

ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ

УДК 621.9.02-192

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ, РАБОТАЮЩИХ В УСЛОВИЯХ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОИЗВОДСТВА

М. И. Михайлов

*Гомельский государственный технический университет
имени П. О. Сухого, Республика Беларусь*

Переориентация промышленности на выпуск широкого ассортимента продукции малыми сериями (партиями), в совокупности с постоянным снижением трудовых ресурсов европейских государств, привела к изменению использованных ранее форм организации производства и применяемому оборудованию, т. е. к переходу от автоматизированных систем на основе аналогового управления к системам с числовым программным управлением (ЧПУ) [1]–[11]. Достижения в области микроэлектроники способствовали быстрому развитию этого направления в станкостроении и расширению 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], [4].

Как известно, эффективность работы автоматизированного производства зависит от организации технологического процесса, т. е. от формирования и реализации потоков деталей и инструментов, а также от степени согласованности их взаимодействия. В свою очередь, потоки инструментов формируются в зависимости от степени интеграции оборудования и их можно разделить на: инструментообеспечение (СИО) станков с ЧПУ, гибких производственных модулей (ГПМ) и гибких производственных систем (ГПС).

Анализ применяемых СИО станков с ЧПУ позволяет выделить их составляющие, которые включают в себя: накопители инструментов, устройства транспортировки его из накопителя в рабочую зону и обратно, устройства ориентации, закрепления и контроля инструмента. Обобщив накопленный опыт по разработке и эксплуатации СИО станков с ЧПУ [2], [9], их можно представить в системном виде.

Для обеспечения эффективности работы таких систем используются различные виды структур СИО:

а) на основе накопителей инструментов на каждом многоцелевом станке, обеспечивая при этом автономность их работы и повышая надежность ГПС, однако растет емкость каждого накопителя и снижается эффективность использования режущего инструмента;

б) на основе накопителей средней емкости (30–60 инструментов) на каждом станке и общего инструментального склада небольшой емкости, обеспечивая повышение эффективности использования режущего инструмента, но снижая надежность работы ГПС;

в) на основе накопителей малой емкости (12–30 инструментов) на каждом станке и общего инструментального склада большой емкости, обеспечивая макси-

мальную эффективность использования режущего инструмента и мобильность ГПС, позволяя использовать ее при производстве большой номенклатуры изделий.

В машиностроении значительную часть выпускаемой продукции представляет штучная продукция, поэтому в основу анализа может быть взята штучная производительность, т. е. число изделий, изготовленных в единицу времени [1]–[4].

В автоматизированном оборудовании дискретного действия со вспомогательными ходами цикловая производительность $Q_{ц}$ всегда меньше технологической:

$$Q_{ц} = K\eta,$$

где $K = \frac{1}{t_0}$ – технологическая производительность; $\eta = \frac{1}{Kt_b + 1}$ – коэффициент производительности; t_0 – основное время обработки; t_b – вспомогательное время, включающее время смены инструмента.

Два вида производительности – технологическая и цикловая – характеризуют автоматизированное оборудование с точки зрения как прогрессивности технологического процесса, так и конструктивного совершенства механизмов и устройств, системы управления и т. д. Коэффициент производительности характеризует степень непрерывности протекания технологического процесса.

Для различных систем инструментообеспечения t_b – var, если принять $t_b = \text{const}$, то с увеличением K величина η уменьшается, как показано на рис. 1, а. Кривые I, II, III соответствуют трем значениям различных СИО, при этом $t_{b1} > t_{b11} > t_{b111}$.

Цикловая производительность с постоянными значениями вспомогательного времени носит асимптотический характер (рис. 1, б). Если уменьшается инструментальная составляющая вспомогательного времени, то производительность $Q_{ц}$ стремится к технологической. Инструментальная составляющая вспомогательного времени зависит от времени смены и наладки инструмента, которая, в свою очередь, определяется конструкцией инструмента, а также зависит от емкости инструментального накопителя.

Емкость накопителя инструментов станка с ЧПУ определяется по критериям максимальной производительности и минимальной себестоимости обработки [2], [5].

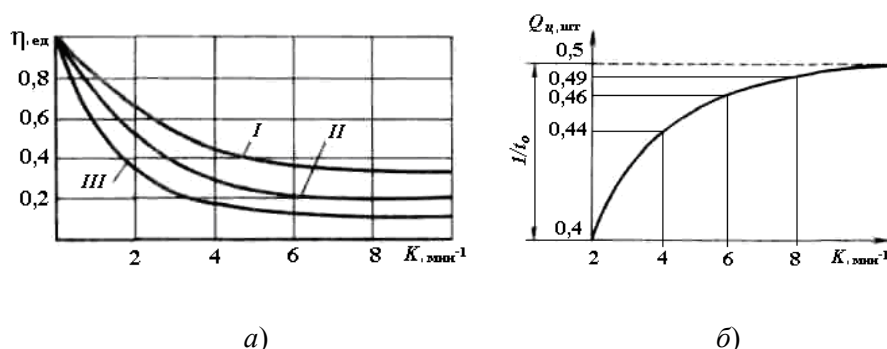


Рис. 1. Графики влияния технологической производительности:
а – на коэффициент производительности; б – цикловую производительность автоматизированного оборудования

Обобщив полученные в работах [2], [7] соотношения для расчета оптимальных режимов резания по критерию производительности, можно произвести оптимизацию емкости накопителя станка с ЧПУ, используя следующее выражение:

$$Q_{ц} = (v, s_0) = R_1 \frac{R_2 - v^{\mu_1} s_0^{\mu_2}}{1/(vs_0) + R_3}, \quad (1)$$

где $R_1 = \frac{K_5}{C_T A}$; $R_2 = \frac{(60 - K_2) C_T}{K_5}$; $R_3 = \frac{K_1}{A}$,

$$K_5 \cong \left\{ \begin{array}{l} \left[1 + \lambda \left(\frac{K_4}{K_3} \frac{b}{b-1} - 1 \right) - \lambda^2 \left(\frac{b}{2b-1} \frac{K_4}{K_3} - \frac{1}{2} \right) + \right. \\ \left. + \frac{\lambda^3}{2} \left(\frac{b}{3b-1} \frac{K_4}{K_3} - \frac{1}{3} \right) - \frac{\lambda^4}{6} \left(\frac{b}{4b-1} \frac{K_4}{K_3} - \frac{1}{4} \right) \right] K_3 \sqrt[b]{\frac{K_3}{b(K_4 - K_3)}} \end{array} \right\};$$

$$K_2 = \frac{\sum_{i=1}^r t_{ni} + t_{пт1} + t_{пт2}}{t}; \quad K_3 = \frac{t_{см1}}{t}; \quad K_4 = \frac{t_{см2}}{t};$$

$$A = \frac{L\pi D}{1000}; \quad \lambda = \left(\frac{T^*}{a} \right)^b = \frac{K_3}{b(K_4 - K_3)}; \quad T(v, s_0) = \frac{C_T}{v^{\mu_1} s_0^{\mu_2}}, \quad (2)$$

где $\sum_{i=1}^r t_{ni}$ – потери времени по техническим причинам за 1 ч работы (за исключением потерь времени на смену инструмента); r – число технических причин; t_{ni} – потери времени на смену инструмента за 1 ч работы, мин; $t_{пт1}$ и $t_{пт2}$ – соответственно, время оперативной технической подготовки производства и время обслуживания оборудования; C_T, μ_1, μ_2 – константы; L и s_0 – ход и подача инструмента; v – скорость резания, м/мин; D – диаметр обрабатываемого изделия, мм; T^* – интервал времени между плановыми заменами, мин; $t_{см1}$ и $t_{см2}$ – время, затрачиваемое, соответственно, на одну плановую и одну внеплановую замену, мин; τ – текущее время.

$$T^* = \frac{K_3}{(K_4 - K_3)p(T^*)} \left(1 - \int_0^{T^*} p(\tau) d\tau \right), \quad (3)$$

где $p(\tau)$ – плотность вероятности стойкости инструмента.

Для отказов инструментов с микровыкрашиваниями плотность вероятности стойкости согласуется с законом Вейбулла [15]–[17].

Тогда

$$T^* = \frac{T(v, s_0)}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{b}\right)} \left[\frac{K_3}{b(K_4 - K_3)} \right]^{1/b}. \quad (4)$$

Известно, что для каждого процесса обработки технологическая система «станок – приспособление – инструмент – заготовка» имеет свои предельные значения v и s_0 [15].

Анализ результатов по изложенной методике рассмотрим на примере токарной операции. Диапазоны изменения элементов режима резания находились в пределах: $v = 40-120$ м/мин и $s_0 = 0,1-0,5$ мм/об. Число резервного инструмента определялось по формуле

$$K_{\Pi} = \sum_{i=1}^m (\eta_{\Pi i} - 1),$$

где $\eta_{\Pi i} = \frac{T_{ai}}{T_i}$; T_{ai} – время резания i -м инструментом в автоматическом режиме; T_i – период стойкости i -го инструмента.

Результаты расчетов представлены на рис. 2 и 3.

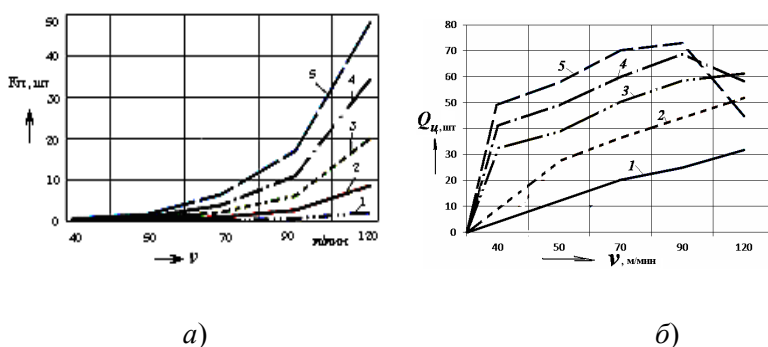


Рис. 2. Графики: *a* – влияния скорости резания на число резервных инструментов в наладке; *б* – производительности при различных значениях подачи: 1 – $s_0 = 0,1$ мм/об.; 2 – $0,2$ мм/об.; 3 – $0,3$ мм/об.; 4 – $0,4$ мм/об.; 5 – $0,5$ мм/об.

Кроме того, число резервных инструментов в наладке при условии его плановой замены увеличивается в 2–2,17 раза, а производительность возрастает при росте скорости резания непропорционально (рис. 2, *б*), т. е. имеется предельный максимум, который зависит от подачи и стойкости инструмента (рис. 3, *б*). Кроме этого эффективность работы СИО зависит от количества резервного инструмента (рис. 3, *а*). Повысить эффективность СИО можно путем применения автоматизированной инструментальной оснастки [5], [15] или надежности элементов СИО.

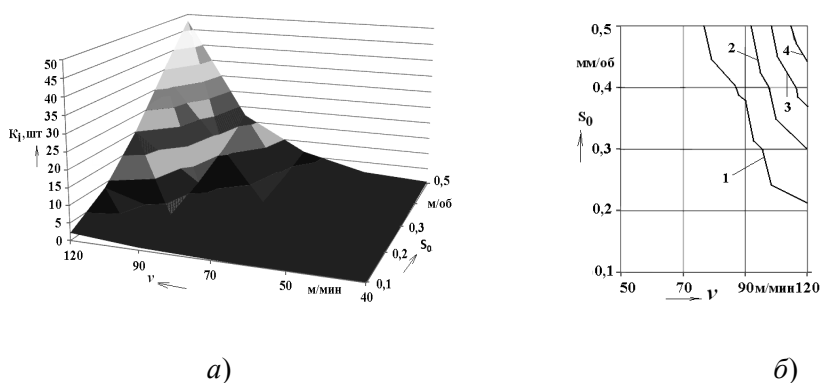


Рис. 3. Графики: *a* – влияния скорости резания и подачи на число инструментов в наладке; *б* – соотношения скорости резания и подачи для различной стойкости инструмента: 1 – $T = 60$ мин; 2 – 26 мин; 3 – 20 мин; 4 – 12 мин

Анализ надежности СИО производился поэтапно [16]–[18].

На первом этапе составлялась структурная схема, при этом допускалось, что система неремонтируема и нерезервируема. Затем рассчитывался риск отказа системы и сравнивался с допусковым 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 распределения, а микровыкрашивание – с экспоненциальным [16]. По предварительным экспериментам определялась наработка на отказ каждого элемента T_i и интенсивность отказов λ_i , а также риск при отказе каждого элемента r_i .

Затем рассчитывались: наработка на отказ T_c и риск всей системы $R(t)$:

$$T_c = \frac{\prod_{i=1}^n T_i}{\sum_{i=1}^n T_i}; \quad R(t) = \sum_{i=1}^n r_i \cdot \lambda_i \cdot \frac{(1 - e^{-\lambda_c t})}{\lambda_c}; \quad \lambda_i = \frac{1}{T_i}; \quad \lambda_c = \sum_{i=1}^n \lambda_i. \quad (5)$$

Если расчетное значение наработки на отказ и риска меньше допускового, 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 определялось по соотношениям:

$$P_c(t) = 1 - \prod_{i=0}^m (1 - P_i(t)); \quad f_c(t) = \sum_{i=0}^m (1 - P_0(t)) \dots f_i(t) \dots (1 - P_m(t)); \quad \lambda_c(t) = \frac{\sum_{j=0}^m f_j(t) \prod_{i=j}^m Q_i(t)}{1 - \prod_{i=0}^m Q_i(t)}, \quad (6)$$

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

Для принятых законов распределения были рассчитаны численные значения показателей, которые представлены на рис. 4, при:

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

где $\Phi_0(t)$ – функция Лапласа.

Как видно на рис. 4, a , с увеличением кратности резервирования увеличивается среднее время безотказной работы и уменьшается дисперсия.

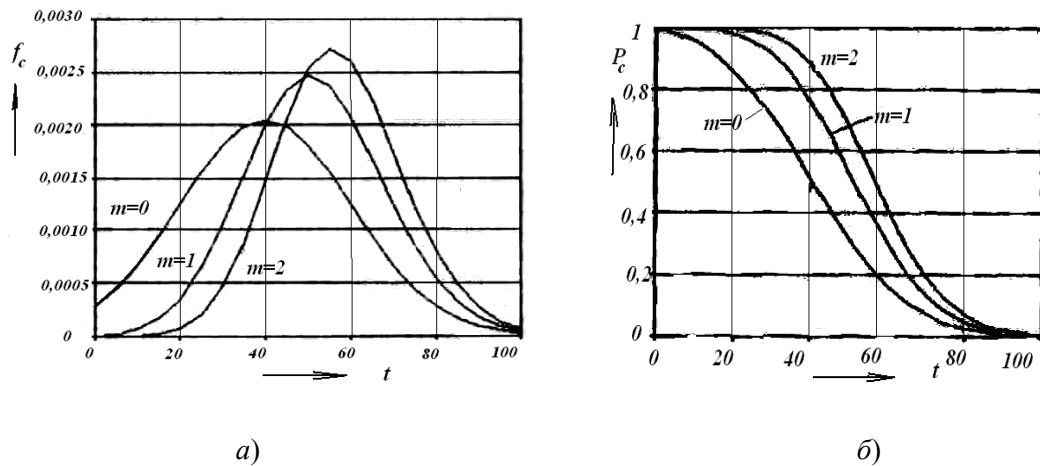


Рис. 4. Графики: а – плотности распределения времени до отказа; б – вероятности безотказности работы системы при различной кратности резервирования с усеченным нормальным законом распределения

Анализ рис. 4, б позволяет заключить, что на вероятность безотказности значительное влияние оказывает кратность резервирования, причем этот эффект тем существеннее, чем меньше m . Анализ рис. 5, а позволяет заключить, что большей кратности резервирования соответствует меньшая интенсивность отказов.

Как видно на рис. 5, б, при постоянной интенсивности отказов основной системы интенсивность отказа резервированной системы увеличивается с течением времени, стремясь к постоянной величине, равной интенсивности отказов нерезервированной системы.

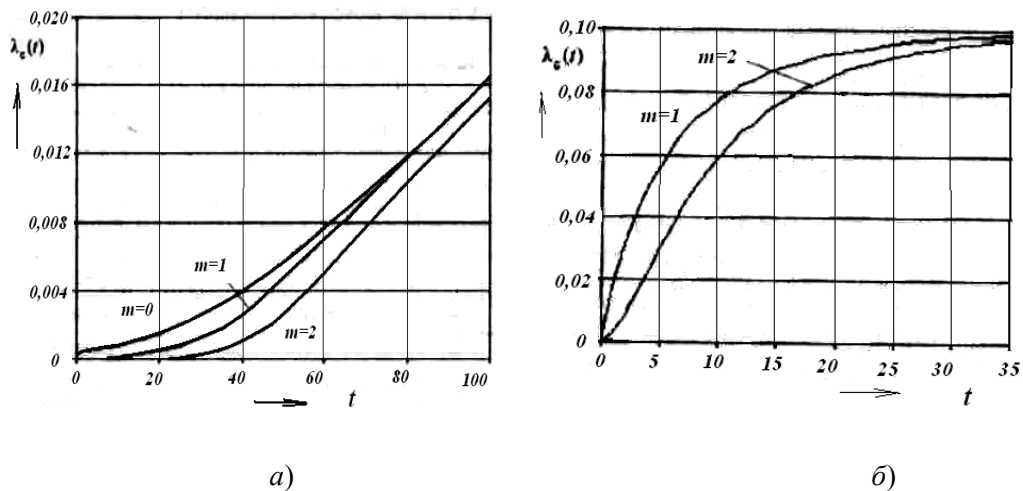


Рис. 5. Графики интенсивности отказа системы при различной кратности резервирования: а – с усеченным нормальным законом распределения; б – экспоненциальным

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

$$P_c(t) = 1 - \prod_{i=0}^m \left(1 - \prod_{j=1}^n P_{ij}(t) \right), \quad (7)$$

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

Постоянный резерв сложно технически реализовать в системах инструментального обеспечения, поэтому часто используются конструкции с резервированием замещением. В этом случае вероятность безотказной работы, плотность распределения времени до отказа, и среднее время безотказной работы системы определяются выражениями:

$$P_c(t) = P_0(t) + \sum_{i=1}^m f_0 \times f_i \times \dots \times f_{i-1} \times P_i(t); f_c(t) = f_0 \times f_i \times \dots \times f_m(t); T_1 = \int_0^{\infty} P_c(t) dt = \sum_{i=0}^m T_{1i}, \quad (8)$$

где $f_0 \times f_i \times \dots \times f_m(t)$ – 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. 6.

Анализ рис. 6 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 λt .

Вероятность безотказной работы системы при отдельном резервировании замещением определяли по выражению

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

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

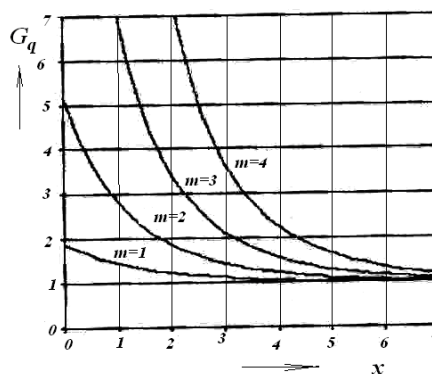


Рис. 6. График выигрыша надежности при резервировании замещением

Для всей системы инструментального обеспечения, в которой n – общее число элементов, $(n - m)$ основных и m резервных элементов, показатели надежности соот-

ветствовали для мажоритарных систем. Отказ такой системы наступает при отказе $(m + 1)$ -го элемента, тогда:

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

$$\lambda_c(t) = \frac{(n - m) C_n^m Q^m(t) P^{n-m}(t)}{\sum_{i=0}^m C_n^i Q^i(t) P^{n-1}(t)} \lambda(t). \quad (11)$$

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:

$$P_c(t) = \sum_{k=0}^m \sum_{k_1+k_2+\dots+k_{n-m}=k} f^{+(k_1)} \times P(t) f^{*(k_2)} \times P(t) \dots f^{*(k_{n-m})} \times P(t). \quad (12)$$

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

$$P_c(t) = \sum_{k=0}^m \frac{((n - m)\lambda t)^k}{k!} e^{-(n-m)\lambda t}; \quad \lambda_c(t) = (n - m)\lambda \frac{((n - m)\lambda t)^m}{\sum_{k=0}^m \frac{((n - m)\lambda t)^k}{k!}}; \quad T_{1c} = \frac{m + 1}{n - m} T_1. \quad (13)$$

При практической реализации необходимо уточнить полученную структуру (рис. 7), которая реализуется изображением либо структурной схемы СИО, габаритного чертежа, либо габаритной планировки в двух проекциях.

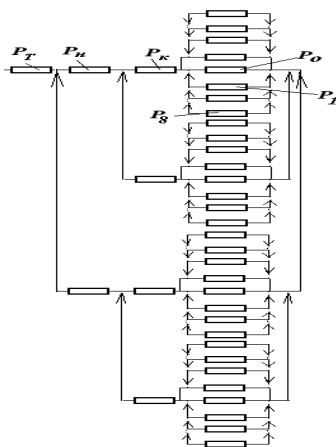


Рис. 7. Эскиз структурной схемы системы инструментообеспечения с резервированием

Литература

1. Теоретические основы проектирования технологических комплексов / А. М. Русецкий [и др.] ; под общ. ред. А. М. Русецкого. – Минск : Беларус. навука, 2012. – 239 с.
2. Лищинский, Л. Ю. Структурный и параметрический синтез гибких производственных систем / Л. Ю. Лищинский. – М. : Машиностроение, 1990. – 312 с.
3. Ящерицын, П. И. Основы проектирования технологических комплексов в машиностроении : монография / П. И. Ящерицын, Л. М. Акулович, М. Л. Хейфиц. – Минск : Технопринт, 2006. – 248 с.
4. Технологические аспекты конверсии машиностроительного производства / А. С. Васильев [и др.]. – Тула : ТулГУ, 2003. – 271 с.
5. Инструмент для станков с ЧПУ, многоцелевых станков и ГПС / И. Л. Фадюшин [и др.]. – М. : Машиностроение, 1990. – 272 с.
6. Каштальян, И. А. Повышение эффективности использования станков с ЧПУ в условиях нестационарного резания / И. А. Каштальян. – Минск : БНТУ, 2008. – 311 с.
7. Monitorowanie ostrza skrawajacego. Metody konwencjonalne i sieci neuronowe / Z. Adamczyk [and other] ; unter a rel. J. Kosmola. – Warszawa : WNT, 1996. – 244 s.
8. Byrne, G. Tool Condition Monitoring (NCM). – The status of research and Industrial Application // CIRP Annals. – 1995. – Vol. 44, № 2. – P. 541–568.
9. Хартли, Дж. ГПС в действии: пер. с англ / Дж. Хартли. – М. : Машиностроение, 1987. – 328 с.
10. Kosmol, J. Automatyzacja obrabiarek i obrobki skrawaniem. Wyd. 2. – Warszawa : WNT, 2000. – 444 s.
11. Козловский, В. А. Эффективность переналаживаемых роботизированных производств / В. А. Козловский. – Л. : Машиностроение, 1985. – 224 с.
12. Митрофанов, В. Г. Живучесть гибких производственных систем / В. Г. Митрофанов, А. С. Старостин // Станки и инструмент. – 1990. – № 12. – С. 9–11.
13. Шведенко, В. Н. Теоретический расчет закона распределения стойкости резцов при точении / В. Н. Шведенко // Вестн. машиностроения. – 1989. – № 10. – С. 49–51.
14. Нодельман, М. О. Идентификация периодичности смены режущего инструмента / М. О. Нодельман // Вестн. машиностроения. – 1989. – № 7. – С. 46–48.
15. Михайлов, М. И. Сборный металлорежущий механизированный инструмент: Ресурсосберегающие модели и конструкции / М. И. Михайлов ; под ред. Ю. М. Плескачевского. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2008. – 339 с.
16. Схиртладзе, А. Г. Надежность и диагностика технологических систем / А. Г. Схиртладзе, М. С. Уколов, А. В. Скворцов. – М. : Новое знание, 2008. – 518 с.
17. Шимарев, В. Ю. Надежность технических систем / В. Ю. Шимарев. – М. : Издат. центр «Академия», 2010. – 304 с.
18. Дианов, В. Н. Диагностика и надежность автоматических систем / В. Н. Дианов. – М. : Изд-во МГИУ, 2005. – 378 с.