

Цей вид моделювання роботи механізму може бути використаний під час дослідження кінематики вузлів та механізмів із змінними розмірами ланок, а також для визначення їх впливу на вихідні показники ТС. При цьому розроблена модель може бути використана для визначення найбільш навантажених ланок механізму, а також у разі ремонту та експлуатації ТС.

Актуальними напрямками дослідження з використанням розробленої моделі є аналіз технічних показників системи під час врахування контактної взаємодії між рухомими ланками механізму, а також їх вплив на вихідні показники ТС.

Список використаних джерел

1. *Planchard C. D.* Assembly Modeling with SolidWorks / C. D. Planchard, M. P. Planchard // SDC Publications, 2012. – 528 p.
2. *Xiaobin D.* The Design on Automatic Feed Punching Mechanism on SolidWorks / D. Xiaobin, H. Wu, H. Liu // Advanced Materials Research, 2013. – Vols. 655–657. – P. 272–276.
3. *Kamil P.* Effective work in design of new product in MCAD systems / P. Kamil, A. Łukaszewicz // Machine Dynamics Research. – 2013. – Vol. 37. – No 3. – P. 45–52.
4. *Łukaszewicz A.* Modelling of solid part using multibody techniques in parametric CAD systems / A. Łukaszewicz // Solid State Phenomena. – 2009. – Vols. 147–149. – P. 924–929.
5. *Fang H.* Design and Movement Simulation to the Cam of the Testing Device for capacitor encapsulation equipment / H. Fang, G. Zhang, J. Jian // Open Journal of Modelling and Simulation. – 2014. – Vol. 2. – P. 138–143.
6. *Off-line programming of an industrial robot for manufacturing* / S. Mitsi, K. D. Bouzakis, G. Mansour, D. Sagris, G. Maliaris // Int. J. Adv. Manuf. Technol. – 2005. – Vol. 26. – P. 262–267.

УДК 621.9.02

М.И. Михайлов, канд. техн. наук

Гомельський державний технічний університет ім. П. О. Сухого, г. Гомель, Беларусь

ОПТИМИЗАЦИЯ ЕМКОСТИ НАКОПИТЕЛЕЙ ИНСТРУМЕНТОВ СТАНКОВ С ЧПУ ДЛЯ ГИБКИХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМ

М.І. Міхайлав, канд. техн. наук

Гомельський державний технічний університет ім. П. О. Сухого, м. Гомель, Білорусь

ОПТИМІЗАЦІЯ ЄМНОСТІ НАКОПИЧУВАЧІВ ІНСТРУМЕНТІВ ВЕРСТАТІВ З ЧПУ ДЛЯ ГНУЧКИХ ВИРОБНИЧИХ СИСТЕМ

Mikhail Mikhailov, PhD in Technical Sciences

Sukhoi State Technical University of Gomel, Gomel, Belarus

OPTIMIZATION OF MACHINE TOOLS WITH CNC STORAGE CAPACITY FOR FLEXIBLE MANUFACTURING SYSTEMS

Рассмотрена методика расчета емкости накопителей инструментов станков с ЧПУ для гибких производственных систем из условий применяемости деталей и произведена их оптимизация по критерию производительности.

Ключевые слова: станок с числовым программным управлением, гибкая производственная система, накопитель инструментов.

Розглянуто методика розрахунку ємності накопичувачів інструментів верстатів з ЧПУ для гнучких виробничих систем з умов застосовності деталей і проведено їх оптимізацію за критерієм продуктивності.

Ключові слова: верстат з числовим програмним управлінням, гнучка виробнича система, накопичувач інструментів.

The article considers an approach how to calculate the capacity of instruments store shops within tools equipped with system of numerical program control which are to be inserted to function in the environment of flexible production modules. The calculation is suggested to be done with a view of the investigating of the fields of applicability of the manufactured parts and is aimed at providing their optimum design in accordance with the productivity criterion.

Key words: a tool equipped with system of numerical program control, a flexible production module, instruments store shop.

Постановка проблемы. Переориентация промышленности на выпуск широкого ассортимента продукции малыми сериями (партиями), в совокупности с постоянным снижением трудовых ресурсов европейских государств, привела к изменению исполь-

зованных 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) [1–12]. Достижения в области микроэлектроники способствовали 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; 4 и др.]. Обобщив полученные в работах результаты, можно выделить удельные производственные и непроизводственные затраты времени (табл.).

Таблица

Удельные затраты времени при обработке на станках с ЧПУ

Виды затрат времени		Относительные затраты времени, %
Производственные	Смена режущих инструментов	7
	Переналадка оборудования	7
	Установка заготовок и снятие деталей	4
	Обработка	8
Непроизводственные	Выходные и праздничные дни	28
	Отсутствие рабочих второй и третьей смен	40
	Простои (плановые и внеплановые)	6

Анализ данных, приведенных в табл., позволяет сделать вывод, что основные резервы уменьшения потерь времени при обработке на станках с ЧПУ, позволяющие работать в выходные дни, а также во вторую и третью смены, заключены в повышении степени их автоматизации и оптимизации системы инструментообеспечения.

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 станков с ЧПУ, гибких производственных модулей (ГПМ) и гибких производственных систем (ГПС).

Анализ известных результатов исследований. 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 [1–12 и др.], их можно представить в системном виде. При этом системы инструментообеспечения станков с ЧПУ могут формироваться на основе: револьверных головок, одна из позиций которых является рабочей; инструментальных магазинов; стационарных инструментальных панелей, расположенных на рабочем столе станка, на его базовых элементах или рядом со станком. СИО ГПМ дополнительно снабжается устройствами: контроля целостности инструмента, определения его остаточного периода стойкости, автоматической подналадки станка на исходный размер инструмента, дополнительным накопителем инструмента и транспортной системой, например в виде роботов. Такая СИО значительно повышает стоимость обработки и требует ее оптимизации. Система инструментообеспечения производственных структур направлена на приспособление входящих в нее видов

технологического оборудования при условии получения требуемых качественных и количественных показателей изготавливаемых изделий. Она зависит от типа производства, используемых базовых технологических процессов, наличия соответствующей вычислительной техники, программного обеспечения и состоит в общем виде из: набора физических носителей режущего инструмента, набора управляющих программ; информационного обеспечения выбора инструмента; системы оперативного проектирования инструмента и инструментальных наладок; систем учета наличия и планирования поставок инструмента; системы транспортных инструментальных потоков, устройств настройки инструмента на размер; диагностических систем контроля состояния режущих инструментов, способных прогнозировать период его стойкости и фиксировать момент предельного износа и остаточный период стойкости, автоматизированных систем смены инструмента у оборудования, участков реставрации инструмента и др.

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

Наличие автоматической подналадки инструментов, в сочетании с возможностью их накопления в инструментальном складе для группы станков, позволяет эксплуатировать комплект инструментов или его часть в группе взаимозаменяемых ГПМ, т. е. организовать межстаночный инструментообмен. Это значительно расширяет технологические возможности оборудования, повышает надежность функционирования ГПС в целом и сокращает требуемое количество инструмента.

Полученные практические результаты не позволяют автоматизировать процесс проектирования систем инструментального обеспечения, так как отсутствует единый алгоритм, позволяющий производить формирование инструментальной наладки при обработке группы заготовок деталей с оптимизацией их по технико-экономическим критериям.

Цель работы. Разработка алгоритма формирования инструментальной наладки при обработке группы заготовок деталей с оптимизацией их по технико-экономическим критериям.

В машиностроении значительную часть выпускаемой продукции представляет штучная продукция, поэтому в основу анализа взята штучная производительность, т. е. число изделий, изготовленных в единицу времени.

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

$$Q_{ц} = K\eta, \quad (1)$$

где $K = \frac{1}{t_o}$ – технологическая производительность; $\eta = \frac{1}{Kt_b + 1}$ – коэффициент произ-

водительности; t_o – 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 $t_e\text{-var}$, если принять $t_e = const$, то с увеличением K величина η уменьшается, как показано на рис. 1, а. Кривые I, II, III соответствуют трем значениям различным 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 (см. табл.) зависит от времени смены и наладки инструмента, которые, в свою очередь, зависят от конструкции инструмента, а также от емкости и конструкции инструментального накопителя.

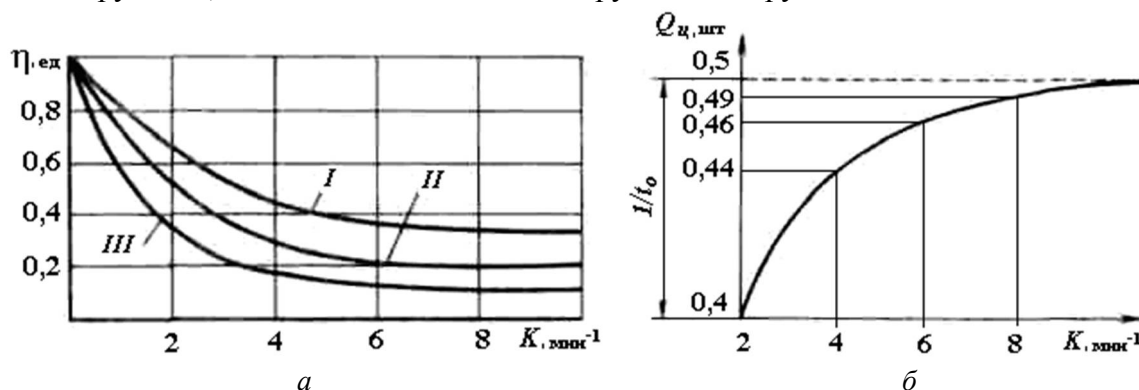


Рис. 1. Графики влияния технологической производительности на коэффициент производительности (а) и цикловую производительность (б) автоматизированного оборудования

Емкость накопителя инструментов станка с ЧПУ формировалась поэтапно, с оптимизацией по критериям максимальной производительности и минимальной себестоимости обработки.

На первом этапе производится условная разбивка деталей каждой партии на технологические элементы (отверстия, канавки, выточки, фаски и т. д.), каждый из которых имеет характерные размеры (например, для отверстий – осевые и диаметральные l_i и d_i и т. д.). Затем определяется диапазон выделенных размеров по каждому элементу. Выделенные диапазоны разделяются на интервалы. Определяется общее количество элементов с выделенным интервалом во всех деталях и рассчитывается частота применяемости выделенных элементов по каждому интервалу диапазона

$$P_{ij} = \frac{A_{ij}}{\sum_{j=i}^n A_{ij}} \cdot 100 \%,$$

где A_{ij} – применяемость i -го элемента с j -м интервалом; n – число интервалов.

По полученным результатам строится гистограмма применяемости по каждому из размеров выделенных элементов. По данным гистограммы выбираются элементы с на-

ибольшей применяемостью, из которых проектируется деталь-представитель и на нее составляется развернутая технология обработки. Используя технологию, определяются размеры и количество необходимого инструмента, т. е. начальная емкость инструментальной наладки.

На втором этапе учитывается реализуемый в условиях ГПС принцип групповой обработки деталей, базирующийся на применении групповых инструментальных наладок. Каждая наладка представляет собой комплект инструментов, сформированный в ГПС и позволяющий обрабатывать максимальное число деталей без переналадки станка. В практике серийного производства возникает задача формирования минимальной совокупности K групповых инструментальных наладок $M_1, \dots, M_i, \dots, M_k$, необходимых для обработки m деталей $D = \{d_1, \dots, d_m\}$; при этом каждая наладка позволяет обрабатывать одну группу D_i деталей: $D_1UD_2U \dots D_iU \dots UD_m = D$. Число инструментов $|M_i|$ в одной групповой наладке ограничивается конструктивными и техническими параметрами, т. е. расчетной емкостью q_t магазина станка, таким образом должно соблюдаться условие $|M_i| \leq q_t$.

Эта задача решается путем сведения ее к задаче о минимальном покрытии с помощью U -графа, являющегося разновидностью арифметического графа. При этом граф строится путем последовательного наращивания его размаха $R_e(1, \bar{r})$ с помощью задающих этот граф ресурсных матриц. Базис U -графа строится по данным анализа применимости инструмента. Наращивание размаха R_e продолжается до тех пор, пока не будут построены все возможные групповые инструментальные наладки M_1, \dots, M_m , удовлетворяющие условию $|M_i| \leq q_t$ и позволяющие обработать всю заданную совокупность D . При этом каждой инструментальной наладке в соответствие ставится вполне определенная совокупность деталей.

На третьем этапе решается задача о минимальном покрытии множества инструментов с целью исключения избыточной наладки. Поиск решения начинается с построения U -графа путем последовательного наращивания размаха с помощью рекуррентных матриц. Наращивание размаха продолжается до первого покрытия множества U принятыми наладками. Эти наладки образуют минимальную совокупность. По результатам решений можно определить минимальное число инструментов каждого наименования, требуемых для обработки заданной совокупности деталей, и выбрать оптимальную последовательность переналадок станков, входящих в состав ГПС. При недостаточном числе инструментов увеличивается время обработки всей совокупности (партии) деталей, а при их избыточном числе увеличиваются материальные затраты.

Необходимо выбрать оптимальную последовательность загрузки станков запланированными группами деталей, при которой суммарное время простоев станка минимально. Для ее решения строится матрица $\|t_{ij}\|$, где t_{ij} – время переналадки станка при переходе от обработки деталей групп D_i к обработке деталей группы D_j . При этом групповая наладка M_i заменяется наладкой M_j . При наличии достаточного ресурса стойкости инструменты, входящие в обе эти наладки, могут быть оставлены в магазине станка. В первом приближении время t_{ij} может быть принято равным времени, необходимому для изъятия из наладки M_i неиспользуемых далее инструментов и размещения в ней новых инструментов с целью получить окончательную наладку.

На четвертом этапе, обобщив полученные в работах [2; 8] соотношения для расчета оптимальных режимов резания по критерию производительности, производится оптимизация емкости накопителя станка с ЧПУ, используя следующее выражение:

$$Q_u = (v, s_o) = R_1 \frac{R_2 - v^{\mu_1} s_o^{\mu_2}}{1/(vs_o) + R_3}, \tag{2}$$

где $R_1 = K_5 / C_T A$; $R_2 = (60 - K_2) C_T / K_5$; $R_3 = K_1 / A$.

$$K_5 \cong \left\{ 1 + \lambda \left(\frac{K_4}{K_3} \frac{b}{b-1} - 1 \right) - \lambda^2 \left(\frac{b}{2b-1} \frac{K_4}{K_3} - \frac{1}{2} \right) + \right. \\ \left. + \frac{\lambda^3}{2} \left(\frac{b}{3b-1} \frac{K_4}{K_3} - \frac{1}{3} \right) - \frac{\lambda^4}{6} \left(\frac{b}{4b-1} \frac{K_4}{K_3} - \frac{1}{4} \right) \right\} K_3 \frac{\Gamma(1+1/b)}{\sqrt[b]{K_3/b(K_4 - K_3)}}.$$

$$K_2 = \left(\sum_{i=1}^r t_{ni} + t_{пт1} + t_{пт2} \right) / t; \quad K_3 = t_{см1} / t; \quad K_4 = t_{см2} / t;$$

$$A = L\pi D / 1000; \quad \lambda = \left(\frac{T^*}{a} \right)^b = \frac{K_3}{b(K_4 - K_3)}; \quad T(v, s_o) = \frac{C_T}{v^{\mu_1} s_o^{\mu_2}}, \tag{3}$$

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_o – 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.

$$T^* = \frac{K_3}{(K_4 - K_3)p(T^*)} \left(1 - \int_0^{T^*} p(\tau) d\tau \right), \tag{4}$$

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

Для отказов инструментов с микровыкрашиваниями плотность вероятности стойкости согласуется с законом Вейбулла [13; 14]

$$p(\tau) = \frac{b}{a} \left(\frac{\tau}{a} \right)^{b-1} e^{-(\tau/a)^b}, \tag{5}$$

где a и b – параметры закона.

Тогда стойкость определится по выражению

$$T = \Gamma \left(1 + \frac{1}{b} \right) a,$$

где Γ – гамма-функция.

Кроме того, стойкость T является функцией параметров v, s_o режима резания (3), поэтому

$$a = \frac{T(v, s_0)}{\Gamma(1 + 1/b)}, \quad (6)$$

Подставив выражения (5) и (6) в формулу (4), получим

$$T^* = \frac{T(v, s_0)}{\Gamma(1 + 1/b)} \left[\frac{K_3}{b(K_4 - K_3)} \right]^{1/b}. \quad (7)$$

Известно, что для каждого процесса обработки технологическая система «станок – приспособление – инструмент – заготовка» имеет свои предельные значения V и S_0 .

Анализ результатов по изложенному алгоритму рассмотрим на примере токарной операции.

Диапазоны изменения элементов режима резания находились в пределах: $V = 40 \dots 120$ м/мин и $s_0 = 0,1 \dots 0,5$ мм/об. Значения стойкости $T(v, s_0)$ рассчитывались по выражению (3), а значения оптимальных интервалов времени плановой замены инструмента T^* и производительности $Q_{ц}$ – по формулам (7) и (2), для тех же сочетаний параметров режима обработки. Число резервного инструмента определим по формуле

$$K_{\Pi} = \sum_{i=1}^m (\eta_{\Pi i} - 1), \quad (8)$$

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, 3.

Результаты расчетов представлены на рис. 2, 3.

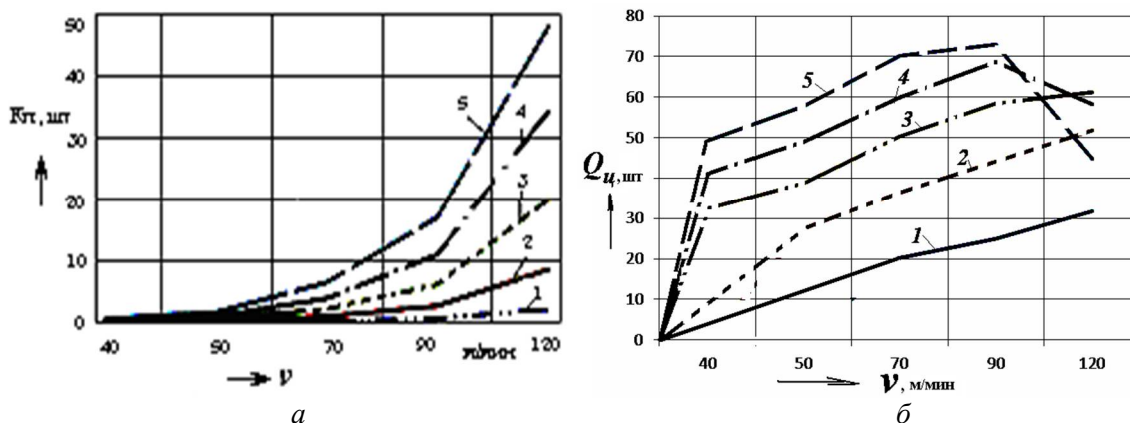


Рис. 2. Графики влияния скорости резания на число резервных инструментов в наладке (а) и производительность (б) при различных значениях подачи: 1 – $s_0 = 0,1$ мм/об.; 2 – $0,2$ мм/об.; 3 – $0,3$ мм/об.; 4 – $0,4$ мм/об.; 5 – $0,5$ мм/об.

Выводы и предложения. Анализ графиков позволяет заключить, что наибольшее влияние на число резервных инструментов в наладке (8), при условии его работы до отказа, оказывает скорость резания (рис. 2, а).

Кроме того, число резервных инструментов в наладке при условии его плановой замены увеличивается в $2 \dots 2,17$ раза, а производительность возрастает при росте скорости резания не пропорционально (рис. 2, б), т. е. имеется предельный максимум, который зависит от подачи и стойкости инструмента (рис. 3, б). Кроме того, эффективность работы СИО зависит от количества резервного инструмента (рис. 3, а). Повысить эффективность СИО можно путем применения автоматизированной инструментальной оснастки.

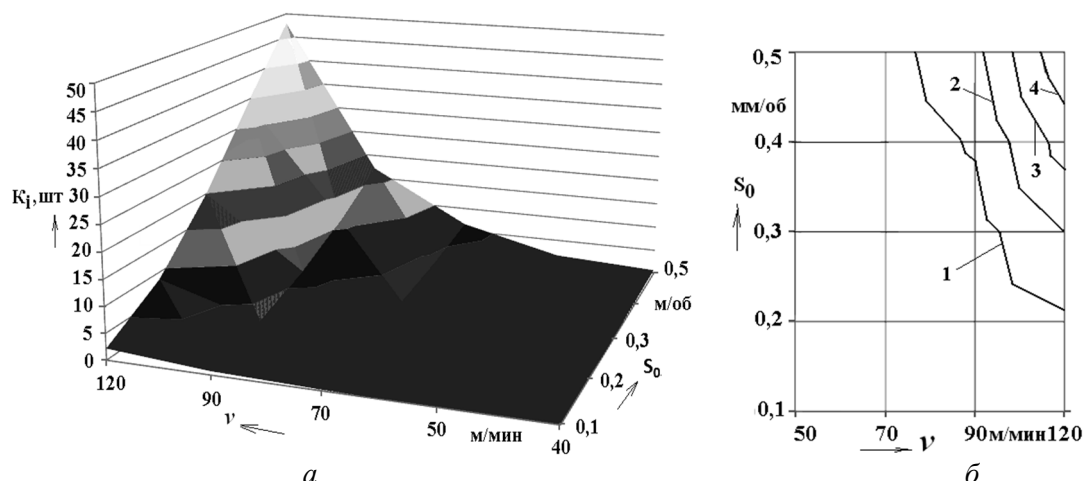


Рис. 3. Графики влияния скорости резания и подачи на число инструментов в наладке (а), соотношение скорости резания и подачи для различной стойкости инструмента (б):
1 – $T = 60$ мин; 2 – 26 мин; 3 – 20 мин; 4 – 12 мин

Укомплектованный таким образом инструментальный магазин содержит инструмент, обладающий различной стойкостью T_i . Для обеспечения работоспособности ГПС в условиях «безлюдного» производства необходима синхронизация стойкости каждого из инструментов, которую можно обеспечить путем рационального выбора T_i и уточнения необходимого числа резервного инструмента в инструментальном магазине.

Список использованных источников

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 / П. И. Ящерицын, Л. М. Акулович, М. Л. Хейфиц. – Минск : Технопринт, 2006. – 248 с.
4. *Инструмент для станков с ЧПУ, многоцелевых станков и ГПС* / И. Л. Фадюшин [и др.]. – М. : Машиностроение, 1990. – 272 с.
5. *Каштальян И. А.* Повышение эффективности использования станков с ЧПУ в условиях нестационарного резания / И. А. Каштальян. – Минск : БНТУ, 2008. – 311 с.
6. *Попок Н. Н.* Анализ тенденций проектирования инструментальных систем / Н. Н. Попок // Вестн. ПГУ. – 2012. – № 3. – С. 71–81.
7. *Monitorowanie ostrza skrawajacego. Metody konwencjonalne i sieci neuronowe* / Z. Adamczyk [and other]; unter a rel. J. Kosmola. – Warszawa : WNT, 1996. – 244 s.
8. *Burne G.* Tool Condition Monitoring (NCM) – The status of research and Industrial Application / G. Burne // 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.* Automatyizacja obrabiarek i obrabki 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. *Эстерзон М. А.* Технология обработки на станках с ЧПУ / М. А. Эстерзон, Т. М. Нахова // Стружка. – 2006. – № 3. – С. 12–16.
13. *Шведенко В. Н.* Теоретический расчет закона распределения стойкости резцов при точении / В. Н. Шведенко // Вестн. машиностроения. – 1989. – № 10. – С. 49–51.
14. *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.