

УДК 519.8

А.А. Саратов

СОГЛАСОВАНИЕ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ЦИКЛОВ МЕТОДОМ ВЗАИМНЫХ ШТРАФОВ

Саратов Анатолий Алексеевич, кандидат технических наук, окончил Тульский политехнический институт, аспирантуру Института технической кибернетики АН БССР. Директор ООО «Интерактивные системы автоматизации проектирования» («ИНТЕРСАП», г. Тула). Имеет труды и публикации в области синтеза сложных объектов декомпозиционными методами. [e-mail: sapford@tula.net].

Аннотация

Описывается реализованный в системе «САПФОРД» алгоритм согласования производственных циклов изделий при планировании позаказного производства. Известные на российском рынке MES-системы расчета производственных расписаний (ПР), основанные на схемах ветвления, не обладают достаточной эффективностью для планирования работ предприятия в реальном режиме времени. Показано, что специфические особенности ПР позаказного производства позволяют использовать при решении задачи синтеза расписаний такие эффективные приемы, как декомпозиция задачи и согласование критериев подзадач между собой и с глобальным критерием оптимальности. Задача планирования позаказного производства декомпозируется на подзадачи распределения деталей-операций по рабочим местам с заданными параметрами в оптимальные сроки. Для каждой операции вычисляется критерияльная оценка q роста издержек производства при задержке выполнения операции или их преждевременном выполнении. Согласование критериев подзадач осуществляется методом взаимных штрафов, суть которого заключается в том, что конкурирующие в очередях детали-операции штрафуют друг друга своими оценками издержек от задержек. Предложенный алгоритм обеспечивает эффективное планирование позаказного производства на основе единого ПР без ограничений по составу исходных данных о номенклатуре изделий и технологии их изготовления. Создаются реальные предпосылки для распараллеливания процесса решения задачи, что в свою очередь приводит к более полному использованию возможностей многопроцессорных систем. Приведены примеры решений.

Ключевые слова: производственное расписание, метод взаимных штрафов, система «САПФОРД».

THE COORDINATION OF MANUFACTURING CYCLES BY THE METHOD OF MUTUAL PENALTIES

Anatolii Alekseevich Saratov, Candidate of Science in Engineering; graduated from Tula Polytechnical Institute; completed his postgraduate studies at the Engineering Cybernetics Institute of the Academy of Sciences of Belarus; Director of Interactive Computer-Aided Design Systems, LLC (INTERSAP, city of Tula); an author of articles in the field of a structurally-parametrical synthesis of the systems by decomposition methods. e-mail: sapford@tula.net.

Abstract

The article deals with an algorithm of the product manufacturing cycle coordination implemented in the SAPFORD system when planning the make-to-order production. MES-Systems well-known in the Russian market, which are intended for the machine scheduling calculation and based on branching schemes, are not effective for the plant scheduling in real time. When scheduling design problem solving, author shows that the specific details of the machine scheduling of make-to-order manufacturing allow using the effective methods like task decomposition, co-ordination of the sub-task criteria against each other and with the universal criterion of optimality. The make-to-order manufacturing scheduling task is broken to subtasks of the detail and process distribution through workplaces with preset parameters in a reasonable amount of time. The criterion estimation of the cost-push during delay or abnormal end of the operation is calculated for each operation. The method of the mutual penalties allows to implement the coordination of subtask criteria, whereby details and operations engaged in competition in queue impose to each other penalties like estimation of costs caused by delay. The proposed algorithm provides an effective planning of the make-to-order manufacturing based on a unified machine scheduling with no limits on initial data scope for product range and manufacturing processes. The favourable environment is created for paralleling the problem solving process, which in turn allows to use all the multiprocessor system resources. Author gives examples for problem solving.

Key words: machinescheduling, method of mutual penalties, SAPFORD-System.

ВВЕДЕНИЕ

Управление позаказным производством является наиболее сложным процессом принятия плановых решений ввиду высокой динамичности исходных данных о составе производимой продукции, технологии её изготовления, а также о сроках поставки материалов и комплектующих, отсутствия производственных запасов, необходимости согласования производственных циклов изделий (ПЦИ), синхронизации производства и снабжения, а также оптимизации производственных расписаний (ПР).

Традиционный подход к оперативному планированию позаказного производства заключается в расчете длительности ПЦИ и разработке цикловых графиков выполнения заказов. Для каждой операции рассчитываются сроки её выполнения путём отсчета от даты окончания изготовления изделия суммарной длительности работ, следующих за этой операцией. Длительность работ берётся из технологических процессов. Для учёта времени пролёживания заготовок и полуфабрикатов в очередях на распределение по рабочим местам к суммарной длительности работ добавляется резервное время, определяемое опытным путем. Определение фактического времени запуска деталей в производство возлагается на цеховых плановиков.

Однако, как отмечается в работе [1], «к сожалению, правильное производственное расписание, в котором каждый процесс идет в нужном порядке, т. е. с учетом всех ограничений (загрузки производственных мощностей, человеческих ресурсов, поставки сырья и материалов и пр.), не может быть составлено даже самыми опытными плановиками. Слишком сложна такая задача, особенно если речь идет о сотнях станков и видов продукции. Решить ее вручную довольно проблематично. Поэтому в реальности пока эту задачу на многих российских предприятиях просто не решают: формируют укрупненные планы обычно на месяц или другой относительно длительный срок и пускают производственные задания «самотеком». Такой подход оправдан при низкой загрузке оборудования и наличии значительных резервов производственных мощностей, которые могли бы компенсировать погрешности планирования, выполненного без детальной проработки ПР цехов.

Для обеспечения высокой пропускной способности позаказных производств необходим инструментарий, который способен производить расчёт оптимальных ПР предприятия за время, приемлемое для интерактивного планирования. То есть планировщик должен иметь возможность в реальном режиме времени, за несколько минут, формировать ПР для различных исходных данных (состав работ, передаваемых контрагентам, предполагаемые сроки поступления материалов, комплектующих и полуфабрикатов от смежников, режимы работы оборудования и персонала, аварийные остановки оборудования, задержки платежей и изменения в актуальности заказов и т. д.).

Исследования в области теории расписаний для задач класса $Jm | r_j, intree | \sum \omega_j T_j$ [2] привели к решениям, временная сложность которых не позволяет выполнять планирование работ предприятия в реальном режиме времени [3–6], поскольку в машиностроении размеры задач исчисляются миллионами деталей-операций (ДОП).

Как следствие, известные на российском рынке MES-системы расчета ПР (ФОБОС, YSB.Enterprise.Mes, PolyPlan, IT-Enterprise APS/MES, APS/MES Preactor и др.) основаны на эвристических методах, в основном на схемах ветвления с функциями предпочтения. Эти методы характеризуются, с вычислительной точки зрения, недостаточно высокой эффективностью, для того чтобы «накрыть» единым ПР всё машиностроительное предприятие, и применяются для небольших производств цехового уровня.

ДЕКОМПОЗИЦИОННЫЙ СИНТЕЗ ПР

Создание эффективных алгоритмов синтеза оптимальных ПР позаказного производства возможно при использовании специфики их структуры, заключающейся в следующем:

- структура ПР полностью определяется составом портфеля заказа предприятия. Для каждой ДОП задано её место в ПЦИ, а также актуальность («напряжённость») её выполнения в заданные сроки (рис. 1);
- требования к последовательности выполнения ДОП, а также к характеристикам рабочих мест определены технологическими процессами;
- для каждой ДОП локально оптимальный срок её выполнения определяется контрактным сроком выполнения заказа, а также составом изделия и технологическими процессами;
- оптимальность ПР определяется составом задержек ДОП в очередях на распределение по рабочим местам;
- конкурирующие ДОП распределяются по рабочим местам в порядке актуальности их выполнения.

Перечисленные факторы позволяют сделать следующие выводы:

1. Задача синтеза ПР декомпозируется на подзадачи распределения ДОП по рабочим местам с заданными параметрами в оптимальные сроки.
2. Область допустимых решений задачи может быть отражена в свойствах решений подзадач.
3. Локальный критерий оптимальности любой подзадачи не зависит от сочетаний решений других подзадач.
4. Глобальный критерий оптимальности решения задачи может быть отражен в критериях оптимальности решений подзадач.
5. В оптимальном ПР конфликтующие ДОП следуют в порядке убывания значений согласованных критерияльных оценок.

Следовательно, декомпозиция задачи синтеза ПР и согласование локальных критериев оптимальности



Рис. 1. Фрагмент диаграммы ПР завода. Выделен ПЦИ

решений подзадач между собой, а также с глобальным критерием даёт возможность эффективного решения задачи «жадными» алгоритмами.

В системе «САПФОРД» задача планирования позаканного производства декомпозируется на подзадачи распределения ДОП по рабочим местам с заданными параметрами в оптимальные сроки [7]. Для каждой ДОП вычисляется критериальная оценка q роста издержек производства при задержке выполнения операции или их преждевременном выполнении. Согласование критериев подзадач осуществляется методом взаимных штрафов [8], суть которого заключается в том, что конкурирующие в очередях ДОП штрафуют друг друга своими оценками издержек от задержек.

Оптимальное время выполнения каждой операции может быть определено исходя из контрактных сроков сдачи заказов. Расчёт ПЦИ от контрактной даты окончания изготовления изделия к дате запуска производства позволяет определить для каждой ДОП предельно допустимое время старта работы, превышение которого ведет к срыву сроков выполнения заказа. Срыв сроков ведёт к штрафным санкциям со стороны заказчика. Величина штрафов, как правило, линейно зависит от количества дней задержки выполнения заказа. Выполнение операций в более ранние сроки

ведет к росту стоимости незавершенного производства. Нарастание отвлечения средств в незавершенное производство также линейно зависит от длительности пролёживания полуфабрикатов. Поэтому зависимость $C = F(T_f)$ производственных затрат C от времени T_f запуска партии ДОП (рис. 2) может быть описана сплайном (1):

$$C = \begin{cases} b_k + k(T_z - T_f - T_o), & T_f + T_o < T_z, \\ b_u + u(T_f + T_o - T_z), & T_f + T_o \geq T_z, \end{cases} \quad (1)$$

где k – коэффициент стоимости преждевременного начала работы;

T_f – фактическое время запуска (начала технологической операции);

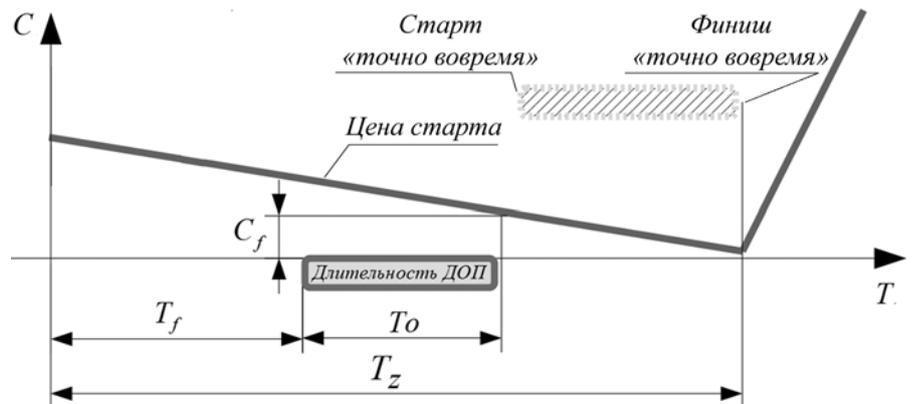


Рис. 2. Оценка срочности ДОП

T_z – предельно допустимое время выполнения работы, превышение которого ведет к срыву сроков выполнения заказа;

u – коэффициент стоимости задержки технологической операции.

b_k – суммарные затраты на производство изделия;

b_u – минимальное значение цены задержки выполнения заказа;

T_o – длительность операции (штучно-калькуляционное время);

$$T_o = T_s + T_p/n;$$

где T_p – время переналадки станка (подготовительно-заключительное время);

n – размер партии деталей;

T_s – штучное время операции;

Значения T_z определяются структурами ПЦИ и контрактными сроками выполнения заказов. ПЦИ может иметь различные конфигурации по срокам запуска деталей в производство.

При планировании по стратегии «точно вовремя» (рис. 3) ПЦИ формируется от даты окончания изготовления изделия к предшествующим по технологии операциям. Длительность ПЦИ определяется от даты старта самой ранней операции до даты окончания изготовления изделия. В результате получаем ПЦИ с минимальными затратами на незавершенное производство, но с наибольшим риском срыва сроков выполнения заказа, при любой задержке производственного процесса. Сроки T_z выполнения операций формулы (1) будем называть поздними сроками.

При планировании работ от текущей даты и начальных операций (рис. 4) к последующим операциям до расчётного срока изготовления изделия сроки старта операций будут минимальными, а ПЦИ будет иметь максимальные запасы времени. Сроки выполнения операций в этом случае будем называть ранними сроками.

Ранняя дата T_i^S старта R_i определяется временем окончания T_{i-1}^F операции, предшествующей по технологическому процессу, а также датой T_k^F начала свободного времени рабочего места:

$$T_i^S = \max \left[T_{i-1}^F, \min \left(T_k^F \right) \right]. \quad (2)$$

Ранние и поздние сроки выполнения операций определяют диапазоны времени, в пределах которых ДОП могут быть распределены на рабочие места без нарушения сроков выполнения заказов. Планирование, ориентированное на поздние сроки T_z , связано



Рис. 3. ПЦИ «Точно вовремя»

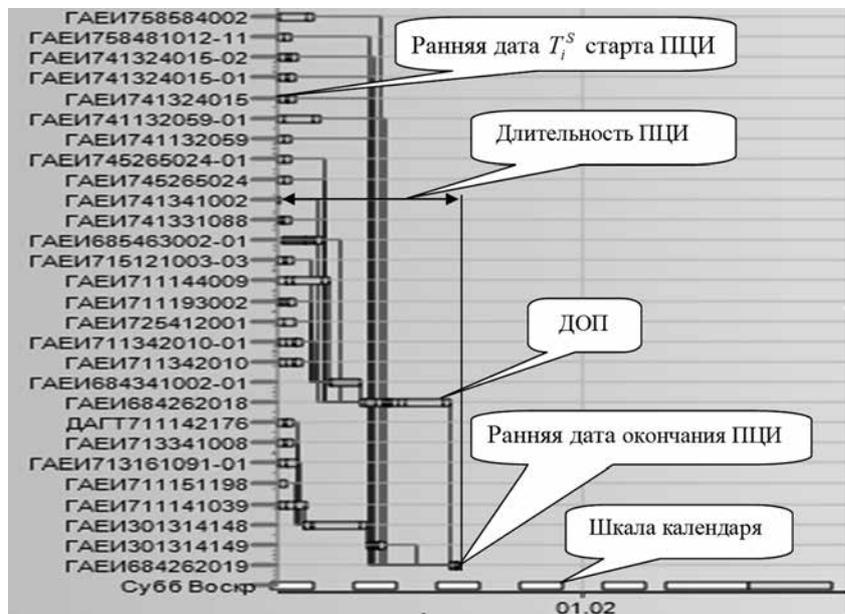


Рис. 4. ПЦИ с ранними сроками изготовления

с риском срыва сроков выполнения заказов при любой задержке производственного процесса, так как производственных запасов в позаказном производстве нет. Поэтому для расчёта критериальных оценок времени выполнения работ целесообразно использовать более ранние сроки оптимального старта $T_z^S = T_z - t^s$, где t^s – нормативный запас времени. Тогда цена q старта работы определится выражением:

$$q = \begin{cases} b_k + k(T_z - t^s - T_f - T_o), & T_f + T_o < T_z - t^s, \\ b_u + u(T_f + T_o - T_z - t^s), & T_f + T_o \geq T_z - t^s. \end{cases} \quad (3)$$

При низкой загрузке оборудования, когда ресурсы времени рабочих мест достаточны для своевременного размещения всех работ, расписание, построенное по стратегии «точно вовремя», является оптимальным.

С увеличением объемов производства при ограниченных станочных и людских ресурсах ПЦИ вступают в конфликты за очередность размещения работ на рабочих местах. В результате задержки выполнения работ в очередях на рабочие места длительность циклов увеличивается на величины, определяемые дефицитом производственных мощностей, а также конкурентностью заказов. Наилучшим компромиссным решением будем считать такое сочетание конфигураций ПЦИ, которое даст минимальную суммарную стоимость затрат на незавершенное производство и штрафов за нарушения сроков выполнения заказов.

Конфликтующие работы R_i, R_j пересекаются ранними сроками (2) выполнения:

$$T_i^S \leq T_j^F \wedge T_i^F \geq T_j^S, \quad (4)$$

где $T_i^S, T_i^F, T_j^S, T_j^F$ – ранние даты начала и окончания работ R_i и R_j .

Назначение на рабочее место W_k работы R_i длительностью T_o приводит к задержке остальных работ (R_j) $\subset (R)$, находящихся в очереди к W_k на время T_o . Поэтому решение о назначении R_i должно быть оштрафовано на величину V_i :

$$V_i = \max \{q_j(T_i + T_{oi}) - q_j(T_j)\}, \quad (5)$$

где $q_j(T_j)$ – цена старта R_j во время T_j ;

$q_j(T_i + T_{oi})$ – цена старта R_j во время $(T_i + T_{oi})$.

При вычислении оценки V_i для операции R_i последовательно моделируются задержки конкурирующих операций R_j на время, необходимое для размещения

R_i . На рабочее место назначается та работа, цена задержки которой превышает затраты, возникающие от задержки конкурентов.

Для каждой пары конкурирующих работ выполняется следующая последовательность действий (рис. 5):

1. Выбор работ R_1 и R_2 , конкурирующих за первоочередное распределение на рабочее место, то есть работ, сроки выполнения которых соответствуют (4). Расчёт цен q_1, q_2 .

2. Моделируется первоочередное распределение работы R_1 , и на оставшемся ресурсе времени рабочих мест размещается работа R_2 . Из (3) вычисляются штраф V_{R_1} за задержку работы R_2 и согласованная цена q'_1 первоочередного распределения работы R_1 .

3. Моделируется первоочередное распределение работы R_2 , и на оставшемся ресурсе времени рабочих мест размещается работа R_1 . Вычисляются штраф V_{R_2} и цена q'_2 .

4. Принимается первоочередное распределение работы R_2 с наилучшей согласованной ценой.

5. Для принятой к первоочередному распределению работы выполняются шаги 1–4 с оставшимися конкурирующими работами.

Одной из проблем планирования работ под заказ, когда отсутствуют производственные запасы (заделы), является обеспечение синхронности комплектования сборочных единиц. Входящие в сборку детали, изготавливаемые на разных рабочих местах, участках, в разных цехах, поступают на сборочную операцию с большим разбросом времени, в результате на сборочных участках образуется множество неполных комплектов, и ничего в итоге собрать нельзя, хотя обеспечивающие

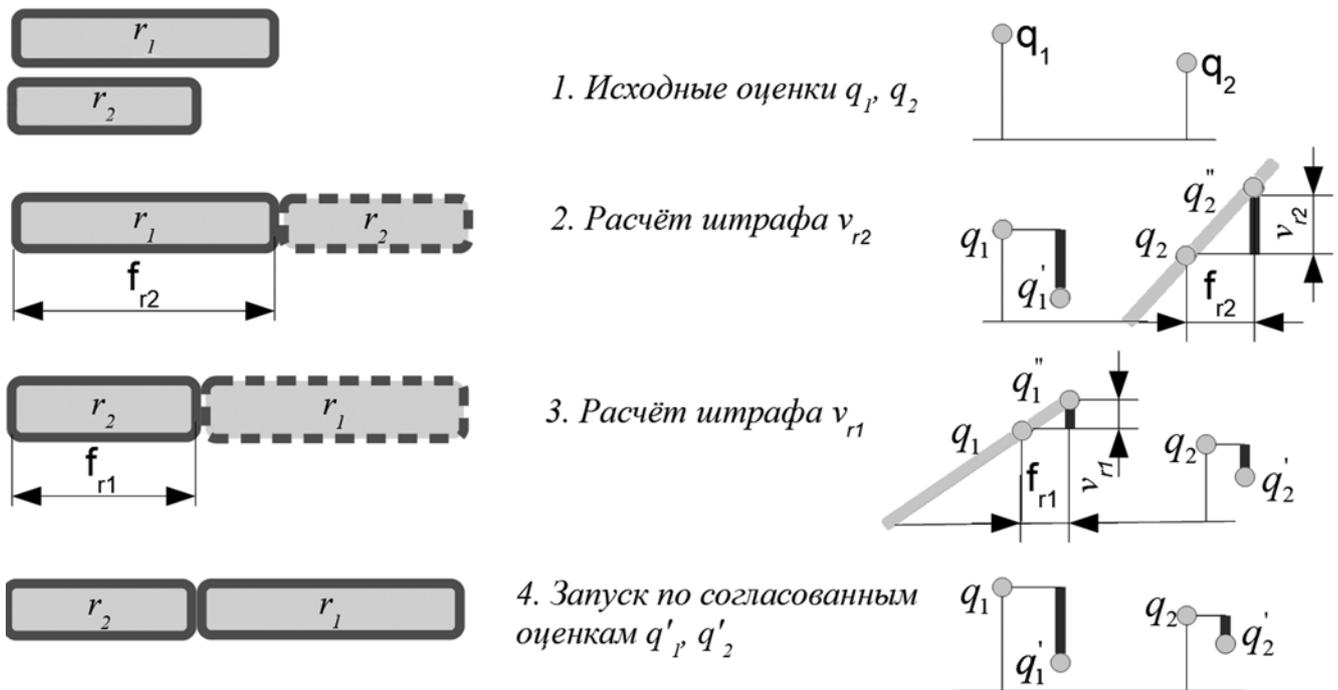


Рис. 5. Согласование оценок срочности ДОП

производства работают на полную мощность (рис. 6, поз. 2). Это ведёт к задержке сборочных работ и затягиванию сроков выполнения заказов.

При разных запасах времени синхронизация комплектования обеспечивается различием значений V_i , так как оценки $q(T)$ в (5) будут выше для более срочных работ. Поэтому рассмотрим вопрос согласования циклов с равными значениями срочности.

Пусть узлы R_i и R_j входят в общий узел R_k и имеют равные сроки ($T_i^F = T_j^F$) поступления на сборку. Соответственно, операции деталей $r_i \subseteq R_i$ и $r_j \subseteq R_j$, входящих в эти узлы, имеют равные значения срочности. После старта $r_j \subseteq R_j$ происходит обмен штрафами между входящими $r_i \subseteq R_i$ и $r_j \subseteq R_j$. Значение T_j раннего старта для всех $r_j \subseteq R_j$ остается прежним, и штрафы на работы $r_j \subseteq R_j$ примут значения V_i из (5), в то время как ранний старт T_i узла R_i сместится на более поздний срок $T_i = T_j + T_{oj}$, и работы $r_i \subseteq R_i$ получают «отсрочку» T_{oj} , а штрафы на работы $r_j \subseteq R_j$ уменьшаются до значения V_j :

$$V_j = \max \left\{ q_i(T_i + T_{oi}) - q_i(T_j + T_{oj} + T_{oi}) \right\}. \quad (6)$$

Поскольку в выражении (6) $T_{oj} > 0$, то $V_i > V_j$ и на всех рабочих местах, где в очередях конкурируют $r_i \subseteq R_i$ и $r_j \subseteq R_j$, работы $r_i \subseteq R_i$ будут уступать очередь

работам $r_j \subseteq R_j$. Следовательно, моделирование задержек операций и начисление штрафов на конкурирующие работы обеспечивают необходимую очередность комплектования узлов без перебора сочетаний последовательностей операций.

Рассмотрим пример (рис. 6). Пусть имеется три узла R_1, R_2, R_3 , включающие соответственно детали $(r_1, r_2, r_3), (r_4, r_5, r_6), (r_7, r_8, r_9)$. Для выполнения работ $r_1 \dots r_9$ имеются рабочие места М1, М2, М3, а для сборки узлов – М4. Длительности работ $r_1 \dots r_9$ равны и времена начала свободного времени рабочих мест М1, М2, М3 одинаковы. Одинаковы также и контрактные даты выполнения работ R_1, R_2, R_3 (рис. 6, поз. 1). Таким образом, работы $r_1 \dots r_9$ имеют равноценную конкурентность и могут распределиться на рабочих местах в любой последовательности. При этом задержка сборки при несогласованности работ может быть весьма большой (рис. 6, поз. 2).

Алгоритм согласования циклов (рис. 7) включает процедуры:

1. Расчёт взаимных штрафов и распределение работ R_1 . Моделирование задержки сборки R_1 и начисление штрафов на работы $r_4 \dots r_9$, распределение которых приведёт к этой задержке.

2. Распределение работ в соответствии с их согласованными оценками. Поскольку работы r_2 и r_3 не имеют штрафов, то они и распределяются на М2 и М3.

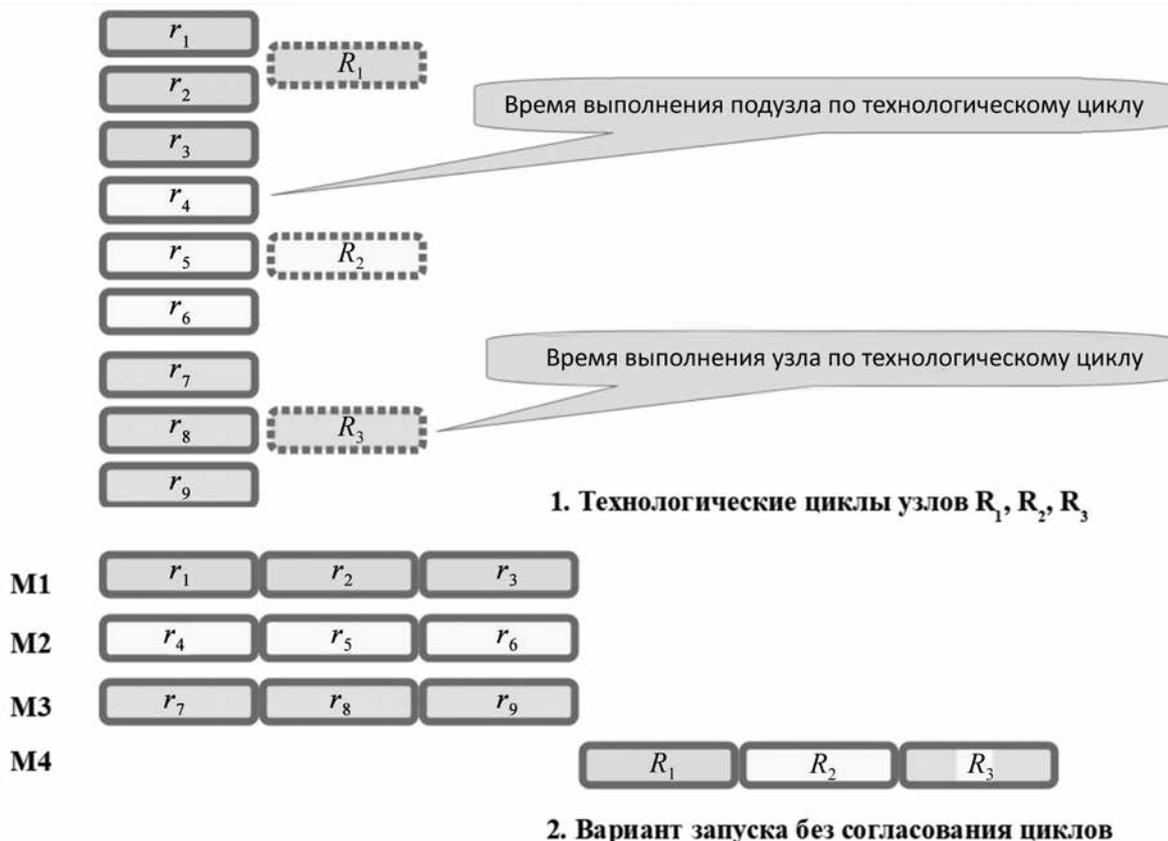
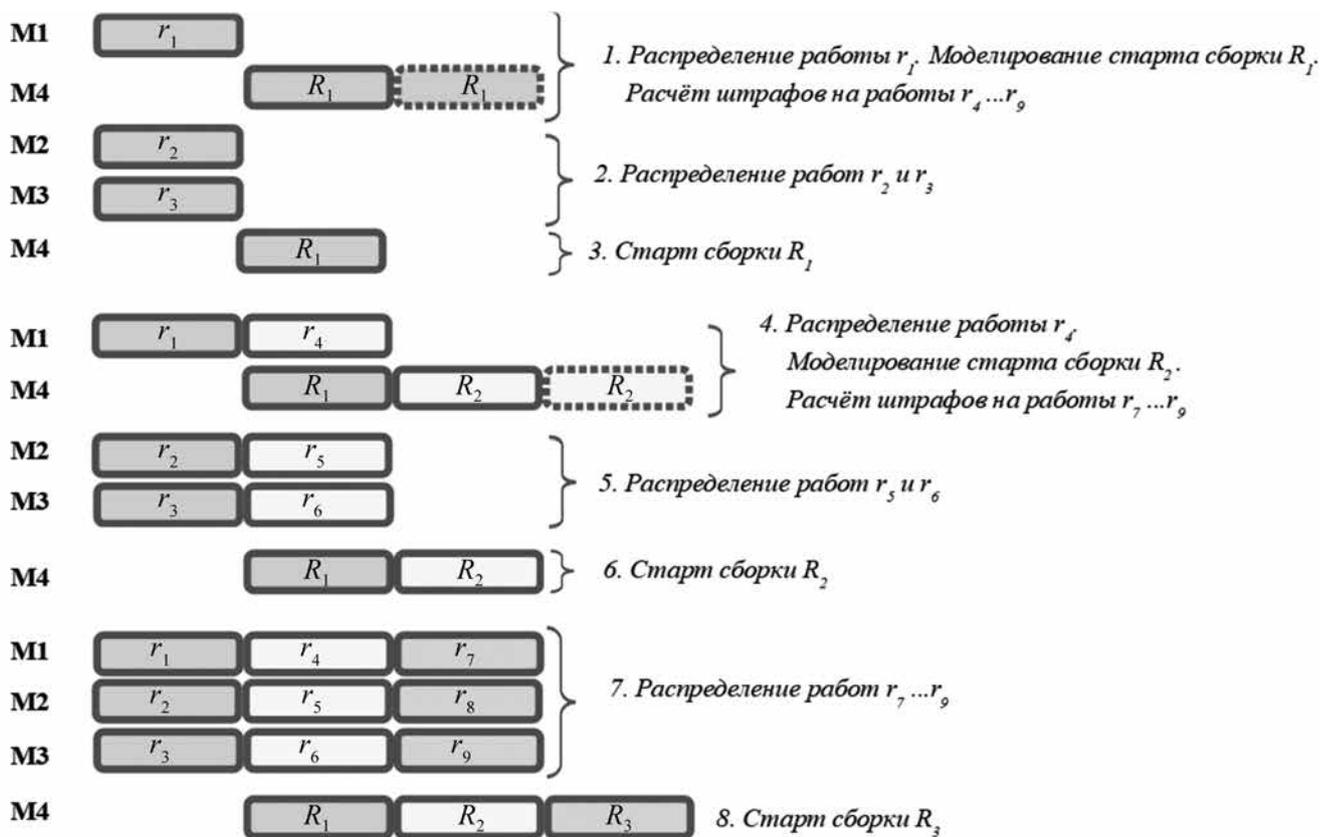


Рис. 6. Состав работ для планирования

Рис. 7. Согласование циклов узлов R_1, R_2, R_3

3. Узел R_1 полностью укомплектован и распределяется на М4.

4. Выполнение процедуры 1 в отношении работ $r_4 \dots r_9$, распределение r_4 и начисление штрафов на r_7, r_8, r_9 .

5. Выполнение процедуры 2 в отношении работ r_5, r_6 .

6. Узел R_2 полностью укомплектован и распределяется на М4.

7. Выполнение процедуры 2 в отношении работ r_8, r_9 .

8. Распределение узла R_3 .

В результате согласования циклов время сдачи узлов принимает минимальное значение.

Количество конкурирующих работ, отвечающих условию (4), на каждом шаге алгоритма относительно невелико и на практике не превышает нескольких сотен на рабочее место, что обеспечивает высокую скорость синтеза ПР. Например, месячное расписание завода для 240 изделий, содержащее 38456 ДОП, приведенное на рисунке 1, строится за 71 секунду.

Алгоритм формирования производственных партий описан в работе [9], а алгоритм интеграции ПЦИ с плановыми ремонтами оборудования – в работе [10].

Режимы работы оборудования, схемы распределения заделов между заказами, номенклатура работ, передаваемых контрагентам, выступают перед каждым построением ПР в качестве исходных данных.

По мере поступления данных о выполненных работах и фактических сроках их выполнения эти работы исключаются из расчета, а состав и сроки ПР при перерасчётах меняются. Тем самым производственное планирование ведется непрерывно, с каждым днём пополняясь новыми данными: изменениями в портфеле заказов, в плановых и фактических сроках поставки материалов, комплектующих, результатами работ смежников и т. п.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Специфические особенности ПР позаказного производства позволяют использовать при решении задачи синтеза расписаний такие эффективные приемы, как декомпозиция задачи и согласование критериев подзадач между собой и с глобальным критерием оптимальности. Предложенный алгоритм обеспечивает эффективное планирование позаказного производства на основе единого производственного расписания без ограничений по составу исходных данных о номенклатуре изделий и технологии их изготовления. Создаются реальные предпосылки для распараллеливания процесса решения задачи, что в свою очередь приводит к более полному использованию возможностей многопроцессорных систем. Результаты работы реализованы при внедрении программного комплекса «САПФОРД» на ряде машиностроительных предприятий и обеспечили режим непрерывного планирования в режиме реального времени. Например, ПР Сафоновского Электрома-

шиностроительного завода (концерн «РУСЭЛПРОМ»), включающее более 50000 ДОП, формируется за 2,3 минуты, а расписание производства ЦКБМ («РОСАТОМ»), включающее более 100000 ДОП, формируется за 5,4 минуты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Российские MES-системы или Как вернуть производству оптимизм / Ю. Гараева [и др.] // САПР и графика. – 2013. – № 10. – С.16–19.
 2. Теория расписаний. Задачи и алгоритмы / А.А. Лазарев [и др.]. – М. : МГУ им. М.В. Ломоносова, 2011. – 222 с.
 3. Танаев В.С., Сотсков Ю.Н., Струевич В.А. Теория расписаний. Многостадийные системы. – М. : Наука, 1989. – 328 с.
 4. Аничкин А.С., Семенов В.А. Современные модели и методы теории расписаний // Труды ИСП РАН. – 2014. – Т. 26, вып. 3. – С. 5–30.
 5. Гераськин И.В., Егорова В.В. Оптимальные механизмы планирования позаказного производства по финансовым и временным критериям // УБС. – 2015. – Вып. 58. – С. 179–211.
 6. Мамонов В.И., Полуэктов В.А. Моделирование календарных расписаний и обоснование нормативов движения производства // Организатор производства. – 2018. – Т. 26, № 1 – С. 93–102.
 7. Саратов А.А. Конкурентный метод синтеза производственных расписаний // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2014. – № 3. – С. 104–110.
 8. Саратов А.А. Системный синтез структур технических объектов на основе метода взаимных штрафов // Тез. междунар. конф. и выставки «CAD/CAM/PDM-2001». – М. : ИПУ РАН, 2001. – С. 126–128.
 9. Саратов А.А. Конкурентный метод расчёта партий запуска в позаказном производстве // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2018. – № 8. – С. 179–184.
 10. Саратов А.А. Планирование планово-предупредительных ремонтов оборудования при автоматизированном синтезе производственных расписаний // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2017. – № 12. – С. 217–225.
- REFERENCES
1. Garaeva lu et al. Rossiiskie MES-sistemy, ili kak vernut proizvodstvu optimizm [MES-Systems or How to Bring Back the Optimism to Manufacture]. *SAPR i grafika* [Russian MES-Systems], 2013, no. 10, pp. 16–19 .
 2. Lazarev A.A. et al. *Teoriia raspisanii. Zadachi i algoritmy* [Scheduling Theory. Problems and Algorithms]. Moscow, MGU im. M.V. Lomonosova Publ., 2011. 222 p.
 3. Tanaev V.S., Sotskov Iu.N., Strusevich V.A. *Teoriia raspisanii. Mnogostadiiinye sistemy* [Scheduling Theory. Multistage Systems]. Moscow, Nauka Publ., 1989. 328 p.
 4. Anichkin A.S., Semenov V.A. *Sovremennyye modeli i metody teorii raspisanii* [A Survey of Emerging Models and Methods of Scheduling]. *Trudy ISP RAN* [Proc. of the Institute for System Programming of the RAS], 2014, vol. 26, iss. 3, pp. 5–30.
 5. Geraskin I.V., Egorova V. V. *Optimalnye mekhanizmy planirovaniia pozakaznogo proizvodstva po finansovym i vremennym kriteriiam* [Optimal Planning Mechanisms for Assemble-to-Order Manufacturing: Time and Money Criteria]. *UBS* [Large System Control, Proc.], 2015, iss. 58, pp. 179–211.
 6. Mamonov V.I., Poluektov V.A. *Modelirovanie kalendarnykh raspisanii i obosnovanie normativov dvizheniia proizvodstva* [Modeling Calendar Scheduling and Justification of the Norms of Production Flow]. *Organizator proizvodstva* [Organizer of Production], 2018, vol. 26, no. 1, pp. 93–102.
 7. Saratov A.A. *Konkurentnyi metod sinteza proizvodstvennykh raspisanii* [Competitive Method of Synthesis of the Machine Scheduling]. *Izvestiia TulGU. Tekhnicheskie nauki* [Proc. of the Tula State University. Technical Sciences], 2014, no. 3, pp. 104–110.
 8. Saratov A.A. *Sistemnyi sintez struktur tekhnicheskikh obektov na osnove metoda vzaimnykh shtrafov* [The System Synthesis of Technical Objects by Mutual Penalty Method]. *Tez. mezhdunar. konf. i vystavki "CAD/CAM/PDM-2001"* [Proc. of Int. Conf. and Exhibition CAD/CAM/PDM-2001]. Moscow, IPU RAN, 2001, pp. 126–128.
 9. Saratov A.A. *Konkurentnyi metod rascheta partii zapuska v pozakaznom proizvodstve* [Competitive Method of Synthesis of the Machine Scheduling]. *Izvestiia TulGU. Tekhnicheskie nauki* [Proc. of the Tula State University. Technical Sciences], 2018, no. 8, pp. 179–184.
 10. Saratov A.A. *Planirovanie planovo-predupreditelnykh remontov oborudovaniia pri avtomatizirovannom sinteze proizvodstvennykh raspisanii* [Planning Preventive Repair of the Equipment Under Automated Synthesis of the Machine Scheduling]. *Izvestiia TulGU. Tekhnicheskie nauki* [Proc. of the Tula State University. Technical Sciences], 2017, no. 12, pp. 217–225.