

УДК 621.9.06

doi: 10.18698/0536-1044-2020-9-18-23

# Некоторые особенности повышения производительности автоматических линий

**Ф.Г. Амиров**

Азербайджанский Технический Университет

## Some Aspects of Increasing the Efficiency of Automated Production Lines

**F.G. Amirov**

Azerbaijan Technical University

Разработана математическая модель определения производительности автоматической линии в зависимости от следующих факторов: числа участков и потоков на каждом из них, числа и типа накопителей, числа наладчиков. Рассмотрены некоторые вопросы, решаемые теорией производительности автоматической линии на стадии проектирования и эксплуатации. Существующие методы расчета производительности автоматической линии рассмотрены как процесс проектирования по этапам, определены необходимые правила для принятия решений. Технологический процесс задан в виде технологических переходов. Разработан метод получения нижней и верхней оценок производительности и коэффициента готовности автоматической линии. Предложенный метод предполагает использование ЭВМ и наличие в качестве исходных данных аналитических решений для вычисления производительности элементарных модулей, из которых скомпонована автоматическая линия. В результате комплексной автоматизации повышаются производительность линии и качество выпускаемой продукции, сокращается производственный цикл изготовления деталей.

**Ключевые слова:** автоматические линии, метод расчета производительности, число участков, разделители потоков, число наладчиков, вместимость накопителя

The article examines the development of mathematical models of automated production lines to determine their efficiency, depending on the following parameters: the number of sections and the number of steams in each section, the number and type of storage buffers, and the number of adjusters. Some issues related to the theory of automated line performance at the design and operation stage are also considered. The existing methods for calculating the efficiency of automated production lines are considered as a stage-by-stage design process, and the necessary decision making rules are defined. It is noted that the technological process is specified in the form of technological transitions. A method for obtaining the lower and upper estimates of productivity and the availability factor are developed. The proposed method involves using computers and assumes, as initial data, the availability of analytical solutions for calculating the efficiency of elementary modules that the automated line is comprised of. Integrated automation leads to improved efficiency of the automated line, better quality of the finished product, and a reduced manufacturing cycle.

**Keywords:** automated production lines, productivity calculation method, number of sections, flow separators, number of adjusters, buffer capacity

Одним из важных элементов автоматизированного производства является автоматическая линия (АЛ) — комплекс оборудования, расположенный в определенной технологической последовательности, связанный транспортными устройствами, средствами управления и обеспечивающий автоматическое превращение исходных материалов в обрабатываемое изделие [1–3].

Цель работы — разработка метода синтеза структуры системы АЛ для обработки заданного множества деталей крупносерийного и массового производства.

В результате комплексной автоматизации повышаются производительность АЛ и качество выпускаемой продукции, сокращается производственный цикл изготовления изделия. Чтобы увеличить производительность АЛ, необходимо максимально автоматизировать цикл обработки на каждом станке (в том числе с помощью средств вычислительной техники) и оснастить станки загрузочно-разгрузочными и транспортными устройствами, например, промышленными роботами [1, 2, 4–7].

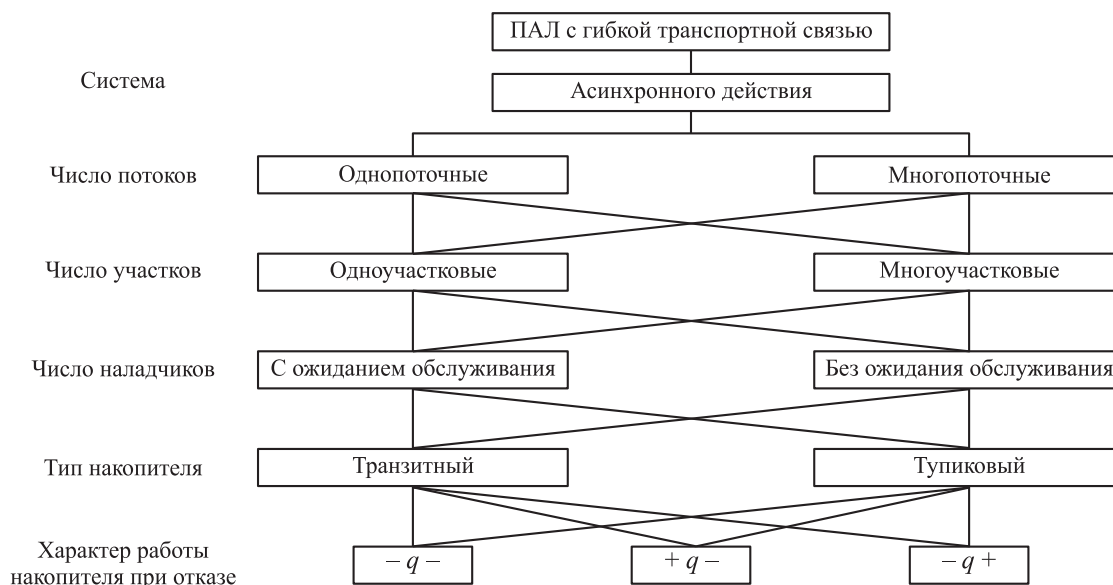
Обзор литературных источников показал, что сложность определения производительности АЛ связана со следующими факторами: числом участков и потоков на каждом из них, числом и типом накопителей, числом наладчиков и др. Для расчета производительности АЛ принята модель, составленная на основе классификации переналаживаемых АЛ (ПАЛ), приведенной на рисунке.

Вопрос повышения производительности АЛ на стадии проектирования и эксплуатации решают на основе теории производительности автоматизированного производства. При этом необходимо определить оптимальную структуру разрабатываемой АЛ, для чего следует выбрать ее структурную компоновку, разделить линии на участки и построить многопоточную структуру, определить вместимость межучастковых накопителей и разместить их на линии, рассчитать число наладчиков, подобрать систему управления и др. [1, 4, 8–13].

Обзор трудов по теории производительности АЛ показал, что они в основном посвящены задачам анализа и не обеспечивают процесс проектирования достаточным количеством решающих правил [14]. Сложность разработки алгоритма синтеза структурной компоновки АЛ объясняется факторами, приведенными на рисунке.

Рассмотрим основной метод расчета производительности АЛ при проектировании по этапам и определим необходимые правила для принятия решений. Зададим технологический процесс в виде технологических переходов. Первым этапом является оптимизация технологического процесса АЛ, вторым — определение структурной компоновки АЛ.

На этапе оптимизации технологического процесса исследуют однопоточные АЛ, т. е. такие структурные компоновки, в которых на каждом участке действует один поток. Под



Классификация ПАЛ по математическим моделям для определения их производительности:  
 $- q -$  — накопитель не принимает и не выдает заготовки;  $+ q -$  — накопитель принимает, но не выдает заготовки;  
 $- q +$  — накопитель не принимает, но выдает заготовки

участком понимают отдельно взятый агрегат или множество жестко сблокированных агрегатов (т. е. АЛ синхронного действия). Участок расположен между двумя накопителями или разделителями потоков. Многопоточная структура АЛ — это такие компоновки, в которых хотя бы на одном участке число потоков больше единицы [4, 11, 15].

Анализ классификации математических моделей ПАЛ (см. рисунок) показывает, что конечные формулы для вычисления производительности можно получить лишь для двухучастковых АЛ, так как использование двух накопителей приводит к математической модели (с более чем семью частными производными), общего решения которой не существует [4, 15].

На базе аналитического решения двухучастковых АЛ и обобщения большого количества результатов статистического моделирования предложена эмпирическая формула определения производительности АЛ, состоящей из участков с идентичным оборудованием и безотказными транзитными накопителями [11, 14, 16], имеющая вид

$$Q = \frac{q}{1 + B \left[ 1 + \frac{k-1}{(1+B)Z_m \mu / 4q} \right]}.$$

Здесь  $q$  — цикловая производительность одного участка,  $q = 1/t_{\text{ц}}$  ( $t_{\text{ц}}$  — продолжительность цикла действия одного потока,  $t_{\text{ц}} = t_{\text{вс}} + t_{\text{м}}$ , где  $t_{\text{вс}}$  и  $t_{\text{м}}$  — вспомогательное и машинное (основное) время этого цикла);  $B$  — удельные потери одного потока,  $B = \bar{t}_{\text{вос}} / \bar{t}_{\text{р}}$  ( $\bar{t}_{\text{вос}}$  — среднее время восстановления единичного отказа потока;  $\bar{t}_{\text{р}}$  — среднее время работы потока или наработка на отказ);  $k$  — число участков АЛ;  $Z_m$  — вместимость накопителей, шт.;  $\mu$  — интенсивность восстановления отказавшего потока,  $\mu = 1/t_{\text{вос}}$ .

Оптимальное число накопителей [12]

$$K_{\text{опт}} = \sqrt{\frac{A + N(m_1 + 1)}{(A + Nm_1)\alpha} \frac{B_0(1-\delta)}{1 + B_0\delta}},$$

где  $A$  — параметр, определяющий влияние АЛ синхронного действия на годовой фонд заработной платы обслуживающего персонала;  $N$  — срок службы АЛ;  $m_1$  — отношение годовых затрат на ремонт и обслуживание АЛ синхронного действия к годовому фонду заработной платы обслуживающего персонала;  $\alpha$  — относительная стоимость накопителя по сравнению со

средней стоимостью одного станка в линии;  $B_0$  — суммарные удельные потери АЛ синхронного действия;  $\delta$  — коэффициент компенсации удельных потерь накопителем.

Для расчета производительности АЛ со сложной структурой и безотказными накопителями с условием работы при отказе —  $q$  — предложена эмпирическая формула более общего вида [14, 16]

$$Q = q_{\min} K_q;$$

$$q_{\min} = \min\{q_1, q_2, \dots, q_j\};$$

$$K_q = \min\{\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_j\};$$

$$\eta_i = \min\{C_{i1}, C_{i2}\};$$

$$C_{i1} = \left\{ 1 + B_i [\gamma_j(B_i a_{i-1})]^{1/\sqrt{n_i}} \right\}^{-1};$$

$$C_{i2} = \left\{ 1 + B_i [\gamma_j(B_i a_i)]^{1/\sqrt{n_i}} \right\}^{-1};$$

где  $q_i$  — цикловая производительность  $i$ -го участка ( $i = 1, 2, \dots, j$ ),  $q_i = n_i/t_{\text{ц}i}$  ( $n_i$  — число параллельно работающих потоков на  $i$ -м участке;  $t_{\text{ц}i}$  — продолжительность цикла действия одного потока  $i$ -го участка);  $\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_j$  — коэффициенты готовности АЛ на 1-м, 2-м и  $j$ -м участках;  $B_i$  — удельные потери  $i$ -го участка;  $\gamma_j(B_i a_{i-1}), \gamma_j(B_i a_i)$  — табличные значения коэффициента наложения потерь.

В основу обобщенного приближенного метода расчета производительности АЛ с использованием ее верхней и нижней оценок положена формула [4, 14]

$$\eta = \eta_{\min} + \frac{3}{5} \frac{k-2}{k-1} (\eta_{\max} - \eta_{\min}),$$

где  $\eta, \eta_{\min}$  и  $\eta_{\max}$  — коэффициент готовности АЛ, его минимальное и максимальное значения.

Этот метод предполагает использование ЭВМ и наличие в качестве исходных данных аналитических решений для расчета производительности элементарных модулей, из которых скомпонована АЛ. Поэтому для использования такого метода необходимо разработать аналитические решения для имеющихся моделей АЛ [10, 14].

Исследование производительности многопоточных АЛ показало, что они охватывают следующий класс математических моделей:

- метод расчета производительности АЛ синхронного действия;

- приближенный метод расчета производительности многопоточных двухчастковых АЛ с равными цикловыми производительностями участков, с условием работы транзитного накопителя при отказе –  $q$  –;

- приближенный метод расчета производительности многопоточных и многоучастковых АЛ без учета разности цикловых производительностей потоков с условием работы транзитного накопителя при отказе –  $q$  –.

Чтобы решить задачу повышения производительности АЛ, рассмотрим общую задачу оптимального проектирования ПАЛ.

Критерий оптимального проектирования ПАЛ имеет вид

$$\min = \sum_{i=1}^n \frac{Z_{\text{АЛ}i} \Phi}{Q_i}; \quad (1)$$

$$Q_i \geq Q_{\text{пр}i};$$

$$S \leq S^*,$$

где  $n$  — число изготавливаемых деталей;  $Z_{\text{АЛ}i}$  — стоимость оборотных средств и амортизационных отчислений, обеспечивающая заданную производительность ПАЛ для  $i$ -й детали;  $\Phi$  — годовой фонд времени;  $Q_i$  и  $Q_{\text{пр}i}$  — текущая и проектная производительность АЛ конкретной структурной компоненты для  $i$ -й детали;  $S$  — площадь, занимаемая ПАЛ;  $S^*$  — проектная площадь, занимаемая ПАЛ.

В выражении (1):

$$Z_{\text{АЛ}i} = f(N_i, M, S, Z, T, W);$$

$$Q_i = \psi(N_i, M, K, Z, T, A, B, K_{r_i});$$

$$S = \varphi_4(N, A).$$

Здесь  $N_i$  — число станков в составе ПАЛ, необходимых для обработки  $i$ -й детали,  $N_i = \varphi_1(C_i, K_{r_i})$ , где  $C_i$  — технологический процесс для  $i$ -й детали, реализуемый на ПАЛ;  $K_{r_i}$  — коэффициент готовности станков и накопителей для  $i$ -й детали,  $K_{r_i} = \varphi_6(C_i, N_i)$ ;  $M$  — число обслуживающего персонала,  $M = \varphi_2(C_i, K_{r_i}, N_i)$ ;  $Z$  — вместимость используемых накопителей,  $Z = \varphi_5(K_{r_i}, K)$ , где  $K = \varphi_3(K_{r_i}, N_i)$  — число участков ПАЛ;  $T$  — тип транспортной системы;  $W$  — мощность всех агрегатов ПАЛ;  $A$  — система управления ПАЛ.

## Выводы

1. На основе теории производительности автоматизированного производства с учетом факторов, присущих АЛ, разработана математическая модель повышения производительности АЛ на стадии проектирования и эксплуатации.

2. Рассмотрена общая задача оптимального проектирования ПАЛ для изготовления деталей машиностроения.

## Литература

- [1] Амиров Ф.Г. Механика машиностроения. *Решения теоретических задач производительности автоматических линий*, Баку, 2003, с. 26–27.
- [2] Amirov F.G. Developing Criterion and optimization of PAL system. *Applied mechanics and materials*, 2013, vol. 379, pp. 244–249, doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.379.244>
- [3] Hehenberger P. *Computerunterstützte Fertigung*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2011. 265 p.
- [4] Султан-Заде Н.М. *Надежность и производительность автоматических станочных систем*. Москва, ВЗМИ, 1982. 80 с.
- [5] Петраков Ю.В., Драчев О.И. *Автоматическое управление процессами резания*. Старый Оскол, ТНТ, 2011. 407 с.
- [6] Амиров Ф.Г. Оптимизация планировочных решений автоматизированных станочных систем. *Прогрессивные технологии и системы машиностроения*, 2011, вып. 42, с. 11–16.
- [7] Амиров Ф.Г. Особенности механической обработки на позициях. *Вестник машиностроения*, 2013, № 1, с. 49–51.
- [8] Амиров Ф.Г. *Повышение эффективности автоматических линий с гибкой связью за счет транспортно-накопительных систем тупикового типа*. Дис. ... канд. техн. наук. Москва, 1997. 138 с.

- [9] Житников Ю.З., Житников Б.Ю., Схиртладзе А.Г., Симаков А.Л. *Автоматизация технологических и производственных процессов в машиностроении*. Старый Оскол, ТНТ, 2017. 656 с.
- [10] Схиртладзе А.Г., Бочкарев С.В., Лыков А.Н. *Автоматизация технологических процессов в машиностроении*. Пермь, Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2010. 505 с.
- [11] Морозов В.В., Схиртладзе А.Г., Жданов А.В., Залеснов А.И. *Автоматизированное проектирование технологической оснастки для холодной штамповки*. Старый Оскол, ТНТ, 2012. 344 с.
- [12] Базров Б.М. *Модульная технология в машиностроении*. Москва, Машиностроение, 2001. 368 с.
- [13] Кондаков А.И., Васильев А.С. *Выбор заготовок в машиностроении. Справочник*. Москва, Машиностроение, 2007. 560 с.
- [14] Султан-Заде Н.М., Амиров Ф.Г. *Исследование надежности и производительности АЛ*. Москва, ИКТИ РАН, 1997. 42 с.
- [15] Кошин А.А., Юсубов Н.Д. Аналитические основы моделей силового взаимодействия подсистем технологической системы в процессах обработки резанием. *Современные проблемы машиностроения и приборостроения. Докл. Междунар. науч.-техн. конф.*, Баку, АзТУ, 2005, с. 67–70.
- [16] Базров Б.М. *Основы технологии машиностроения*. Москва, Машиностроение, 2007. 736 с.

## References

- [1] Amirov F.G. Mechanics of mechanical engineering. *Resheniya teoreticheskikh zadach proizvoditel'nosti avtomaticheskikh liniy*, Baku, 2003, pp. 26–27 (in Russ.).
- [2] Amirov F.G. Developing Criterion and optimization of PAL system. *Applied mechanics and materials*, 2013, vol. 379, pp. 244–249, doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.379.244>
- [3] Hehenberger P. *Computerunterstützte Fertigung*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2011. 265 p.
- [4] Sultan-Zade N.M. *Nadezhnost' i proizvoditel'nost' avtomaticheskikh stanochnykh sistem* [Reliability and performance of automatic machine systems]. Moscow, VZMI publ., 1982. 80 p.
- [5] Petrakov Yu.V., Drachev O.I. *Avtomaticheskoye upravleniye protsessami rezaniya* [Automatic control of cutting processes]. Staryy Oskol, TNT publ., 2011. 407 p.
- [6] Amirov F.G. Optimization planning solutions automated machine systems. *Progressivnyye tekhnologii i sistemy mashinostroyeniya*, 2011, iss. 42, pp. 11–16 (in Russ.).
- [7] Amirov F.G. Distinctive features of machining operation at positions. *Vestnik mashinostroyeniya*, 2013, no. 1, pp. 49–51 (in Russ.).
- [8] Amirov F.G. *Povysheniye effektivnosti avtomaticheskikh liniy s gibkoy svyaz'yu na schet transportno-nakopitel'nyy sistem*. Kand. Diss. [Improving the efficiency of automated lines with flexible communication at the expense of transport and storage systems. Cand. Diss.]. Moscow, 1997. 138 p.
- [9] Zhitnikov Yu.Z., Zhitnikov B.Yu., Skhirtladze A.G., Simakov A.L. *Avtomatizatsiya tekhnologicheskikh i proizvodstvennykh protsessov v mashinostroyenii* [Automation of technological and production processes in mechanical engineering]. Staryy Oskol, TNT publ., 2017. 656 p.
- [10] Skhirtladze A.G., Bochkarev S.V., Lykov A.N. *Avtomatizatsiya tekhnologicheskikh protsessov v mashinostroyenii* [Automation of technological processes in mechanical engineering]. Perm, PSTU publ., 2010. 505 p.
- [11] Morozov V.V., Skhirtladze A.G., Zhdanov A.V., Zalesnov A.I. *Avtomatizirovannoye proyektirovaniye tekhnologicheskoy osnastki dlya kholodnoy shtampovki* [Computer-aided design of cold forming tooling]. Staryy Oskol, TNT publ., 2012. 344 p.
- [12] Bazrov B.M. *Modul'naya tekhnologiya v mashinostroyenii* [Modular technology in mechanical engineering]. Moscow, Mashinostroyeniye publ., 2001. 368 p.

- [13] Kondakov A.I., Vasil'yev A.S. *Vybor zagotovok v mashinostroyenii. Spravochnik* [Selection of workpieces in mechanical engineering. Guide]. Moscow, Mashinostroyeniye publ., 2007. 560 p.
- [14] Sultan-Zade N.M., Amirov F.G. *Issledovaniye nadezhnosti i proizvoditel'nosti AL* [Research on the reliability and performance of AL]. Moscow, IKTI RAN publ., 1997. 42 p.
- [15] Koshin A.A., Yusubov N.D. The analytical framework that models the force interaction of subsystems in technological systems in the processes of machining. *Sovremennyye problemy mashinostroyeniya i priborostroyeniya. Dokl. Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.* [Modern problems of mechanical engineering and instrument engineering. Reports of the International scientific and technical conference]. Baku, 2005, pp. 67–70.
- [16] Bazrov B.M. *Osnovy tekhnologii mashinostroyeniya* [Fundamentals of mechanical engineering technology]. Moscow, Mashinostroyeniye publ., 2007. 736 p.

Статья поступила в редакцию 15.04.2020

## Информация об авторе

**АМИРОВ Фариз Гачай оглы** — доктор технических наук, профессор кафедры «Специальная технология и оборудование». Азербайджанский Технический Университет (AZ 1073, Баку, Азербайджан, пр-т Г. Джавида, д. 25, e-mail: fariz.67@mail.ru).

## Information about the author

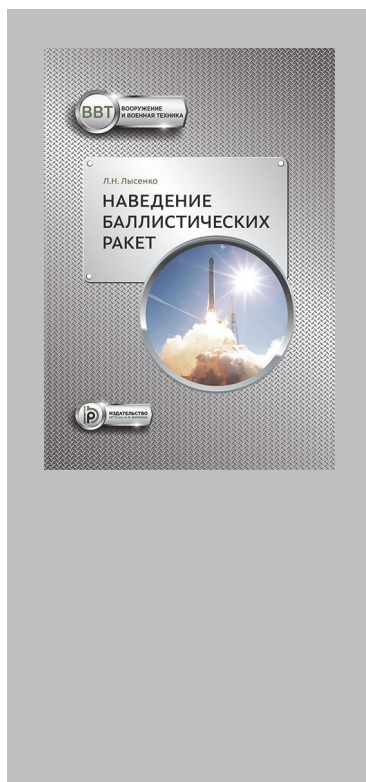
**AMIROV Fariz Gachay ogly** — Doctor of Science (Eng.), Professor, Department of Special Machinery and Equipment. Azerbaijan Technical University (Az-1073, Baku, Azerbaijan Republic, H. Javid Ave., Bldg. 25, e-mail: fariz.67@mail.ru).

### Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Амиров Ф.Г. Некоторые особенности повышения производительности автоматических линий. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2020, № 9, с. 18–23, doi: 10.18698/0536-1044-2020-9-18-23

### Please cite this article in English as:

Amirov F.G. Some Aspects of Increasing the Efficiency of Automated Production Lines. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2020, no. 9, pp. 18–23, doi: 10.18698/0536-1044-2020-9-18-23



## В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана вышло в свет учебное пособие Л.Н. Лысенко «Наведение баллистических ракет»

Изложены научные и методологические основы наведения баллистических ракет. Рассмотрены вопросы программирования движения (задачи наведения) и информационно-навигационного обеспечения управления (задачи навигации), а также проблемы определения точности стрельбы (задачи оценки точности возмущенного движения). Показаны направления решений соответствующих задач при создании ракетных комплексов тактического, оперативно-тактического и стратегического назначения, возможные пути совершенствования баллистико-навигационного обеспечения полета ракет указанных классов.

Содержание пособия соответствует курсу лекций, читаемых в МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Для студентов технических вузов, слушателей военных академий, а также аспирантов, инженеров и научных работников, специализирующихся в области баллистики, динамики полета и управления движением летательных аппаратов.

### По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.

Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;

press@bmstu.ru; www.baumanpress.ru