

Вернемся к вопросу создания самого расписания работы станочного оборудования, или, если говорить с позиций САПЛ-ТП, к вопросу реализации ТП.

Для реализации ТП необходимо формализовать исходную задачу, а для этого, в свою очередь, необходимо выполнить постановку задачи.

Исходя из указанных выше характеристик многономенклатурного производства, можно сделать вывод, что оценка качества плана реализации ТП для такого производства должна определяться основным критерием: общее время обработки всех партий деталей на станках (затраты на переналадки станков учитываются в этом критерии). Учитывая применение САПЛ-ТП, предполагается, что в начале периода планирования известен перечень деталей, подлежащих обработке. Детали могут быть сгруппированы в партии. Время обработки партии равно сумме времен обработки всех деталей в партии. Маршрут обработки детали представляет собой совокупность последовательных операций, выполнение которых осуществляется на назначенных станках. Единицы оборудования могут быть объединены в группы идентичных станков. Каждая деталь для своего выполнения должна пройти обработку последовательно всех операций, причем для каждой детали количество операций может быть различным. Прерывания в обработке партий деталей для остановки или передаче на другой станок не допускаются. Все детали доступны для обработки в течение всего периода обработки. Все станки также доступны для использования, однако в случае остановки некоторые станки могут быть исключены из расписания.

Время переналадки станка зависит как от текущей детали, так и от ее непосредственного предшественника на данном станке. Время транспортировки детали между станками предполагается учтенным во времени обработки. Устройства загрузки и выгрузки предполагаются бесконечной вместительности. Два последних требования предполагается включить в рассмотрение в дальнейших статьях авторов. Множество всех партий деталей разбито на группы с одинаковым приоритетом обработки. Требуется построить такое расписание выполнения работ на станках, чтобы суммарный критерий был минимальным при выполнении всех перечисленных выше требований. На производстве возможны остановки оборудования, однако эта проблема решается за счет использования САПЛ-ТП, и при формализации задачи не рассматривается.

После такой постановки задачи реализации ТП можно сказать, что в качестве формализации можно взять описание так называемой «задачи планирования в цеху» (в иностранной литературе Job Shop Scheduling Problem) с мультистадийной обработкой деталей и неидентичными маршрутами обработок [3]. В литературе, посвященной теории расписаний, эта модель является стандартной задачей планирования.

Далее приведем описание модели задачи Job Shop (JS), из которого станет ясно, почему данная модель «удобно» подходит в качестве основы для формализации поставленной задачи.

В задаче JS заданное число работ должно быть обработано некоторым количеством процессоров. Все работы и процессоры доступны начиная с нулевого момента. Каждая работа содержит цепь (цепь – это граф последовательно расположенных узлов) операций, которые должны быть обработаны в заданном порядке. Каждая операция должна быть обработана назначенным ей процессором без прерываний. Время обработки любой операции детерминировано, не зависит от остальных времен обработки и известно заранее. Времена подготовки/завершения обработки, переналадки и транспортировки входят во время обработки. Устройства загрузки и выгрузки неограниченны в объеме. Каждый процессор может обработать только одну операцию в момент времени. Любое допустимое расписание определяет время начала каждой операции таким образом, что не образуются временных перекрытий любых двух операций на одном станке и любых двух операций в маршруте обработки. Цель состоит в нахождении допустимого расписания, минимизирующего время окончания всех работ, которое в иностранной литературе называется makespan.

Однако, как видно из приведенного выше описания типовой задачи JS, она не полностью удовлетворяет указанной постановке задачи, поэтому нашей целью стало расширение классической модели JS для корректного описания многономенклатурной производственной среды механообработки.

Классическая задача JS использует некоторые допущения [4], которые можно классифицировать следующим образом:

Допущения по деталям (партиям деталей):

J1. Каждая деталь начинает обрабатываться в начальный момент расчетного периода. Каждая деталь доступна для обработки в течение всего этого периода.

J2. Существуют ограничения предшествования между любыми двумя операциями одной детали (иначе говоря, у каждой детали есть свой фиксированный маршрут обработки, которому она должна следовать), но не между любыми двумя операциями разных деталей.

J3. Маршрут обработки каждой детали определяется очередностью ее операций и назначенными станками для каждой операции. Маршруты обработки деталей могут не совпадать.

J4. Каждая операция имеет конечное положительное и детерминированное время обработки, которое включает в себя время транспортировки детали и время установки (если таковое имеется).

J5. Для деталей не предусмотрено директивных сроков.

Допущения для станков:

M1. Каждый станок непрерывно доступен в течение всего времени планирования без поломок и техобслуживания.

Допущения, связанные с процессом обработки:

P1. Все детали должны быть обработаны.

P2. Каждый станок обрабатывает не более одной детали (операции) в каждый момент времени.

P3. Каждая операция, однажды начавшись, должна быть закончена без прерываний.

P4. Каждый станок обладает бесконечными буферами загрузки/выгрузки деталей.

P5. Каждая деталь (партия деталей) может обрабатываться только одним станком в каждый момент времени.

P6. Обработка детали должна точно соответствовать заданному маршруту.

P7. Время переключения между обработкой двух операций следующих друг за другом на одном станке равно 0.

Теперь становится очевидным: чтобы расширить классическую модель до модели реальной многономенклатурной производственной системы механообработки с целью адекватного отображения в ней процесса обработки, нам необходимо ослабить допущения J2 (для учета приоритета некоторых партий деталей), J5 (для учета директивных сроков в модели), P5 (для обработки партии деталей группой станков) и P7 (для учета переналадок).

Чтобы знать, как расширить задачу job shop, вначале необходимо привести математическую модель самой задачи job shop [4].

Пусть Ψ есть множество из n деталей, M – множество из m станков, а I – множество из o операций. Деталь $J \in \Psi$ состоит из множества операций, которые необходимо обработать в заданном порядке. По этой причине, $J \subseteq I$, а Ψ это часть I . Для любой детали J , индекс ее операции в порядке обработки деталей определяется как $J_1, \mathbf{K}, J_{|J|}$. Деталь операции $i \in I$ обозначим как J^i . Определим множество пар последовательных (следовательно, упорядоченных) операций детали J как $A_J = \{(i, j) : J^i = J^j = J, i = J_r, j = J_{r+1}, 1 \leq r \leq |J|\}$. Для каждой пары $(i, j) \in A_J$, i – это непосредственная операция-предшественник для операции j одной детали, поэтому обозначим $i = JP(j)$, а j – операция-наследник операции i , и $j = JP(i)$. Обозначим через s и t две фиктивные операции нулевой длительности, где s – начинается до, а t – после всех остальных операций. Каждой операции $i \in I$ назначается определенный станок $m(i) \in M$; время обработки операции i на этом станке $p_i > 0$. Обозначим через I_k множество операций назначенных станку k согласно m , а через B конфликтное множество всех неупорядоченных пар (i, j) операций i и j , обрабатываемых на одном станке, т.е. $B = \{(i, j) : i, j \in I_k, i \neq j, k \in M\}$. Каждая операция обрабатывается только одним станком, назначенным ей, а каждый станок может обрабатывать не более одной операции одновременно. Не допускается прерываний ни для одной операции. Все

величины времен обработок положительны; остальные величины не отрицательны. Все детали и станки непрерывно доступны начиная с нулевого момента. Целью является нахождение допустимого расписания, которое соответствует порядку обработки каждой детали и возможности каждого станка и минимизирует makespan.

Математическая модель формализованной классической задачи job shop представляется моделью Манна, использующей переменную выбора очередности y_{ij} для любых двух операций, обрабатываемых на одном станке, т.е. $i, j \in I, (i, j) \in B$:

$$y_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если } i \text{ предшествует } j \\ 0, & \text{если наоборот} \end{cases}$$

Минимизировать x_t при условии

$$x_j - x_i \geq p_i \quad \forall (i, j) \in A_J, J \in \Psi \quad (1)$$

$$x_j + H(1 - y_{ij}) - x_i \geq p_i \quad \forall (i, j) \in B \quad (2)$$

$$x_j + Hy_{ij} - x_i \geq p_i \quad \forall (i, j) \in B \quad (3)$$

$$x_t - x_i \geq p_i \quad \forall i \in I \quad (4)$$

$$y_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall (i, j) \in B \quad (5)$$

$$x_i \geq 0 \quad \forall i \in I \quad (6)$$

$$x_t \geq 0 \quad (7)$$

$$x_t \geq 0 \quad (8)$$

Расширение модели Манна для задачи JS с учетом зависимых от очередности времен переналадок является довольно прямым. Пусть $p_{ij}^s \geq 0$ есть зависящая от очередности время переналадки между операцией i и ее операцией наследником j на том же станке $k = m(i) = m(j), i, j \in I, k \in M$. Пусть p_{si}^s определяет время переналадки операции $i \in I_k$, если i является первой операцией в списке обработки на станке k . Также определим через p_{it}^s время переналадки для операции $i \in I_k$, если i обрабатывается последней в очереди на станок k . Модель для задачи JS с учетом времен переналадок будет отличаться от модели классической JS лишь включением соответствующих времен переналадок в четырех ограничениях (3) – (6) и с сохранением целевой функции и остальных критериев модели JS.

Расширение модели Манна для задачи JS с учетом множества однотипных станков выглядит следующим образом. Пусть M_i есть множество (один или несколько) станков, обрабатывающих операцию $i \in I$. Две операции $i, j \in I$ могут вступить в конфликт, если имеют общий станок $k \in M_i \cap M_j$. Можно расширить модель JS для получения модели задачи реализации ТП со множеством однотипных станков, которая будет учитывать указанную особенность в модели лишь при незначительных изменениях, путем определения конфликтного множества B как: $B = \{(i, j) : i, j \in I, M_i \cap M_j \neq \emptyset\}$.

Учет директивных сроков в классической модели JS осуществляется за счет введения дополнительных ограничений, а именно:

$$x_{J|J|} + p_{J|J|} \leq d_J \quad \forall J \in \Psi, \quad (9)$$

все остальные ограничения при этом сохраняются.

Для того чтобы учесть приоритетность выполнения деталей, вводится дополнительное множество $P = \{P_1, K, P_q\}$, где $1 \leq q \leq n$. Каждой детали назначается

свой приоритет $n(J) \in P$. Расширение модели для случая учета приоритетности деталей происходит за счет дополнения неравенств (3) и (4) условиями $n(J^i) = n(J^j)$, и ввода дополнительных ограничений на случай неравенства приоритетов:

$$x_i - x_j \geq p_j \quad \forall (i, j) \in B, n(J^i) > n(J^j) \quad (10)$$

$$x_j - x_i \geq p_i \quad \forall (i, j) \in B, n(J^i) < n(J^j) \quad (11)$$

На основе приведенных выше так называемых «однохарактеристических» расширений модели JS мы можем составить модель многономенклатурной производственной системы механообработки, которая будет представлена полностью в дальнейших статьях авторов.

Поставленная задача является NP-трудной задачей дискретной оптимизации. В данной работе для ее решения используются исключительно методы случайного поиска, дающие близкое к оптимальному решение, поскольку использование точных методов невозможно в данной задаче по многим причинам. Например, даже для решения практической задачи малой размерности $n \times m$ (n – число деталей, m – число станков) точные методы поиска занимают слишком много времени [5].

Одним из самых эффективных методов нахождения быстрого и близкого к оптимальному решению являются *Генетические Алгоритмы* (ГА) – адаптивные методы поиска, которые в последнее время часто используются для решения задач функциональной оптимизации. Они наиболее применимы для практических многомерных задач. ГА основаны на генетических процессах биологических организмов: биологические популяции развиваются в течение нескольких поколений, подчиняясь законам естественного отбора и по принципу «выживает наиболее приспособленный» (survival of the fittest), открытому Чарльзом Дарвином. Подражая этому процессу, генетические алгоритмы способны «развивать» решения реальных задач, если те соответствующим образом закодированы.

ГА используют прямую аналогию с таким механизмом. Они работают с совокупностью «особей» – популяцией, каждая из которых представляет возможное решение данной проблемы. Каждая особь оценивается мерой ее «приспособленности» согласно тому, насколько «хорошо» соответствующее ей решение задачи. (В природе это эквивалентно оценке того, насколько эффективен организм при конкуренции за ресурсы.) Наиболее приспособленные особи получают возможность «воспроизводит» потомство с помощью «перекрестного скрещивания» с другими особями популяции. Это приводит к появлению новых особей, которые сочетают в себе некоторые характеристики, наследуемые ими от родителей. Наименее приспособленные особи с меньшей вероятностью смогут воспроизвести потомков, так что те свойства, которыми они обладали, будут постепенно исчезать из популяции в процессе эволюции.

Так и воспроизводится вся новая популяция допустимых решений, выбирая лучших представителей предыдущего поколения, скрещивая их и получая множество новых особей. Это новое поколение содержит более высокое соотношение характеристик, которыми обладают хорошие члены предыдущего поколения. Таким образом, из поколения в поколение, хорошие характеристики распространяются по всей популяции. Скрещивание наиболее приспособленных особей приводит к тому, что исследуются наиболее перспективные участки пространства поиска. В конечном итоге, популяция будет сходиться к оптимальному решению задачи.

На основе предложенной системы САПЛ-ТП и подсистемы планирования на базе математической модели мелкосерийного производства были разработаны программные средства создания оптимальных расписаний с различными критериями оптимизации. Разработанное программное обеспечение было проверено на различных тестовых задачах мелкосерийного производства, и по полученным результатам можно сделать вывод о том, что экономический эффект и качество принятых решений по управлению производственными системами на стадии реализации технологических процессов превосходят традиционные подходы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бочкарев П.Ю. Системное представление планирования технологических процессов механообработки // Технология машиностроения. 2002. № 1. С. 10–14.
2. Бочкарев П.Ю., Васин А.Н. Планирование технологических процессов в условиях многономенклатурных механообрабатывающих систем. Теоретические основы разработки подсистем планирования маршрутов технологических операций. Саратов: СГТУ, 2004. 136 с.
3. Brucker P. Scheduling Algorithms. Fifth ed. Springer, Heidelberg, 2007.
4. URL. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.89.154> (дата обращения: 20.08.2011).
5. Algorithms for the job shop scheduling problem - a comparison of different methods / J. Käschel, T. Teich, G. Köbernik and B. Meier // European Symposium on Intelligent Techniques, Greece. URL. <http://www.erudit.de/erudit/events/esit99/12553> (дата обращения 15.09.2011).

Поступила в редакцию 17.10.2011 г.

Принята к печати 27.09.2012 г.