

© 2021 г. А.А. САРАТОВ, канд. техн. наук (sapford@tula.net)
(ООО “Интерактивные системы автоматизации проектирования”, Тула)

СИНХРОНИЗАЦИЯ РАБОТЫ ЦЕХОВ В ПОЗАКАЗНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Описывается реализованная в системе “САПФОРД” методика согласования и перестройки расписаний цехов и участков при возникновении сбоев в работе служб производства и снабжения. Предложен эффективный метод построения единого производственного расписания завода, оптимизированного по критерию минимизации затрат, связанных с обслуживанием незавершенного производства и штрафами за задержки выполнения заказов. Задача планирования позаказного производства декомпозируется на подзадачи распределения работ по рабочим местам с заданными параметрами в допустимые сроки. Для каждой работы задается целевая функция зависимости прироста цены производства от величины задержки или преждевременного выполнения работы и вычисляется время ее выполнения, при котором не нарушается срок сдачи изделия, а время “пролеживания” детали до начала операции минимально. Согласование критериев подзадач осуществляется методом взаимных штрафов, суть которого заключается в том, что конкурирующие в очередях работы штрафуют друг друга приращением своих оценок при пропуске вперед конкурента. Первой в очереди оказывается работа с наименьшей суммой собственной критериальной оценки и штрафов за задержку конкурентов. При возникновении задержек производства в одном цехе происходит пересчет оценок задержанных заказов и перестройка очередности выполнения работ в других цехах. Результаты пересчета планов цехов отражаются в цеховых номенклатурах первоочередных работ. Приведен пример решения.

Ключевые слова: производственное расписание, метод взаимных штрафов, система “САПФОРД”.

DOI: 10.31857/S0005231021030089

1. Введение

Управление позаказным производством является наиболее сложным процессом принятия плановых решений из-за высокой динамичности исходных данных о составе производимой продукции и технологии ее изготовления, о сроках поставки материалов и комплектующих и необходимости оперативного пересчета и взаимного согласования производственных циклов изделий.

Традиционный подход к оперативному планированию производства предполагает двухуровневую иерархию, включающую межцеховое и внутрицеховое планирование. При этом для решения задач управления на этих уровнях предлагаются разные системы и методики принятия решений. В позаказном производстве расчет сроков выполнения работ сводится к расчету длительности производственных циклов изделий и к разработке цикловых графиков

выполнения заказов. Для каждой операции рассчитываются сроки ее выполнения путем отсчета от даты окончания изготовления изделия суммарной длительности работ, следующих за этой операцией. Длительность работ берется из технологических процессов. Для учета времени пролеживания 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. Такой подход требует наличия значительных резервов производственных мощностей, которые могли бы скомпенсировать погрешности планирования на межцеховом уровне, выполненного без детальной проработки производственных расписаний (ПР) цехов.

Для обеспечения высокой пропускной способности позаказных производств необходим инструментарий, который был бы способен производить расчет оптимального производственного расписания предприятия за время, приемлемое для интерактивного планирования, т.е. планировщик должен иметь возможность в реальном режиме времени, за несколько минут, формировать производственные расписания предприятия для различных сочетаний исходных данных (предполагаемые сроки поступления материалов, комплектующих и полуфабрикатов от смежников, непредвиденные задержки производства при отсутствии страховых заделов, смена приоритетов заказов, задержки платежей, аварийные остановки оборудования и т.д.).

Исследования в области теории расписаний для задач класса $Jm|r_j, enttree|\sum \omega_j T_j$ (расписание для множества изделий, имеющих структуры входящих деревьев, с заданными отношениями предшествования операций, выполняемых на множестве рабочих мест, с минимизацией суммы взвешенных запаздываний) [1] привели к решениям, временная сложность которых не позволяет выполнять планирование работ предприятия в реальном режиме времени, поскольку в машиностроении размеры задач исчисляются миллионами деталей-операций (ДОП).

Как следствие, известные на российском рынке MES-системы (ФОБОС, PolyPlan, YSB.Enterprise.MesIT-Enterprise APS/MES, APS/MES Preactor и др.) для расчета производственных расписаний используют эвристические методы, основанные на схемах ветвления с функциями предпочтения. Эти методы характеризуются, с вычислительной точки зрения, недостаточно высокой эффективностью, чтобы “накрыть” единым расписанием все машиностроительное предприятие, и применяются для небольших производств цехового уровня. Например, по данным публикации [2] время расчета расписания объемом 100 тысяч операций средствами MES на платформе “1С: Предприятие” составляет 23 часа.

2. Конкурентный метод синтеза производственных расписаний

В системе “САПФОРД” планирование производства осуществляется на основе единого для всего предприятия ПР, оптимизированного по критерию минимизации затрат, связанных с обслуживанием незавершенного производства и штрафами за задержки выполнения заказов. Оперативные планы це-

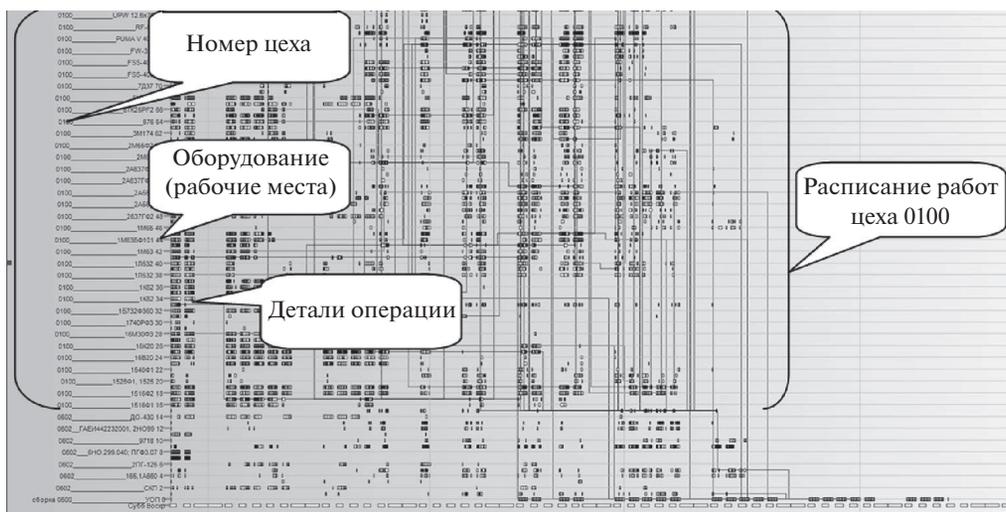


Рис. 1. План работ цеха в составе плана предприятия.

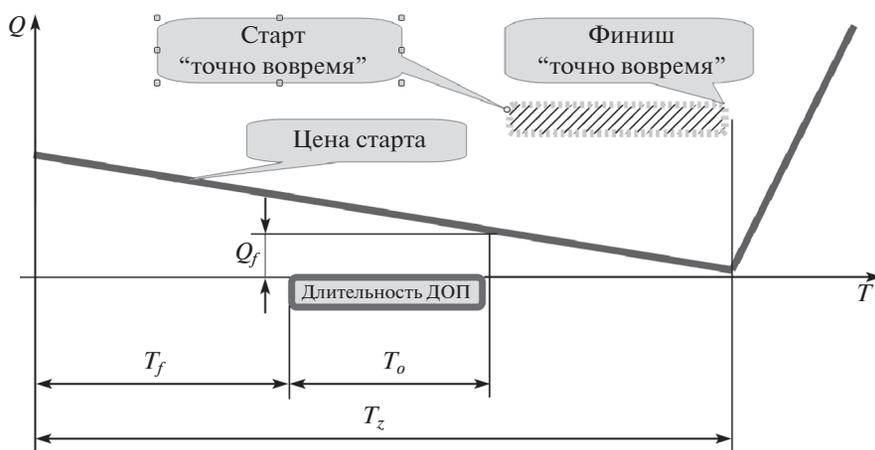


Рис. 2. Оценка срочности ДОП.

хов и участков представляют собой взаимно согласованные фрагменты этого расписания (рис. 1).

В основу алгоритмов синтеза ПР положен принцип декомпозиции общей задачи планирования на подзадачи выполнения деталей-операций и взаимного согласования их критериев оптимальности [3]. В качестве критерия оптимальности ПР предложены те составляющие рентабельности производства, которые в наибольшей степени определяются качеством планирования, т.е. своевременность выполнения заказов и минимизация незавершенного производства. Срыв сроков выполнения ДОП ведет к штрафным санкциям со стороны заказчика, а преждевременное выполнение — к росту стоимости незавершенного производства.

В [4] предложена функция зависимости производственных затрат Q от времени T_f запуска партии ДОП (рис. 2) в виде сплайна (1):

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

где

k – коэффициент стоимости преждевременного начала работы;

T_f – фактическое время запуска (начала технологической операции);

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

u – коэффициент стоимости задержки технологической операции;

T_o – длительность операции (штучно-калькуляционное время).

Пусть $R = \{r_1, \dots, r_n\}$ – множество ДОП. При размещении ДОП $r_i \in R$ по рабочим местам для каждой r_i задается целевая функция (1) зависимости прироста Δq_i цены q_i производства от величины задержки или преждевременного выполнения работы и вычисляется время t_i^z выполнения операции, при котором не нарушается срок сдачи изделия, а время “пролеживания” детали до начала операции минимально.

Согласование критериев подзадач осуществляется методом взаимных штрафов [4], суть которого заключается в том, что конкурирующие в очередях ДОП штрафуют друг друга приращением своих оценок при пропуске вперед конкурента. Первой в очереди оказывается ДОП с наименьшей суммой собственной критериальной оценки и штрафов за задержку конкурентов.

Алгоритм формирования ПР включает моделирование попарных перестановок конкурирующих ДОП r_i, r_j и расчет величин прироста $\Delta q_i, \Delta q_j$ целевых функции q_i, q_j (1) для задерживаемых работ. Значения Δq_j начисляются к цене q_i ДОП r_i в качестве штрафа за задержку r_j при пропуске вперед ДОП r_i . На рабочее место распределяется ДОП, имеющая наименьшее значение суммы собственной локальной оценки q_i и начисленных штрафов Δq_j . Цикл повторяется для оставшихся нераспределенных работ. Поскольку в данном алгоритме отсутствуют процедуры ветвлений по альтернативам, время расчета производственного расписания имеет линейную зависимость от размера задачи, что обуславливает высокую скорость расчетов. Например ПР, включающее 36078 деталей-операций, фрагмент которого приведен на рис. 1, строится за 27 секунд.

3. Перестройка расписаний при возникновении сбоев в работе служб производства и снабжения

При позаказном производстве состав производственной номенклатуры полностью определяется составом выпускаемых изделий, что резко ограничивает возможности создания заделов для компенсации задержек поставок деталей и полуфабрикатов между смежными цехами и участками. Эти задержки являются следствием различной периодичности запуска–выпуска в смежных цехах, различных величин размеров партий, перебоев или непола-

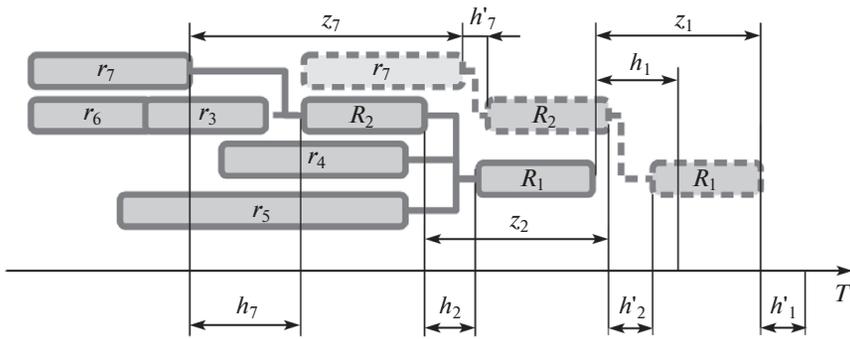


Рис. 3. Задержка сборочных операций при задержке входящих деталей.

док на рабочих местах, возникновения брака, а также нарушений сроков поставки материалов и комплектующих от контрагентов предприятия. Поэтому планировщик должен оперативно перестраивать порядок выполнения работ, чтобы переключать производство на заказы, которые могут быть выполнены с минимальными потерями прибыли предприятия.

Рассмотрим зависимость смещения критических сроков выполнения ДОП от внеплановых задержек. При задержке любой ДОП задерживаются и все последующие ДОП вплоть до конечной сборочной единицы. Частично или полностью задержки компенсируются запасами времени h_j , предусмотренными при расчете производственных циклов изделий (задержки сборочных работ начинаются после исчерпания межоперационных запасов времени). Например, если изделие R_1 (рис. 3) включает в себя сборку R_2 и детали r_4, r_5 , $(r_4, r_5, R_2) \subseteq R_1$, а изделие R_2 включает детали r_3, r_6, r_7 , $(r_3, r_6, r_7) \subseteq R_2$, то при задержке работы r_7 на время z_7 сборочная операция изделия R_2 задерживается на время $z_2 = z_7 - h_7 + h'_7$, а сборочная операция изделия R_1 — на время $z_1 = z_7 - h_7 + h'_7 - h_2 + h'_2$, где h_2, h'_2, h_7, h'_7 — запасы времени на выполнение работ r_2, r_7 до их задержки и после корректировки расписания.

Поскольку задержки z_i могут происходить одновременно в разных точках производственного цикла изделия, то итоговая задержка Z_v изготовления изделия R_v определится максимальной длительностью цепи φ_i , связывающей ДОП r_i с финишной операцией изделия R_v , $\varphi_i = (r_i \dots R_v)$:

$$(2) \quad Z_v = \max \left[z_i - \sum_{k=1}^{n_i-1} (h_k - h'_k) \right],$$

где

n_i — количество ДОП цепи φ_i ;

h_k, h'_k — запасы времени на выполнение ДОП $r_k \in \varphi_i$ в исходном и в скорректированном расписаниях.

Задержка Z_v (2) выпуска изделия R_v снижает актуальность (срочность) выполнения всех остальных работ, входящих в его ПЦ, что приводит к отсрочке ∇t_j критического времени выполнения ДОП r_j , принадлежащих R_v , но

относящихся к другим цепям $\varphi_j = (r_j \dots R_v)$:

$$(3) \quad \nabla t_j = \max \left[z_i - \sum_{k=i}^{n_i-1} (h_k - h'_k) \right] - \sum_{m=j}^{n_j-1} (h'_m - h_m), \quad r_j \in R_v, \quad r_j \notin \varphi_i,$$

где

n_i – количество ДОП цепи φ_j ;

h_m, h'_m – запасы времени на выполнение ДОП $r_m \in \varphi_j$ в исходном и в скорректированном расписаниях.

Из (1), (2) следует, что отсрочка ∇t_j ДОП r_j (3) приводит к изменению значения критериальной оценки q_j^* (4):

$$(4) \quad q_j^* = \begin{cases} k \left(t_j^z + \nabla t_j - h_j - t_j^f - t_j^o \right), & t_j^f + t_j^o < t_j^z + \nabla t_j - h_j, \\ u \left(t_j^f - \nabla t_j - h_j - t_j^z + t_j^o \right), & t_j^f + t_j^o \geq t_j^z + \nabla t_j - h_j. \end{cases}$$

При выборе ДОП для размещения на рабочем месте моделируются попарные перестановки $r_j \rightarrow r_k$ и $r_k \rightarrow r_j$, $r_j \in R_v$, $r_k \in R_w$ с расчетом изменений оценок q_k и q_j :

$$(5) \quad \Delta q_j = \begin{cases} k \left(t_j^z + \nabla t_j - t_j^f - t_j^o - t_k^o \right), & t_j^f + t_j^o + t_k^o < t_j^z + \nabla t_j - h_j, \\ u \left(t_j^f - \nabla t_j - t_j^z + t_j^o + t_k^o \right), & t_j^f + t_j^o + t_k^o \geq t_j^z + \nabla t_j - h_j, \end{cases}$$

$$(6) \quad \Delta q_k = \begin{cases} k \left(t_k^z + \nabla t_k - t_k^f - t_k^o - t_j^o \right), & t_k^f + t_k^o + t_j^o < t_k^z + \nabla t_k - h_j, \\ u \left(t_k^f - \nabla t_k - t_k^z + t_k^o + t_j^o \right), & t_k^f + t_k^o + t_j^o \geq t_k^z + \nabla t_k - h_j, \end{cases}$$

где

Δq_j – цена задержки r_j на время t_k^o при первоочередном распределении r_k , $r_k \rightarrow r_j$;

Δq_k – цена задержки r_k на время t_j^o при первоочередном распределении r_j , $r_j \rightarrow r_k$;

t_j^o, t_k^o – длительность ДОП r_j, r_k .

К первоочередному распределению назначается ДОП r_j с наименьшей оценкой C_j :

$$(7) \quad C_j = q_j + \max(\Delta q_k), \quad r_j \rightarrow r_k,$$

где

C_j – системная оценка цены старта ДОП r_j с момента времени t_j^f ,

q_j – локальная оценка цены старта ДОП r_j с момента времени t_j^f .

Для ДОП r_j , имеющих достаточные запасы времени h_j , т.е. $t_j^f + t_j^o < t_j^z + \nabla t_j - h_j$, отсрочка ∇t_j приводит к росту стоимости незавершенного

производства, поэтому штрафы Δq_j за их задержку (5) имеют отрицательные значения, тем самым способствуя более срочным ДОП занять рабочие места.

Отсрочка отстающих ДОП r_j , для которых $t_k^f + t_k^o + t_j^o \geq t_k^z + \nabla t_k$, создает запас времени h_j , а задержка r_j при $t_j^f + t_j^o < t_j^z + \nabla t_j - h_j$ лишь уменьшает значение q_i и актуальность работы r_j , поскольку штрафы за задержку отсроченных работ (5) уменьшаются относительно штрафов (6) от конкурирующих ДОП $r_k \in R_\omega$.

Таким образом, смещения критичных сроков выполнения ДОП $r_i \in R_v$ от внеплановых задержек снижает конкурентность работ $r_j \in R_v, r_j \notin (r_i \dots R_v)$ при распределении на рабочие места, и вместо них распределяются ДОП $r_k \in R_\omega$, относящиеся к другим заказам и имеющие лучшие оценки C_k (7). Это позволяет использовать конкурентный метод [3] синтеза производственных расписаний для синхронизации оперативных планов цехов при возникновении задержек производства и снабжения от ранее установленных сроков.

Алгоритм формирования и корректировки производственного плана.

1. Расчет длительности ПЦ изделий от контрактных сроков выполнения заказов к датам начальных работ и вычисление критичных сроков t_z выполнения ДОП r_j .
2. Конкурентное размещение работ по рабочим местам [3]:
 - 2.1. Выбор конкурирующих работ r_i, r_j ;
 - 2.2. Моделирование первоочередного распределения ДОП r_i и размещение на оставшемся ресурсе времени рабочих мест r_j . Вычисление из (5) штрафа Δq_j за задержку работы r_j и цены C_i (7) первоочередного распределения r_i ;
 - 2.3. Моделирование первоочередного распределения ДОП r_j и размещение на оставшемся ресурсе времени рабочих мест r_i . Вычисление штрафа Δq_i (6) и цены C_j ;
 - 2.4. Исключение из конкурентов на первоочередное распределение ДОП r_j с более высокой оценкой ($C_j > C_i$);
 - 2.5. Выполнение шагов 2.1–2.4 для ДОП r_i с оставшимися конкурентами;
 - 2.6. Распределение на рабочее место ДОП с наименьшей ценой (7);
 - 2.7. Выполнение 2.1.–2.7. до распределения всех оставшихся ДОП.
3. Формирование составов первоочередных работ цехов.
4. Обновление множества ДОП на основе данных диспетчерского учета выполненных работ. Исключение из плана выполненных работ. Если все работы выполнены, то конец.
5. Если выполнение работ соответствует плану, то переход к п. 4.
6. Корректировка сроков выполнения задержанных ДОП или сроков ожидаемого поступления комплектующих, полуфабрикатов от предприятий-смежников;
7. Корректировка сроков выполнения заказов и пересчет значений t_z, q_j ;
8. Переход к п. 2.

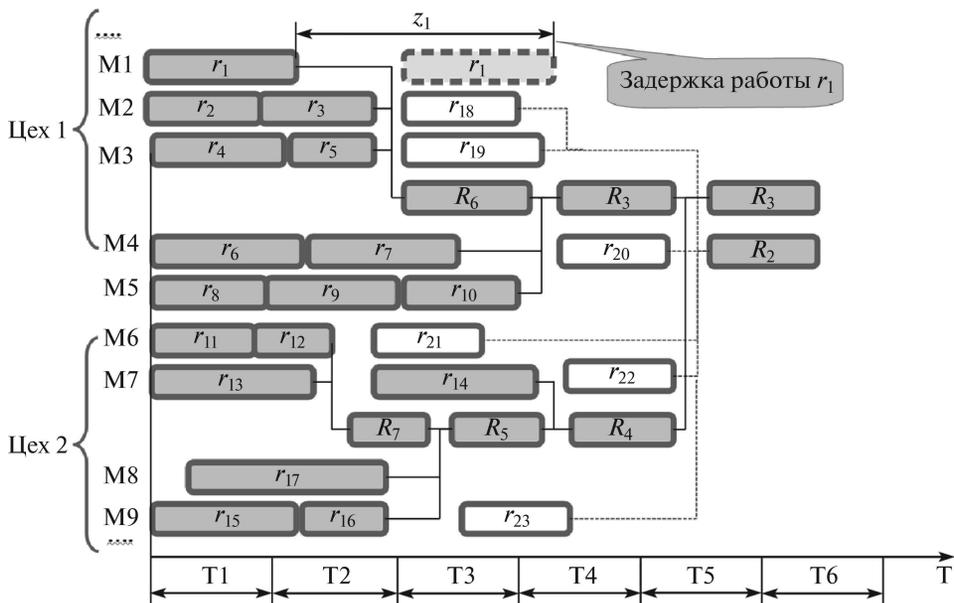


Рис. 4. Расписание работ на периоды T1–T6.

Количество корректировок плана завода (пп. 6, 7, 8 алгоритма) зависит от стабильности процессов производства и снабжения.

Рассмотрим *пример*. Пусть имеется производственное расписание π по изготовлению изделий R_1 и R_2 (рис. 4). Оба изделия изготавливаются в смежных цехах 1 и 2. Изделие R_1 включает узлы R_3 и R_4 ($(R_3, R_4) \subseteq R_1$), а изделие R_2 – детали $r_{18}–r_{23}$. В свою очередь $(r_8, r_9, r_{10}, R_6) \subseteq R_3$, $(r_{14}, R_5) \subseteq R_4$, $(r_{15}, r_{16}, r_{17}, R_7) \subseteq R_5$, $(r_1, r_2, r_3, r_4, r_5) \subseteq R_6$, $(r_{11}, r_{12}, r_{13}) \subseteq R_7$. Горизонт планирования включает периоды времени T1–T6. В цехе 1 на рабочем месте M1 выполнение r_1 задерживается на время z_1 . Требуется перестроить работу цехов и построить производственное расписание π^* (рис. 5), обеспечивающее первоочередное выполнение работ, относящихся к наиболее актуальным заказам, из числа тех, которые не имеют задержек в производстве и снабжении.

В соответствии с п. 1–5 алгоритма формируем расписание π на период T1–T6. Конкурентность ДОП $r_i \in R_1$ и $r_j \in R_2$ рассчитывается исходя из контрактных сроков выполнения заказов R_1 и R_2 до конца периода T6. Длительность ПЦ изделия R_1 превышает длительность ПЦ заказа R_2 , и критичное время выполнения ДОП $r_2–r_{16}$ наступает раньше, чем для $r_{18}–r_{23}$ заказа R_2 . Поэтому оценки $q_2–q_{16}$ превышают значения $q_{18}–q_{23}$, и ДОП $r_2–r_{16}$ распределяются на рабочие места M1–M9 раньше, чем ДОП $r_{18}–r_{23}$ изделия R_2 .

Задержка выполнения r_1 ведет к переносу срока сдачи R_1 (п. 6 алгоритма) на конец периода T7. Перенос срока сдачи R_1 приводит к пересчету (п. 7 алгоритма) критичных сроков $r_i \subseteq R_1$ и критериальных оценок $q_2–q_{16}$. О задержке z_1 становится известно в конце периода T1, когда уже были выполнены ДОП r_2 и r_{11} . Поэтому на период T2 планируется завершение работ $r_4, r_6, r_{12}, r_{13}, r_{15}$, начатых в период T1, а работы $r_3, r_5, r_7, r_9, r_{10}, r_{14}, r_{16}$,

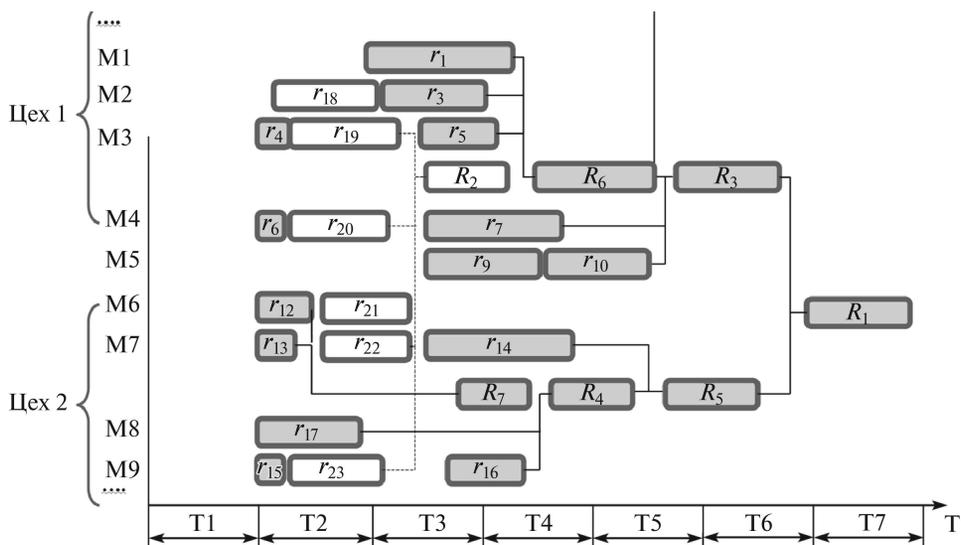


Рис. 5. Расписание работ на периоды T2–T7.

r_{17} получают “отсрочки” критических сроков выполнения, что в свою очередь снижает их конкурентные оценки $q_3, q_5, q_7, q_9, q_{10}, q_{14}, q_{16}, q_{17}$.

При повторном распределении ДОП по рабочим местам (п. 2 алгоритма) $r_3, r_5, r_7, r_9, r_{10}, r_{14}, r_{16}, r_{17}$ уступают очередь работам r_{18} – r_{23} , относящимся к изделию R_2 . В итоге получаем расписание π' на период T2–T7, в котором план работы цеха 2 приведен в соответствие с изменениями в работе цеха 1.

4. Непрерывное планирование

Динамика позаказного производства обуславливает необходимость ежедневного пересчета производственных расписаний по нескольким вариантам исходных данных (предполагаемые сроки поступления материалов, комплектующих и полуфабрикатов от смежников, непредвиденные задержки производства, смена приоритетов заказов и т.д.).

После проведения корректировок исходных данных выполняется перерасчет ПР, анализируются результаты и, если прогноз по срокам выполнения заказов оказывается приемлемым, формируется номенклатура запуска первоочередных работ для каждого цеха и составляются производственные задания участкам (рис. 6).

Формирование производственных партий также ведется на основе оценки конкурентности ДОП и группирования деталей с близкими оценками срочности их изготовления [5], а при интеграции производственных циклов с плановыми ремонтами оборудования используются оценки срочности ремонта, которые соотносятся с оценками срочности (напряженности) технологических операций [6]. Отсутствие в конкурентном методе синтеза ПР процедур ветвления обеспечивает возможность планирования производства завода в режиме реального времени с многократными корректировками исходных данных о режимах работы предприятия [7].

Заказ	Челка	Обозначение	Наименование	Цех	№ оп	Операция	Оборудование	Трудн	Кол-во	Сдано	Налич	№ зад	Дата н	Дата ок	Заготовка	Материал	р-р1	р-р2	Норма
1410	1713-37-0007	1391-37-1006-01	ВТЯЛКА	350	045	ТОКАРНАЯ	15732	1.6	10	0	10	0	24.12.13 08:24	24.12.13 10:47	Круг	120181107	120	0	4.6166
1410	1713-37-0007	1391-37-1006-01	ВТЯЛКА	350	045	ТОКАРНАЯ	15732	1.6	10	0	10	0	24.12.13 10:25	24.12.13 13:19	4Круг	120181107	120	0	4.6166
1410	1391-01-0107	1391-01-1027	ТРЕПА	350	195	ТОКАРНАЯ	1740P-3	30	1	0	1	0	24.12.13 22:19	24.12.13 04:11	Лист	120181107	32	400	293.7157
1410	1391-24-0115	1391-24-1048	КОРПУС	350	030	ТОКАРНАЯ	14M65	15.2	1	0	1	0	25.12.13 08:25	24.12.13 08:01	Полова	Гр.120181107	0	0	138
1410	1391-24-0111	1391-24-1012	ПЛАТА	350	045	ТОКАРНАЯ	15732	2	10	0	10	0	25.12.13 10:28	24.12.13 08:47	Круг	120181107	105	0	4.4183
1410	1391-24-0104	1391-24-1011	КОЛОДКА	350	020	ТОКАРНАЯ (Фланс №1)	14M65	2.64	10	0	10	0	25.12.13 08:27	24.12.13 03:11	ПОКОВКА	Гр.14017H2	0	0	24.6
1410	1391-42-0004-01	1391-42-1002	ВТЯЛКА	350	045	ТОКАРНАЯ	1740P-3	12	1	0	0	0	25.12.13 04:26	24.12.13 10:11	ПОКОВКА	Гр.120181107	10	0	177
1410	1391-24-0111	1391-24-1012	ПЛАТА	350	055	ТОКАРНАЯ	15732	1.5	10	0	10	0	25.12.13 08:27	24.12.13 03:11	Круг	120181107	105	0	4.4183
1410	1391-24-0129	1391-24-1031	ВТЯЛКА ВИНТОВАЯ	350	076	ТОКАРНАЯ (Фланс №3)	1740P-3	16	1	0	1	0	25.12.13 08:25	24.12.13 03:01	Полова	Гр.120181107	0	0	138
1410	1713-01-0001	1391-01-1109	ШПИНДА	350	095	ТОКАРНАЯ	15732	4.5	16	14	2	0	27.12.13 01:42	27.12.13 19:04	Круг	30843M-PA	65	0	16.68
1410	1391-24-0104	1391-24-1025	КОЛОДКА	350	020	ТОКАРНАЯ (Фланс №1)	14M65	2.64	10	0	10	0	27.12.13 08:30	24.12.13 03:01	Полова	Гр.14017H2	0	0	24.6
1410	1713-05-0001	1391-05-1024	БОЛТ	350	095	ТОКАРНАЯ	15732	0.85	18	0	18	0	27.12.13 10:30	24.12.13 10:02	Круг	07019H46	40	0	1.2391
1410	1713-01-0001	1391-01-1109	ШПИНДА	350	115	ТОКАРНАЯ	15732	2	16	14	2	0	27.12.13 15:27	24.12.13 13:25	Круг	30843M-PA	65	0	16.68
1410	1391-02-0109	1391-02-1055	КОРПУС	350	020	ТОКАРНАЯ	14M638	5	12	0	12	0	27.12.13 18:00	24.10.17 00	ПОКОВКА	Гр.120181107	0	0	72
1410	1391-41-0102	1391-41-1008	КОРПУС	350	090	ТОКАРНАЯ (Фланс №2)	14M65	24	1	0	1	0	30.12.13 01:49	24.12.13 01:45	Полова	Гр.14017H2	0	0	242
1410	1713-05-0001	1391-05-1007	БОЛТ	350	095	ТОКАРНАЯ	15732	0.7	12	0	12	0	30.12.13 02:30	24.12.13 13:25	Круг	20143	35	0	0.882
1410	1391-24-0122	1391-24-1023	ГРЕБЕНЬ	350	040	ТОКАРНАЯ	14M65	100.5	1	0	1	0	30.12.13 06:38	24.11.10 05	ПОКОВКА	Гр.120181107	0	0	1720
1410	1713-05-0001	1391-05-1008	БОЛТ	350	115	ТОКАРНАЯ	15732	0.53	18	0	18	0	30.12.13 08:32	24.12.13 07:57	Круг	07019H46	40	0	1.2391
1410	1391-24-0111	1391-24-1012	ПЛАТА	350	090	ТОКАРНАЯ	15732	3	10	0	10	0	30.12.13 12:31	24.12.13 08:21	Круг	120181107	105	0	4.4183
1410	1713-05-0001	1391-05-1006	ВТЯЛКА	350	120	ТОКАРНАЯ	14M65	23.5	1	0	1	0	31.12.13 01:43	24.10.15	Полова	Гр.14017H2	230	0	311.4717
1410	1713-05-0001	1391-05-0101	КОРПУС	350	210	ТОКАРНАЯ	14M65	54	1	0	1	0	31.12.13 22:20	24.10.20	0	0	0		
1410	1713-24-0001	1391-24-1027	ВТЯЛКА ВИНТОВАЯ	350	070	ТОКАРНАЯ (Фланс №3)	14M65	12	1	0	1	0	3.01.14 01:19	24.11.15	Полова	Гр.120181107	0	0	170
1410	1391-24-0101	1391-24-1010	БАЛАНСИР ВИНТОВ	350	115	ТОКАРНАЯ	15732	2.5	10	0	10	0	3.01.14 21:25	24.11.23	Полова	25017H25-W	50	100	15.0755
1410	1713-01-0001	1391-01-1101	ЗАПЛИСКА	350	025	ТОКАРНАЯ	1740P-3	3.8	4	0	4	0	6.01.14 20:08	24.10.32	Круг	С3	85	0	3.8328
1410	1391-41-0002	1391-41-1008	КОРПУС ПОДШИПТ	350	030	ТОКАРНАЯ	14M65	82	1	0	1	0	8.01.14 10:08	24.10.08	Полова	Гр.120181107	0	0	467
1410	1713-24-0001	1391-24-1078-01	БОЛТ	350	030	ТОКАРНАЯ	1740P-3	0.5	16	0	16	0	8.01.14 10:30	24.10.32	Круг	120181107	28	0	0.3884
1410	1713-01-0001	1391-01-1109	ЗАПЛИСКА	350	025	ТОКАРНАЯ	1740P-3	3.6	7	0	7	0	9.01.14 19:30	24.11.34	Круг	С3	60	0	3.3924
1410	1391-24-0104	1391-24-1024	КОЛОДКА	350	020	ТОКАРНАЯ	14M65	05	1	0	1	0	9.01.14 05:12	24.11.01	Полова	25017H25-W	50	100	15.0755
1410	1391-24-0105	1391-24-1010	БАЛАНСИР ВИНТОВ	350	115	ТОКАРНАЯ	15732	2.5	10	0	10	0	9.01.14 09:32	24.10.11	Полова	25017H25-W	50	100	15.0755
1410	1713-01-0001	1391-01-1040	ШАЙБА	350	070	ТОКАРНАЯ	1740P-3	8	1	0	1	0	13.01.14 00:11	24.10.31	Лист	120181107	45	350	43.2731
1410	1713-01-0001	1391-01-1032	КОРПУС	350	080	ТОКАРНАЯ	1740P-3	10	1	0	1	0	13.01.14 23:14	24.10.31	Полова	Гр.14017H2	0	0	61.5
1410	1713-24-0001	1391-41-0002	ПОДШИПТНИК РАД	350	035	ТОКАРНАЯ	1740P-3	21.7	1	0	1	0	14.01.14 08:15	24.10.31	0	0	0		
1410	1391-24-0104	1391-24-1025	БОЛТ	350	050	ТОКАРНАЯ	1740P-3	0.3	110	0	110	0	14.01.14 08:15	24.10.31	Круг	120181107	15	0	0.0474
1410	1713-05-0001	1391-05-1006	ВТЯЛКА	350	125	ТОКАРНАЯ	14M65	15.5	1	0	1	0	14.01.14 18:15	24.10.25	Круг	14017H2	230	0	311.4717
1410	1713-24-0001	1391-41-0002	ПОДШИПТНИК РАД	350	055	ТОКАРНАЯ	1740P-3	12	1	0	1	0	15.01.14 11:51	24.10.25	0	0	0		
1410	1713-05-0001	1391-05-1006	ВТЯЛКА	350	130	ТОКАРНАЯ	14M65	17	1	0	1	0	15.01.14 12:25	24.10.25	Круг	14017H2	230	0	311.4717
1410	1391-42-0004-01	1391-42-1002	ВТЯЛКА	350	045	ТОКАРНАЯ	1740P-3	12	1	0	1	0	15.01.14 16:15	24.10.31	ПОКОВКА	Гр.120181107	10	0	177
1410	1391-24-0102	1391-24-1141	ПЛИСКА	350	095	ТОКАРНАЯ	1740P-3	0.9	16	0	16	0	15.01.14 22:05	24.10.25	Лист	120181107	20	50	1.512
1410	1713-01-0001	1391-01-1001	ПОДШИПТНИК РАД	350	035	ТОКАРНАЯ	1740P-3	21.7	1	0	1	0	15.01.14 13:11	24.11.21	0	0	0		
1410	1391-01-0121	1391-01-1061	ВТЯЛКА ШПИЦЕВА	350	020	ТОКАРНАЯ (Фланс №2)	1740P-3	20	1	0	1	0	17.01.14 10:20	24.10.04	ПОКОВКА	Гр.120181107	0	0	124
1410	1391-24-0108	1391-24-1141-01	ПЛИСКА	350	085	ТОКАРНАЯ	1740P-3	0.9	16	0	16	0	17.01.14 11:20	24.10.06	Лист	120181107	20	50	1.68
1410	1713-01-0001	1391-01-1001	ПОДШИПТНИК РАД	350	055	ТОКАРНАЯ	1740P-3	16	1	0	1	0	20.01.14 03:20	24.10.06	0	0	0		
1410	1713-05-0001	1391-05-1025	ПРЕСТАВКА	350	030	ТОКАРНАЯ	1740P-3	19.5	1	0	1	0	20.01.14 06:20	24.10.31	ПОКОВКА	Гр.14017H2	0	0	72
1410	1391-02-0107	1391-02-0109	СТАКАН	350	045	ТОКАРНАЯ	15732	0.7	12	0	12	0	20.01.14 14:25	24.10.23	0	0	0		
1410	1391-24-0108	1391-24-1022	КОЛЫШО	350	020	ТОКАРНАЯ	1740P-3	8.3	1	0	1	0	21.01.14 08:21	24.10.18	Лист	120181107	0	0	0

Рис. 6. Отбор заданий из списка первоочередных работ.

Если работа не может быть вовремя размещена на рабочее место, то она включается в состав дефицита по мощностям. Дефицит по мощностям используется для формирования заданий для контрагентов [8].

По мере поступления данных о выполненных работах и фактических сроках их выполнения эти работы исключаются из расчета, а состав и сроки актуального производственного расписания и номенклатура запуска при перерасчете меняются. Тем самым производственное планирование ведется непрерывно, с каждым днем пополняясь новыми данными, изменениями в портфеле заказов, сведениями о фактических сроках поставки материалов, комплектующих, работ смежников и т.п. Высокая скорость расчетов обеспечивает выполнение производственного планирования в режиме реального времени. Например, ПР Сафоновогского электромашиностроительного завода (концерн «РУСЭЛПРОМ»), включающее более 50 тысяч операций, формируется за 2–3 мин, а расписание производства ЦКБМ («РОСАТОМ»), включающее более 100 тысяч операций, формируется за 5–4 мин.

5. Заключение

Предложенный метод синхронизации планов производственных подразделений обеспечивает плавную, в режиме реального времени, адаптацию плановых показателей к воздействиям внутренним и внешних факторов, поддержанию хода производства. Высокая скорость расчета номенклатуры первоочередных работ обеспечивает возможность непрерывного планирова-

ния производства. Результаты статьи реализованы в системе “САПФОРД” (www.sapford.ru) и могут быть использованы планово-диспетчерскими службами машиностроительных предприятий с позаказным характером производства без ограничений по объемам номенклатуры запуска и горизонту планирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Лазарев А.А. и др.* Теория расписаний. Задачи и алгоритмы. М.: МГУ им. М.В. Ломоносова, 2011.
2. *Артемов А.А.* Цифровое производство с использованием систем Arrius-PLM и 1С: MES на платформе “1С: Предприятие” // Журн. “САПР и Графика” 2019. № 9. С. 18–23.
3. *Саратов А.А.* Конкурентный метод синтеза производственных расписаний // Изв. ТулГУ. Технические науки. 2014. № 3. С. 104–110.
4. *Саратов А.А.* Согласование производственных циклов методом взаимных штрафов // Автоматизация процессов управления. 2019. № 1. С. 66–73.
5. *Саратов А.А.* Конкурентный метод расчета партий запуска в позаказном производстве // Изв. ТулГУ. Технические науки. 2018. № 8. С. 179–184.
6. *Саратов А.А.* Планирование планово-предупредительных ремонтов оборудования при автоматизированном синтезе производственных расписаний // Изв. ТулГУ. Технические науки. 2017. № 12. С. 217–225.
7. *Кузьмин А.М., Саратов А.А.* Оптимизация номенклатуры запуска в позаказном производстве // Тез. 12 Всеросс. конф. молодых ученых и специалистов “Будущее машиностроения России”. Москва, 2016. С. 41–45.
8. *Саратов А.А.* Оптимизация структуры кооперации в позаказном производстве // Изв. ТулГУ. Технические науки. 2018. № 6. С. 435–443.

Статья представлена к публикации членом редколлегии А.А. Лазаревым.

Поступила в редакцию 20.02.2020

После доработки 28.08.2020

Принята к публикации 10.09.2020