

УДК 621.9

## СТРУКТУРНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМЫ ИНСТРУМЕНТООБЕСПЕЧЕНИЯ ПО КРИТЕРИЯМ РИСКА И НАРАБОТКИ НА ОТКАЗ

**М. И. МИХАЙЛОВ**

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого»,  
Республика Беларусь*

### **Введение**

Переориентация промышленности на выпуск широкого ассортимента продукции малыми сериями (партиями) выявила недостатки использованных ранее форм организации производства. Так, известно, что повышение производительности труда можно достичь путем сокращения либо основного, либо вспомогательного времени. Кроме того, постоянное сокращение трудовых ресурсов требует повышения степени автоматизации их производств.

Современные достижения микроэлектроники способствуют быстрому развитию этого направления в станкостроении и расширении номенклатуры станков с ЧПУ. Из исследований, выполненных в ФРГ, США, Швейцарии и других странах, известно, что эффективное время обработки на традиционных металлорежущих станках и станках с ЧПУ в случае участия человека (оператора) составляет только 6–10 % годового фонда рабочего времени. Известно также, что в структуре времени обработки деталей на основе традиционных технологий доля основного времени составляет только около 30 %, а оставшаяся часть приходится на вспомогательное и подготовительно-заключительное время [1], [2].

Эффективность современных технологических систем определяется не только величиной основного времени, когда наиболее существенным является съём объема материала обрабатываемой детали в единицу времени, но и затратами вспомогательного времени, времени технического обслуживания и времени на подналадку.

Для широкономенклатурных ГПС, характеризующих частой сменой объектов производства, длительные периоды отладки процесса приводят к значительному снижению эффективности [3].

Поэтому в ГПС применяют системы контроля и подналадки, которые повышают стоимость системы, снижая риск отказа и увеличивая продолжительность наработки на отказ [4]–[6].

### **Методика и результаты структурной оптимизации по критериям риска и наработки на отказ**

В состав системы инструментообеспечения структурно включали: режущую и рабочую части инструмента, а также накопитель режущих инструментов. При этом анализ производился применительно к торцовым фрезам. Под риском отказа системы понимались не запланированные затраты в случае отказа системы инструментообеспечения. Риск выражался в условных единицах или в уровне опасности условий труда.

На основе анализа влияния каждого элемента системы инструментообеспечения на ее вероятность безотказности составлялась структурная схема, при этом на первом этапе допускалось, что система не ремонтируема и не резервируема.

Затем рассчитывался риск отказа системы и сравнивался с допускаемым значением. Анализ производился для наиболее часто встречающихся случаев отказа: в виде микроразрушений и износа режущей кромки. При этом было принято, что наработка на отказ в результате износа согласуется с усеченным нормальным законом распределением, а микровыкрашивание – с экспоненциальным [4]. По предварительным экспериментам определялась наработка на отказ каждого элемента  $T_i$  и интенсивность отказов  $\lambda_i$ , а также риск при отказе каждого элемента  $r_i$ . Затем рассчитывались наработка на отказ  $T_c$  и риск всей системы  $R(t)$ :

$$T_c = \frac{\prod_{i=1}^n T_i}{\sum_{i=1}^n T_i}, \quad R(t) = \sum_{i=1}^n r_i \cdot \lambda_i \frac{(1 - e^{-\lambda_c \cdot t})}{\lambda_c}, \quad (1)$$

где  $\lambda_i = 1/T_i$ ,  $\lambda_c = \sum_{i=1}^n \lambda_i$ .

Если расчетное значение наработки на отказ и риска меньше допускаемого производилось резервирование. При этом рассматривалось: общее резервирование элементов системы инструментаобеспечения, которое может быть реализовано только замещением, либо поэлементное, которое для накопителя и режущего инструмента также реализовывалось замещением, а для режущей части и режущих кромок можно реализовать как с постоянным, так и с резервированием замещением. Тогда вероятность безотказной работы, плотность распределения времени безотказной работы и интенсивность отказов элементов системы с кратностью резервирования  $m$  при постоянном резервировании определялись по соотношениям:

$$P_c(t) = 1 - \prod_{i=0}^m (1 - P_i(t)); \quad (2)$$

$$f_c(t) = \sum_{i=0}^m (1 - P_0(t)) \dots f_i(t) \dots (1 - P_m(t)); \quad (3)$$

$$\lambda_c(t) = \frac{\sum_{j=0}^m f_j(t) \prod_{i=j}^m Q_i(t)}{1 - \prod_{i=0}^m Q_i(t)}, \quad (4)$$

где  $P_c(t)$ ,  $P_i(t)$ ,  $P_0(t)$  – соответственно вероятность безотказности системы,  $i$ -го и основного элементов;  $f_c$  и  $f_i$  – соответственно функции распределения системы и элемента;  $Q_i$  – функция вероятности отказа.

Для принятых законов распределения были рассчитаны численные значения показателей, которые представлены на рис. 1 при

$$f(t) = \frac{1}{\sigma_0 \sqrt{2\pi(0,5 + \Phi_0(\frac{m_0}{\sigma_0}))}} e^{-\frac{(t-m_0)^2}{2\sigma_0^2}}, \quad P(t) = \frac{0,5 - \Phi_0(\frac{t-m_0}{\sigma_0})}{0,5 + \Phi_0(\frac{m_0}{\sigma_0})},$$

где  $\Phi_0(t)$  – функция Лапласа с математическим ожиданием и средним квадратическим отклонением,  $m_0 = 40$  мин,  $\sigma_0 = 20$ .

Как видно на рис. 1, а, с увеличением кратности резервирования увеличивается среднее время безотказной работы и уменьшается дисперсия.

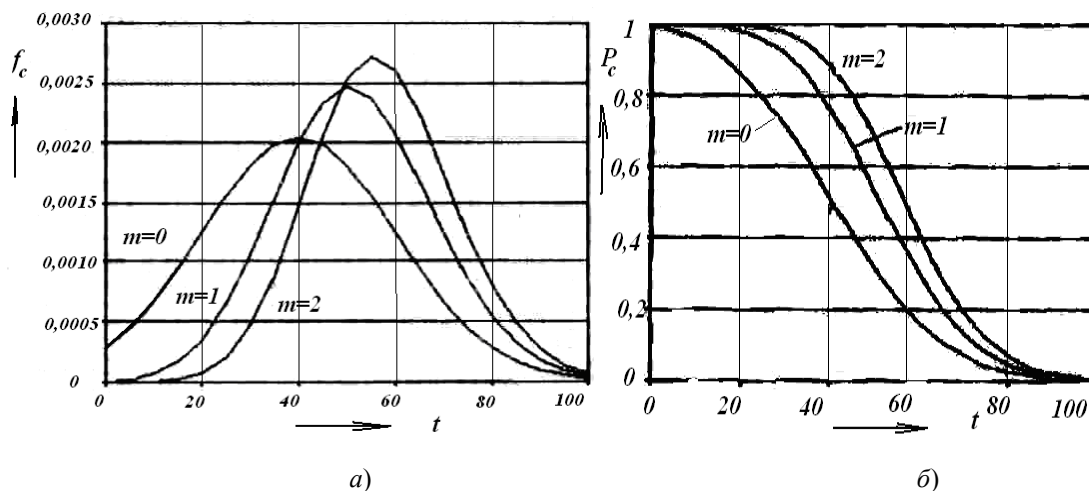


Рис. 1. Графики плотности распределения времени до отказа (а) и вероятности безотказности работы системы (б) при различной кратности резервирования с усеченным нормальным законом распределения

Анализ рис. 1, б позволяет заключить, что на вероятность безотказности значительное влияние оказывает кратность резервирования, причем этот эффект тем существеннее, чем меньше  $m$ .

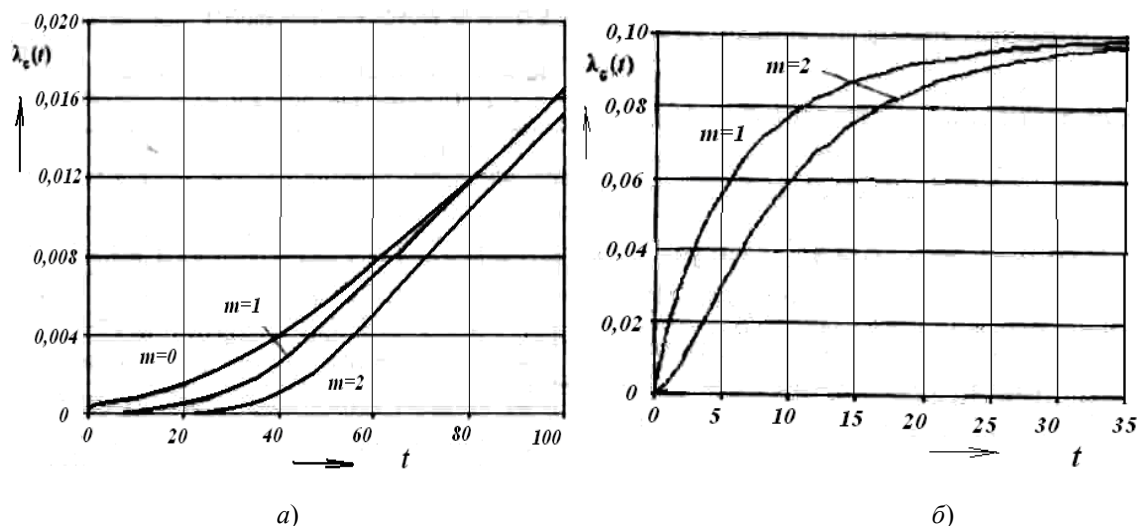


Рис. 2. Графики интенсивности отказа системы при различной кратности резервирования с усеченным нормальным (а) и экспоненциальным (б) законами распределения

Кроме того, установлено, что интенсивность отказов нелинейно зависит от кратности резервирования (рис. 2).

Как видно на рис. 2, б, при постоянной интенсивности отказов основной системы интенсивность отказа резервированной системы увеличивается с течением времени, стремясь к постоянной величине, равной интенсивности отказов нерезервированной системы.

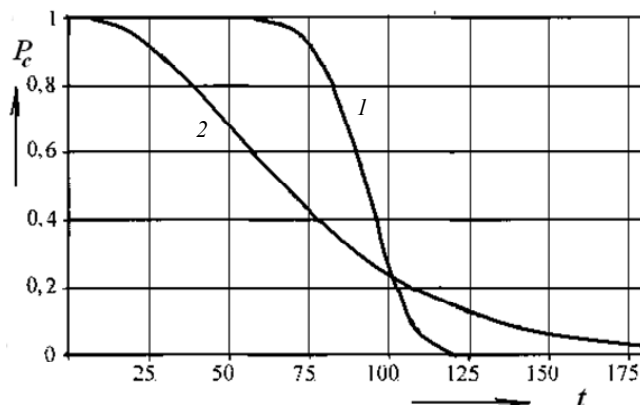


Рис. 3. Графики вероятности безотказности работы системы с усеченным нормальным (1) и экспоненциальным (2) распределениями

Установлено также, что вероятность безотказной работы при усеченном нормальном законе в течение длительного времени работы  $t = [0-70]$  остаются практически постоянными и система высоконаджна, но в течении короткого времени она теряет ресурс и быстро становится ненадежной (рис. 3). Система с экспоненциальным законом распределения более надежна в период  $t = [100-175]$ .

Для отдельного резервирования, которое проще технически реализовать, формула вероятности безотказной работы имеет вид:

$$P_c(t) = 1 - \prod_{i=0}^m \left( 1 - \prod_{j=1}^n P_{ij}(t) \right), \quad (5)$$

где  $n$  – число элементов нерезервированной системы;  $P_{ij}(t)$  – вероятность безотказной работы элемента с номером  $(i, j)$ .

Так как в системах инструментообеспечения постоянный резерв сложно технически реализовать, то часто используются конструкции с резервированием замещением. В этом случае вероятность безотказной работы, плотность распределения времени до отказа, и среднее время безотказной работы системы определялись по выражениям:

$$P_c(t) = P_0(t) + \sum_{i=1}^m f_0 \cdot f_i \cdot \dots \cdot f_{i-1} \cdot P_i(t); \quad (6)$$

$$f_c(t) = f_0 \cdot f_i \cdot \dots \cdot f_m(t); \quad (7)$$

$$T_1 = \int_0^{\infty} P_c(t) dt = \sum_{i=0}^m T_{1i}, \quad (8)$$

где  $f_0 \cdot f_i \cdot \dots \cdot f_m(t)$  – свертки функций.

Для оценки эффективности вида резервирования использовалась функция выигрыша в виде:

$$G(x, m) = \frac{1}{(1 - e^{-x})^m},$$

где  $x = \lambda t$ .

График функции представлен на рис. 4.

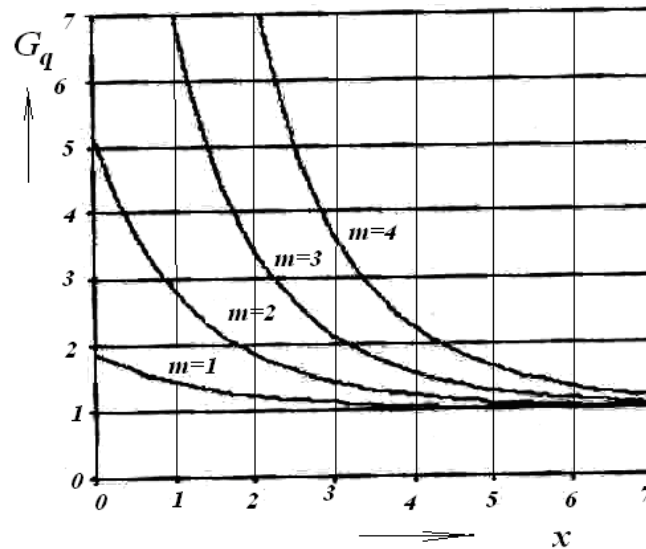


Рис. 4. График выигрыша надежности при резервировании замещением

Анализ рис. 4 позволяет заключить, что с ростом  $x$  выигрыш надежности  $G(x, m)$  убывает, т. е. чем выше надежность резервированной системы и чем меньше время ее работы, тем выше эффективность резервирования. С ростом кратности резервирования выигрыш увеличивается, причем рост тем значительней, чем меньше  $\lambda t$ .

Вероятность безотказной работы системы при отдельном резервировании замещением определяли по выражению

$$P_c(t) = \prod_{j=1}^n \sum_{i=0}^m f_{0j} \cdot f_{1j} \cdot \dots \cdot f_{i-1,j} \cdot P_{ij}(t), \quad (9)$$

где  $P_{ij}(t)$  – вероятность безотказной работы элемента с номером  $(i, j)$ ,  $f_{ij}(t)$  – плотность распределения времени до отказа элемента,  $i = 0, 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n$ .

Для всей системы инструментообеспечения, в которой  $n$  – общее число элементов,  $(n - m)$  основных и  $m$  резервных элементов показатели надежности соответствовали мажоритарным системам. Отказ такой системы наступает при отказе  $(m + 1)$ -го элемента, тогда:

$$P_c(t) = \sum_{i=0}^m C_n^i Q^i(t) P^{n-1}(t); \quad (10)$$

$$f_c(t) = (n - m) C_n^m Q^m(t) P^{n-m-1}(t) f(t); \quad (11)$$

$$\lambda_c(t) = \frac{(n - m) C_n^m Q^m(t) P^{n-m}(t)}{\sum_{i=0}^m C_n^i Q^i(t) P^{n-1}(t)} \lambda(t). \quad (12)$$

Для всей системы инструментообеспечения с резервированием замещением показатели надежности соответствовали показателям при скользящем резервировании, тогда вероятность безотказной работы системы при условии, что все элементы системы имеют одинаковую надежность, равна

$$P_c(t) = \sum_{k=0}^m \sum_{k_1+k_2+\dots+k_{n-m}=k} f^{+(k_1)} \cdot P(t) f^{*(k_2)} \cdot P(t) \dots f^{*(k_{n-m})} \cdot P(t). \quad (13)$$

Для работы инструментов в условиях с выраженной геометрической или физической анизотропией свойствами показатели работоспособности элементов системы согласуются с экспоненциальным законом, в этом случае вероятность безотказной работы, интенсивность отказов и среднее время безотказной работы системы соответственно равны:

$$P_c(t) = \sum_{k=0}^m \frac{((n-m)\lambda t)^k}{k!} e^{-(n-m)\lambda t}; \quad (14)$$

$$\lambda_c(t) = (n-m)\lambda \frac{\frac{((n-m)\lambda t)^m}{m!}}{\sum_{k=0}^m \frac{((n-m)\lambda t)^k}{k!}}; \quad (15)$$

$$T_{1c} = \frac{m+1}{n-m} T_1. \quad (16)$$

Полученную структуру путем построения системы габаритного чертежа либо габаритной компоновки в двух проекциях при практической реализации необходимо уточнить.

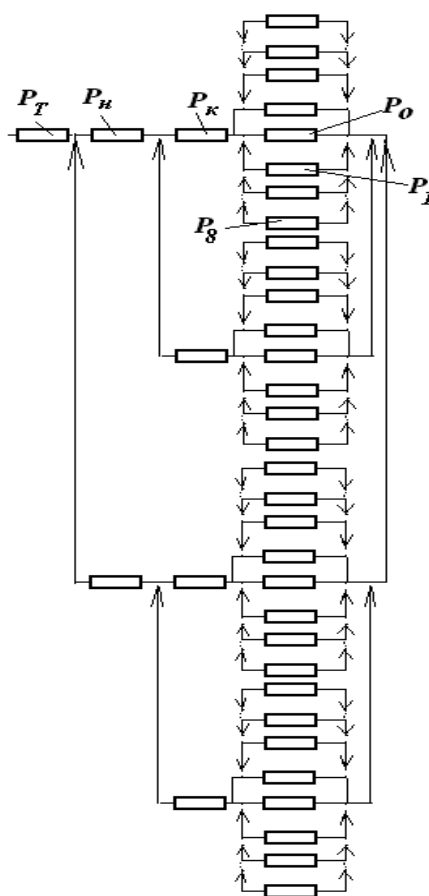


Рис. 5. Эскиз структурной схемы системы инструментообеспечения с резервированием

В качестве выбранного примера служила технологическая система инструментообеспечения фрезерного станка с ЧПУ. В ходе оптимизации системы по предварительно проведенным расчетам были введены резервные элементы, которые расположены в рабочем пространстве станка либо рядом с ним, в зависимости от вида резервирования (рис. 6).

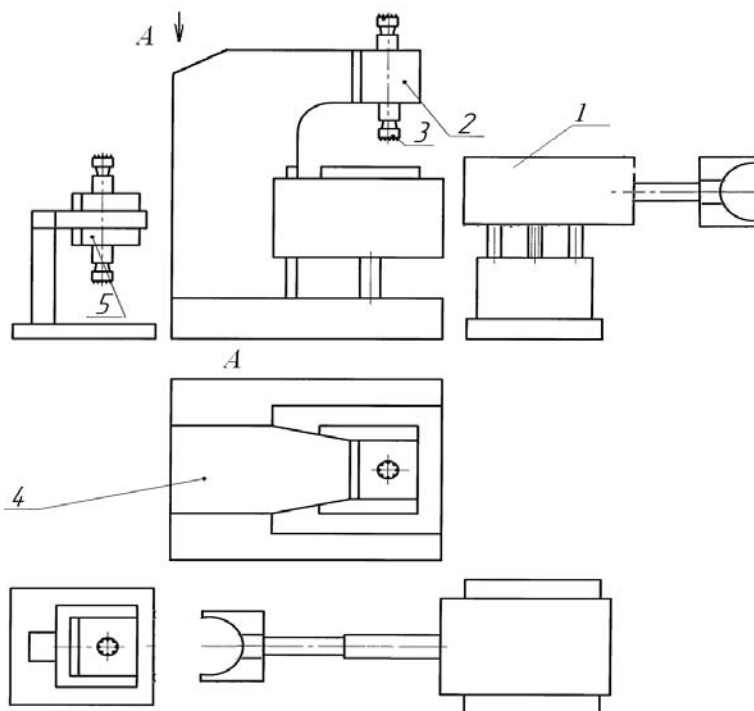


Рис. 6. Эскиз системы инструментообеспечения с резервированием:  
1 – робот; 2 – револьверная головка; 3 – рабочий инструмент; 4 – станок;  
5 – резервный накопитель

Как видно на рис. 5, в конструкцию фрезы необходимо ввести 8 режущих элементов. На рис. 7 изображена фреза с автоматической заменой режущих пластин [7], состоящая из корпуса 1, в котором расположен механизм автоматической замены и закрепления режущих пластин. Он содержит магазины с резервными пластинами 2 и пружинами 3. Резервные пластины входят в боковой паз 4 в нижней части инструментальных блоков 5. В верхней части блоков 5 имеется другой паз 6, в котором свободно размещены упоры 7, которые входят своим выступом в планки 8, закрепленные в пазах корпуса инструмента с помощью винтов 9. Планки 8 вместе с упорами 7 могут регулироваться в осевом направлении. В верхнем пазу инструментальных блоков установлены режущие пластины 10. Для закрепления режущих пластин в рабочем положении инструментальные блоки охватывают их по трем сторонам, причем с одной стороны стенка блока выполнена в виде упругого лепестка *a*, контактирующего со скосом шайбы 12, закрепленной с помощью винтов 13 на корпусе инструмента 1. В корпусе инструмента установлен по скользящей посадке приводной элемент, состоящий из диска 14, в котором веерообразно расположены винты 15, пружины 16 и шарики 17. С помощью шариков 17 крутящий момент от диска 14 передается втулке 18. На периферийной поверхности втулки 18 имеется винтовая канавка 19 с прямоугольным профилем в сечении. Выступы на инструментальных блоках 5 входят в зацепление с винтовой втулкой 18. В тангенциальных отверстиях корпуса инструмента свободно установлены толкатели 20 с пружинами 21.

Пазы инструментального магазина закрываются диском 22, который крепится к корпусу 1 винтами 23. Для защиты механизма закрепления и замены пластин от загрязнений инструмент закрыт крышками 24 и 25, закрепленными винтами 26 и 27.

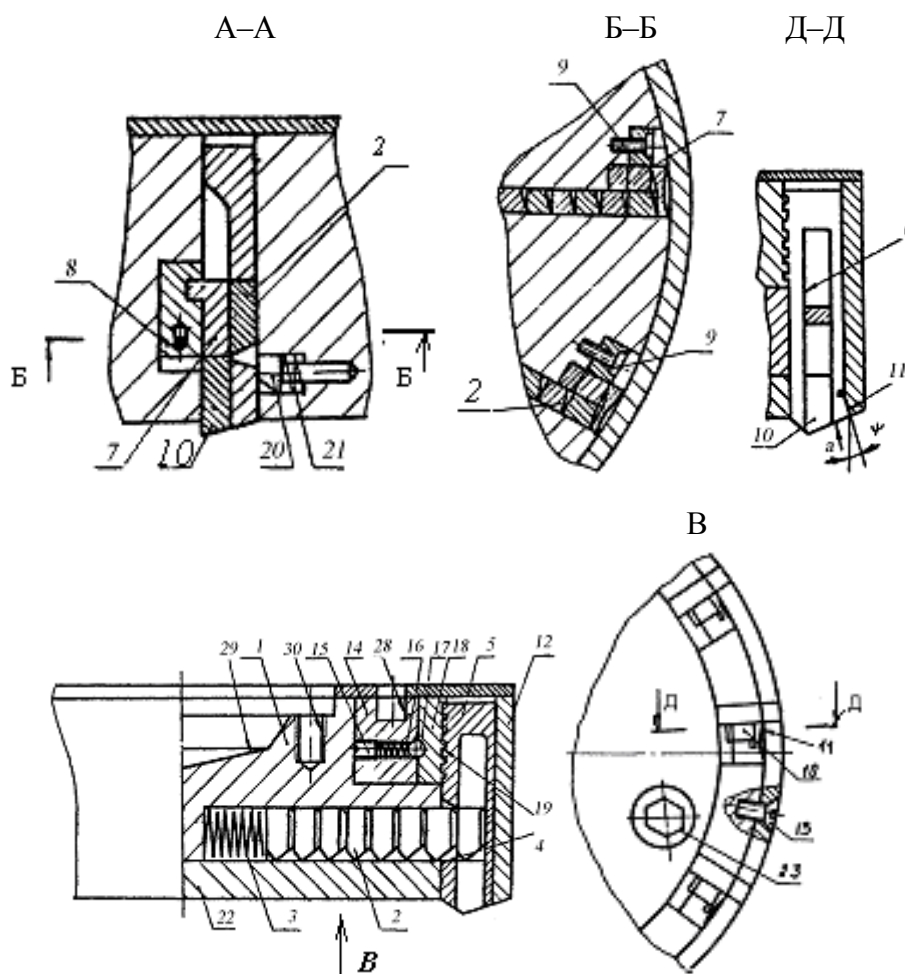


Рис. 7. Эскиз инструмента с механизмом замены режущих пластин

В завершение можно отметить, что полученная система позволяет повысить надежность автоматизированного производства и снизить затраты, связанные с межремонтными простоями оборудования.

### Литература

1. Схиртладзе, А. Г. Надежность и диагностика технологических систем / А. Г. Схиртладзе, М. С. Уколов, А. В. Скворцов. – М. : Новое знание, 2008. – 518 с.
2. Автоматизация технологии сборки и механической обработки / А. Г. Схиртладзе [и др.]. – М. : Славян. шк., 2003. – 431 с.
3. Шимарев, В. Ю. Надежность технических систем / В. Ю. Шимарев. – М. : Академия, 2010. – 304 с.
4. Дианов, В. Н. Диагностика и надежность автоматических систем / В. Н. Дианов. – М. : Изд-во МГИУ, 2005. – 378 с.
5. Венцель, Е. С. Теория вероятности и ее инженерные приложения / Е. С. Венцель, Л. А. Овчаров. – М. : Академия, 2003. – 464 с.



6. Сольнищев, Р. И. Автоматизация проектирования ГПС / Р. И. Сольнищев, А. Е. Кононюк, Ф. М. Кулаков. – Л. : Машиностроение, 1990. – 415 с.
7. Михайлов, М. И. Сборный металлорежущий механизированный инструмент: Ресурсосберегающие модели и конструкции / М. И. Михайлов ; под ред. Ю. М. Плещачевского. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2008. – 339 с.

*Получено 28.11.2012 г.*