

# Оценка риска неприемлемой производительности при выборе оборудования механообрабатывающих производств\*

Никоноров А.И.

МГТУ им. Н.Э. Баумана

г. Москва, Российская Федерация

[ainikonorov@bmstu.ru](mailto:ainikonorov@bmstu.ru)

**Аннотация.** Рассмотрены вопросы поддержки выбора оборудования в проектных задачах на основе оценок риска неприемлемой производительности технологических комплексов механической обработки. В контексте развития исследования, ранее проведенного автором, приведена формальная постановка задачи оценки риска неприемлемой производительности, ограничения при решении задачи, имеющие место в контексте предметной области технологии машиностроения. Приведены результаты обработки данных машинных экспериментов по определению фактической производительности технологических комплексов механической обработки тел вращения. Проведен сравнительный анализ результатов, полученных при ограниченной серии экспериментов и при реализации статистических испытаний, а также рекомендации по применению указанных подходов при моделировании. Обоснована необходимость поддержки существующих методов экспертного опроса данными о риске неприемлемой производительности.

**Ключевые слова:** оценка риска, производительность, технологический комплекс, механическая обработка, задача выбора оборудования, производственная неопределенность

## ВВЕДЕНИЕ

Условия рыночной экономики в России привели к необходимости модернизации машиностроительных производств и применению концепций комплексного перевооружения предприятий в части технологического оборудования, а также систем и средств, обеспечивающих поддержку управления производственным процессом на основе цифровых моделей данных. В условиях обширной номенклатуры оборудования, актуальной проблемой неизменно остается обоснование и прогнозирование эффективности использования технологических решений (ТР), определяемых внедряемыми технологическими процессами (ТП) и сформированными на их основе проектами технологических комплексов (ТК). Основа технологического проектирования механообрабатывающих производств, традиционно связана с задачами выбора оборудования и расчета его количества. Сложившиеся научно – методические подходы к решению указанных задач предполагают независимое их рассмотрение. Задача выбора оборудования опирается на субъективные экспертные оценки возможности реализации намечаемых технологических операций (ТО) на предполагаемом оборудовании, а продвижения в ее решении связаны с использованием ряда методов многокритериального

принятия решений [1-7]. Задача расчета количества оборудования опирается на отношение трудоемкости выполняемых работ к фондам времени работы оборудования с учетом данных о его фактической работоспособности. При решении данной задачи в отечественной практике традиционно применяется детерминистский подход [8-10], не позволяющий оценить возможное нежелательное снижение производительности ТК вследствие отклонений от принятых параметров ТП и соответствующих значений норм времени, при возникновении брака производимой продукции. В то же время, известные стохастические постановки задачи [11] не содержат связей с процессом целенаправленного формирования качества изделий. Изложенные доводы определили необходимость развития методов обоснования и поддержки выбора ТР и разработки ТП с использованием проектных оценок риска неприемлемой производительности (РНП), связанной с принятым количеством оборудования и его загрузкой по времени. Далее понятие неприемлемая производительность трактуется в рамках предметной области технологии машиностроения, как низкая производительность, не удовлетворяющая требованиям задания на проектирование ТК.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Формальная постановка задачи оценки РНП,  $R_P^{TR}$ , рассмотрена в контексте обратной и частной задачи анализа предполагаемых, ранее синтезированных проектных ТР. Для корректной постановки частной задачи рассмотрим общую задачу анализа прогностической проектной оценки риска применения ТР,  $R_{TR}$ , сформулированную на основании системного анализа данных ТП действующих отечественных машиностроительных производств, эксплуатационной документации на технологическое оборудование, данных о составе технических заданий на проектирование, методических подходов отечественной теории производительности. Для групп параметров ТР связанных с вопросами безопасности для человека и окружающей среды ( $S$ ), достигаемого качества производимой продукции ( $Q$ ), фактической производительности ( $P$ ) и экономической эффективности ( $E$ ), определенных в соответствующих единицах измерения за период времени  $\tau = T$ , и случайного вектора их прогностических проектных оценок, общая задача может быть сформулирована следующим образом:

$$R_{TR} = 1 - \int_{S^*P^*Q^*E^*} f(S, P, Q, E) dS dP dQ dE \leq R^* \quad (1)$$

\* Статья публикуется по рекомендации программного комитета Всероссийской научно-технической конференции "Пром-Инжиниринг", <https://icie-rus.org>

где  $S^*P^*Q^*E^*$  – область проектных ограничений параметров ТР;  $f(\cdot)$  – совместная плотность распределения;  $R^*$  – установленное проектом предельное значение риска применения ТР. Частная задача оценки РНП, имеет вид:

$$R_{P(\tau=T)}^{TR} = 1 - \int_{P^*} f(P) dP \leq R_{P(\tau=T)}^* \quad (2)$$

$$F_{max} \leq \int_{S^*P^*Q^*E^*} f(S, Q, E) dS dQ dE \leq 1 \quad (3)$$

и может быть решена в контексте общей задачи с допущением (3) об обеспечении надежности достижения установленной проектом величины  $F_{max}$  показателями групп  $S, Q, E$ . Следует отметить, что подходы технологии машиностроения могут затрагивать не всецелый ряд причин неприемлемой производительности, а лишь тех, которые связаны с реализацией ТП: возможный брак продукции, структура и параметры ТО, а также связи технологического порядка, определяющие связи между оборудованием и загрузку оборудования в проектируемом ТК. Также следует отметить, что цель задачи оценки РНП – определение возможных направлений корректирующих мероприятий относительно ТП, поэтому при решении задачи рассматривается производительность ТК и формирующих его ТС применительно к реализации конкретного ТП и отдельных, входящих в него ТО на выбранном периоде времени Т.

#### Порядок решения задачи при проектировании

Решение поставленной задачи может быть проведено в условиях проектной организации посредством реализации сложной цепочки взаимосвязанных бизнес – процессов, предусматривающих проработку частных задач, а также согласование результатов их решения. Общая последовательность этапов решения опирается на положения известной концепции менеджмента риска, изложенной, в том числе, в стандартах [12-14]. Для получения проектной оценки РНП необходимо проведение следующих этапов:

1. Синтез ТР любым известным методом, в том числе, выбор ТР из множества известных. Разработка и нормирование проектного ТП;
2. Восстановление данных о производительности ТС;
3. Пооперационное определение необходимого количества оборудования. Построение графа ТК с учетом связей между выбранным оборудованием;
4. Моделирование ТК и оценка РНП.

Ключевым этапом среди перечисленных является восстановление данных о производительности ТС, а результатом его выполнения - получение систематизированных и структурированных данных о возможных периодах работы и простоев ТС при реализации намечаемого ТП. В зависимости от ситуации, для получения таких данных могут быть использованы различные источники.

Часть данных может содержаться в ТП в явном виде. К таким данным относятся временные показатели ТО, полученные в результате нормирования. Однако, для использования их при решении рассматриваемой задачи, необходимо определить диапазоны их рассеяния, что требует проведения дополнительного анализа их состава или принятие обоснованных допущений об их возможных отклонениях и соответствующих причинах, их вызывающих. Также следует отметить имеющуюся неполноту содержания текстовой информации ТП, наличие неточных и неполных формулировок, приводящих к необходимости использования интервалов или случайных чисел вместо традиционно применяемых точечных оценок временных параметров ТО.

На основании данных ТП также возможно получение информации о параметрических отказах и соответствующих простоях, связанных с необходимостью подналадок ТС. Время между отказами может быть оценено с использованием диаграмм точности обработки [15,16], для построения которых могут применяться справочные данные, данные публикаций, натуральных и машинных экспериментов при моделировании ТО механической обработки. Границы интервала времени между отказами ТС могут быть определены на основании заранее заданных значений риска возникновения брака.

Информация об иных отказах, простоях ТС и вызывающих их причинах может быть получена с использованием упомянутых методов экспертного опроса, наблюдений на действующем производстве, данных экспериментов и нормативной и справочной информации. Заметим, что данные наблюдений или мониторинга состояния оборудования и соответствующих временных показателей на действующем производстве наиболее удобно использовать при оценке РНП, однако, в отсутствии данных о процессе формирования качества, затруднительным может оказаться формирование перечня корректирующих мероприятий, так как использование исключительно временных показателей не дает достаточную информацию о причинах отказов ТС.

Наиболее сложным, в отсутствии данных наблюдений на действующем производстве, оказывается определение доли вынужденных простоев ТС, вызванных внешними причинами, такими, как простой вследствие отсутствия заготовок, неравномерной загрузки оборудования по времени. Данные простои ТС возможно оценить при проигрывании сценария функционирования действующей производственной системы или ее модели, разработка которой предполагается в приведенном этапе процедуры. Для оценки вынужденных простоев при моделировании необходимо иметь структурированные данные о собственных отказах и простоях ТС и обеспечить их передачу в модель ТК.

#### ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДАННЫХ О ВРЕМЕНИ ДО ОТКАЗА ТС

Рассмотрим задачу о восстановлении данных о времени до отказа ТС по описанию ТО на примере одной из наиболее характерных токарных ТО, выполняемых на станках с ЧПУ. Исходными данными для анализа ТО являлось ее текстовое и графическое описание, а также код управляющей программы. Предполагается обработка шейки валика из стали 30 за три перехода: черновая обработка с послойным снятием материала, обработка канавки, чистовая обработка цилиндрической поверхности (рис.1). Режимы обработки, характеристика применяемых инструментов и данные о времени переходов по управляющей программе приведены в табл.1. Требуется найти время до отказа ТС и определить причины возможного отказа ТС.

Решение задачи проведено с использованием диаграмм точности обработки и графическим интегрированием функций плотности распределения времени до возможных отказов ТС по выявленным причинам. При решении задачи использованы дополнительные данные, полученные исключительно из опубликованных источников, что характерно для ситуаций, в которых проведение натуральных экспериментов или имитационного моделирования ТО затруднено или недоступно.

Использованные данные содержали информацию об износе режущих пластин [17-19], жесткости элементов технологической системы и погрешности настройки инструментов [20]. На основе анализа данных об износе установлены значения величины износа по задней поверхности  $h_z^* = 0,2 - 0,3$  мм, при которых возможен катастрофический износ пластин, что позволило выделить соответствующие возможные причины отказа ТС и было учтено при построении отдельных диаграмм износа  $h_r(\tau)$ . Расчет систематических и случайных погрешностей для построения диаграмм проведен в пакете Matlab. Исходные данные для построения диаграмм приведены в табл 1,2, на рис.1.

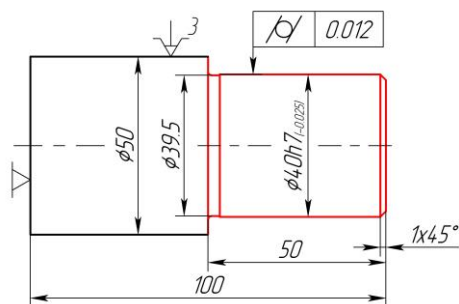


Рис. 1. Маршрутный эскиз ТО

- о кусочно – линейном виде функции суммарной составляющей функциональных систематических погрешностей и использовании в расчетах ее приближения  $\Delta_i^{np}(\tau)$  следующего вида:

$$\Delta_i^{np}(\tau) = \Delta_{0i} + \frac{\Delta_{ki} - \Delta_{ni}}{T_C} \cdot \tau, \quad (4)$$

где  $\Delta_{0i}$  – значение функции в момент времени  $\tau = 0$ ;  $\Delta_{ki}, \Delta_{ni}$  – расчетные значения функции в момент конца и начала цикла обработки;  $T_C$  – время цикла обработки, включая переходы установки и снятия заготовки.

Функция риска отказа ТС,  $R_\Sigma(\tau)$ , с учетом принятых допущений, имеет вид:

$$R_\Sigma(\tau) = \sum_{i=1}^n R_i(\tau), \quad (5)$$

где  $R_i(\tau)$  – функция риска (функция распределения вероятности) отказа ТС по причине  $i$ ,  $n$  – количество рассматриваемых причин возможного отказа ТС. Границы интервала времени из (5) определены следующим образом:

$$\tau_{min}: R_\Sigma(\tau) = R_{min}; \tau_{max}: R_\Sigma(\tau) = R_{max} \quad (6)$$

Пороговые значения величины риска отказа ТС приняты  $R_{min} = 0$  и  $R_{max} = 1$ . Результаты приведены на рис. 2.

Таблица 2

Данные для построения диаграмм точности

Параметр	Значение
<i>Параметры оборудования</i>	
Жесткость передней бабки, Н/мм	1,466x10 <sup>4</sup>
Жесткость суппорта, Н/мм	10 <sup>5</sup>
<i>Погрешность настройки инструмента в радиальном направлении, мкм</i>	
Резец Т1 (пластина CNMG 120408)	40
Резец Т2 (пластина N123G2-0300-0004)	40
Резец Т3 (пластина CNMG 120404)	10
<i>Начальный износ в радиальном направлении, мкм</i>	
Все пластины	10
<i>Относительный удельный износ, мкм/км</i>	
Все пластины	3

Таблица 1

Данные о технологических переходах

№ перехода	Пластина	Содержание перехода	Режимы обработки			Время перехода, мин
			Скорость резания, м/мин	Подача, мм/об	Глубина резания, мм	
1	-	Установка заготовки	-	-	-	0,42
2	CNMG 120408	Черновая обработка	110	0,15	1	3,42
3	N123G2-0300-0004	Обработка канавки	100	0,06	0,33	0,3
4	CNMG 120404	Чистовая обработка	110	0,05	0,075	1,32
5	-	Снятие заготовки	-	-	-	0,25

При решении приняты следующие допущения:

- о равновероятном распределении времени до возможного отказа ТС по каждой выявленной причине;
- о взаимной независимости причин возможных отказов ТС и образовании ими полной группы;
- известное направление действия элементарных погрешностей и их векторное суммирование;
- неизменность радиальной составляющей силы резания во времени и соответствия ее значения условиям работы затупленным инструментом;
- обработка осуществляется приработанным инструментом с интенсивным охлаждением;
- систематическая составляющая от упругих деформаций элементов ТС компенсируется погрешностью настройки и соответствующим значением корректора инструмента, внесенным в таблицу данных стойки ЧПУ;

При решении задачи установлено, что возможные причины отказа связаны с черновой и чистовой обработкой цилиндрического участка заготовки в продольном направлении. На основании полученного решения возможна разработка корректирующих мероприятий по модификации ТО, на необходимость проведения которых может указывать оценка РНП, полученная по результатам анализа производительности ТС. Среди возможных мероприятий можно выделить выбор режущих пластин с более низкой характеристикой относительного удельного износа; сокращения части основного и вспомогательного времени при исключении из обработки канавочного резца и обработку канавки по контуру на переходе чистовой обработки.

Примененный подход может быть распространен на случай определения времени между отказами ТС посредством анализа времени до отказа с различными начальными состояниями элементов ТС и после ее восстановления (подналадки).



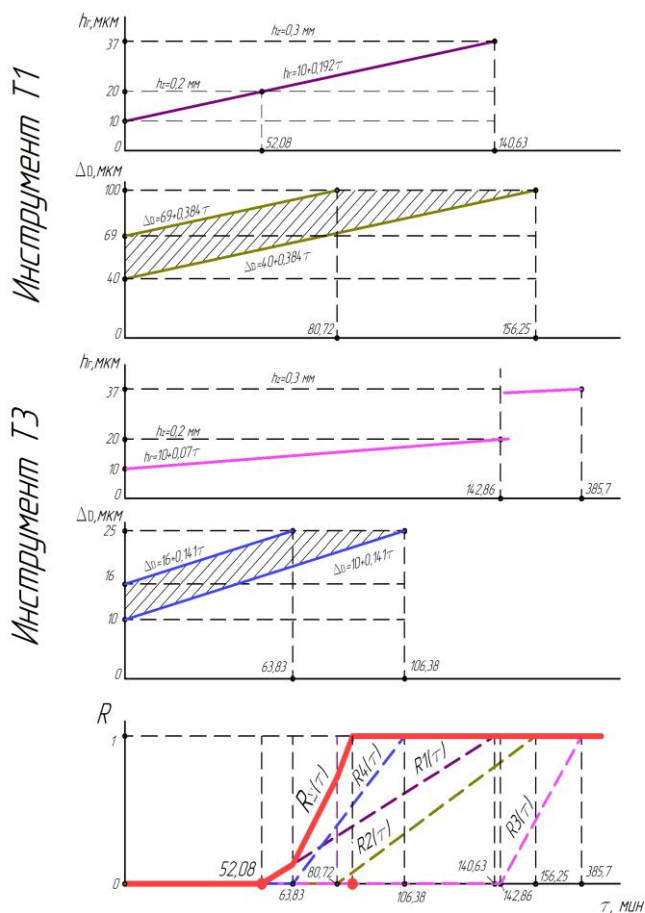


Рис. 2. Диаграммы точности обработки и функция риска отказа ТС

#### ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ОЦЕНКИ РНП

Рассмотрим задачу сравнения ТР для ТК изготовления тел вращения, решение которой демонстрирует реализацию этапов предлагаемого подхода, и приведено автором в [21] и воспользуемся результатами проведенных машинных экспериментов. Рассматриваются альтернативные ТР1 и ТР2 и оценки их производительности.

Для интервалов оценок производительности, полученных при проведении ограниченной серии экспериментов, введем допущения о виде функций распределения производительности и рассмотрим случаи равновероятного ( $R'_p$ ) и нормального ( $R''_p$ ) распределения. Введенные допущения предполагают, что граничные значения производительности соответствуют границам  $\pm 3\sigma$  соответствующего доверительного интервала.

Результаты полученных оценок РНП приведены на рис. 3. Для оценок, полученных при реализации статистических испытаний ( $R_p$ ), на основании результатов обработки данных по критерию Пирсона установлена приемлемость использования аппроксимирующей функции нормального распределения с вероятностью ошибки первого рода  $\alpha=0,05$ .

На основании сравнения результатов, полученных при проведении ограниченной серии экспериментов и статистических испытаний, можно утверждать, что введение допущения о равновероятном распределении производитель-

ности позволяет получить оценку риска с наибольшим гарантированным запасом. Такая оценка, с одной стороны, при приемлемых значениях риска, соответствует максимальной уверенности в достижении целей проектирования, с другой стороны, может являться причиной исключения варианта ТР из рассмотрения и дальнейшей его модификации. Поэтому такие оценки риска целесообразно считать предварительными или применять при небольшом количестве оборудования или параметров сценариев отказов и простоев ТС, задаваемых при имитационном моделировании ТК. Применение серии статистических испытаний в данном случае следует считать предпочтительным. Объем выборки при проведении серии статистических испытаний при фиксированном значении производительности по заданию на проектирование может быть установлен на основании доверительного интервала для среднего значения производительности. Проведенные эксперименты показали статистическую достаточность серии из 50 экспериментов для обеспечения 95% доверительного интервала для средней производительности ТК при реализации ТР в пределах 2% ( $\pm 1\%$ ).

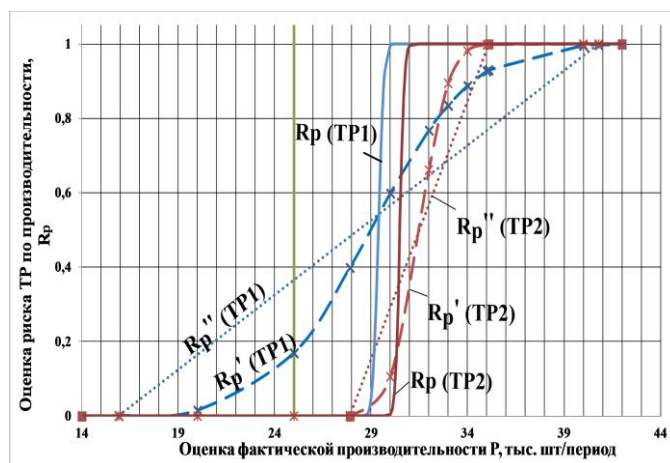


Рис. 3. Примеры оценок РНП для ТР по результатам имитационного моделирования

#### Выводы по результатам исследования

1. На основании полученных оценок РНП возможен отбор ТР в задаче обоснования выбора оборудования и реализуемых ТП как в ситуации проектирования ТК, так и среди имеющегося оборудования и иных средств технологического оснащения действующего производства. Оценки РНП также могут быть использованы при поддержке экспертных опросов.

2. Поддержка статистической оценки производительности на ранних этапах проектирования возможна с применением имитационного моделирования ТК. Данные о производительности ТС для моделирования могут быть получены при анализе проектных ТП, при использовании данных действующих производств, данных экспертного опроса, экспериментальных исследований и теоретических расчетов точности обработки.

3. Диаграммы точности обработки обеспечивают связь оценок достигаемой точности и производительности ТС в части параметрических отказов последних, что позволяет использовать такие оценки в задаче расчета количества оборудования.

4. Величины  $R_p^*$ , определяющие порог приемлемости ТР, целесообразно назначать невысокими (до 5%) ввиду наличия иных источников РНП, не связанных с процессом целенаправленного достижения качества продукции и трудно поддающихся учету на ранних этапах проектирования.

5. Получение оценок РНП сопряжено с дополнительными временными затратами на проведение работ, связанных с анализом технологической документации, получением данных и изучением условий функционирования действующих производств, моделированием ТК. В условиях дефицита времени существующие методы опроса экспертов и многокритериального принятия решений могут оказаться предпочтительными.

6. Сохранение и передача данных о рисках возникновения брака продукции и РНП ТК вместе с технологической документацией, а также автоматизация бизнес – процессов поддержки анализа и обработки рисков необходима для ускорения принятия и повышения качества решений по внедрению новых ТП и адаптации действующих в изменяющейся конъюнктуре.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Çimren E. Development of a machine tool selection system using AHP / E. Çimren, B. Çatay, E. Budak // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2007. – vol. 35, is. 3. – P. 363-376.
- Dagdeviren M. Decision making in equipment selection: an integrated approach with AHP and PROMETHEE // *Journal of Intelligent Manufacturing*. – 2008. – vol.19, is. 4. – P. 397-406.
- Kulak O. Fuzzy multi-attribute equipment selection based on information axiom / O. Kulak, D.M. Bulent, C. Kahraman // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2005. – vol. 169, is. 3. – P. 337-345.
- Tabucanon M.T. Decision support system for multicriteria machine selection for flexible manufacturing systems / M.T. Tabucanon, D.N. Batanov, D.K. Verma // *Computers in Industry*. – 1994. – vol. 25, is. 2. – P. 131-143.
- Wang X. Ranking irregularities when evaluating alternatives by using some / X. Wang, E. Triantaphyllou // *Omega*. – 2008. – vol. 36, is. 1. – P.45-63.
- Yurdakul M. AHP as a strategic decision-making tool to justify machine tool selection // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2004. – Vol. 146, is. 3. – P. 365-376.
- Yurdakul M. Analysis of the benefit generated by using fuzzy numbers in a TOPSIS model developed for machine tool selection problems / M. Yurdakul, İç.Y. Tansel // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2009. – Vol. 209, is. 1. – P. 310-317.
- Мельников Г.Н. Проектирование механосборочных цехов: Учебник для вузов / Мельников Г.Н., Вороненко В.П.. – М.: Машиностроение, 1990. – 352 с.
- ОНТП 14-93 нормы технологического проектирования предприятий машиностроения, приборостроения и металлообработки (доработка ОНТП 14-93). Механообработывающие сборочные цехи. – М., 1993. 91 с.
- Волчеквич И.Л. Расчет необходимого количества оборудования проектируемых технологических комплексов в машиностроении с учетом факторов производственной неопределенности // *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*. – 2011. – № 10. – С. 69-71.
- Miller D. M. The machine requirements problem / D.M. Miller, R.P. Davis // *International Journal of Production Research*. – 1977. – vol. 15, is. 2. – P. 219-231.
- ГОСТ Р ИСО 31000 – 2019. Менеджмент риска. Принципы и руководство. – М.: Стандартинформ, 2020. <http://docs.cntd.ru/document/1200170125> (дата обращения 20.12.2022)
- ГОСТ Р 51897 – 2021. Менеджмент риска. Термины и определения. – М.: Российский институт стандартизации, 2021. <http://docs.cntd.ru/document/1200181662> (дата обращения 20.12.2022)
- ГОСТ Р 58771 – 2019. Менеджмент риска. Технологии оценки риска. – М.: Стандартинформ, 2020. <http://docs.cntd.ru/document/1200170253> (дата обращения 20.12.2022)
- Соколовский А.П. Расчеты точности обработки на металлорежущих станках. – М.-Л.: Машгиз, 1952. – 288 с.
- Солонин И.С. Математическая статистика в технологии машиностроения.– М.: Машиностроение, 1972. – 215 с.
- Грубый С.В. Исследование режущих свойств резцов из нитрида бора / С.В. Грубый, В.В. Лапшин // *Наука и образование*. – 2012. – № 6. <http://technomag.edu.ru/doc/423622.html> (дата обращения 20.12.2022)
- Fnides B. Tool life evaluation of cutting materials in hard turning of AISI H11 / B. Fnides, S. Boutabba, M. Fnides, A. Hamdi, M.A. Yallese // *Estonian Journal of Engineering*. – 2013. – vol. 19, is. 2. – P. 143-151.
- Huang Y. CBN tool wear in hard turning: a survey on research progresses / Y. Huang, Y.K. Chou, S.Y. Liang // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2007. – vol. 35, is. 5. – P. 443-453.
- Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. Т.1 / под ред. А.М. Дальского, А.Г. Косиловой, Р.К. Мещерякова, А.Г. Сулова. – М.: Машиностроение-1, 2003. – 912 с
- Никоноров А.И. Оценка проектных технологических решений с учетом факторов внутренней производственной неопределенности // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. – 2016. – № 7-1. – С. 93-103.

# Estimation of the Unacceptable Productivity Risk in the Machine Selection Problem

Nikonorov A.I.

Department of Mechanical Engineering Technologies  
Bauman Moscow State Technical University  
Moscow, Russian Federation  
[ainikonorov@bmstu.ru](mailto:ainikonorov@bmstu.ru)

**Abstract.** In this paper the issues of support of the machine selection problem in design tasks based on risk estimation of unacceptable productivity of the manufacturing systems of machining are considered. In the context of the development of the study, previously conducted by the author, a formal statement of the problem of assessing the risk of unacceptable productivity, limitations in solving the problem that take place in the context of the subject area of mechanical engineering technology is given. The results of processing the data of machine experiments to estimate the actual productivity of manufacturing systems for the mechanical machining of cylinder type workpieces are presented. A comparative

analysis of the results obtained in a limited series of experiments and in the implementation of statistical tests, as well as recommendations on the use of these approaches in modeling, was carried out. The necessity of supporting the existing methods of expert survey with data on the risk of unacceptable performance is substantiated.

**Keywords:** risk estimation, productivity, manufacturing system, mechanical machining, the machine selection problem, production uncertainty.

---

## Библиографическое описание статьи

Никонов А.И. Оценка риска неприемлемой производительности при выборе оборудования механообрабатывающих производств // *Машиностроение: сетевой электронный научный журнал*. – 2023. – Т.10, №1. – С. 3-8. DOI: 10.24892/RIJE/20230101

---

## Reference to article

Nikonorov A.I. Estimation of the unacceptable productivity risk in the machine selection problem, *Russian Internet Journal of Industrial Engineering*, 2023, vol.10, no.1, pp. 3-8. DOI: 10.24892/RIJE/20220401

---