

Вероятностные модели расчета производительности автоматизированных станочных систем

© В.В. Додонов

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Производительность и надежность автоматизированных металлорежущих станков являются важнейшими показателями эффективности их эксплуатации. Однако в научной литературе не освещены вопросы их работы с точки зрения обслуживания большого количества требований на обработку деталей и интенсивности обслуживания этих требований, описываемых методами теории массового обслуживания. Рассмотрены механизмы формирования потоков заявок на обработку, отказов оборудования, инструмента и потоков обслуживания на примере работы металлорежущего станка как своеобразной системы массового обслуживания. Предложен метод описания механизма формирования потоков заявок и обслуживания, позволяющий оценить влияние условий работы станка на его производительность и надежность. Результаты исследования расширяют знания об использовании теории производительности и надежности, теории массового обслуживания при анализе функционирования металлорежущих станков и других технологических машин дискретного действия.

Ключевые слова: автоматизированные металлорежущие станки, производительность, надежность, поток заявок, поток обслуживания, вероятности состояний станка, система массового обслуживания.

Проектирование автоматизированных станочных систем (АСС) и анализ эффективности функционирования уже существующих АСС (гибких производственных модулей (ГПМ), гибких производственных систем, робототехнических комплексов, участков с ЧПУ и др.) предполагают подробное описание и анализ производительности и надежности АСС как наиболее важных и существенных факторов их эффективной эксплуатации. При этом элементы АСС — станки, ГПМ, устройства загрузки-выгрузки, транспортно-накопительное и другое вспомогательное оборудование АСС можно рассматривать как своеобразные дискретные системы массового обслуживания (СМО), на которые с определенной интенсивностью λ поступает поток заявок на обработку заготовок, полуфабрикатов для осуществления определенных технологических операций с длительностью цикла T :

$$T = t_p + t_x, \quad (1)$$

где t_p — время рабочих ходов; t_x — время холостых ходов.

Цикл обработки T определяет интенсивность обработки (обслуживания) поступающих заготовок, полуфабрикатов [1].

Автоматизированную станочную систему, состоящую из n единиц технологического и вспомогательного оборудования, можно рассматривать как последовательную сеть многофазных СМО, моделирующих функционирование отдельных технологических или других машин, подсистем АСС.

Технологические машины, входящие в АСС, и сама АСС характеризуются потоком λ поступающих на обработку заготовок $\lambda = 1/\tau$, где τ — промежуток времени между отдельными заявками на обработку, и потоком обслуживания (обработки) $\mu = 1/t_{об}$, где $t_{об}$ — время обработки (обслуживания) на технологической машине. При этом потоком $\lambda(t)$, как и $\mu(t)$, является предел отношения вероятности P_1 появления хотя бы одного события за промежуток Δt к величине данного промежутка при $\Delta t \rightarrow 0$:

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P_1(t, t + \Delta t)}{\Delta t}. \quad (2)$$

Как правило, АСС и ее элементы — основное и вспомогательное оборудование — имеют финальные (предельные) вероятности состояний и характеристики эффективности их эксплуатации, такие как [2]:

1) среднее число деталей (заготовок), обрабатываемых в единицу времени;

2) средняя доля (часть) обработанных деталей от поступивших заявок на обработку;

3) вероятность отказа при обработке детали;

4) среднее число занятого обработкой оборудования;

5) вероятности возможных состояний АСС или ее составных подсистем;

6) среднее число заявок на обработку, приходящееся на среднее время обработки одной детали;

7) загрузка или простой АСС при варьировании структуры и параметров;

8) среднее время пребывания детали в АСС либо в очереди перед АСС или перед входящими в ее состав технологическими машинами.

С точки зрения теории массового обслуживания работа АСС характеризуется случайными потоками событий, происходящих одно за другим в какие-то моменты времени. При этом потоки событий могут быть потоками заявок на обслуживание (обработку) и потоками, характеризующими время обслуживания (обработки).

Потоки могут быть регулярными, простейшими, с ограниченным последствием (поток Пальма), с произвольным распределением, потоками Эрланга от нулевого до k -го порядка и др. [2, 3].

При расчете характеристик АСС и ее составных частей, представляющих собой СМО, необходимо учитывать структуру и особенности функционирования анализируемой СМО. К простейшим, наиболее распространенным структурам СМО относятся следующие системы [4, 5]:

- 1) одноканальная с ожиданием;
- 2) одноканальная с ограниченной очередью или с конечным накопителем;
- 3) с потерями или отказами;
- 4) многоканальная с общей очередью или общим накопителем;
- 5) многоканальная с ограниченным временем ожидания;
- 6) многоканальная с приоритетным обслуживанием;
- 7) многоканальная с ненадежными обслуживающими приборами (оборудованием);
- 8) замкнутая с одним или несколькими каналами и m источниками заявок (например, один или несколько наладчиков обслуживают m ненадежных технологических машин).

При этом каждая из перечисленных структур отражает те или иные случаи конструктивно-компоновочной реализации и различные режимы функционирования той или иной АСС либо ее составных частей.

Некоторые из описанных структур СМО схематично показаны на рис. 1.

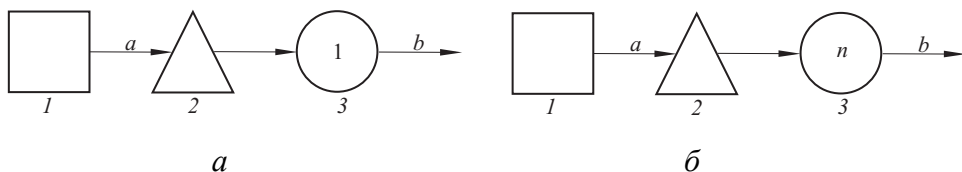


Рис. 1. Структуры СМО:

1 — источник требований; 2 — накопитель; 3 — обслуживающий прибор

На рис. 1, *а* представлена одноканальная система с одним обслуживающим прибором 3. Стрелкой *а* показан поток требований (например, на обработку деталей) от источника 1 к накопителю 2, стрелкой *б* — поток обслуженных заявок (требований). Обслуживающим прибором может быть, например, технологическая машина, станок, робот и др.

На рис. 1, *б* приведена многоканальная система с общей очередью, в которой имеется n обслуживающих приборов, например n станков с ЧПУ, n гибких производственных модулей, n позиций измерения и т. п.

Большинство перечисленных структур СМО имеет то или иное аналитическое описание, позволяющее определить в численном виде

характеристики эффективности работы системы. Затруднения при аналитическом расчете представляют варианты СМО с произвольным распределением времени обслуживания и произвольным распределением потока заявок [2, 3].

Фактическая производительность оборудования Q_{ϕ} зависит от технологической производительности $k = 1/t_p$, цикловой производительности $Q_{\Pi} = 1/(t_p + t_x)$ и внецикловых потерь $\sum t_{\Pi}$:

$$Q_{\phi} = \frac{1}{t_p + t_x + \sum t_{\Pi}}. \quad (3)$$

Внецикловые потери $\sum t_{\Pi}$ представляют собой фиктивное среднее удлинение рабочего цикла $T = t_p + t_x$ вследствие внецикловых простоев. Внецикловые потери характеризуют снижение производительности ΔQ технологической машины, например ГПМ. Потери производительности ΔQ определяются потерями ΔQ_1 из-за наличия холостых ходов в цикле T , а также потерями из-за отказа инструмента ΔQ_2 , оборудования ΔQ_3 , по организационным причинам ΔQ_4 , из-за брака ΔQ_5 , вследствие переналадки АСС на производство других деталей ΔQ_6 .

Соотношение t_p и t_x , а также ΔQ_i характеризуют конструктивное совершенство технологического оборудования. Так, параметры t_p , t_x и ΔQ_i характеризуют длительность холостых ходов, ΔQ_2 и ΔQ_3 — надежность функционирования, ΔQ_4 — организацию системы эксплуатации, ΔQ_5 — точность и устойчивость протекания технологического процесса обработки, ΔQ_6 — гибкость и мобильность оборудования АСС [6, 7].

Используя математический аппарат теории массового обслуживания, потери $\Delta Q_2, \Delta Q_3, \Delta Q_4, \Delta Q_5$ и ΔQ_6 можно описать потоками заявок на обслуживание (обработку) и потоком обслуживания. При этом подразумевается, что, например, простои ΔQ_2 определяются потоком отказов инструмента $\lambda_{и}$ и потоком его восстановления $\mu_{и}$, т. е. смены или регулировки инструментов. Поток $\lambda_{и}$ определяется размерной стойкостью инструмента T_{0i} , временем работы инструмента a_i при обработке одной детали, временем его смены $t_{сми}$, наработкой S_i на аварийный отказ в периодах размерной стойкости.

Потери времени из-за смены комплекта инструментов $\sum C_i$ на автоматизированном оборудовании, например на станке с ЧПУ или на ГПМ, можно оценить по формуле

$$\sum C_i = \sum \frac{a_i t_{cmi}}{T_{0i} S_i}. \quad (4)$$

Эти потери будут характеризовать поток возникновения аварийных отказов по инструменту, поэтому

$$\lambda_{и} = \frac{1}{\sum C_i}. \quad (5)$$

Поток восстановлений работоспособного состояния, например, ГПМ

$$\mu_{и} = \frac{1}{\tau_{в}}, \quad (6)$$

где $\tau_{в}$ — время смены отказавшего, аварийно вышедшего из строя инструмента.

Как и любые случайные величины, потоки λ_i и μ_i характеризуются математическим ожиданием и средним квадратическим отклонением.

Потоки λ_i и μ_i могут рассматриваться как ожидаемые, например, при проектировании АСС, как требуемые, например, при отборе наилучших вариантов, и как действительные при анализе действующего оборудования [4, 8].

Потери из-за отказов оборудования, например станка с ЧПУ, будут определяться надежностью, наработкой на отказ T_0 самого станка с ЧПУ, включая надежность вспомогательных систем (приспособлений, магазина инструментов и деталей, загрузочного устройства и т. п.), т. е. поток отказов станка с ЧПУ

$$\lambda_0 = \frac{1}{T_0}. \quad (7)$$

Поток восстановлений работоспособного состояния

$$\mu_0 = \frac{1}{T_{в}}, \quad (8)$$

где $T_{в}$ — среднее время восстановления механизмов и устройств [5].

Организационно-технические потери времени $\sum \theta_{0,т}$ характеризуют простои технологического оборудования по внешним причинам — из-за отсутствия заготовок, инструмента, оператора, наладчика и т. п.

Потери $\sum \theta_{o.T}$ и соответствующие потери $\Delta \theta_4$ можно описать потоками простоев $\lambda_{o.T}$ и восстановлений $\mu_{o.T}$.

Организационно-технические потери определяют коэффициентом загрузки η_3 :

$$\eta_3 = \frac{\theta_p + \sum \theta_c}{\theta_p + \sum \theta_c + \sum \theta_{o.T}}, \quad (9)$$

где θ_p — время работы оборудования; $\sum \theta_c$ — время простоя оборудования.

Значение коэффициента η_3 , как правило, хорошо известно из опыта эксплуатации технологических машин, что позволяет, зная θ_p и $\sum \theta_c$, определить потери $\sum \theta_{o.T}$:

$$\sum \theta_{o.T} = \lambda_{o.T} \theta_{cp} T_{cm}, \quad (10)$$

где $\lambda_{o.T} = \frac{1}{T_{o.T}}$ — поток отказов по организационно-техническим причинам ($T_{o.T}$ — среднее время между такими отказами); $\theta_{cp} = \frac{1}{\mu_{o.T}}$ — среднее время восстановления работоспособного состояния; T_{cm} — длительность рабочей смены ($T_{cm} = 480$ мин) [9].

Известно также, что средняя длительность $\sum \theta_{o.T}$ составляет 8...10 % от T_{cm} . При этом $\sum \theta_{o.T} = 48$ мин, а $\theta_{cp} \lambda_{o.T} = \frac{\lambda_{o.T}}{\mu_{o.T}} = 0,1$, что

может соответствовать, например, $\lambda_{o.T} = \frac{1}{60} = 0,0167 \text{ мин}^{-1}$, а

$\mu_{o.T} = \frac{1}{6} = 0,167 \text{ мин}^{-1}$ при $T_{o.T} = 60$ мин, и $\theta_{cp} = 6$ мин [10].

Потоки отказов λ_{δ} и восстановлений μ_{δ} , связанные с появлением и устранением брака обработанных деталей, зависят от типа контроля деталей, который может быть пассивным и активным, а также от эффективности встроенных систем контроля и измерений. При активном контроле в партии может появиться до 2 % бракованных деталей, при пассивном контроле — 2...3 %. Если обозначить через γ процент выхода годных деталей при выполнении технологической операции, то процент бракованных деталей будет $100 - \gamma$. В случае обработки на автоматизированном оборудовании обычно $\gamma = 97...98$ %. Значения γ зависят от соотношения допуска на обра-

ботку, а также от точности технологического оборудования и режимов его работы. Потoki λ_6 и μ_6 могут быть определены аналогично расчетам для организационно-технических потерь.

Потоки отказов λ_{Π} и восстановлений μ_{Π} , связанные с переналадкой, можно определить по формулам

$$\lambda_{\Pi} = \frac{1}{t_z}, \quad \mu_{\Pi} = \frac{1}{\theta_{\Pi}}, \quad (11)$$

где $t_z = zT_{\Phi}$ — время обработки партии деталей из z штук (T_{Φ} — фактический цикл работы технологической машины); θ_{Π} — время переналадки оборудования, которое может составлять от нескольких минут до нескольких часов [11].

Суммарные потоки отказов и восстановлений АСС можно получить суммированием отдельных вышеперечисленных потоков:

$$\lambda_0 = \sum_{i=1}^n \lambda_i; \quad \mu_0 = \sum_{j=1}^n \mu_j. \quad (12)$$

При этих условиях размеченный граф состояний технологической машины — станка, автомата, модуля, сборочной машины и т. п. — будет иметь вид, приведенный на рис. 2 [12].

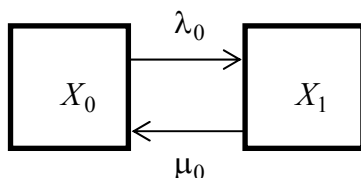


Рис. 2. Размеченный граф состояний технологической машины

На рис. 2 обозначены состояния технологической машины (станок, автомат, модуль):

X_0 — технологическая машина или система машин исправна и работает;

X_1 — технологическая машина или система машин неисправна и не работает.

Вероятности этих состояний в момент времени t обозначим $p_0(t)$ и $p_1(t)$ соответственно. С учетом графа состояний технологической машины можно составить систему дифференциальных уравнений для вероятностей состояний X_0 и X_1 [12, 13]:

$$\begin{cases} \frac{dp_0(t)}{dt} = -\lambda_0 p_0(t) + \mu_0 p_1(t), \\ \frac{dp_1(t)}{dt} = -\mu_0 p_1(t) + \lambda_0 p_0(t). \end{cases} \quad (13)$$

Решение системы (13) при начальных условиях $p_0(0)=1$ и $p_1(0)=0$ будет иметь вид

$$p_0(t) = \frac{\mu_0}{\lambda_0 + \mu_0} \left[1 + \frac{\lambda_0}{\mu_0} e^{-(\lambda_0 + \mu_0)t} \right], \quad (14)$$

$$p_1(t) = \frac{\lambda_0}{\lambda_0 + \mu_0} \left[1 - e^{-(\lambda_0 + \mu_0)t} \right]. \quad (15)$$

При $t \rightarrow \infty$ в технологической системе возникает стационарный (предельный, финальный) режим работы с установившимися вероятностями состояний:

$$p_0 = \frac{\mu_0}{\lambda_0 + \mu_0}; \quad p_1 = \frac{\lambda_0}{\lambda_0 + \mu_0}. \quad (16)$$

Например, пусть суммарный поток отказов станочной системы $\lambda_0 = \frac{1}{T_0}$, где T_0 — средний промежуток времени между отказами.

Тогда при $T_0 = 10$ мин $\lambda_0 = 6 \text{ ч}^{-1}$. Аналогично если $\mu_0 = \frac{1}{T_b}$, то при

$T_b = 3$ мин $\mu_0 = 20 \text{ ч}^{-1}$. При этих значениях λ_0 и μ_0 в соответствии с (16) вероятность исправного состояния системы $p_0 \approx 0,77$, а вероятность отказа $p_1 \approx 0,23$. При этих вероятностях состояний в течение рабочей смены (480 мин) технологическая машина или система машин будет 370 мин работать нормально и 110 мин либо простаивать, либо обрабатывать бракованные изделия, либо работать в счет затрат времени на переналадку.

Зависимости (14), (15) и (16) дают возможность оценить влияние потоков λ_i и μ_i на вероятности состояний технологической машины, например ГПМ, входящего в состав робототехнического комплекса.

Допустим, поток отказов $\lambda_0 = 6 \text{ ч}^{-1}$ распределен следующим образом:

$$\lambda_2 = 2,8; \lambda_3 = 2,0; \lambda_4 = 0,4; \lambda_5 = 0,3; \lambda_6 = 0,5,$$

а поток восстановлений $\mu_0 = 20 \text{ ч}^{-1}$ распределен, например, так:

$$\mu_2 = 8; \mu_3 = 7; \mu_4 = 2; \mu_5 = 2; \mu_1 = 1.$$

Предположим, что за счет использования в ГПМ текущего контроля состояния инструмента удалось сократить вдвое λ_2 и время смены инструмента τ_v . При этом λ_2 станет равным 1,4, а μ_2 увеличится в 2 раза. Изменяются и суммарные потоки λ_0 и μ_0 :

$$\lambda'_0 = 4,6; \mu'_0 = 28.$$

При этих изменениях

$$p_0 = \frac{28}{28 + 4,6} \cong 0,86; p_1 = \frac{4,6}{28 + 4,6} \cong 0,14.$$

Время безотказной работы ГПМ будет 412 мин, что на 11,35 % больше, чем в исходном случае, когда время безотказной работы ГПМ было равно 370 мин.

Аналогично рассмотренному примеру можно проанализировать, как влияют на работу ГПМ изменения в уровне его надежности, потери из-за брака, переналадки, по организационно-техническим причинам и др.

Выводы.

1. Использование теории массового обслуживания при анализе автоматизированного оборудования позволяет определять и анализировать вероятности его возможных состояний, аналитически рассчитывать характеристики эффективности его функционирования.

2. Определение суммарных потоков заявок на обслуживание λ_0 и потоков обслуживания μ_0 позволяет при проектных расчетах определять влияние на производительность и надежность технологического оборудования типовых потерь времени из-за смены инструмента, отказа оборудования, по организационно-техническим причинам, из-за брака и переналадки.

3. Исследование размеченных графов состояний технологического оборудования позволяет находить стационарные, предельные вероятности этих состояний.

4. Варьирование потоков заявок на обслуживание и потоков обслуживаний в допустимых пределах дает возможность определять время работы и простоев технологического оборудования.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Волчкевич Л.И. *Автоматизация производственных процессов*. Москва, Машиностроение, 2007, 379 с.
- [2] Ивченко Г.И., Каштанов В.А., Коваленко И.Н. *Теория массового обслуживания*. Москва, Высшая школа, 1982, 256 с.

- [3] Григорьев С.Н. Проблемы технической диагностики станочного оборудования на современном этапе развития. *Вестник МГТУ «СТАНКИН»*, 2010, № 4, с. 27–36.
- [4] Даровских В.Д. Поколения в автоматизации процессов и производств. *Техника машиностроения*, 2013, № 3, с. 2–12.
- [5] Пуш В.Э., Пигерт Р., Сосонкин В.Л. *Автоматические станочные системы*. Пуш В.Э., ред. Москва, Машиностроение, 1982, 319 с.
- [6] Грубый С.В. *Методы оптимизации режимных параметров лезвийной обработки*. Москва, Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008, с. 96.
- [7] Вентцель Е.С. *Исследование операций: задачи, принципы, методология*. Москва, Наука, 1980, 208 с.
- [8] Даровских В.Д. Распределение длительности безотказной работы гибкой производственной системы с многосвязной структурой управления. *Техника машиностроения*, 2013, № 4 (88), с. 20–31.
- [9] Попов А.П. Интегрированные производственные системы. *Вестник машиностроения*, 2014, № 3, с. 80–82.
- [10] Рагрин Н.А., Самсонов В.А. Особенности влияния подачи на стойкость и наработку спиральных сверл. *Техника машиностроения*, 2013, № 4 (88), с. 12–15.
- [11] Соломенцев Ю.М., Чекменев С.Е. О проблемах автоматизации этапов жизненного цикла изделия. *Вестник МГТУ «Станкин»*, 2010, № 4, с. 122–126.
- [12] Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. *Теория вероятностей*. Москва, Наука, 1993, 242 с.
- [13] Додонов В.В. Использование элементов теории массового обслуживания анализа производительности и надежности автоматизированных станочных систем. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2011, № 12, с. 70–76.

Статья поступила в редакцию 05.11.2014

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Додонов В.В. Вероятностные модели расчета производительности автоматизированных станочных систем. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2014, вып. 11.

URL: <http://engjournal.ru/catalog/machin/hidden/1334.html>

Додонов Владимир Владимирович родился в 1942 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1965 г. Канд. техн. наук, доцент кафедры «Металлорежущие станки» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область научных интересов: проектирование автоматизированных станочных систем. e-mail: chetvertin@inbox.ru

Probabilistic models for calculating the performance of automated machine tools

© V.V. Dodonov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

Performance and reliability of automated cutting machines is an important indicator of efficiency of their operation. However, the scientific literature does not address the issues of their work in terms of servicing a large number of requirements for processing of parts and service intensity of these requirements, described by the method of queueing theory. The article considers mechanisms of flow applications for processing, failure of equipment, tools and service flows on the example of a machine tool as a kind of queuing system. The proposed method for describing the mechanism of application stream formation and services allows to estimate effect of the conditions machine operation on its performance and reliability. The study results extend the knowledge about the use of performance and reliability theory, queueing theory in the analysis of the operation of cutting machines and other processing devices of discrete.

Keywords: *automated cutting machines, performance, reliability, flow applications, the flow of services, the state probabilities of the machine, the queuing system.*

REFERENCES

- [1] Volchkevich L.I. Avtomatizatsiya proizvodstvennykh protsessov [Computer-aided manufacturing]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2007, 379 p.
- [2] Ivchenko G.I., Kashtanov V.A., Kovalenko I.N. *Teoriya massovogo obsluzhivaniya* [Queueing Theory]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1982, 256 p.
- [3] Grigoryev S.N. *Vestnik MGTU "STANKIN" — Vestnik "MSTU "STANKIN"*, 2010, no. 4, pp. 27–36.
- [4] Darovskikh V.D. *Tekhnika mashinostroeniya — Engineering Technics*, 2013, no. 3, pp. 2–12.
- [5] Push V.E., Pigert R., Sosonkin V.L. *Avtomaticheskie stanochnye sistemy* [Automatic Machine Tool Systems]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1982, 319 p.
- [6] Gruby S.V. *Metody optimizatsii rezhimnykh parametrov lezviynoi obrabotki* [Optimization Method of Edge Cutting Machining Parameters]. Moscow, BMSTU Publ., 2008, pp. 96.
- [7] Venttsel E.S. *Issledovanie operatsiy: zadachi, printsipy, metodologiya* [Operations Research: Task, Maxims, Methodology]. Moscow, Nauka Publ., 1980, 208 p.
- [8] Darovskikh V.D. *Tekhnika mashinostroeniya — Engineering Technics*, 2013, no. 4 (88), pp. 20–31.
- [9] Popov A.P. *Vestnik mashinostroeniya — Herald of Engineering Industry*, 2014, no. 3, pp. 80–82.
- [10] Ragrin N.A., Samsonov V.A. *Tekhnika mashinostroeniya — Engineering Technics*, 2013, no. 4 (88), pp. 12–15.
- [11] Solomentsev Yu.M., Chekmenev S.E. *Vestnik MGTU "STANKIN" — Vestnik "MSTU "STANKIN"*, 2010, no. 4, pp. 122–126.
- [12] Venttsel E.S., Ovcharov L.A. *Teoriya veroyatnostey* [Probability Theory]. Moscow, Nauka Publ., 1993, 242 p.

- [13] Dodonov V.V. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie — Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2011, no. 12, pp. 70–76.

Dodonov V.V. (b. 1942) graduated from Bauman Moscow Higher Technical School in 1965. Ph.D., assoc. professor of the Department of Metal Cutting Machines at Bauman Moscow State Technical University. Scientific research: machine tool automated system design. e-mail: chetvertin@inbox.ru