

# Технология и технологические машины

УДК 621.9.06



**СУЛТАН-ЗАДЕ**  
Назим Музаффарович  
(Московский  
государственный  
индустриальный университет)

**SULTAN-ZADEH**  
Nazim Muzaffarovich  
(Moscow, Russian Federation,  
Moscow State Industrial  
University)



**АМИРОВ**  
Фариз Гачай-оглы  
(Азербайджанский  
технический университет)

**AMIROV**  
Fariz Gachay-oglu  
(Baku, Azerbaijan,  
Azerbaijan Technical University)

## Разработка алгоритма процесса оптимизации технологических процессов для ПАЛ

*Н.М. Султан-заде, Ф.Г. Амиров*

*Метод синтеза структурной компоновки по критерию максимального использования проектной производительности для заданных технологических процессов позволяет на стадии технического проекта выбирать оптимальную структуру, обеспечивающую проектную производительность переналаживаемых автоматических линий. Структурная компоновка автоматических линий означает, что в общем случае нужно преобразовать одну многопоточную структуру в другую, так как на любом уровне принятия решения технологический процесс может быть реализован на станках с разной степенью концентрации технологических переходов.*

*Исследования показали, что сущность работы этого алгоритма заключается в том, что сначала осуществляется попытка реализовать максимально возможную концентрацию технологических переходов в одном инструментальном блоке. При этом определяется общее число инструментальных блоков, обеспечивающее выполнение проектной производительности.*

*Рассмотрена алгоритмизация процесса оптимизации технологического процесса и процесс оптимизации числа инструментальных блоков. Разработан метод оптимизации технологических процессов по критерию минимизации технологического оборудования для системы переналаживаемых автоматических линий.*

**Ключевые слова:** автоматические линии, технологический процесс, переход и операции, одноинструментальные и односторонние станки.

## Developing Algorithm for Technological Processes Optimization

*N.M. Sultan-zadeh, F.G. Amirov*

*Synthesis method of a structural configuration by criterion of the maximum use of design capacity for given technological processes allows at technical project stage choosing the optimal structure that provides the design capacity of re-adjustable automatic lines. Automatic line means that the structural configu-*

*ration, the flow structure of a switch, if necessary, at any level of the solution is carried out and machine is built in accordance with the different stages of technological processes. Research shows that the algorithm in this case is that, at the time of technological transition in order to check in advance with the maximum possibility for a tool that is performed on the block. The total number of block instruments shall be determined at this time, which is determined to carry out the design capacity. In the article the algorithmization of optimization of technological processes and tools is considered as well as optimization of the number of blocks. A method for optimization of technological processes by minimizing of technological equipment for the re-adjustable automatic lines is developed.*

**Keywords:** automatic lines, technological process, processing step and working operations, single-cutter and single-side machines.

Переход к концепции гибкого производства требует изменения организационной структуры предприятия, повышения роли унификации и стандартизации, что обеспечивает повышение эффективности оборудования уже на переходном этапе от традиционного производства к гибкому [1–5].

Метод синтеза структурной компоновки по критерию максимального использования проектной производительности для заданных технологических процессов (ТП) позволяет уже на стадии технического проекта выбирать оптимальную структуру, обеспечивающую проектную производительность переналаживаемых автоматических линий (ПАЛ) при минимальном значении приведенных затрат, числа технологического оборудования и транспортных связей между ними, минуя этап изготовления и испытания опытного образца. Проблема малооперационной технологии особенно актуальна при использовании принципа концентрации операций на обрабатывающих центрах [6–9].

По структурной компоновке ПАЛ отличаются от обычных автоматических линий (АЛ) загрузочными устройствами, которые должны быть универсальными или переналаживаемыми.

В общем виде задачу автоматизации проектирования ТП, т. е. формирование технологи-

ческих операций, можно поставить следующим образом.

Допустим, что ТП состоит из  $N$  технологических переходов, что является исходной информацией для последующих преобразований. На практике оптимизация ТП для АЛ решается как двухуровневая задача. На первом уровне формируют инструментальные блоки (шпиндельные коробки, комбинированные инструменты и т. д.), а на втором уровне — многостороннюю обработку. С точки зрения структурной компоновки АЛ это означает, что в общем случае нужно преобразовать одну многопоточную структуру в другую, так как на любом уровне принятия решения ТП может быть реализован на станках с разной степенью концентрации технологических переходов.

Для описания предлагаемого метода оптимизации структуры операционного ТП изготовления детали введем два понятия: односторонний станок и многосторонний станок.

Односторонний станок — технологическое оборудование, выполняющее технологические переходы одного инструментального блока (в частности инструментальный блок может содержать один инструмент).

Многосторонний станок — технологическое оборудование, выполняющее технологические переходы более одного инструментальных блоков (на этих станках может выполняться переустановка заготовки относительно базовых элементов технологического оборудования).

Для записи математической модели оптимизации структуры ТП примем следующие обозначения. Технологический процесс в виде технологических переходов, реализуемый на одноинструментальных и односторонних станках, обозначим множеством  $A$ , где каждый элемент множества соответствует одному технологическому переходу:

$$A = \{a_1; a_2; \dots; a_i; \dots; a_N\}. \quad (1)$$

Технологический процесс в виде работы инструментальных блоков, реализуемый на односторонних станках, обозначим множеством  $B$ , где каждый элемент множества соответствует одному инструментальному блоку:

$$B = \{b_1; b_2; \dots; b_i; \dots; b_{N1}\}. \quad (2)$$

Технологический процесс в виде операций, реализуемый на многосторонних станках, обозначим множеством  $V$ , где каждый элемент множества соответствует одной технологической операции:

$$V = \{V_1; V_2; \dots; V_i; \dots; V_{N2}\}. \quad (3)$$

Оптимизации ТП на первом уровне, т. е. при формировании инструментальных блоков, сводится к тому, чтобы по известному множеству  $A$  найти такое множество  $B$ , которое максимизировало бы производительность АЛ. Оптимизация на втором уровне, т. е. при формировании технологических операций, сводится к тому, чтобы по известному множеству  $B$  найти такое множество  $V$ , которое максимизировало бы производительность АЛ. Математическая модель оптимизации на первом уровне можно представить в виде

$$\delta_1 = \max \frac{M_B(q)}{\Omega_B}$$

при следующих ограничениях:

$$\begin{aligned} \frac{M_B(q)}{\Omega_B} &\geq \frac{M_A(q)}{\Omega_A}; \\ M_A(q) &\geq Q_{пр}; \\ M_B(q) &\geq Q_{пр}, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $M_A(q)$  — математическое ожидание проектной производительности АЛ, реализующей ТП  $A$ ;  $M_B(q)$  — математическое ожидание проектной производительности АЛ, реализующей ТП  $B$ ;  $\Omega_A = \sum_{i=1}^n n_i$  — суммарное количество технологического оборудования в структурной компоновке АЛ, где в каждой позиции выполняется один технологический переход;  $\Omega_B = \sum_{i=1}^{N_1} m_i$  — суммарное количество технологического оборудования в структурной компоновке АЛ, где в каждой позиции выполняется множество технологических переходов с общей стороной обработки заготовки;  $Q_{пр}$  — проектная произво-

дительность АЛ, обеспечивающая годовую программу.

При этом структуру и параметры надежности ТП  $B$  находят следующим образом. Число различных инструментальных блоков  $N_1$  определяют как допустимое разбиение множества  $A$  на  $N_1$  непересекающихся подмножеств таких, которые максимизировали бы значение  $\delta_1$  и удовлетворяли следующему условию:

$$\begin{aligned} A &= \bigcup_{i=1 \dots N_1} b_i; \\ b_{i_1} \cap b_{i_2} &= \emptyset; \quad i_1 \neq i_2; \\ i_1 \text{ и } i_2 &= 1; 2; \dots; N_1, \end{aligned}$$

где  $B = \{a^1; a^2; \dots; a^{ai}\}$  — набор технологических переходов, реализуемый  $i$ -м инструментальным блоком;  $a^i$  — число технологических переходов, концентрированных в  $i$ -м инструментальном блоке.

Длительность цикла действия  $i$ -го инструментального блока рассчитывают по формуле

$$t_{ц.б.i} = \max_{j=1 \dots a_i} \{t_{всj} + t_{оj}\}. \quad (5)$$

Здесь  $t_{всj}$  — время подвода и отвода  $j$ -го инструмента в  $i$ -м блоке;  $t_{оj}$  — основное технологическое время  $j$ -го инструмента в  $i$ -м блоке.

Суммарные удельные потери  $i$ -го инструментального блока

$$B_{б.i} = B_{авт.i} + \psi_i \left( \sum_{j=1}^{a_i} t_{нас.j} \right) T_{б.i}^{-1}, \quad (6)$$

где  $B_{авт.i}$  — удельные потери системы управления и привода  $i$ -го инструментального блока;  $t_{нас.j}$  — среднее время настройки или замены  $j$ -го инструмента в  $i$ -м блоке;  $T_{б.i}$  — период стойкости  $i$ -го инструментального блока;  $\psi_i$  — коэффициент, учитывающий ухудшение ремонтпригодности инструментов в  $i$ -м блоке.

Число  $i$ -х инструментальных блоков, обеспечивающих годовую программу, определяют по формуле

$$m_i = \left\lceil \frac{Q_{пр}}{t_{ц.б.i} (1 + B_{авт.i} + B_{б.i})} \right\rceil + d_i. \quad (7)$$

Здесь  $\left\lceil \frac{Q_{пр}}{t_{ц.б.i} (1 + B_{авт.i} + B_{б.i})} \right\rceil$  — целая часть отношения;  $d_i \geq 1$  — число дополнительных  $i$ -х ин-

струментальных блоков, компенсирующих наложенные потери, которое определяется из ограничения  $M_B(q) \geq Q_{\text{пр}}$ .

Математическая модель оптимизации на втором уровне имеет аналогичный вид:

$$\delta_2 = \max \frac{M_V(q)}{\Omega_V} \quad (8)$$

при следующих ограничениях

$$\frac{M_V(q)}{\Omega_V} \geq \frac{M_B^*(q)}{\Omega_B^*},$$

$$M_V(q) \geq Q_{\text{пр}},$$

где  $M_B^*(q)$  — математическое ожидание проектной производительности АЛ, определенное на первом уровне;  $\Omega_B^*$  — суммарное количество технологического оборудования, определенное на первом уровне;  $M_V(q)$  — математическое ожидание проектной производительности АЛ, реализующей ТП  $V$ ;  $\Omega_V = \sum_{i=1}^{N_2} l_i$  — суммарное количество технологического оборудования в структурной компоновке АЛ.

При этом структуру и параметры надежности ТП  $V$  определяют следующим образом. Число различных технологических операций (станков) находят, как допустимое разбиение множества  $B$  на  $N_2$  непересекающихся подмножеств таких, чтобы максимизировало значение  $\delta_2$  и удовлетворяло следующему условию:

$$B = \bigcup_{i=1 \dots N_2} V_i;$$

$$v_{i_1} \cap v_{i_2} = \emptyset, \quad i_1 \neq i_2;$$

$$i_1 \text{ и } i_2 = 1; 2; \dots; N_2.$$

Здесь  $V_i = \{b_1^i; b_2^i; \dots; b_{\beta_i}^i\}$  — набор инструментальных блоков, входящих в  $i$ -ю операцию;  $\beta_i$  — число инструментальных блоков в  $i$ -й операции.

Длительность цикла действия  $i$ -й операции определяется следующим образом:

$$t_{ц. \delta i} = \max_{j=1, \dots, \beta_i} \{t_{всj} + t_{оj}\}, \quad (9)$$

где  $t_{ц. \delta i}$  — длительность цикла действия  $i$ -го инструментального блока, входящего в  $i$ -ю операцию.

Суммарные удельные потери станка для  $i$ -й операции рассчитывают по формуле

$$B_{ci} = \sum_{j=1}^{\beta_i} B_{\delta j}. \quad (10)$$

Число  $i$ -х станков, обеспечивающих годовую программу,

$$e_i = \left\lceil \frac{Q_{\text{пр}}}{t_{ц \delta i} (1 + B_{ci})} \right\rceil + f_i,$$

где  $f_i$  — число дополнительных  $i$ -х станков, компенсирующее наложенные потери, которое определяется из ограничения  $M_V(q) \geq Q_{\text{пр}}$ .

Рассмотрим алгоритм реализации процесса оптимизации ТП. Сначала рассмотрим процесс оптимизации числа инструментальных блоков. Инструментальным блоком будем называть множество инструментов, которые в процессе обработки не изменяют взаимное положение в пространстве и привязаны к одной системе координат. Как было указано выше, исходной информацией для этого этапа оптимизации является ТП по переходам. Технологический процесс показан в виде матрицы с пятью измерениями  $A(i_1, i_2, i_3, i_4, j)$ . Первое измерение используется для нумерации комплекта баз по ходу их смены в ТП ( $i_1 = 1, \dots, \alpha$ , где  $\alpha$  — общее число смен комплекта баз); второе измерение — для нумерации сторон обработки детали ( $i_2 = 1, \dots, \beta$ , где  $\beta$  — максимальное число обрабатываемых сторон детали с учетом формирования базовых поверхностей); третье измерение — для нумерации обрабатываемых поверхностей (геометрических фигур) на каждой обрабатываемой стороне ( $i_3 = 1, \dots, \gamma$ , где  $\gamma$  — максимальное число обрабатываемых поверхностей на одной стороне); четвертое измерение — для нумерации технологических переходов для обработки одной поверхности ( $i_4 = 1, \dots, \varepsilon$ , где  $\varepsilon$  — максимальное число технологических переходов для обработки одной поверхности);



пятое измерение — для нумерации характеристик технологического перехода ( $j = 1, \dots, \alpha$ , где  $\alpha$  — максимальное число характеристик одного технологического перехода).

В силу того, что в инструментальный блок могут объединяться только те технологические переходы, которые находятся на одной стороне и осуществляются от одного комплекта баз, то оптимизация должна вестись для  $d$  подмножеств технологических переходов:

$$d = \sum_{i_1=1}^{\alpha} \beta_{i_1}, \quad (11)$$

где  $i_1$  — номер комплекта баз;  $\beta_{i_1}$  — число обрабатываемых сторон от  $i_1$ -го комплекта баз.

Алгоритм формирования инструментальных блоков по критерию максимума усредненной производительности оборудования приведен на рис. 1. Сущность работы этого алгоритма заключается в том, что сначала (в первом случае) осуществляется попытка реализовать максимально возможную концентрацию технологических переходов в одном инструментальном блоке (случай  $K = 1$ ). При этом определяется общее число инструментальных блоков, обеспечивающее выполнение проектной производительности ( $M(q) \geq Q_{пр}$ ).

Однако, с другой стороны, известно, что максимальная концентрация технологических переходов в одном инструментальном блоке обуславливает максимальные удельные потери на инструмент и минимально-возможную цикловую производительность. Поэтому, в целях уменьшения удельных потерь на инструмент и увеличения цикловой производительности инструментальных блоков, делается попытка уменьшить степень концентрации технологических переходов. Для этого исходное множество технологических переходов делится на два подмножества ( $K = 2$ ), при этом предполагается, что каждый технологический переход выполняется на отдельном станке. Полученные подмножества покрываются минимально-возможным числом инструментальных блоков, общее число которых, по определению, не может быть меньше, чем в первом случае. Исходя из того, что каждый инструментальный блок

реализован на отдельном станке определяется их общее количество, обеспечивающее выполнение проектной производительности. Если для нового множества инструментальных блоков значение критерия оптимальности растет, то процесс уменьшения степени концентрации технологических переходов в одном инструментальном блоке продолжается, т. е. исходное множество технологических переходов делится на три подмножества ( $K = 3$ ) и вся процедура повторяется до тех пор, пока от шага к шагу значение критерия оптимальности растет. Процесс оптимизации прекращается в том случае,

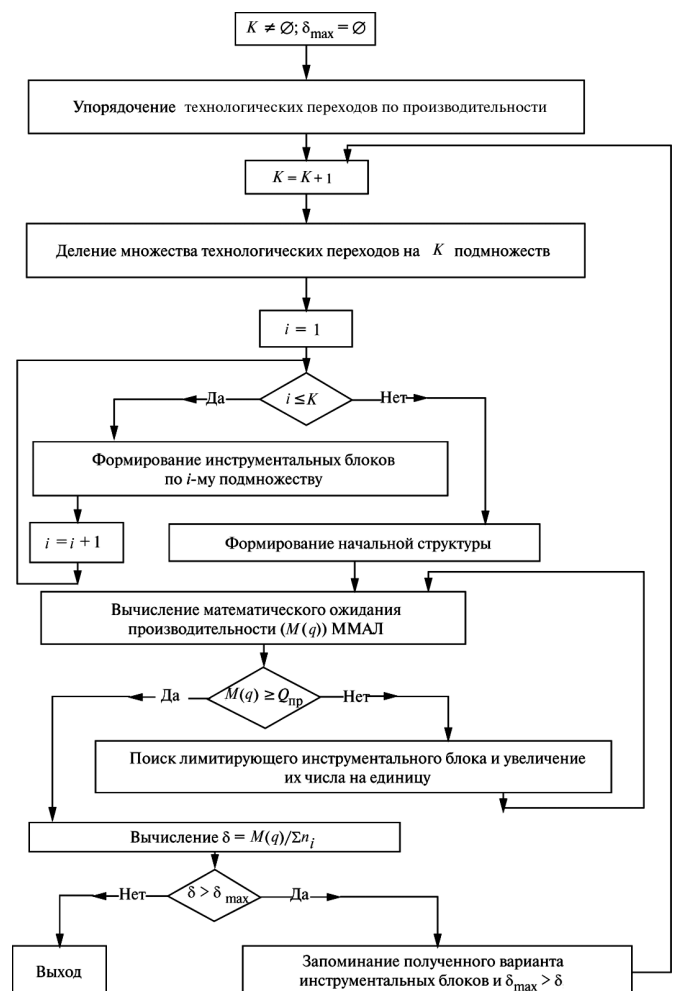


Рис. 1. Алгоритм формирования инструментальных блоков по критерию максимума усредненной производительности оборудования



5. Амиров Ф.Г. Оптимизация режимов резания технологических переходов при их последовательной концентрации на одной позиции // Известия Азербайджанского Национального Аэрокосмического Агентства. 2013. № 3. С. 67–73.

6. Султан-заде Н.М. Метод оптимизации структурной компоновки автоматических линий // Сб.: Системы управления станками и автоматические линии. М.: ВЗМИ, 1982. С. 9–13.

7. Султан-заде Н.М., Тимковский В.Г. Метод оптимизации структуры однопоточных автоматических линий // Сб.: Системы управления станками и автоматические линии. М.: ВЗМИ, 1983. С. 93–96.

8. Классификатор технологических операций машиностроения и приборостроения: 1 85 151 / Ю.Я. Венгеровский, Б.Н. Волков и др. М.: Изд-во стандартов, 1987. С. 72.

9. Основы автоматизации машиностроительного производства / Е.Р. Ковальчук, М.Г. Косов, В.Г. Митрофанов и др.; Под ред. Ю.М. Соломенцева. М.: Высш. шк.; Машиностроение, 1999. 312 с.

## References

1. Dem'ianiuk F.S. *Tekhnologicheskie osnovy potочно-avtomatizirovannogo proizvodstva* [Technological bases of thread-aided manufacturing]. Moscow, Vysshiaia shkola publ., 1968. 700 p.

2. Balakshin B.S. *Osnovy tekhnologii mashinostroeniia* [Fundamentals of Mechanical Engineering]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1969. 559 p.

3. Sultan-zade N.M., Zagidullin R.R. *Povyshenie proizvoditel'nosti GPS putem optimizatsii raspisanii* [Increase productivity by optimizing the scheduling of GPS]. Moscow, STIN publ., 1996, no. 12, pp. 9–13.

4. Amirov F.G. *Klassifikatsiia detalei po razmeram, sposobu postroeniia sistemy koordinat detali dlia geometricheskogo modelirovanie* [Classification of parts by size, method of

constructing a system of part coordinates for geometric simulation]. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Mashinostroenie* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building]. 2012, no. 8, pp. 32–35.

5. Amirov F.G. *Optimizatsiia rezhimov rezaniia tekhnologicheskikh perekhodov pri ikh posledovatel'noi kontsentratsii na odnoi pozitsii* [Optimization of the cutting process transitions in their consistent focus on one position]. *Izvestiia Azerbaidzhanskogo Natsional'nogo Aerokosmicheskogo Agentstva* [Proceedings of the Azerbaijan National Aerospace Agency]. 2013, no. 3, pp. 67–73.

6. Sultan-zade N.M. *Metod optimizatsii strukturnoi komponovki avtomaticheskikh linii* [The method of optimizing the structural layout of automatic lines]. *Sbornik Sistemy upravleniia stankami i avtomaticheskie linii* [Collection Management System control machine tools and transfer lines]. Moscow, VZMI publ., 1982, pp. 9–13.

7. Sultan-zade N.M., Timkovskii V.G. *Metod optimizatsii struktury odnopotochnykh avtomaticheskikh linii* [The method of optimizing the structure of single-threaded transfer lines]. *Sbornik Sistemy upravleniia stankami i avtomaticheskie linii* [Collection Management System control machine tools and transfer lines]. Moscow, VZMI publ., 1983, pp. 93–96.

8. Vengerovskii Iu.Ia., Volkov B.N. *Klassifikator tekhnologicheskikh operatsii mashinostroeniia i priborostroeniia: 1 85 151* [Classifier manufacturing operations in Aerospace Engineering no. 1 85 151]. Moscow, Standart publ., 1987. 72 p.

9. Koval'chuk E.R., Kosov M.G., Mitrofanov V.G., Solomentsev Iu.M., Sultan-zade N.M., Skhirtladze A.G. *Osnovy avtomatizatsii mashinostroitel'nogo proizvodstva* [Fundamentals of automation engineering production]. Moscow, Vysshiaia shkola, Mashinostroenie publ., 1999. 312 p.

Статья поступила в редакцию 18.04.2012

## Информация об авторах

**СУЛТАН-ЗАДЕ Назим Музаффарович** (Москва) — доктор технических наук, профессор кафедры «Технологии металлорежущих систем автомобилестроения». Московский государственный индустриальный университет (115280, Москва, Российская Федерация, Автозаводская ул., д. 16).

**АМИРОВ Фариз Гачай-оглы** (Баку) — кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологии машиностроения». Азербайджанский Технический Университет (1073, Баку, Азербайджан, Г. Джавида ул., 25, e-mail: fariz.67@mail.ru).

## Information about the authors

**SULTAN-ZADEH Nazim Muzaffarovich** (Moscow) — Dr. Sc. (Eng.), Professor of «Technologies of metal-cutting systems of automotive industry» Department. Moscow State Industrial University (Avtozavodskaya str., 16, 115280, Moscow, Russian Federation).

**AMIROV Fariz Gachay-oglu** (Baku) — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor of «Mechanical Engineering Technology» Department. Azerbaijan Technical University (H. Cavid str., 25, 1073, Baku, Azerbaijan, e-mail: fariz.67@mail.ru).