

ВЫБОР ВИДА СТАНОЧНЫХ ПРИСПОСОБЛЕНИЙ ПРИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКЕ ПРОИЗВОДСТВА ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНЫХ ИЗДЕЛИЙ

© 2020 А.А. Блюменштейн

Ульяновский государственный университет, г. Ульяновск, Россия

Статья поступила в редакцию 12.10.2020

Современные машиностроительные предприятия активно внедряют цифровые технологии на всех этапах технологической подготовки производства. Большое внимание при этом уделяется рациональному выбору вида станочных приспособлений. В данной статье рассматривается модель выбора вида станочных приспособлений в необходимом количестве. В качестве определяющих факторов рассматриваются количество, производительность и виды станочных приспособлений, нормы затрат трудовых и машинных ресурсов, плановый объём деталей и т.д. Модель может быть использована при разработке системы поддержки принятия решения при технологической проработке конструкторской документации.

Ключевые слова: поддержка принятия решения, универсально-сборочные приспособления, специальные неразборные приспособления, технологическая подготовка производства.

DOI: 10.37313/1990-5378-2020-22-5-41-47

ВВЕДЕНИЕ

При переходе к цифровому производству высокотехнологичных изделий возникает требование разработки информационных интеллектуальных систем для сопровождения всех этапов жизненного цикла, что позволяет повысить управляемость процессами, улучшить качество мониторинга за процессами, уменьшить производственные издержки, повысить прибыль компании и конкурентоспособность компании на рынке [1].

При переходе к концепции цифрового производства высокотехнологичных изделий на отечественных авиастроительных предприятиях большое внимание уделяется этапам технологической подготовки производства в части выбора и применения станочных приспособлений [3], в частности, это относится к их рациональному выбору [6]. В качестве одного из способов сокращения издержек предлагается разработка и применение автоматизированной системы поддержки принятия решения по выбору станочных приспособлений, которая осуществляла бы анализ конструкторско-технологических, экономических и организационных факторов самолетной детали и предполагаемого приспособления и выдавала рекомендации инженеру-технологу по заказу наиболее целесообразного вида технологической оснастки. Основными видами технологической оснастки были выбраны универсально-сборные приспособления (УСП) и неразборные специальные приспособления (НСП).

Реализация автоматизированной системы предполагает наличие оптимизационной математической модели, позволяющей осуществлять рациональный выбор станочного приспособления. В статье предлагается модель выбора необходимого набора НСП и УСП для производственного процесса.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Будем считать, что для некоторого цеха существует линия производства множества деталей и сборок $D = \{D_1, \dots, D_{N^{дет}}\}$ ($N^{дет}$ — количество видов деталей и сборок в цехе) с использованием множества неразборных специальных приспособлений $НСП = \{НСП_1, \dots, НСП_{N^{нсп}}\}$ ($N^{нсп}$ — количество НСП в цехе) и множества универсально-сборных приспособлений $УСП = \{УСП_1, \dots, УСП_{N^{усп}}\}$ ($N^{усп}$ — количество УСП в цехе). При этом имеют место соответствия:

$$\varphi^{нсп} \subseteq D \times НСП, \varphi^{усп} \subseteq D \times УСП \quad (1)$$

определяющие принадлежность видов деталей и сборок $D_{i^{дет}}$ к видам $НСП_{i^{нсп}}$ и $УСП_{i^{усп}}$ ($i^{дет} \in \{1, 2, \dots, N^{дет}\}$, $i^{нсп} \in \{1, 2, \dots, N^{нсп}\}$, $i^{усп} \in \{1, 2, \dots, N^{усп}\}$) из множеств D , $НСП$ и $УСП$ соответственно.

Под деталью или сборкой может подразумеваться полуфабрикат в случае, если механическая обработка с использованием УСП/НСП не является конечной для технологического процесса и предполагаются дальнейшие действия для получения готового изделия.

Предположим, что на заданный период времени M (измеряется в месяцах) по-

Блюменштейн Алексей Александрович, старший преподаватель кафедры математического моделирования технических систем, заведующий лабораторией РПСАС НИИЦ CALS-технологий. E-mail: blyumenshteyn@mail.ru

ступает потребность в производстве определенного количества деталей и сборок в объемах $V = \{V(1), V(2), \dots, V(M)\}$. Здесь $V(t)$ – множество требуемых значений объемов деталей и сборок в месяц t ; $V(t) = (V_1(t), V_2(t), \dots, V_{N^{дет}}(t))$, $V_j(t)$ – плановый объем деталей вида j .

При формировании планового объема деталей важным моментом является стадия запуска изделия в серию. При централизованной проработке конструкторской документации инженер-технолог не имеет актуального плана, поэтому в качестве плана используется объем деталей вида j в запускаемом в производство изделии.

Распределение объемов по НСП и УСП является неоднозначным и может определяться на основе некоторого критерия качества. Выделим некоторые наиболее важные характеристики, по которым дифференцируется выбор УСП и НСП: производительность, риски при использовании в производственном процессе, себестоимость. Каждая из характеристик может определять критерий качества при выборе приспособлений для выполнения производственного плана.

Введем обозначения для производительностей УСП и НСП:

P_{1ij} – производительность УСП вида i при производстве деталей вида j , $j \in \{1, 2, \dots, N^{дет}\}$, $i \in \{1, 2, \dots, N^{УСП}\}$ (количество деталей за 1 месяц);

P_{2ij} – производительность НСП вида i при производстве деталей вида j , $j \in \{1, 2, \dots, N^{дет}\}$, $i \in \{1, 2, \dots, N^{НСП}\}$ (количество деталей за 1 месяц).

При планировании производственной деятельности можно регулировать количество УСП и НСП разного вида, а также длительность использования приспособлений, введем следующие переменные:

$x_{1ij}(t)$ – количество УСП вида i , необходимых для производства деталей вида j , в момент времени t , $j \in \{1, 2, \dots, N^{дет}\}$, $t \in \{1, 2, \dots, M\}$, $i \in \{1, 2, \dots, N^{УСП}\}$.

$x_{2ij}(t)$ – количество НСП вида i , необходимых для производства деталей вида j , в момент времени t , $j \in \{1, 2, \dots, N^{дет}\}$, $t \in \{1, 2, \dots, M\}$, $i \in \{1, 2, \dots, N^{НСП}\}$;

τ_{1ij} – непрерывная длительность работы единицы УСП вида i при производстве деталей вида j , $j \in \{1, 2, \dots, N^{дет}\}$, $i \in \{1, 2, \dots, N^{УСП}\}$ (количество месяцев, в долях);

τ_{2ij} – непрерывная длительность работы единицы НСП вида i при производстве деталей вида j , $j \in \{1, 2, \dots, N^{дет}\}$, $i \in \{1, 2, \dots, N^{НСП}\}$ (количество месяцев, в долях).

Отметим, что каждая нормативная переналадка УСП [4] после выпуска установленного количества деталей будет считаться новой позицией УСП и включаться в $x_{1ij}(t)$. Аналогичным образом новой позицией в $x_{2ij}(t)$ будет считаться

НСП после плановых восстановительных работ.

В этом случае величина $Q_j(t)$:

$$Q_j(t) = \sum_{i: (D_j, УСП_i) \in \Phi^{УСП}} x_{1ij}(t) p_{1ij} + \sum_{i: (D_j, НСП_i) \in \Phi^{НСП}} x_{2ij}(t) p_{2ij}, \quad (2)$$

определяет количество деталей вида j , производимых в цехе за месяц t .

Очевидно, что выбор наборов из множества $X(t) = \left\{ x(t): x(t) = (x_1(t), x_2(t)), x_1(t) \in \mathbb{R}^{N^{УСП} \times N^{дет}}, x_2(t) \in \mathbb{R}^{N^{НСП} \times N^{дет}}, \right. \\ \left. x_{1ij}(t), x_{2kj}(t): 1 \leq j \leq N^{дет}, (D_j, УСП_i) \in \Phi^{УСП}, (D_j, НСП_k) \in \Phi^{НСП} \right\}$

является неоднозначным и должен удовлетворять ряду естественных ограничений.

В частности, площадь цеха в один временной такт может не позволить использовать все варианты множества $X(t)$. Задача оптимального размещения оборудования в цехе является отдельной сложной логистической производственной задачей, которая не рассматривается в данном исследовании, поэтому будем считать, что она будет решаться экспертами. Кроме размещения присутствуют ограничения по сборке различных вариантов УСП [2,4], которые определяются временем и существующим набором элементов на участке сборки. Одним из важных недостатков УСП являются достаточно низкая жесткость из-за наличия большого количества стыков элементов [2, 4], что зачастую является существенной проблемой для авиационного производства.

Все возможные варианты УСП и НСП для применения в цехе при условии наличия перечисленных выше естественных ограничений обозначим через множество $A(t)$.

Также есть ограничения, связанные с использованием трудовых ресурсов. Пусть известна вектор-функция $L(t) = (L_1(t), L_2(t), \dots, L_{N^{ТР}}(t))$, здесь $1 \leq t \leq M$, $N^{ТР}$ – количество видов трудовых ресурсов различной квалификации, $L_i(t)$ – количество трудовых ресурсов вида i , которые могут быть использованы во временной такт t . Значения функции $L(t)$ определяются штатным расписанием, графиком отпусков, другими факторами. Согласно нормам технологических процессов для каждого вида УСП и НСП на соответствующую деталь требуются фиксированные затраты трудовых ресурсов соответствующей квалификации.

Введем обозначение для нормозатрат по трудовым ресурсам:

a_{1ij} – вектор норм затрат трудовых ресурсов в i -ом УСП для j -ой детали, $a_{1ij} = (a_{1ij1}, a_{1ij2}, \dots, a_{1ijN^{ТР}})$, a_{1ijk} – норма затрат трудовых ресурсов k -го вида для обеспечения функционирования i -го УСП, детали вида j ;

a_{2lj} – вектор норм затрат трудовых ресурсов в l -ом НСП для j -ой детали, $a_{2lj} = (a_{2lj1}, a_{2lj2}, \dots, a_{2ljN^{ТР}})$, a_{2ljk} – норма за-

трат трудовых ресурсов k -го вида для обеспечения функционирования l -го НСП, детали вида j .

Таким образом, вектор трудовых затрат $\tilde{L}^j(t)$, направленный на производство детали вида j , может быть вычислен по формуле:

$$\tilde{L}^j(t) = \sum_{i:(D_j, \text{УСП}_i) \in \Phi^{\text{УСП}}} x_{1ij}(t) a_{1ij} + \sum_{i:(D_j, \text{НСП}_i) \in \Phi^{\text{НСП}}} x_{2ij}(t) a_{2ij}. \quad (4)$$

Таким образом, полные трудовые затраты $\tilde{L}(t) = \sum_{j=1}^{N^{\text{дет}}} \tilde{L}^j(t)$, т.е. составляют сумму затрат по каждому виду деталей. Условие обеспеченности трудовыми ресурсами можно записать в виде

$$\tilde{L}(t) \leq L(t). \quad (5)$$

Немаловажным фактором являются машинные ресурсы. В случае использовании станков с ЧПУ один оператор может обслуживать несколько единиц оборудования. В таком случае затраты трудовых ресурсов будут занимать незначительную часть по сравнению со стоимостью 1-ого машино-часа. Пусть известна вектор-функция $E(t) = (E_1(t), ME_2(t), \dots, E_{N^{\text{маш}}}(t))$, здесь $1 \leq t \leq M$, $N^{\text{маш}}$ – количество видов машинных ресурсов различной квалификации, $E_i(t)$ – количество машинных ресурсов вида i , которые могут быть использованы во временной такт t . Значения функции $E(t)$ определяются нагрузкой оборудования, профилактическими работами по обслуживанию и т.д.

Введем обозначение для нормозатрат по машинным ресурсам:

a'_{1ij} – вектор норм затрат машинных ресурсов в i -ом УСП для j -ой детали, $a'_{1ij} = (a'_{1ij1}, a'_{1ij2}, \dots, a'_{1ijN^{\text{ТР}}})$, a'_{1ijk} – норма затрат машинных ресурсов k -го вида для обеспечения функционирования i -го УСП, детали вида j ;

a'_{2lj} – вектор норм затрат машинных ресурсов в l -ом НСП для j -ой детали, $a'_{2lj} = (a'_{2lj1}, a'_{2lj2}, \dots, a'_{2ljN^{\text{ТР}}})$, a'_{2ljk} – норма затрат машинных ресурсов k -го вида для обеспечения функционирования l -го НСП, детали вида j .

Векторы норм трудовых и машинных затрат представляют из себя перечень переходов, выполняемых согласно технологическому процессу с использованием станочных приспособлений. В силу технических ограничений обычно УСП уступает НСП в режимах обработки или возможностях используемого оборудования, поэтому величины норм трудовых и машинных затрат будут зачастую различаться в пользу НСП [2, 5].

Вектор машинных затрат $\tilde{E}^j(t)$, направленный на производство детали вида j , может быть вычислен по формуле:

$$\tilde{E}^j(t) = \sum_{i:(D_j, \text{УСП}_i) \in \Phi^{\text{УСП}}} x_{1ij}(t) a'_{1ij} +$$

$$+ \sum_{i:(D_j, \text{НСП}_i) \in \Phi^{\text{НСП}}} x_{2ij}(t) a'_{2ij}. \quad (6)$$

Таким образом полные машинные затраты $\tilde{E}(t) = \sum_{j=1}^{N^{\text{дет}}} \tilde{E}^j(t)$, т.е. составляют сумму затрат по каждому виду деталей. Условие обеспеченности машинными ресурсами можно записать в виде

$$\tilde{E}(t) \leq E(t). \quad (7)$$

Важным фактором при принятии решения является стоимость затрат, связанных с выбором того или иного набора УСП и НСП. Рассмотрим финансовые затраты, влияющие на стоимость продукции при проектировании и изготовлении различных наборов УСП и НСП. Пусть c_{1ij} , c_{2lj} – приведенная к началу периода планирования стоимость затрат, связанных с проектированием, изготовлением и демонтажем i -ой УСП и l -ой НСП для j -ой детали, соответственно. Если до начала периода планирования НСП или УСП не были запущены в действие, то значения c_{1ij} , c_{2lj} представляют полную стоимость затрат на проектирование и изготовление. Если же приспособление было использовано в процессе производства какой-то период времени, то часть стоимости проектирования, изготовления и демонтаж списывается пропорционально номинальному времени работы приспособления, а остаток записывается в c_{1ij} , c_{2lj} , соответственно.

В этом случае общая стоимость затрат $C_{Пj}(t)$ от проектирования, изготовления и демонтаж УСП и НСП для деталей вида j , перенесенных на продукцию за один такт, может быть вычислена по формуле:

$$C_{Пj}(t) = \sum_{i:(D_j, \text{УСП}_i) \in \Phi^{\text{УСП}}} \frac{x_{1ij}(t) c_{1ij}}{\tau_{1ij}} + \sum_{l:(D_j, \text{НСП}_l) \in \Phi^{\text{НСП}}} \frac{x_{2lj}(t) c_{2lj}}{\tau_{2lj}}. \quad (8)$$

Также различные виды приспособлений требуют использование трудовых ресурсов различной квалификации, следовательно, различной стоимости трудового часа. Введем норму оплаты c_{Lk} трудовых ресурсов вида k , установим норму в виде оплаты за один временной такт (месяц). Тогда общая оплата труда $C_{Lj}(t)$ за один временной такт по деталям вида j определяется скалярным произведением:

$$C_{Lj}(t) = \sum_{k=1}^{N^{\text{ТР}}} \tilde{L}_k^j(t) c_{Lk}. \quad (9)$$

Аналогичным образом введем норму затрат C_{Ek} машинных ресурсов вида k , установим норму в виде оплаты за один временной такт (месяц). Тогда общие машинные затраты $C_{Ej}(t)$ за один временной такт по деталям вида j определяется скалярным произведением:

$$C_{Ej}(t) = \sum_{k=1}^{N^{\text{маш}}} \tilde{E}_k^j(t) c_{Ek}. \quad (10)$$

Также к переменным затратам можно отнести затраты, связанные с поддержкой функцио-

нирования УСП и НСП, такие как амортизация приспособлений, переналадка, ремонт, доработка конструкторской документации, затраты электрической энергии и т.д. Введем нормы затрат b_{1ij}, b_{2ij} на единицу УСП и НСП, соответственно. В этом случае переменные затраты $C_{bj}(t)$ можно рассчитать:

$$C_{bj}(t) = \sum_{i:(D_j, \text{УСП}_i) \in \Phi^{\text{УСП}}} x_{1ij}(t) b_{1ij} + \sum_{i:(D_j, \text{НСП}_i) \in \Phi^{\text{НСП}}} x_{2ij}(t) b_{2ij}. \quad (11)$$

Таким образом, суммарные денежные затраты $C_j(t)$ на один такт времени, определяемые поддержкой приспособлений УСП и НСП для деталей вида j , а также валовым выпуском продукции, представляют собой сумму определенных выше затрат:

$$C_j(t) = C_{Пj}(t) + C_{Lj}(t) + C_{Ej}(t) + C_{bj}(t). \quad (12)$$

Важным моментом в производственном процессе является стабильность функционирования системы, надежность всех элементов обеспечения планируемых валовых показателей выпускаемой продукции. Рассмотрим наиболее существенные риски, вызванные функционированием УСП и НСП: временные потери, финансовые потери, бракованная продукция. К факторам, определяющим вышеперечисленные риски, следует отнести квалификацию персонала, вид приспособлений, интенсивность загрузки приспособлений.

Введем следующие случайные величины ($j \in \{1, 2, \dots, N^{\text{дет}}\}$, $t \in \{1, 2, \dots, M\}$, $i \in \{1, 2, \dots, N^{\text{УСП}}\}$, $l \in \{1, 2, \dots, N^{\text{НСП}}\}$):

$\xi_{1ij}(t)$ – финансовые потери при использовании i -го УСП для детали вида j в момент времени t ;

$\eta_{1ij}(t)$ – временные потери при использовании i -го УСП для детали вида j в момент времени t (количество месяцев);

$\zeta_{1ij}(t)$ – объем брака при использовании i -го УСП для детали вида j в момент времени t ;

$\xi_{2lj}(t)$ – финансовые потери при использовании l -го НСП для детали вида j в момент времени t ;

$\eta_{2lj}(t)$ – временные потери при использовании l -го НСП для детали вида j в момент времени t (количество месяцев);

$\zeta_{2lj}(t)$ – объем брака при использовании l -го НСП для детали вида j в момент времени.

В силу естественных ограничений величины $\xi_{1ij}(t), \eta_{1ij}(t), \zeta_{1ij}(t), \xi_{2lj}(t), \eta_{2lj}(t), \zeta_{2lj}(t)$ неотрицательны, в общем случае значения величин подвержены временному влиянию. Оценка данных величин может быть проведена на основе статистического анализа, в котором можно определить возможный сезонный характер рисков, постоянство рисков и т.д.

ФОРМАЛИЗАЦИЯ ПРИНЦИПОВ ДЛЯ ВЫБОРА УСП И НСП

За счет выбора факторов, определяющих производственную деятельность предприятия, можно изменять те или иные критерии, которые наиболее важны при принятии управленческого решения.

Также следует отметить, что длительность использования приспособлений УСП и НСП определяется управленческим решением. Однако, для каждого вида приспособления есть нормативный срок работы, превышение этого срока влечет увеличение рисков: повышение количества брака, увеличение финансовых затрат, временные задержки.

Введем нормативные сроки использования приспособлений:

τ_{1ij}^H – нормативный срок длительности работы единицы УСП вида i при производстве деталей вида j , $j \in \{1, 2, \dots, N^{\text{дет}}\}$, $i \in \{1, 2, \dots, N^{\text{УСП}}\}$ (количество месяцев);

τ_{2lj}^H – нормативный срок длительности работы единицы НСП вида l при производстве деталей вида j , $j \in \{1, 2, \dots, N^{\text{дет}}\}$, $l \in \{1, 2, \dots, N^{\text{НСП}}\}$ (количество месяцев).

Рассмотрим следующие случайные величины: при $j \in \{1, 2, \dots, N^{\text{дет}}\}$, $t \in \{1, 2, \dots, M\}$,

$$i \in \{1, 2, \dots, N^{\text{УСП}}\}$$

$$\xi_{1ij}(t) = \begin{cases} \xi_{1ij}(t), & \tau_{1ij} \leq \tau_{1ij}^H; \\ \xi_{1ij}(t) (1 + \alpha_{1ij}(\tau_{1ij} - \tau_{1ij}^H)), & \tau_{1ij} > \tau_{1ij}^H. \end{cases} \quad (13)$$

$$\eta_{1ij}(t) = \begin{cases} \eta_{1ij}(t), & \tau_{1ij} \leq \tau_{1ij}^H; \\ \eta_{1ij}(t) (1 + \beta_{1ij}(\tau_{1ij} - \tau_{1ij}^H)), & \tau_{1ij} > \tau_{1ij}^H. \end{cases} \quad (14)$$

$$\zeta_{1ij}(t) = \begin{cases} \zeta_{1ij}(t), & \tau_{1ij} \leq \tau_{1ij}^H; \\ \zeta_{1ij}(t) (1 + \gamma_{1ij}(\tau_{1ij} - \tau_{1ij}^H)), & \tau_{1ij} > \tau_{1ij}^H. \end{cases} \quad (15)$$

при $j \in \{1, 2, \dots, N^{\text{дет}}\}$, $t \in \{1, 2, \dots, M\}$,

$$l \in \{1, 2, \dots, N^{\text{НСП}}\}$$

$$\xi_{2lj}(t) = \begin{cases} \xi_{2lj}(t), & \tau_{2lj} \leq \tau_{2lj}^H; \\ \xi_{2lj}(t) (1 + \alpha_{2lj}(\tau_{2lj} - \tau_{2lj}^H)), & \tau_{2lj} > \tau_{2lj}^H. \end{cases} \quad (16)$$

$$\eta_{2lj}(t) = \begin{cases} \eta_{2lj}(t), & \tau_{2lj} \leq \tau_{2lj}^H; \\ \eta_{2lj}(t) (1 + \beta_{2lj}(\tau_{2lj} - \tau_{2lj}^H)), & \tau_{2lj} > \tau_{2lj}^H. \end{cases} \quad (17)$$

$$\zeta_{2lj}(t) = \begin{cases} \zeta_{2lj}(t), & \tau_{2lj} \leq \tau_{2lj}^H; \\ \zeta_{2lj}(t) (1 + \gamma_{2lj}(\tau_{2lj} - \tau_{2lj}^H)), & \tau_{2lj} > \tau_{2lj}^H. \end{cases} \quad (18)$$

Введенные величины обозначают риски, соответствующие аналогичным рискам, если приспособления работают в штатном режиме, не превышая нормативные сроки, и значение соответствующих рисков растет (увеличивается математическое ожидание, дисперсия), если приспособления работают дольше установленных нормативов. Параметры α , β и γ в данном случае величина штрафа за выход из допустимых нормативов.

Формализуем выполнение принципа «точно в срок». Для обеспечения принципа «точно в срок» необходимо выполнение условия $Q_j(t) = V_j(t), 1 \leq j \leq N^{дет}$.

Принимая во внимание случайные временные задержки $\tilde{\eta}_{1ij}(t)$ i -го УСП для детали вида j , $\tilde{\eta}_{2lj}(t)$ l -го НСП для детали вида j , мы можем произвести переоценку реальной производительности приспособлений: вместо номинальной производительности p_{1ij} получаем производительность $\tilde{p}_{1ij}(t) = p_{1ij}/(1 + \tilde{\eta}_{1ij}(t))$, а вместо p_{2ij} получаем производительность $\tilde{p}_{2ij}(t) = p_{2ij}/(1 + \tilde{\eta}_{2lj}(t))$.

Различные способы производства порождают разные величины бракованной продукции $\tilde{\zeta}_{1ij}(t)$, $\tilde{\zeta}_{2lj}(t)$, которые не могут быть использованы в дальнейшем производстве или для реализации. Последнее означает, что для обеспечения необходимых плановых показателей следует произвести продукции больше на величину брака.

В этом случае ожидаемый объем выпуска $\tilde{Q}_j(t)$ будет случайной величиной и может быть рассчитан на основе выражения:

$$\begin{aligned} \tilde{Q}_j(t) = & \sum_{i:(D_j, УСП_i) \in \varphi^{УСП}} x_{1ij}(t) \left(\frac{p_{1ij}}{(1 + \tilde{\eta}_{1ij}(t))} + \tilde{\zeta}_{1ij}(t) \right) \\ & + \sum_{i:(D_j, НСП_l) \in \varphi^{НСП}} x_{2ij}(t) \left(\frac{p_{2ij}}{(1 + \tilde{\eta}_{2lj}(t))} + \tilde{\zeta}_{2lj}(t) \right). \end{aligned} \quad (19)$$

Тогда для обеспечения принципа «точно в срок» условие $Q_j(t) = V_j(t), 1 \leq j \leq N^{дет}$ следует заменить на условие $\tilde{Q}_j(t) = V_j(t), 1 \leq j \leq N^{дет}$.

Введем множество $S_{JIT}(t)$ – множество допустимых наборов УСП и НСП, которые обеспечивают необходимое количество производимых деталей и сборок в заданное время согласно плану V :

$$S_{JIT}(t) = \left\{ \begin{array}{l} x(t): x(t) \in X(t) \cap A(t), \tilde{Q}_j(t) = V_j(t), \\ 1 \leq j \leq N^{дет}, \tilde{L}(t) \leq L(t) \end{array} \right\}. \quad (20)$$

С математической точки зрения множество $S_{JIT}(t)$ определяется совокупностью линейных ограничений типа равенств и неравенств, при этом в системе присутствуют случайные величины, которые в общем случае могут между собой коррелировать. Корреляция может быть обусловлена общей логистикой, системой управления, единым цехом и т.д. Если множество S_{JIT} имеет более одного решения, выбор решения, удовлетворяющего принципу «точно в срок», обуславливается введением дополнительного критерия качества.

В силу наличия в системе случайных величин применение стандартных методов оптимизации вызывает затруднения. Одним из вариантов решения проблемы является переход к детерминированной системе на основе замены случайных величин их средними значениями. В этом случае введем величину $\tilde{Q}_j(t)$:

$$\begin{aligned} \tilde{Q}_j(t) = & \sum_{i:(D_j, УСП_i) \in \varphi^{УСП}} x_{1ij}(t) \left(\frac{p_{1ij}}{(1 + M(\tilde{\eta}_{1ij}(t)))} + M(\tilde{\zeta}_{1ij}(t)) \right) \\ & + \sum_{i:(D_j, НСП_l) \in \varphi^{НСП}} x_{2ij}(t) \left(\frac{p_{2ij}}{(1 + M(\tilde{\eta}_{2lj}(t)))} + M(\tilde{\zeta}_{2lj}(t)) \right) \end{aligned} \quad (22)$$

Таким образом, множество решений, удовлетворяющих принципу «точно в срок», можно представить множеством $\bar{S}_{JIT}(t)$:

$$\bar{S}_{JIT}(t) = \left\{ \begin{array}{l} x(t): x(t) \in X(t) \cap A(t), \tilde{Q}_j(t) = V_j(t), 1 \leq j \leq N^{дет}, \\ \tilde{L}(t) \leq L(t), \quad \tilde{E}(t) \leq E(t) \end{array} \right\}. \quad (22)$$

Множество $\bar{S}_{JIT}(t)$ определяется детерминированной системой линейных уравнений и неравенств. Поиск единственного решения $x(\cdot) = (x(1), x(2), \dots, x(M))$ на множестве $\bar{S}_{JIT} = (\bar{S}_{JIT}(1), \bar{S}_{JIT}(2), \dots, \bar{S}_{JIT}(M))$ возможно с помощью критерия:

$$J_{JIT}(x(\cdot)) = \sum_{1 \leq t \leq M} \left(\sum_{i,j} (D(\tilde{\eta}_{1ij}(t))) + \sum_{l,j} (D(\tilde{\eta}_{2lj}(t))) \right). \quad (23)$$

Функционал $J_D(x(\cdot))$ представляет собой сумму дисперсий временных рисков, влияющих на выполнение «точно в срок».

Естественно, поставить задачу поиска решения $x^*(\cdot)$ на основе минимизации рисков:

$$J_{JIT}(x^*(\cdot)) = \min_{x(\cdot) \in \bar{S}_{JIT}} (J_{JIT}(x(\cdot))). \quad (24)$$

Данная оптимизационная задача, по существу, включает в себя два важных принципа: «управление рисками» и «точно в срок». Инструментальное решение этой оптимизационной задачи может быть сведено к методам решения задач квадратичного программирования.

Эффективность деятельности производства сопряжена самым серьезным образом с финансовыми затратами на обеспечение этой деятельности. Таким образом, на любом предприятии одной из первостепенных задач является задача уменьшения себестоимости продукции для получения конкурентного преимущества на рынке.

Рассмотрим ту часть себестоимости производимой продукции, которая обусловлена деятельностью в цехе. Введем величину $pc_j(t)$ – себестоимость продукции вида j в момент времени t , которая формируется всеми УСП и НСП в текущий момент. Вычисление данной величины может быть представлено:

$$pc_j(t) = \frac{C_j(t)}{Q_j(t)}. \quad (25)$$

Однако стоит отметить, что при большой диверсификации производства рассмотрение себестоимости каждого вида деталей не всегда корректно, гораздо важнее суммарная себестоимость всей продукции, производимой в цехе.

В связи с этим, рассмотрим интегральную себестоимость всей продукции в цехе $PC(t)$ во временной такт t :

$$PC(t) = \frac{\sum_{j=1}^{N^{дет}} C_j(t)}{\sum_{j=1}^{N^{дет}} Q_j(t)}. \quad (26)$$

В процессе использования приспособлений возникают ситуации, когда требуются дополнительные финансовые средства, не учтенные в нормативных документах, на обеспечение деятельности приспособлений. К примеру, это могут быть изменения конструкторской документации, требующие доработки приспособления, сбой электроэнергии, приводящие к поломке оборудования, штрафы, накладываемые проверяющими органами, и т.д. Введем ожидаемые затраты на производство деталей вида j :

$$\tilde{C}_{bj}(t) = \sum_{i:(D_j, USP_i) \in \varphi^{УСП}} x_{1ij}(t)(b_{1ij} + \xi_{1ij}) + \sum_{i:(D_j, НСП_i) \in \varphi^{НСП}} x_{2ij}(t)(b_{2ij} + \xi_{2ij}). \quad (27)$$

В этом случае ожидаемые затраты $\tilde{C}_j(t)$ по каждому виду деталей j :

$$\tilde{C}_j(t) = C_{Пj}(t) + C_{Lj}(t) + C_{Ej}(t) + \tilde{C}_{bj}(t). \quad (28)$$

Если принимать во внимание случайные воздействия, оказываемые на производство, можно получить представление интегральной себестоимости $\tilde{PC}(t)$ в виде случайной величины:

$$\tilde{PC}(t) = \frac{\sum_{j=1}^{N^{дет}} \tilde{C}_j(t)}{\sum_{j=1}^{N^{дет}} \tilde{Q}_j(t)}. \quad (29)$$

Себестоимость по каждому виду деталей $\tilde{pc}_j(t)$ может быть вычислена на основе соотношения:

$$\tilde{pc}_j(t) = \frac{\tilde{C}_j(t)}{\tilde{Q}_j(t)}. \quad (30)$$

Себестоимость производимой продукции может быть задана при планировании производства. Пусть задана интегральная себестоимость PC^* , а также, частные себестоимости по каждому виду деталей pc_j^* , $1 \leq j \leq N^{дет}$. В этом случае можно поставить условие обеспечение себестоимости в виде:

$$\tilde{PC}(t) \leq PC^*; \quad (31)$$

или в виде

$$\tilde{pc}_j(t) \leq pc_j^*, \quad 1 \leq j \leq N^{дет}. \quad (32)$$

Можно ввести стохастическое множество $S_{PC}(t)$ – множество решений с заданной себестоимостью

$$S_{PC}(t) = \left\{ x(t): x(t) \in X(t) \cap A(t), \tilde{PC}(t) \leq PC^*, \right. \\ \left. \tilde{L}(t) \leq L(t), \tilde{E}(t) \leq E(t) \right\}. \quad (33)$$

Если множество $S_{PC} = (S_{PC}(1), S_{PC}(2), \dots, S_{PC}(M))$ содержит более одного решения, то выбор единственного решения требует введения дополнительного критерия, например:

$$J_{PC}(x(\cdot)) = \sum_{1 \leq t \leq M} \left(\sum_{i,j} (D(\xi_{1ij}(t))) + \sum_{i,j} (D(\xi_{2ij}(t))) \right). \quad (34)$$

Для формулировки оптимизационной задачи введем величины

$$\tilde{C}_{bj}(t) = \sum_{i:(D_j, USP_i) \in \varphi^{УСП}} x_{1ij}(t)(b_{1ij} + M\xi_{1ij}) + \sum_{i:(D_j, НСП_i) \in \varphi^{НСП}} x_{2ij}(t)(b_{2ij} + M\xi_{2ij}) \quad (35)$$

$$\text{и } \tilde{C}_j(t) = C_{Пj}(t) + C_{Lj}(t) + C_{Ej}(t) + \tilde{C}_{bj}(t). \quad (36)$$

В этом случае функция себестоимости может быть записана в детерминированном виде:

$$\tilde{PC}(t) = \frac{\sum_{j=1}^{N^{дет}} \tilde{C}_j(t)}{\sum_{j=1}^{N^{дет}} \tilde{Q}_j(t)}. \quad (37)$$

Введем детерминированное множество решений с заданной себестоимостью \bar{S}_{PC} :

$$\bar{S}_{PC}(t) = \left\{ x(t): x(t) \in X(t) \cap A(t), \tilde{PC}(t) \leq PC^*, \right. \\ \left. \tilde{L}(t) \leq L(t), \tilde{E}(t) \leq E(t) \right\}, \quad (38)$$

$$\bar{S}_{PC} = (\bar{S}_{PC}(1), \bar{S}_{PC}(2), \dots, \bar{S}_{PC}(M)). \quad (39)$$

Таким образом, можно сформулировать следующую оптимизационную задачу:

$$J_{PC}(x^*(\cdot)) = \min_{x(\cdot) \in \bar{S}_{PC} \cap \bar{S}_{JIT}} (J_{PC}(x(\cdot))). \quad (40)$$

Данная задача состоит в минимизации рисков, связанных с увеличением себестоимости, при обеспечении планового выпуска высокотехнологичной продукции. Таким образом, решение данной задачи обеспечивает принципы: «под заданную себестоимость», «с учетом рисков», «точно в срок».

С точки зрения применения инструментария решения проблемы, данную задачу можно отнести к классу задач нелинейного программирования и применять соответствующие методы, например, градиентные методы. Применение методов второго порядка весьма затруднительно в силу высокой размерности исходной оптимизационной задачи.

ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье рассмотрены оптимизационные модели выбора УСП и НСП в необходимом количестве, а также сроков длительности их использования для обеспечения производственной деятельности цеха. Предложенные модели соответствуют принципам управления: «точно в срок», «под заданную себестоимость», «с учетом рисков».

Полученные результаты заложены в основу программного обеспечения поддержки принятия решения по выбору системы станочного приспособления при технологической подготовке производства на АО «Авиастар-СП». Разработанное программное обеспечение успешно апробировано и внедрено в промышленную эксплуатацию на авиастроительном предприятии.

Реализация моделей как части системы поддержки принятия решений в общем комплексе информационной поддержки предприятия позволит лицам, принимающим решения, делать обоснованный управленческий выбор по проектированию и реализации УСП и НСП.

При программной реализации предложенных моделей необходимо использование численных методов решения задач нелинейного программирования высокой размерности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Lutoshkin I., Lipatova S., Polyanskov Y., Yamaltdinova N., Yardaeva M.* (2019) The Mathematical Model for Describing the Principles of Enterprise Management "Just in Time, Design to Cost, Risks Management". In: Dolinina O., Brovko A., Pechenkin V., Lvov A., Zhmud V., Kreinovich V. (eds) Recent Research in Control Engineering and Decision Making. ICIT 2019. Studies in Systems, Decision and Control, vol 199. Springer, Cham.
2. *Блюменштейн В.Ю.* Проектирование технологической оснастки: Учебное пособие. / В.Ю. Блюменштейн, А.А. Клепцов, 2-е изд., испр. и доп. - СПб.: Лань, 2011. - 224 с.
3. *Вардашкин Б.Н.* Станочные приспособления: Справочник. В 2 т. Т.1 / Под ред. Вардашкина Б.Н., Данилевского В.В. - М.: Машиностроение, 1984.-592 с.
4. *Кузнецов В.С., Пономарев В.А.* Универсально сборные приспособления. - М.: Машиностроение, 1974. - 170 с.
5. *Полянсков Ю.В.* Автоматизация процесса прогнозирования трудоёмкости проектирования и изготовления станочных приспособлений для механообработки самолетных деталей / Ю.В. Полянсков, И.В. Лутошкин, А.А. Блюменштейн // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2016. Т. 18. № 4(3). С. 30-33.
6. *Серков Е.А.* Автоматизация проектирования универсально-сборных приспособлений. Автореферат дисс. ... канд. техн. наук: 05.11.14. СПб.: Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, 2012. 20 с.

CHOOSING OF THE TYPE OF MACHINE DEVICES DURING THE TECHNOLOGICAL PREPARATION OF THE PRODUCTION OF HIGH-TECH PRODUCTS

© 2020 A.A. Blyumenshteyn

Ulyanovsk State University, Ulyanovsk, Russia

Modern machine-building enterprises are actively introducing digital technologies at all stages of technological preparation of production. Great attention is paid to the rational choice of the type of machine tools. This article deals with the model for choosing the type of machine tools in the required amount. The determining factors here are quantity, productivity and types of retaining devices, rate of expenditure of machine and labour forces, production volume of details, etc. The model can be used in the development of a decision support system for the technological elaboration of design documentation.

Keywords: decision support system, universal machine retaining devices, special machine retaining devices, universal machine retaining devices, special machine retaining devices, technological preparation of production.

DOI: 10.37313/1990-5378-2020-22-5-41-47