

is based on the search for an active gradient solution. The paper considers application of the proposed approach for saving the energy consumption of an oil-production wells group. Here, the parallel technological system includes the oil-production wells as the local processes. The results of the numerical experiments show feasibility of saving energy by more than 5 % in comparison with a technological system without the optimal distribution of the productive capacities. Thus, the proposed approach can reduce significantly the energy consumption of a parallel technological system without an expensive modernization of its technology.

Keywords: energy consumption, parallel technological system, multi-level control system, coordinated control, multiparameter optimization, oil-production wells group

For citation:

Nugaev I. F., Vasilyev V. I. Increase of the Energy Efficiency of the Parallel Technological Systems on the Basis of the Optimal Coordinated Control of the Processes, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2016, vol. 17, no. 12, pp. 847–853.

DOI: 10.17587/mau.17.847-853

References

1. **GOST P 51750—2001** (state standard) Energy conservation. Methods for determination of energy capacity on production of output and rendering of services in technological energy systems. General principles (in Russian)
2. **GOST 27.004—85** (state standard) Industrial product dependability. Technological systems. Terms and definitions (in Russian)
3. **Sadovskii V. V., Samoilov M. V., Kohno N. P., Kovalev A. N., Perminov E. V., Panevchik V. V., Mironovich I. M., Tarasevich V. L.** Production technology: textbook, Minsk, BSEU, 2008. 431 p. (in Russian).
4. **Mesarovic M., Mako D., Takahara Y.** Theory of hierarchical multi-level systems, Moscow, Mir Pub., 1973. 334 p. (in Russian).

5. **Vasilyev V. I., Gusev Yu. M., Efanov V. N., Krymsky V. G.** Multi-level control of dynamic objects, Moscow, Nauka Pub., 1987, 309 p. (in Russian).

6. **Vasilyev V. I., Piyasov B. G.** Intelligent control systems. Theory and practice, Moscow, Radiotekhnika, 2009, 392 p. (in Russian).

7. **Vladimirov I. V., Khisamutdinov N. I., Taziev M. M.** Problems of development of water-oil and partially flooded areas of oil fields, Moscow, VNIIOENG Pub., 2007, 360 p. (in Russian).

8. **Nugaev I. F., Vasilyev V. I.** Control of oil-well production on the basis of cascade algorithms, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2015, no. 5, pp. 321–326 (in Russian).

9. **Merlet J.-P., Gosselin C.** Parallel Mechanisms and Robots, *Springer Handbook of Robotics, Ref. Work*, 2008, pp. 269–285.

10. **Baeten J., Bert van Beek, Markovski J., Somers L.** Coordinated Control of Complex Machines. — In: Coordination Control of Distributed Systems, *Lecture Notes in Control and Information Sciences*, 2015, vol. 456, pp. 61–68.

11. **Anderson D., Howard T., Apfelbaum D., Herman H., Kelly A.** Coordinated Control and Range Imaging for Mobile Manipulation, *Lecture Notes in Control and Information Sciences, Proceedings of the Eleventh International Symposium of Experimental Robotics (ISER)*, Athens, Greece, 2006, pp. 547–556.

УДК 004.942

DOI:10.17587/mau.17.853-859

Ю. И. Буряк, канд. техн. наук, нач. подразделения, buryak@gosniias.ru,

А. А. Скрынников, канд. техн. наук, вед. инженер, a1260@mail.ru,

Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем, Москва

Алгоритмы оптимального распределения ресурсов в задаче планирования изготовления протяжного инструмента для производства авиационных двигателей¹

Предложен подход к решению задачи планирования воспроизводства протяжного инструмента с учетом использования остаточного ресурса его существующего состава. Разработан алгоритм расчета необходимого числа заказываемых новых протяжек, проведена оценка вероятности выполнения такого заказа с использованием математического аппарата статистического анализа. Приведены результаты формирования вариантов использования существующих протяжек с известным остаточным ресурсом, проведены расчеты надежности каждого варианта, а также сформированы рекомендации по выбору оптимального варианта, доказывающие применимость предложенного подхода.

Ключевые слова: планирование изготовления, протяжной инструмент, ресурс, цикл воспроизводства

Введение

Получение пазов сложно-фасонного профиля в дисках турбин сегодня является одним из самых трудоемких производственных процессов при изготовлении авиационных двигателей. Наиболее эффективным методом получения элементов такого типа является протягивание, выполняемое на специализированных станках с применением протяжного инструмента (протяжек). Протяжки раз-

личных конструкций являются одними из наиболее дорогих инструментов для выполнения металлообработки. Подчас каждая протяжка при своем изготовлении требует наивысшей точности и правильного расчета. Это обусловлено тем, что инструмент при протягивании работает в наиболее тяжелых и суровых условиях огромных нагрузок (растяжение, сжатие, изгиб, абразивное и адгезионное выкрашивание лезвий протяжки) [1].

Организация эффективного использования и своевременного воспроизводства сложно-профильного режущего инструмента (долбяки, протяжки,

¹ Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 15-08-04342а.

червячные фрезы и пр.) представляет собой одно из ключевых условий достижения плановых показателей (временных, ресурсных, качества и пр.) при изготовлении наиболее ответственных и дорогостоящих узлов и агрегатов (дисков турбин, компрессоров и пр.) сложных изделий авиационной техники (АТ).

В основу существующего порядка организации изготовления инструмента положены известные методы расчета его расхода, а именно: статистический, по нормам оснастки рабочих мест, по нормам расхода [2—4].

При использовании статистического метода расчет фактического расхода инструмента, приходящегося на единицу выпуска продукции в стоимостном выражении или на 1000 ч работы оборудования той группы, на которой используется соответствующий инструмент, проводится на основе отчетных данных за прошлый период (обычно год). Статистический метод расчета расхода инструмента может дать значительную погрешность, потому он находит применение лишь в единичном и мелкосерийном производстве (в том числе для вспомогательных производств) и для расчета расхода инструмента, по которому трудно установить сроки службы (слесарно-сборочный, некоторые виды мерительного).

В основе метода расчета по нормам оснастки принимается количество инструмента, которое должно одновременно находиться на соответствующем рабочем месте в течение всего планового периода. По этому методу рассчитывается, главным образом, инструмент долговременного пользования, выдаваемый рабочему по инструментальным книжкам, находящийся у него до полного износа (универсальный режущий, мерительный, вспомогательный, универсальный кузнечный, литейный и др.) и применяемый во вспомогательных производствах.

Метод расчета по нормам расхода используется для определения количества инструмента данного типоразмера, расходуемого (изнашиваемого) при обработке одной детали или изделия. Для удобства расчета часто норму расхода инструмента определяют на 100 или 1000 штук деталей (изделий).

При всех внешних различиях в способах оценки необходимого количества инструмента основная идея рассматриваемых методов предполагает гарантированное оснащение рабочих мест необходимым объемом средств без учета индивидуальных особенностей состояния его конкретного экземпляра, вызванного механическими характеристиками протягиваемого изделия, условиями использования инструмента, восстановления его ресурса и пр.

В этом случае, безусловно, имеет место минимизация рисков срыва производственных планов при изготовлении изделий АТ, однако такой подход сопровождается необоснованным превышением затрат и соответствующим снижением конкурентоспособности выпускаемой продукции.

Поэтому современное машиностроительное производство, реализующее концептуальные положе-

ния Lean-философии (так называемое "Бережливое производство") [5—8] развивается в направлении всестороннего устранения потерь, к которым относятся, в том числе: перепроизводство продукции, избыток запасов, производственные задержки и пр.

Полное использование остаточных ресурсов существующего состава протяжного инструмента (по номенклатуре и объему) на основе прослеживания его индивидуальных характеристик [9] при соответствующем сокращении количества вновь изготавливаемого инструмента рассматривается в качестве важного условия повышения экономической эффективности при изготовлении изделий АТ.

В связи с вышеизложенными особенностями протяжного инструмента (значимости для производства авиационных двигателей, повышенных требований к качеству, высокой стоимости и точности изготовления) задача оптимального распределения протяжного инструмента в производстве авиационных двигателей является актуальной.

Постановка задачи

Для выполнения производственного задания по выпуску N единиц изделий, например дисков турбин, используются I производственных линий (станков), на каждой из которых одновременно обрабатываются заготовки, например, протягиваются пазы дисков турбин. На каждой линии режущий инструмент (протяжки) комплектуется в кассеты; каждая кассета содержит m протяжек. После обработки заготовки кассета разбирается, протяжка перетачивается, и после этого протяжка подвергается контролю. Если протяжка проходит контроль, то она используется при обработке следующей заготовки. Число переточек ограничено заданным числом — при достижении предельного числа рабочих циклов протяжка снимается вне зависимости от ее состояния. По результатам обработки статистических данных закон распределения числа рабочих циклов протяжек известен.

Перед выполнением задания проводится расчет необходимого числа закупаемых новых протяжек. В силу того, что число рабочих циклов, выдерживаемых протяжкой, случайно, число закупаемых протяжек должно обеспечить выполнение задания с вероятностью не меньше заданной.

Однако при таком подходе неизбежно остаются протяжки с использованным не до конца (остаточным) ресурсом. Возникает вопрос обоснования числа закупаемых новых протяжек для выполнения следующего задания с учетом возможности использования протяжек с остаточным ресурсом.

Для решения поставленной задачи необходимо реализовать следующую последовательность действий:

- сформировать возможные варианты замены в кассете новой протяжки протяжкой или совокупностью протяжек с остаточным ресурсом;

- рассчитать вероятность выполнения задачи комплектом новых и "старых" протяжек для каждого из сформированных вариантов;
- выбрать вариант, который обеспечил бы выполнение задания с заданной вероятностью и с минимальным числом закупаемых новых протяжек.

Математическая постановка задачи заключается в следующем. На j -й линии должно быть отработано N_j заготовок, $N_1 + \dots + N_l = N$. Кассета содержит m однотипных протяжек. Закон распределения $P(X = k) = p_k$ числа X рабочих циклов протяжки известен; $k = 1, \dots, K$, где K — предельное число рабочих циклов. Задано число n протяжек с остаточным ресурсом, и для каждой такой протяжки известно число отработанных циклов, т.е. задан массив $V = (v_1, v_2, \dots, v_n)$.

Необходимо найти:

1) минимально допустимое число новых протяжек, необходимое для выполнения задания с заданной вероятностью;

2) оптимальную по минимальной стоимости заказа новых протяжек комплектацию кассеты протяжками с остаточным ресурсом при заданном уровне вероятности обеспечения выполнения планового задания.

Алгоритм расчета необходимого числа заказываемых новых протяжек

В случае, когда для выполнения заказа используются только новые протяжки, необходимое их число определяется следующим образом.

Первоначальная оценка числа r протяжек может быть проведена по формуле

$$r = mr_0, \quad (1)$$

где r_0 — число протяжек, последовательно используемых для замены каждой из m протяжек:

$$r_0 = \left\lceil \frac{N_j}{K} \right\rceil, \quad (2)$$

$\lceil \cdot \rceil$ — символ округления до ближайшего большего целого числа.

Вероятность того, что r_0 протяжек будет достаточно для выполнения N_j циклов, определяется как $P(Y \geq N_j)$, где Y — случайная величина — суммарное число отработанных циклов r_0 протяжками.

Случайная величина Y является суммой r_0 одинаково распределенных случайных величин X_1, X_2, \dots, X_{r_0} , которые составляют число рабочих циклов (до списания) первой, второй, ..., r_0 протяжки.

Перейдем к расчету вероятности $P(Y \geq N_j)$.

При $r_0 = 1$ максимально возможное число рабочих циклов равно K , тогда

$$P(Y \geq N_j) = P(X \geq N_j) = \begin{cases} \sum_{k=1}^K P(X = k) & \text{при } X \geq N_j \text{ и } N_j < K; \\ 0 & \text{при } X < N_j \text{ или } N_j > K; \end{cases}$$

или

$$P(Y \geq N_j) = \theta(K - N_j) \sum_{k=1}^K P(X = k)\theta(k - N_j), \quad (3)$$

где $\theta(\cdot)$ — функция Хевисайда: $\theta(n) = \begin{cases} 1 & \text{при } n \geq 0; \\ 0 & \text{при } n < 0. \end{cases}$

При $r_0 = 2$ максимально возможное число рабочих циклов равно $2K$, тогда

$$P(Y \geq N_j) = P(X_1 + X_2 \geq N_j) = \begin{cases} \sum_{k_1=1}^K \sum_{k_2=1}^K P(X_1 = k_1)P(X_2 = k_2) & \text{при } X_1 + X_2 \geq N_j \text{ и } N_j < 2K; \\ 0 & \text{при } X_1 + X_2 < N_j \text{ или } N_j > 2K \end{cases}$$

или

$$P(Y \geq N_j) = \theta(2K - N_j) \times \sum_{k_1=1}^K \sum_{k_2=1}^K P(X_1 = k_1)P(X_2 = k_2)\theta(k_1 + k_2 - N_j). \quad (4)$$

Сопоставив формулы (3) и (4), получим закономерность для произвольного значения r_0 в виде

$$P(Y \geq N_j) = \theta(r_1 K - N_j) \sum_{k_1=1}^K \dots \sum_{k_{r_1}=1}^K P(X_1 = k_1) \cdot \dots \cdot P(X_{r_1} = k_{r_1})\theta\left(\sum_{i=1}^{r_1} k_i - N_j\right). \quad (5)$$

Рассмотрим пример. Пусть закон распределения случайной величины X задан при $K = 10$ (таблица, рис. 1).

Закон распределения числа рабочих циклов протяжки

k	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
p_k	0	0	0	0	0,01	0,02	0,03	0,05	0,20	0,69

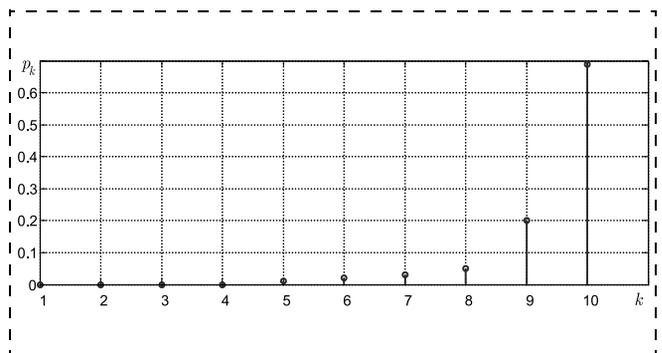


Рис. 1. Закон распределения числа рабочих циклов протяжки до списания

Алгоритм расчета надежности при использовании протяжек с остатком ресурса

Протяжка с остаточным ресурсом может быть однозначно охарактеризована числом отработанных циклов; число Z оставшихся до списания циклов — случайная величина, закон распределения которой будет зависеть от числа отработанных циклов. Обозначим v — число отработанных циклов, тогда максимально возможное число оставшихся циклов будет равно $K_v = K - v$, а случайная величина $Z = X - v$ будет изменяться в диапазоне от 1 до K_v .

Закон распределения случайной величины X известен; известно так-

же, что протяжка уже отработала v циклов. По теореме умножения вероятностей [10]

$$P(X = k) = P(X > v)P(X = k|X > v),$$

откуда

$$P(X = k|X > v) = \frac{P(X = k)}{P(X > v)},$$

тогда условный закон распределения случайной величины Z будет иметь вид

$$P(Z = s|X > v) = \frac{P(X = s + v)}{P(X > v)}, \text{ где } s = 1, \dots, K_v. \quad (6)$$

На рис. 3 приведены результаты расчетов условного закона распределения $P(Z = s|X > v)$ для случайной величины X , закон распределения которой задан в таблице. Очевидно, что при $v = 9$ условная вероятность $P(Z = 1|X > v) = 1$.

Зная условный закон распределения $P(Z = s|X > v)$, можно найти вероятность того, что заданная комбинация, включающая r_0 новых протяжек, r_1 протяжек, отработавших 1 цикл, r_2 протяжек, отработавших 2 цикла, и т.д. будет достаточна для выполнения N_j циклов.

Рассмотрим одну протяжку, отработавшую v циклов. Вероятность того, что эта протяжка может быть использована при обработке еще N_j заготовок, равна

$$P(Y \geq N_j) = \theta(K_v - N_j) \times \sum_{k=1}^{K_v} P(Z = k|X > v) \theta(k - N_j), \quad (7)$$

где условная вероятность $P(Z = k|X > v)$ определяется по формуле (6), а $K_v = K - v$.

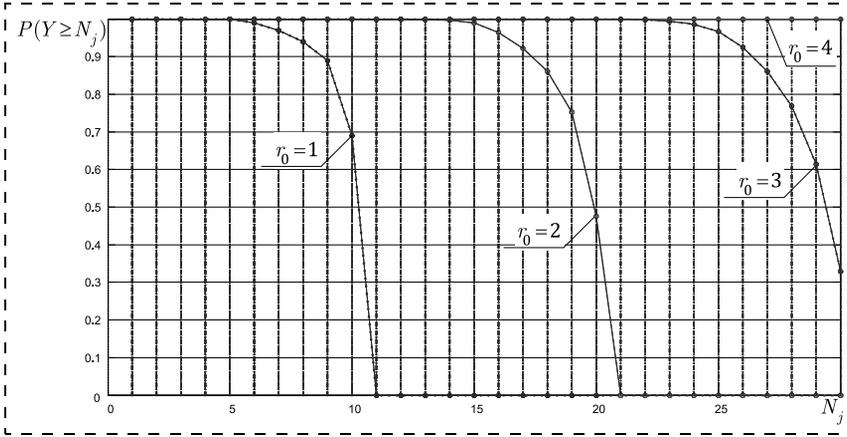


Рис. 2. Вероятность выполнения рабочего задания при использовании заданного числа протяжек

Рассчитаем на основе зависимости (5) вероятность $P(Y \geq N_j)$ для $N_j = 1 \dots 30$ при $r_0 = 1 \dots 4$ (рис. 2).

Полученные результаты позволяют оценить вероятность того, что заданного числа r_0 протяжек для замены каждой из m протяжек будет достаточно для выполнения задания. Так, например, для заданного распределения $P(X = k)$ при $N_j = 17$ две протяжки обеспечивают вероятность $P_d = 0,9225$, а три и более — вероятность 1.

Перейдем к кассете в целом. Вероятность P_k того, что $r = mr_0$ протяжек кассеты достаточно для выполнения задания, можно рассчитать по формуле произведения вероятностей: $P_k = (P_d)^m$. В результате, определив вероятности P_k для каждой из l производственных линий, можно найти конечную вероятность P_3 того, что заданный комплект новых протяжек будет достаточен для обработки N заготовок.

В случае, если полученная вероятность окажется ниже требуемой, необходимо рассмотреть вариант с большим числом протяжек.

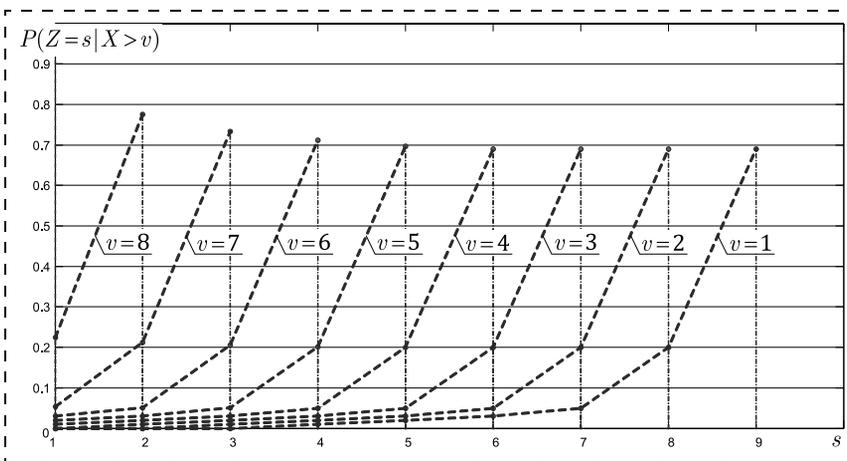


Рис. 3. Условный закон распределения числа рабочих циклов протяжки до списания для разного числа отработанных циклов

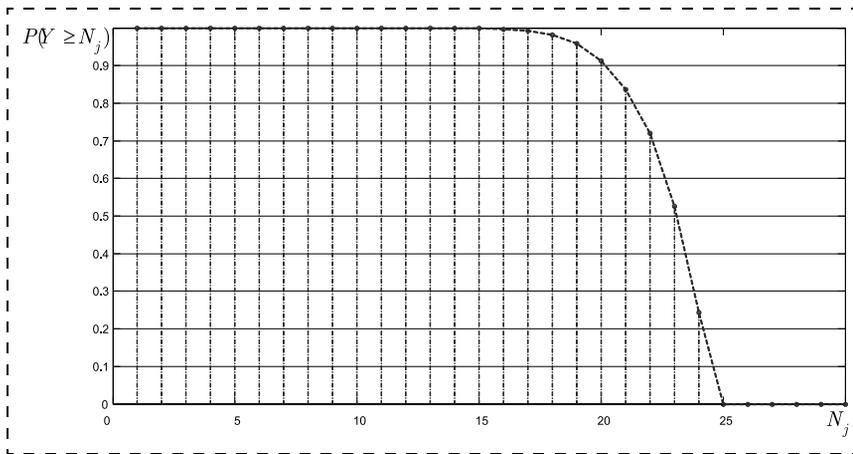


Рис. 4. Вероятность выполнения рабочего задания при использовании комплекта протяжек с заданным числом отработанных циклов

Для двух протяжек, отработавших v_1 и v_2 циклов соответственно, искомая вероятность может быть определена по формуле

$$P(Y \geq N_j) = \theta(K_{v_1} + K_{v_2} - N_j) \times \sum_{k_1=1}^{K_{v_1}} \sum_{k_2=1}^{K_{v_2}} P(Z_1 = k_1 | X > v_1) \times P(Z_2 = k_2 | X > v_2) \theta(k_1 + k_2 - N_j), \quad (8)$$

где случайные величины Z_1 и Z_2 — число оставшихся до списания циклов первой и второй протяжек соответственно.

Для произвольного числа протяжек:

$$P(Y \geq N_j) = \theta\left(\sum_{i=1}^n K_{v_i} - N_j\right) \times \sum_{k_1=1}^{K_{v_1}} \dots \sum_{k_r=1}^{K_{v_r}} P(Z_1 = k_1 | X > v_1) \cdot \dots \cdot P(Z_n = k_n | X > v_n) \theta\left(\sum_{i=1}^n k_i - N_j\right). \quad (9)$$

В качестве примера рассмотрим комплект четырех протяжек: $v_1 = 0$; $v_2 = 4$; $v_3 = 5$; $v_4 = 7$. Результаты расчета вероятности $P(Y \geq N_j)$ для $N_j = 1 \dots 30$ такого комплекта приведены на рис. 4.

Алгоритм генерирования перестановок с повторениями

Для формирования всех вариантов множества за счет перестановок его элементов и в случае наличия повторяющихся элементов воспользуемся алгоритмом, основанном на лексикографическом порядке.

Если в некотором линейно упорядоченном алфавите символ α стоит раньше символа β , то считается, что $\alpha < \beta$, т.е. α лексикографически меньше,

чем β [11]. Тогда слово a предшествует слову b , если первые m символов слов совпадают, а $(m + 1)$ -й символ слова a меньше $(m + 1)$ -го символа слова b . Применительно к цифровым перестановкам лексикографический порядок порождает возрастающую последовательность натуральных чисел [12], например, перестановки из цифр 1, 2, 3 образуют лексикографическую последовательность

$$(123) < (132) < (213) < (231) < (312) < (321).$$

Число перестановок из n различных элементов равно $n!$.

Если исходное множество содержит повторяющиеся элементы, например, n_1 элементов первого типа, n_2 элементов второго типа, ..., n_k элементов k -го типа, то число перестановок, которое можно образовать из n элементов, $n = n_1 + n_2 + \dots + n_k$, равно

$$\frac{n!}{n_1! n_2! \dots n_k!}.$$

В работах [11–13] рассмотрены различные методы генерирования перестановок без повторений. Для генерирования перестановок с повторениями модифицируем алгоритм генерирования перестановок без повторений, изложенный в работе [11].

Алгоритм генерирования перестановок с повторениями заключается в следующем.

1. Упорядочить элементы массива $V = (v_1, v_2, \dots, v_n)$.
2. Путем просмотра справа налево найти самый правый элемент v_i , который меньше своего соседа справа v_{i+1} .
3. Найти наименьший элемент v_j , расположенный справа от v_i , который больше v_i .
4. Поменять местами элементы v_j и v_i .
5. Упорядочить элементы справа от v_j (т.е. ячейки с номерами от $i + 1$ до n).

Например, исходный массив содержит четыре элемента (1233).

Первый вариант перестановки — исходный упорядоченный массив (1233). Находим самый правый элемент v_i , который меньше своего соседа справа v_{i+1} : $v_2 < v_3$ ($2 < 3$). Наименьший элемент v_j , расположенный справа от v_2 и, который больше v_2 : $v_3 = 3$. Меняем местами v_2 и v_3 , получаем (1323). Элементы v_3, v_4 уже получились упорядоченные, поэтому второй вариант — (1323).

Находим самый правый элемент v_i , который меньше своего соседа справа v_{i+1} : $v_3 < v_4$ ($2 < 3$). Справа элементов нет. Меняем местами v_3 и v_4 , получаем третий вариант (1332).

Находим самый правый элемент v_i , который меньше своего соседа справа v_{i+1} : $v_1 < v_2$ ($1 < 3$). Наименьший элемент v_j справа от v_1 , который

больше $v_1: v_4 = 2$. Меняем местами v_1 и v_4 , получаем (2331). Упорядочиваем элементы справа от v_1 (т.е. элементы $v_2...v_4$), получаем четвертый вариант (2331). И т.д.

В результате получим:

(1233), (1323), (1332), (2133), (2313), (2331),
(3123), (3132), (3213), (3231), (3312), (3321)

(12 упорядоченных вариантов).

Таким образом, результатом работы алгоритма является перечень всех возможных вариантов размещения n элементов, среди которых могут быть повторяющиеся. Каждый такой вариант может быть представлен в виде $(v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{in})$, где v_{ij} — значение переменной v , стоящей на j -м месте в i -м варианте перестановок.

Расчет надежности различных вариантов использования протяжек с остатком ресурса

Рассмотрим возможные варианты использования протяжек с остатком ресурса и порядок оценки вероятности выполнения заказа для каждого из таких вариантов.

Пусть для выполнения заказа на j -й линии должно быть обработано N_j заготовок. Число протяжек r_0 , последовательно использованных для замены каждой из m протяжек, определяется по формуле (2), при этом проводится проверка вероятности $P(Y \geq N_j)$. Вероятность $P(Y \geq N_j)$ для комплекта новых протяжек определяется по формуле (5). Если вероятность $P(Y \geq N_j)$ окажется ниже требуемой, то значение r_0 увеличивается на единицу и так до тех пор, пока не будет достигнута требуемая вероятность.

Теперь рассмотрим i -й вариант перестановок $(v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{in})$. Вместо новой протяжки возьмем первый элемент v_{i1} и рассчитаем вероятность $P(Y \geq N_j)$ для комплекта, включающего $r_0 - 1$ новых протяжек и первую по списку протяжку v_{i1} : $(v_0, \dots, v_0, v_{i1})$.

Если $P(Y \geq N_j) \geq P_{\text{треб}}$, то переходим к следующей протяжке; в противном случае комплект пополняется протяжкой v_{i2} , проверяется условие $P(Y \geq N_j) \geq P_{\text{треб}}$ для комплекта $(v_0, \dots, v_0, v_{i1}, v_{i2})$, и так до тех пор,

пока не будет достигнута требуемая вероятность, после чего переходим к следующей протяжке. Замена заканчивается, когда либо исчерпан ряд $(v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{in})$, либо проведена замена всех r_0 новых протяжек.

После этого фиксируется число R сэкономленных новых протяжек, рассчитывается вероятность P_k для каждой линии и вероятность P_3 для задания в целом.

Таким образом, для каждого i -го варианта перестановок находятся значения R_i и P_{3i} .

Выбор оптимального варианта использования протяжек с остатком ресурса проводится следую-

щим образом. Сначала отбираются те варианты, у которых $P_{3i} > P_{3 \text{ треб}}$, из них выбираются варианты с максимальным значением R_i , а затем из выбранных вариантов **выбирается один вариант, у которого значение P_{3i} — максимально.**

Заключение

Предложен подход к решению одной из задач повышения эффективности процессов при изготовлении изделий АТ за счет полного использования остаточных ресурсов существующего состава протяжного инструмента (по номенклатуре и объему) и сокращения числа вновь изготавливаемого инструмента. Разработаны алгоритмы расчета необходимого числа заказываемых новых протяжек (по номенклатуре и объему) и приведен расчет вероятности выполнения планового задания для такого заказа. Разработан алгоритм расчета вероятности выполнения планового задания при использовании протяжек с остатком ресурса. Рассмотрены алгоритмы формирования вариантов комплектования протяжек с учетом остаточного ресурса и приведен расчет надежности каждого варианта. Сформированы рекомендации по выбору оптимального по стоимости варианта, доказывающие применимость предложенного подхода.

Список литературы

1. Братухин А. Г., Язов Г. К., Карасев Б. Е., Елисеев Ю. С., Крымов В. В., Нежурин И. П. Современные технологии в производстве газотурбинных двигателей / Под ред. А. Г. Братухина, Г. К. Язова, Б. Е. Карасева. М.: Машиностроение, 1997. 408 с.
2. Организация и планирование машиностроительного производства / Под ред. Ю. В. Скворцова, Л. А. Некрасова. М.: Высшая школа 2003.
3. Экономика, организация и управление на предприятии / Корсаков М. Н., Ребрин Ю. И., Федосова Т. В., Макареня Т. А., Шевченко И. К.; Под ред. М. А. Боровской. Таганрог: Изд. ТТИ ЮФУ, 2008. 440 с.
4. Методические указания по нормированию расхода режущего инструмента на предприятиях автосельхозмаша / Под ред. Артемова С. Д., Баженова В. И., Воловича В. А., Полякова В. Г., Змиева А. И., Минск: Высшая школа, 1989.
5. Womack J. P., Jones D. T. Lean thinking. New York: Free Press, 2003.
6. ГОСТ Р 56020—2014 "Бережливое производство. Основные положения и словарь". М.: Стандартинформ, 2014.
7. Womack P. J., Jones D. T., Roos D. The Machine That Changed the World: The Story of Lean Production. New York: Harper Perennial, 1991.
8. Liker J. K., Meier D. The Toyota Way Fieldbook: A Practical Guide for Implementing Toyota's 4Ps. New York: McGraw-Hill, 2005.
9. Буряк Ю. И., Калинин В. Л. Оперативное управление состояниями авиационной техники и связанных с ними процессов жизненного цикла на базе концепции "совместных потоков" // Матер. 8-й Всеросс. мультikonф. по проблемам управления "Управление в интеллектуальных, эргадических и организационных системах". 2015. Т. 1. С. 127—129.
10. Ledermann W., Lloyd E. ed. Handbook of Applicable Mathematics, volume VI: Statistics. Part A, B. John Wiley & Sons, Inc., 1984.
11. Кнут Д. Искусство программирования. Т. 4, Вып. 2. М.: Вильямс, 2008. 160 с.
12. Волосатова Т. М., Родионов С. В. Методы комбинаторных вычислений. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2011. 103 с.
13. Липский В. Комбинаторика для программистов. М.: Мир, 1988. 200 с.

Algorithms for the Optimal Distribution of Resources in the Task of Manufacturing of the Broaching Tools for Production of the Aircraft Engines

Yu. I. Buryak, buryak@gosniias.ru✉, A. A. Skrynnikov, a1260@mail.ru,
State Research Institute of Aviation Systems, Moscow, 125167, Russian Federation

Corresponding author: **Buryak Yury I.**, Ph. D., Chief of Department,
State Research Institute of Aviation Systems, Moscow, 125167, Russian Federation,
e-mail: buryak@gosniias.ru

Received on June 15, 2016

Accepted on August 16, 2016

An approach is proposed to solving of the task of planning of reproduction of the broaching tools with the use of the residual life of its present composition. A criterion was formed for selection of the optimal solution — the minimal number of the tools (broaches), needed for a guaranteed performance of the task. The authors considered a procedure for estimation of the probability of implementation of the work assignment by a kit of manufactured broaching tools, based on the law of distribution of the number of the working tool cycles. An algorithm was developed for calculation of the minimal number of the necessary broaches, which ensured performance of the task with a set guaranteed probability. The algorithm for evaluation of the possibility of using the broaches with a residual resource envisages construction of a conditional law of distribution of the number of the cycles remaining before their disposal, depending on the number of the used cycles. Knowing the law of distribution of the number of the operating cycles of the new broach and the conditional law of distribution of the remaining cycles of the broaches with the remaining resource, it is necessary to calculate the probability, that a set of a predetermined number of the new broaches and the broaches with the remaining resource of the known values of the used cycles ensure implementation of the work assignment. A formula was derived for calculation of the probability of performance of the task by a mixed kit of broaches. The authors presented an example of calculation of the sought probability for a cassette with a mixed kit of four broaches. The algorithm for selection of the optimal mixed sets is based on formation of all possible versions of the use of the broaches with remaining resource and estimation of the probability of performance of the work assignment for each of them. In order to form a complete set of options of different numbers of new broaches and broaches with different residual resources the authors proposed an algorithm for generation of permutations with repetitions based on the lexical order. For selection of the optimal use of the broaches with the remaining resources a calculation was done of the probability of performance of the work assignment for each of the possible configuration options. The optimal option is chosen from the condition of performance of the work assignment with a probability, which is not less than the required guaranteed probability at the lowest costs for the purchase of new broaches. The results were presented of formation of options of the use of the existing broaches with the known residual resources, the reliability of each option was calculated, and recommendations were formed for selection of the best option, proving applicability of the proposed approach.

Acknowledgements: This work was supported by RFBR, project number 15-08-04342a

For citation:

Buryak Yu. I., Buryak Yu. I. Algorithms for the Optimal Distribution of Resources in the Task of Manufacturing of the Broaching Tools for Production of the Aircraft Engines, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2016, vol. 17, no. 12, pp. 853–859.

DOI: 10.17587/mau.17.853-859

References

1. **Bratukhin A. G., Yazov G. K., Karasev B. E., Eliseev Yu. S., Krymov V. V., Nezhurin I. P.** *Sovremennye tekhnologii v proizvodstve gazoturbinykh dvigatelei* (Modern technologies in the production of gas turbine engines), Edited by A. G. Bratukhin, G. K. Yazov, B. E. Karasev, Moscow, Mashinostroenie, 1997, 408 p. (in Russian).
2. **Skvorchov Yu. V., Nekrasov L. A.** ed. *Organizatsiya i planirovanie mashinostroitel'nogo proizvodstva* (Organization and planning of machine-building production), Moscow, Vysshaya shkola, 2003 (in Russian).
3. **Korsakov M. N., Rebrin Yu. I., Fedosova T. V., Makarenya T. A., Shevchenko I. K.** *Ekonomika, organizatsiya i upravlenie na predpriyatii* (Economics, organization and management in the enterprise), Edited by M. A. Borovskoy, Taganrog, Publishing house of TTIIYuFU, 2008, 440 p. (in Russian).
4. **Artemov S. D., Bazhenov V. I., Volovich V. A., Polyakov V. G., Zmeev A. I.** ed. *Metodicheskie ukazaniya po normirovaniyu raskhoda rezhushchego instrumenta na predpriyatiyakh avtosel'khozmasha* (Guidelines for standardizing of the cutting tool consumption in enterprises of Autosel'khozmashe), Minsk, Vysshaya shkola, 1989 (in Russian).

5. **Womack J. P., Jones D. T.** Lean thinking, New York, Rawson Associates, 2003.
6. **National Standard R 56020—2014** "Lean production. Fundamentals and vocabulary", Moscow, Standartinform, 2014 (in Russian).
7. **Womack J. P., Jones D. T., Roos D.** The Machine That Changed the World: The Story of Lean Production, Chicago, Free Press, 1990, 352 p.
8. **Liker J. K., Meier D.** The Toyota Way Fieldbook: A Practical Guide for Implementing Toyota's 4Ps., New York, McGraw-Hill, 2005.
9. **Buryak Yu. I., Kalinin V. L.** *Operativnoe upravlenie sostoyaniyami aviatsionnoi tekhniki i svyazannykh s nimi protsessov zhiznennogo tsikla na baze kontseptsii "sovmeshchennykh potokov"* (Operative control of the state of aviation equipment and related life cycle processes on the base of "associated streams" concept), *Materials of the 8th All-Russian multiconference management problems "Management in intellectual, ergodic and organizational systems"*, Rostov na Donu, Publishing house of the Southern Federal University, 2015, vol. 1, pp. 127–129 (in Russian).
10. **Ledermann W., Lloyd E.** ed. Handbook of Applicable Mathematics, vol. VI: Statistics. Part A, B. Chichester, John Wiley & Sons, Inc., 1984.
11. **Knut D.** *Iskusstvo programmirovaniya* (Art of Computer Programming), vol. 4, release 2, Moscow, Williams, 2008, 160 p. (in Russian).
12. **Volosatova T. M., Rodionov S. V.** *Metody kombinatornykh vychislenii* (Methods of combinatorial computing), Moscow, Publishing House of the MSTU Named N. E. Bauman, 2011, p. 103 (in Russian).
13. **Lipskiy V.** *Kombinatorika dlya programmistov* (Combinatorics for programmers), Moscow, Mir, 1988, 200 p. (in Russian).