

УДК 621-235:004:519.8

Н.Н. Гушинский¹, О. Баттайа², А. Долгий³

МОДЕЛИ И МЕТОДЫ СИНТЕЗА СТРУКТУРЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ НА ПОТОЧНОЙ ЛИНИИ ИЗ СТАНКОВ СО СТАЦИОНАРНЫМ ПРИСПОСОБЛЕНИЕМ

Рассматривается задача проектирования поточной линии, комплектуемой из однопозиционных агрегатных станков со стационарным приспособлением, для обработки деталей одного наименования. Предлагаются математические модели и методы синтеза структуры технологического процесса обработки на ней. Критерием качества искомого решения принимается оценка стоимости оборудования линии. Учитываются основные технологические и конструктивные ограничения. Предлагается декомпозиционная схема решения исходной задачи и ее сведения к задаче смешанного линейного программирования. Приводятся результаты вычислительных экспериментов.

Введение

Специальные агрегатные металлорежущие станки [1, 2] широко используются в серийном и крупносерийном производстве, поскольку благодаря высокой степени концентрации операций и уровню автоматизации технологического процесса они обеспечивают высокую производительность и точность обработки при сравнительно небольших требованиях к квалификации станочников-операторов, невысокой себестоимости выпускаемой продукции и занимаемой площади. Важным этапом разработки агрегатного оборудования является аванпроектирование, в процессе которого формируются основные проектные решения (структура и основные параметры технологического процесса обработки детали, компоновки станков и т. п.), во многом определяющие эффективность создаваемого оборудования. Этот этап достаточно трудоемок, связан с решением целого ряда сложных технико-экономических задач и требует привлечения высококвалифицированных специалистов.

Аванпроектирование агрегатного оборудования существенно усложняется при проектировании поточной линии из нескольких станков для обработки детали в случае, когда эта обработка не может быть реализована на одном станке. В работах [3, 4] предложены математическая модель и декомпозиционная схема решения задачи синтеза структуры технологического процесса обработки деталей на поточной линии, комплектуемой из станков со стационарным приспособлением, приспособлением на поворотном столе или на двухпозиционном передвижном столе. Важной особенностью этих станков являлось отсутствие возможности применения параллельно-последовательной схемы совмещения технологических переходов на позициях. Вопросы использования такой схемы для станков с приспособлением на поворотном столе рассматривались в [5].

В настоящей работе возможность применения параллельно-последующей схемы исследуется для станков со стационарным приспособлением.

1. Постановка задачи

Рассматривается задача синтеза структуры технологического процесса (ТП) обработки деталей на поточной линии, состоящей из однопозиционных агрегатных станков со стационарным приспособлением. Предполагается, что обработка на станке может производиться с трех из четырех возможных (сверху, слева, сзади, справа) сторон детали последовательно несколькими блоками инструментов из установленных на соответствующих револьверных бабках (рис. 1 и 2). На рис. 1 обработка сверху производится с помощью револьверной бабки, на которой установлены два блока по два инструмента, обработка слева – блоком из трех инструментов (шпиндельной коробкой), а обработка справа – блоком из одного инструмента (бабкой). На рис. 2 обработка слева производится с помощью двухшпиндельной коробки, а обработка справа и сзади – с помощью револьверных бабок, на которых установлены два блока по одному инструменту.

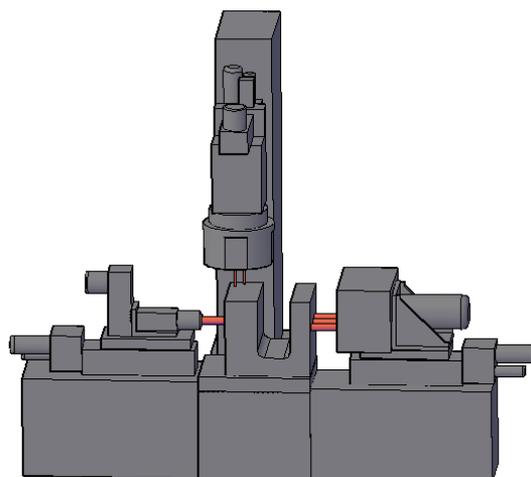


Рис. 1. Станок с вертикальной револьверной бабкой

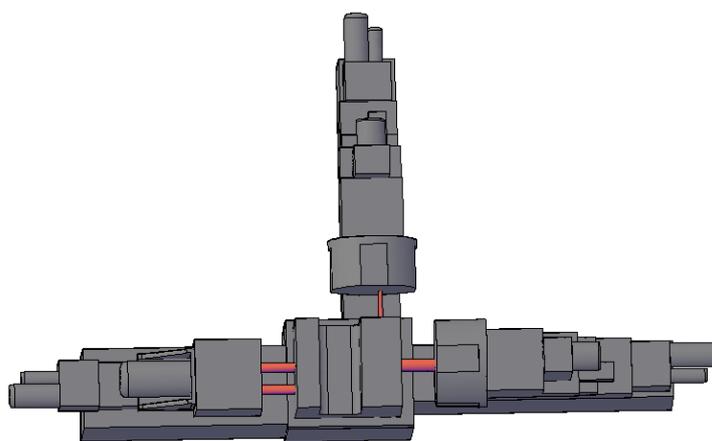


Рис. 2. Станок с двумя горизонтальными револьверными бабками

Предполагается, что заданы множества M_s технологических переходов по обработке элементов, расположенных на s -й стороне детали, $s=1, \dots, n_0$. Множество возможных положений детали задается матрицей \mathbf{H} размерности $r_0 \times n_0$, элементы r -й строки которой $(h_{r1}, h_{r2}, \dots, h_{rn_0})$ определяют способ обработки каждой стороны детали. При этом $h_{rs} \in \{0, 1, 2, 3, 4\}$, $r=1, \dots, r_0$, $s=1, \dots, n_0$, где $h_{rs}=1, 2, 3, 4$, если при ориентации r детали элементы ее стороны s можно обрабатывать сверху, слева, сзади и справа соответственно, а $h_{rs}=0$ означает, что обработка детали со стороны s при этой ориентации детали невозможна.

Положим $M = \bigcup_{s=1}^{n_0} M_s$. Для каждого перехода $u \in M$ определены следующие параметры:

- длина $\lambda(u)$ рабочего хода инструмента;
- сторона $s(u)$ детали, на которой расположен обрабатываемый элемент;
- диапазон $[\gamma_1(u), \gamma_2(u)]$ возможных значений минутной подачи;
- множество допустимых $h(u) \subseteq J = \{1, 2, 3, 4\}$ ориентаций инструмента при выполнении перехода u .

Искомыми в рассматриваемой задаче являются следующие параметры проектируемого ТП:

- число m станков в линии;
- положение H_k детали на k -м станке, $k=1, \dots, m$;
- количество b_{kj} блоков инструментов (шпиндельных головок), устанавливаемых на k -м станке для обработки сверху ($j=1$), слева ($j=2$), сзади ($j=3$) и справа ($j=4$), $k=1, \dots, m$;

– множество N_{kjl} переходов из M по обработке детали, выполняемых на k -м станке l -й шпиндельной головкой для обработки сверху ($j=1$), слева ($j=2$), сзади ($j=3$) и справа ($j=4$), $k=1, \dots, m$, $l=1, \dots, b_{kj}$;

– минутная подача $\Gamma_{kjl} \in [\max\{\gamma_1(u) | u \in N_{kjl}\}, \min\{\gamma_2(u) | u \in N_{kjl}\}]$ при выполнении множества N_{kjl} переходов единым блоком инструментов, $k=1, \dots, m$, $j \in J$, $l=1, \dots, b_{kj}$.

Этот набор параметров должен удовлетворять ряду технологических и конструктивных требований, учитывающих:

- возможный порядок выполнения переходов при обработке детали;
- необходимость и (или) невозможность выполнения отдельных групп переходов из M одной шпиндельной коробкой, одной револьверной головкой, в одном станке;
- предельно допустимое число m_0 станков в линии и число b_0 шпиндельных головок, устанавливаемых на револьверной бабке;
- ориентацию детали, принимающую во внимание возможность выполнения каждого из переходов при определенных ориентациях детали на станке;
- режимы обработки, обусловленные как взаимосвязями режимов обработки для переходов, выполняемых от одного силового узла, так и экономически целесообразными диапазонами этих параметров;
- производительность, регламентирующую время работы линии с учетом заданного коэффициента ее загрузки.

Ограничения, регламентирующие возможный порядок выполнения технологических переходов по обработке деталей, определяют отношение строгого частичного порядка на всем множестве переходов M , которое может быть задано орграфом $G=(M, A)$, в котором дуга $(u, u') \in A$ тогда и только тогда, когда переход $u \in M$ должен выполняться перед переходом $u' \in M$. Следует отметить, что если переходы u и u' обрабатывают элементы, расположенные на разных сторонах детали, то переход u должен быть выполнен на одном из предыдущих станков. Если эти переходы выполняют обработку с одной и той же ориентацией инструмента, то переход u может быть выполнен и одной из предыдущих шпиндельных головок.

Регламенты обязательности выполнения отдельных пар переходов из M в одной шпиндельной головке, одной и той же револьверной бабкой и на одном станке могут быть заданы неориентированными графами $G^{SB}=(M, E^{SB})$, $G^{SG}=(M, E^{SG})$ и $G^{SS}=(M, E^{SS})$, в которых ребро $e=\{u, u'\} \in E^{SB}$ ($e \in E^{SG}$, $e \in E^{SS}$) тогда и только тогда, когда переходы u и u' должны выполняться в одной шпиндельной головке, одной и той же револьверной бабкой и на одном станке соответственно.

Регламенты невозможности выполнения пар переходов из M на одном станке, одной и той же револьверной бабкой или шпиндельной головкой могут быть также заданы неориентированными графами $G^{DS}=(M, E^{DS})$, $G^{DG}=(M, E^{DG})$ и $G^{DB}=(M, E^{DB})$, в которых ребро $e=\{u, u'\} \in E^{DS}$ ($e \in E^{DG}$, $e \in E^{DB}$) тогда и только тогда, когда переходы u и u' не могут быть выполнены совместно на одном станке, одной и той же револьверной бабкой или шпиндельной головкой соответственно.

Предполагается, что матрица \mathbf{H} и множества $h(u)$, $u \in M$, согласованы с ограничениями обязательности выполнения некоторых пар переходов одной шпиндельной головкой, т. е. $h(u) = h(u')$ для всех $\{u, u'\} \in E^{SB}$ и матрица \mathbf{H} не содержит строк r , в которых $h_{rs(u)} \notin h(u)$.

Положим $P_{kj}=(P_{kjl}=(N_{kjl}, \Gamma_{kjl}) | l=1, \dots, b_{kj})$, $P_k=(P_{kj} | j \in J)$, $P=(P_k | k=1, \dots, m)$. Определим некоторые временные характеристики набора P .

Время выполнения непустого множества N_{kjl} переходов одной шпиндельной головкой при ее минутной подаче Γ_{kjl} находится по формуле $t^p(P_{kjl})=L(N_{kjl})/\Gamma_{kjl}+\tau^a$, где $L(N_{kjl})=\max\{\lambda(u) | u \in N_{kjl}\}$ и τ^a – время, связанное с подводом и отводом блока инструментов. Если для j -го типа обработки

установлена револьверная бабка, то время обработки детали $t^p(P_{kj})=\sum_{l=1}^{b_{kj}} t^p(P_{kjl})+\tau^g b_{kj}$, где τ^g – время, связанное с одним поворотом револьверной бабки, в противном случае $t^p(P_{kj})=t^p(P_{kj1})$. Время

обработки детали на k -м станке $t^p(P_k)=\max\{t^p(P_{kj}) | j \in J\}$, а на всей линии $T(P)=\max\{t^p(P_k) | k=1, \dots, m\}+\tau^r$,

где τ^r – время, связанное с перемещением детали транспортным устройством по станкам, их базированием и закреплением на станке. Для обеспечения требуемой производительности это время не должно превышать некоторого заданного значения T_0 .

Пусть C_1, C_2, C_3 и C_4 – «весовые» коэффициенты относительной стоимости оборудования одного станка, одной револьверной бабки, одной шпиндельной головки, устанавливаемой на револьверной бабке, и одной шпиндельной коробки соответственно. Тогда стоимость оборудования для j -го типа обработки вычисляется по формуле

$$C(b_{kj}) = \begin{cases} 0, & \text{если } b_{kj} = 0; \\ C_4, & \text{если } b_{kj} = 1; \\ C_2 + C_3 b_{kj}, & \text{если } b_{kj} > 1. \end{cases}$$

Задача отыскания наилучшего (по предполагаемой оценке суммарной стоимости оборудования линии) набора P может быть представлена следующими соотношениями:

$$\text{Min } Q(P) = C_1 m + \sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^4 C(b_{kj}); \quad (1)$$

$$T(P) \leq T_0; \quad (2)$$

$$\bigcup_{k=1}^m \bigcup_{j=1}^4 \bigcup_{l=1}^{b_{kj}} N_{kjl} = M; \quad (3)$$

$$N_{k'j'l'} \cap N_{k''j''l''} = \emptyset, \quad k', k'' = 1, \dots, m, \quad j', j'' = 1, \dots, 4, \quad l', l'' = 1, \dots, b_{k'j'}, \quad l' \neq l''; \quad (4)$$

$$\sum_{j=1}^4 \text{sign}(|N_{kj}|) \leq 3, \quad k = 1, \dots, m; \quad (5)$$

$$u \in \hat{N}_{k-1}, (u, u') \in A, u' \in N_{kjl}, u \notin N^j, \quad k = 1, \dots, m, \quad j \in J, \quad l = 1, \dots, b_{kj}; \quad (6)$$

$$u \in \hat{N}_{k-1} \cup \bigcup_{l'=1}^{l-1} N_{kjl'}, (u, u') \in A, u' \in N_{kjl}, u \cup N^j, \quad k = 1, \dots, m, \quad j \in J, \quad l = 1, \dots, b_{kj}; \quad (7)$$

$$|N_{kjl} \cap \{u, u'\}| \neq 1, \{u, u'\} \in E^{SB}, \quad k = 1, \dots, m, \quad j \in J, \quad l = 1, \dots, b_{kj}; \quad (8)$$

$$|\underline{N}_{kj} \cap \{u, u'\}| \neq 1, \{u, u'\} \in E^{SG}, \quad k = 1, \dots, m, \quad j \in J; \quad (9)$$

$$|\underline{N}_k \cap \{u, u'\}| \neq 1, \{u, u'\} \in E^{SS}, \quad k = 1, \dots, m; \quad (10)$$

$$|N_{kjl} \cap \{u, u'\}| \neq 2, \{u, u'\} \in E^{DB}, \quad k = 1, \dots, m, \quad j \in J, \quad l = 1, \dots, b_{kj}; \quad (11)$$

$$|\underline{N}_{kj} \cap \{u, u'\}| \neq 2 \text{ или } b_{kj} = 1, \{u, u'\} \in E^{DG}, \quad k = 1, \dots, m, \quad j \in J; \quad (12)$$

$$|\underline{N}_k \cap \{u, u'\}| \neq 2, \{u, u'\} \in E^{DS}, \quad k = 1, \dots, m; \quad (13)$$

$$s(u) = s(u'), \{u, u'\} \in N_{kjl}, \quad k = 1, \dots, m, \quad j \in J, \quad l = 1, \dots, b_{kj}; \quad (14)$$

$$\Gamma_{kjl} \in [\min\{\gamma_2(u) | u \in N_{kjl}\}, \max\{\gamma_1(u) | u \in N_{kjl}\}], \quad k = 1, \dots, m, \quad j \in J, \quad l = 1, \dots, b_{kij}; \quad (15)$$

$$\exists r_k \in \{1, \dots, r_0\}, h_{r_k s(u)} = j, \quad j \in h(u), \quad u \in N_{kjl}, \quad k = 1, \dots, m, \quad l = 1, \dots, b_{kj}; \quad (16)$$

$$m \leq m_0, \quad b_{kj} \leq b_0, \quad k = 1, \dots, m, \quad j \in J. \quad (17)$$

В этих соотношениях $\text{sign}(a)=1$, если $a>0$, и $\text{sign}(a)=0$, если $a\leq 0$; $\underline{N}_{kj} = \bigcup_{l=1}^{b_{kj}} N_{kjl}$; $\underline{N}_k = \bigcup_{j=1}^4 \underline{N}_{kj}$;

$$\hat{N}_k = \bigcup_{k'=1}^k \underline{N}_{k'}; N^j = \bigcup_{k=1}^m \bigcup_{l=1}^{b_{kj}} N_{kjl}.$$

Соотношения (3) и (4) обеспечивают выполнение каждого перехода из множества M ровно одной шпиндельной головкой; соотношение (5) гарантирует, что на каждом станке будет производиться обработка не более чем с трех сторон; соотношения (6) и (7) обеспечивают соблюдение ограничений предшествования; соотношения (8)–(13) гарантируют выполнение ограничений обязательности и невозможности совмещения пар переходов; соотношение (14) запрещают совмещение для одного типа обработки на станке переходов, соответствующих элементам, расположенным на разных сторонах детали; соотношения (15)–(17) обеспечивают выбор допустимых режимов обработки, положения детали и конфигурации линии соответственно.

2. Метод решения

Решение задачи (1)–(17) может быть получено с помощью следующей трехуровневой декомпозиционной схемы [3, 4]. На верхнем уровне решается задача A_1 отыскания наилучшего разбиения $\langle \underline{N}_1, \underline{N}_2, \dots, \underline{N}_m \rangle$ всего заданного множества переходов M по станкам. На среднем уровне решается задача A_2 выбора положения детали для выполнения множества переходов \underline{N}_k . На нижнем уровне решается задача A_3 определения возможности распределения множества переходов N_k по блочным переходам станка при фиксированном положении детали H_k на загрузочной позиции станка с помощью модификации графового подхода [5]. Эта модификация заключается в независимом распределении подмножеств технологических переходов, соответствующих различным сторонам обрабатываемой детали. Задача A_2 решается полным перебором по допустимым положениям детали. Для решения задачи A_1 используется теоретико-графовый подход, основанный на сведении исходной задачи к поиску оптимального ограниченного пути в специальном орграфе [4].

В настоящей работе для решения задачи (1)–(17) предлагается подход, основанный на ее сведении к задаче смешанного линейного программирования.

Введем следующие переменные:

X_{ukjl} – булевы переменные, равные 1, если переход u из M выполняется на k -м станке l -й шпиндельной головкой с ориентацией j , и равные 0 в противном случае, $u \in M$, $k=1, \dots, m_0$, $j \in J$, $l=1, \dots, b_0$;

Y_{kjl} – вспомогательные булевы переменные, равные 1, если на k -м станке производится обработка детали l -й шпиндельной головкой ориентации j , и равные 0 в противном случае, $k=1, \dots, m_0$, $j \in J$, $l=1, \dots, b_0$;

Y_{kj}^s – вспомогательные булевы переменные, равные 1, если на k -м станке производится обработка шпиндельной головкой при ориентации j элемента, расположенного на стороне s детали, и равные 0 в противном случае, $s=1, \dots, n_0$, $k=1, \dots, m_0$, $j \in J$;

Y_{kj} – вспомогательные булевы переменные, равные 1, если на k -м станке производится обработка шпиндельной головкой ориентации j , и равные 0 в противном случае, $s=1, \dots, n_0$, $k=1, \dots, m_0$, $j \in J$, $l=1, \dots, b_0$;

Z_k – вспомогательные булевы переменные, равные 1, если на k -м станке производится обработка, и равные 0 в противном случае, $k=1, \dots, m_0$;

h_{rk} – вспомогательные булевы переменные, равные 1, если на k -м станке деталь может быть обработана при ее ориентации r , и равные 0 в противном случае, $k=1, \dots, m_0$, $r=1, \dots, r_0$;

F_{kjl} – вспомогательные действительные неотрицательные переменные, используемые для определения времени обработки детали на k -м станке l -й шпиндельной головкой ориентации j , $k=1, \dots, m_0$, $j \in J$, $l=1, \dots, b_0$;

F_k – вспомогательные действительные неотрицательные переменные, используемые для определения времени обработки детали на k -м станке, $k=1, \dots, m_0$.

Для определения значения F_{kj} введем также вспомогательный параметр $f(u, u') = \max[\lambda(u), \lambda(u')] / \min[\gamma_2(u), \gamma_2(u')] + \tau^a$ для всех $j \in J$ и таких пар $(u, u') \in (M \times M) \setminus E^{DB}$, что $\max[\gamma_1(u), \gamma_1(u')] \leq \min[\gamma_2(u), \gamma_2(u')]$. При этом предполагается, что $(u, u') \in E^{DB}$, если $\max[\gamma_1(u), \gamma_1(u')] > \min[\gamma_2(u), \gamma_2(u')]$.

Тогда целевая функция (1) может быть представлена выражением

$$\text{Min } C_1 \sum_{k=1}^{m_0} Z_k + C_4 \sum_{k=1}^{m_0} \sum_{j=1}^4 Y_{kj1} + (C_2 + 2C_3 - C_4) \sum_{k=1}^{m_0} \sum_{j=1}^4 Y_{kj2} + C_3 \sum_{k=1}^{m_0} \sum_{j=1}^4 \sum_{l=3}^{b_0} Y_{kjl}. \quad (18)$$

Вспомогательные переменные Y_{kjl} , Y_{kjl}^s , Y_{kj} и Z_k определяются следующими соотношениями:

$$Y_{kj}^s \leq \sum_{u \in M_s} X_{ukj1}, \quad s=1, \dots, n_0, \quad k=1, \dots, m_0, \quad j \in J; \quad (19)$$

$$\sum_{u \in M_s} X_{ukj1} \leq |M_s| Y_{kj}^s, \quad s=1, \dots, n_0, \quad k=1, \dots, m_0, \quad j \in J; \quad (20)$$

$$\sum_{j=1}^4 Y_{kj}^s \leq 1, \quad s=1, \dots, n_0, \quad k=1, \dots, m_0; \quad (21)$$

$$\sum_{s=1}^{n_0} Y_{kj}^s \leq 1, \quad k=1, \dots, m_0, \quad j \in J; \quad (22)$$

$$Y_{kjl} \leq \sum_{u \in M} X_{ukjl}, \quad k=1, \dots, m_0, \quad j \in J, \quad l=1, \dots, b_0; \quad (23)$$

$$\sum_{u \in M} X_{ukjl} \leq M |Y_{kjl}|, \quad k=1, \dots, m_0, \quad j \in J, \quad l=1, \dots, b_0; \quad (24)$$

$$Y_{kjl} \leq Y_{kjl+1}, \quad k=1, \dots, m_0, \quad j \in J, \quad l=1, \dots, b_0-1; \quad (25)$$

$$\sum_{j=1}^4 Y_{kj} \leq 3, \quad k=1, \dots, m_0; \quad (26)$$

$$\sum_{j=1}^4 Y_{kj} \leq 3Z_k, \quad k=1, \dots, m_0; \quad (27)$$

$$Z_k \leq \sum_{j=1}^4 Y_{kj}, \quad k=1, \dots, m_0; \quad (28)$$

$$Z_k \geq Z_{k+1}, \quad k=1, \dots, m_0-1. \quad (29)$$

При выборе ориентации $(h_{r1}, h_{r2}, \dots, h_{rm_0})$ детали булевы переменные $Y_{kh_{rs}}^s$ принимают значение 1, если h_{rs} не равно 0, и соответственно $Y_{kj}^s = 0$ для $s=1, \dots, n_0, \quad k=1, \dots, m_0, \quad j \in J, \quad j \neq h_{rs}$. Это

условие равносильно тому, что $\sum_{s=1}^{n_0} \sum_{j=1, j \neq h_{rs}}^4 Y_{kj}^s = 0$. Таким образом, вспомогательные булевы

переменные h_{rk} могут быть определены из следующих соотношений:

$$h_{rk} \geq 1 - \sum_{s=1}^{n_0} \sum_{j=1, j \neq h_{rs}}^4 Y_{kj}^s, \quad r=1, \dots, r_0, \quad k=1, \dots, m_0; \quad (30)$$

$$\sum_{r=1}^{r_0} h_{rk} \geq 1, \quad k=1, \dots, m_0. \quad (31)$$

Следует отметить, что соотношения (30)–(31) могут выполняться для нескольких $r \in \{1, \dots, n_0\}$.

Искомые булевы переменные X_{ukjl} должны удовлетворять следующей системе соотношений:

$$\sum_{k=1}^{m_0} \sum_{j=1}^4 \sum_{l=1}^{n_0} X_{ukjl} = 1, \quad u \in M; \quad (32)$$

$$\sum_{k'=1}^{k-1} \sum_{j=1}^4 \sum_{l=1}^{b_0} X_{uk'j'l'} + \sum_{l'=1}^{l-1} X_{ukjl'} \geq X_{u'kjl}, \quad (u, u') \in A, \quad k=1, \dots, m_0, \quad j \in J, \quad l=1, \dots, b_0; \quad (33)$$

$$X_{ukjl} = X_{u'kjl}, \quad \{u, u'\} \in E^{SB}, \quad k=1, \dots, m_0, \quad j \in J, \quad l=1, \dots, b_0; \quad (34)$$

$$\sum_{l=1}^{b_0} X_{ukjl} = \sum_{l=1}^{b_0} X_{u'kjl}, \quad \{u, u'\} \in E^{SG}, \quad k=1, \dots, m_0, \quad j \in J; \quad (35)$$

$$\sum_{j=1}^4 \sum_{l=1}^{b_0} X_{ukjl} = \sum_{j=1}^4 \sum_{l=1}^{b_0} X_{u'kjl}, \quad \{u, u'\} \in E^{SS}, \quad k=1, \dots, m_0; \quad (36)$$

$$X_{ukjl} + X_{u'kjl} \leq 1, \quad \{u, u'\} \in E^{DB}, \quad k=1, \dots, m_0, \quad j \in J, \quad l=1, \dots, b_0; \quad (37)$$

$$\sum_{l=1}^{b_0} X_{ukjl} + \sum_{l=1}^{b_0} X_{u'kjl} + Y_{kj2} \leq 2, \quad \{u, u'\} \in E^{DG}, \quad k=1, \dots, m_0, \quad j \in J; \quad (38)$$

$$\sum_{j=1}^4 \sum_{l=1}^{b_0} X_{ukjl} + \sum_{j=1}^4 \sum_{l=1}^{b_0} X_{u'kjl} \leq 1, \quad \{u, u'\} \in E^{DS}, \quad k=1, \dots, m_0; \quad (39)$$

$$X_{ukjl} = 0, \quad u \in M, \quad k=1, \dots, m_0, \quad j \in J, \quad j \notin h(u), \quad l=1, \dots, b_0. \quad (40)$$

Вспомогательные переменные F_{kjl} и F_k определяются соотношениями

$$F_{kjl} \geq f(u, u) X_{ukjl}, \quad u \in M, \quad k=1, \dots, m_0, \quad j \in J, \quad l=1, \dots, b_0; \quad (41)$$

$$F_{kjl} \geq f(u, u')(X_{ukjl} + X_{u'kjl} - 1), \quad u, u' \in M, \quad k=1, \dots, m_0, \quad j \in J, \quad l=1, \dots, b_0; \quad (42)$$

$$F_k \geq \sum_{l=1}^{b_0} F_{kjl} + \tau^g (2Y_{kj2} + \sum_{l=3}^{b_0} Y_{kjl}), \quad k=1, \dots, m_0, \quad j \in J; \quad (43)$$

$$F_k \leq T_0; \quad (44)$$

$$F_{kjl} \in [0, T_0 - \tau^r], \quad k=1, \dots, m_0, \quad j \in J, \quad l=1, \dots, b_0; \quad (45)$$

$$F_k \in [0, T_0 - \tau^r], \quad k=1, \dots, m_0. \quad (46)$$

Если на k -м станке установлена револьверная бабка с b_{kj} шпиндельными головками с ориентацией инструмента j , то согласно (43) $F_k \geq \sum_{l=1}^{b_0} F_{kjl} + b_{kj} \tau^g$. Если на k -м станке установлена шпиндельная коробка с ориентацией инструмента j , то $F_k \geq F_{kj1}$, поскольку $Y_{kjl} = 0$ для $l=2, \dots, b_0$.

Для решения задачи (18)–(46) могут быть использованы известные пакеты для решения задач смешанного линейного программирования (CPLEX, XPRESS-MP и др.).

3. Вычислительные эксперименты

Эксперименты проводились на модифицированных задачах из [3] на ПК с объемом оперативной памяти 2 Гб и процессором Intel 2.33 ГГц с использованием академической версии CPLEX 12.2. Модификации заключаются в применении при проектировании линии только станков со стационарным приспособлением вместо станков с приспособлением на поворотном или передвижном столе. Кроме того, для модифицированных задач возможна установка нескольких шпindelных головок на револьверной бабке, в то время как в задачах из [4] это не допускается. Для «весовых» коэффициентов C_1, C_2, C_3 и C_4 были приняты значения 25, 5, 1, 2 соответственно. Параметры $\tau^a = \tau^s = \tau^r = 0,1$ мин. Характеристики модифицированных задач приведены в табл. 1. В этой таблице O^{OR} – плотность графа предшествования G (отношение числа дуг в транзитивном замыкании графа G к $|M||M-1|/2$). Параметры $O^{DB}, O^{DG}, O^{DS}, O^{SB}, O^{SG}$ и O^{SS} определяются соответственно отношением числа ребер в графах $G^{DB}, G^{DG}, G^{DS}, G^{SB}, G^{SG}$ и G^{SS} к $|M||M-1|/2$. Для задач (6)–(10) в качестве допустимого рассматривалось только одно положение детали, при котором обработка производится справа и слева, поскольку обрабатываемые элементы расположены на противоположных сторонах (сверху и снизу).

Таблица 1

Характеристики задач

| Задача | $ M $ | m_0 | n_0 | r_0 | O^{OR} | O^{DB} | O^{DG} | O^{DS} | O^{SB} | O^{SG} | O^{SS} |
|--------|-------|-------|-------|-------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 1 | 24 | 2 | 13 | 3 | 0,134 | 0,355 | 0,207 | 0,489 | 0,025 | 0,000 | 0,000 |
| 2 | 24 | 8 | 7 | 3 | 0,152 | 0,388 | 0,076 | 0,772 | 0,033 | 0,000 | 0,000 |
| 3 | 32 | 10 | 20 | 4 | 0,101 | 0,470 | 0,050 | 0,784 | 0,022 | 0,000 | 0,000 |
| 4 | 34 | 4 | 16 | 4 | 0,103 | 0,455 | 0,194 | 0,693 | 0,023 | 0,000 | 0,000 |
| 5 | 34 | 3 | 16 | 4 | 0,103 | 0,455 | 0,232 | 0,608 | 0,011 | 0,000 | 0,000 |
| 6 | 59 | 10 | 2 | 1 | 0,106 | 0,364 | 0,001 | 0,798 | 0,020 | 0,000 | 0,000 |
| 7 | 61 | 9 | 2 | 1 | 0,442 | 0,349 | 0,001 | 0,781 | 0,016 | 0,000 | 0,000 |
| 8 | 64 | 8 | 2 | 1 | 0,493 | 0,390 | 0,000 | 0,790 | 0,018 | 0,000 | 0,000 |
| 9 | 68 | 11 | 2 | 1 | 0,302 | 0,401 | 0,004 | 0,863 | 0,017 | 0,000 | 0,004 |
| 10 | 68 | 10 | 2 | 1 | 0,340 | 0,400 | 0,000 | 0,869 | 0,017 | 0,000 | 0,000 |

В табл. 2 представлены результаты решения модифицированных задач: с помощью декомпозиционного подхода (ДП) и модели смешанного линейного программирования (СЛП).

Таблица 2

Результаты решения задач

| Задача | ДП | | | | СЛП | | | |
|--------|-----------------|------------------|--------------|-----------|-----------------|------------------|------------------|-------------------|
| | Стоимость линии | Время решения, с | Число вершин | Число дуг | Стоимость линии | Время решения, с | Число переменных | Число ограничений |
| 1 | 77 | 33,1 | 412 | 2043 | 77 | 1,8 | 725 | 10 824 |
| 2 | 205 | 10,1 | 248 | 885 | 205 | 71,7 | 2697 | 36 290 |
| 3 | 246 | 46,7 | 2173 | 11 847 | 246 | 51,9 | 4371 | 80 243 |
| 4 | 142 | 226,5 | 1407 | 8877 | 142 | 5,5 | 1925 | 42 617 |
| 5 | 118 | 548,4 | 1023 | 6465 | 118 | 2,6 | 1540 | 32 175 |
| 6 | 250 | 69,2 | 15 322 | 84 064 | 250 | 477,6 | 6181 | 238 439 |
| 7 | 244 | 27,6 | 2452 | 10 145 | 244 | 43,1 | 6283 | 229 976 |
| 8 | 227 | 37,9 | 4528 | 21 404 | 227 | 10,9 | 5329 | 227 735 |
| 9 | 316 | 51,4 | 16 312 | 115 301 | 316 | 25,3 | 7855 | 338 788 |
| 10 | 291 | 65,3 | 15 579 | 100 651 | 291 | 13,9 | 7141 | 307 429 |

Заключение

В статье предложены математическая модель и трехуровневая декомпозиционная схема решения задачи синтеза структуры технологического процесса для обработки деталей одного наименования на поточной линии, комплектуемой из однопозиционных агрегатных станков со стационарным приспособлением. Эта схема предполагает решение на верхнем уровне задачи отыскания наилучшего разбиения всего заданного множества переходов по станкам, на среднем уровне – задачи выбора оптимального положения детали на станке, а на нижнем уровне – задачи определения минимальной стоимости оборудования станка для выполнения распределенного множества переходов при фиксированном положении детали. Разработана также модель СЛП, которая позволяет для решения исходной проектной задачи использовать пакеты CPLEX, XPRESS-MP и др. Проведенные вычислительные эксперименты на ряде реальных проектных задач показали преимущества использования модели СЛП.

Список литературы

1. Автоматизация процессов машиностроения / под ред. А.И. Дашенко. – М. : Высшая школа, 1991. – 480 с.
2. Дашенко, А. Конструкции агрегатных станков / А.И. Дашенко, А.И. Шмелев. – М. : Высшая школа, 1982. – 176 с.
3. Комплекс программ автоматизации аванпроектирования поточных линий из агрегатных металлорежущих станков / Г.М. Левин [и др.] // Информационные технологии программы Союзного государства «ТРИАДА»: основные результаты и перспективы : сб. науч. тр. – Минск : ОИПИ НАН Беларуси, 2010. – С. 143–158.
4. Integrated configurable equipment selection and line balancing for mass production with serial-parallel machining systems / O. Battaia [et al.] // Engineering Optimization. – 2014. – Vol. 46, № 10. – P. 1369–1388.
5. Combinatorial techniques to optimally customize an automated production line with rotary transfer and turrets / O. Battaia [et al.] // IE Transactions. – 2014. – Vol. 46, № 9. – P. 867–879.

Поступила 06.07.2015

¹*Объединенный институт проблем информатики НАН Беларуси,
Минск, Сурганова, 6
e-mail: gyshin@newman.bas-net.by*

²*Высшая национальная школа аэронавтики и космоса,
Тулуза, Белина, 10
e-mail: battaia@emse.fr*

³*Горная школа Нанта,
Нант, Кастлера, 4
e-mail: Alexandre.Dolgui@mines-nantes.fr*

N.N. Guschinsky, O. Battaia, A. Dolgui

MODELS AND METHODS FOR SYNTHESIS OF MANUFACTURING PROCESS STRUCTURE FOR MACHINING AT FLOW LINE OF STATIONARY MACHINES

A problem of design of a flow line composed of stationary machines is considered. Mathematical models and methods for synthesis of manufacturing process structure are proposed. The models take into account main technological and structural constraints with the criterion of minimizing the line equipment cost. A decomposition scheme for solving the initial problem and its formulation in terms of a mixed linear problem are developed. Computational results are also presented.