



ISSN 0201-7164

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

---

# შრომები

№ 2 (404)

თბილისი

1994

ISSN 0201-7164

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი  
GEORGIAN TECHNICAL UNIVERSITY  
ГРУЗИНСКИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

---

უ რ მ ე ბ ი

Т Р У Д Ы

TRANSACTIONS

№ 2 (404)

თბილისი — TBILISI — ТБИЛИСИ

1994

## МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 658.512.011.56

А.Н.Шармазанашвили

### МЕТОДЫ ОПТИМИЗАЦИИ ЧЕРНОВЫХ ПРОХОДОВ ПРИ АДАПТИВНОМ УПРАВЛЕНИИ

Главным требованием проектирования черновых проходов механической обработки является обеспечение наиболее производительного съема припуска для удаления основного объема материала заготовки. Однако оптимизация обработки проходов по этому условию усложняется тем, что глубина резания черновых проходов постоянно колеблется из-за неточности формы, разброса размеров, наличия дефектного слоя на поверхности, погрешности взаимного расположения поверхностей и осей симметрии исходной заготовки. В результате для некоторых типов заготовок рассеяние припуска может обусловить существенное изменение глубины резания, о чем свидетельствуют многочисленные исследования, результаты производственных наблюдений, а также нормативные данные.

В таких условиях наиболее эффективным средством для оптимизации черновых проходов являются адаптивные системы управления, которые позволяют компенсировать изменение глубины резания и осуществить оптимальное управление по заданным условиям оптимальности.

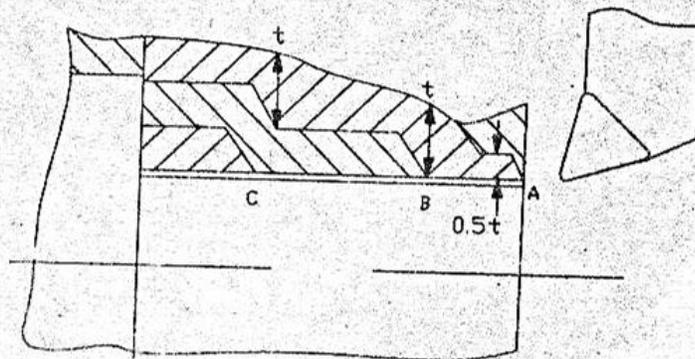
При этом в зависимости от принципов адаптации могут существовать следующие методы оптимизации черновых проходов:

#### 1. Трехкоординатное управление в реальном масштабе времени

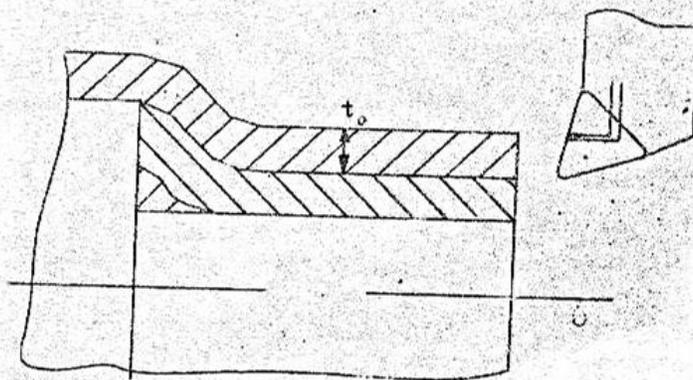
Типичным представителем такой адаптивной системы управления является система АСЕМА, которая осуществляет самопрограммирование черновых проходов по заданным в управляющей программе конечным значениям координат  $Z$  и  $X$ , глубины  $t_0$ , а также подачи  $S_{min}$ , обеспечивающей заданную силу резания. Управление производится путем стабилизации тангенциальной составляющей силы резания за счет автоматического регулирования подачи. При этом, если подача снижается до  $S_{min}$  (рис.1а), то глубина уменьшается на  $0,5t_0$  и обработка производится до

момента увеличения подачи до  $S_{max}$ . После этого обработка продолжается с момента изменения глубины резания.

Существуют более простые реализации таких систем - с использованием специального реза, оснащенного датчиком типа "сошло-заслонка", расположенного под твердосплавной пластиной на расстоянии  $t_0$  (рис.1б).



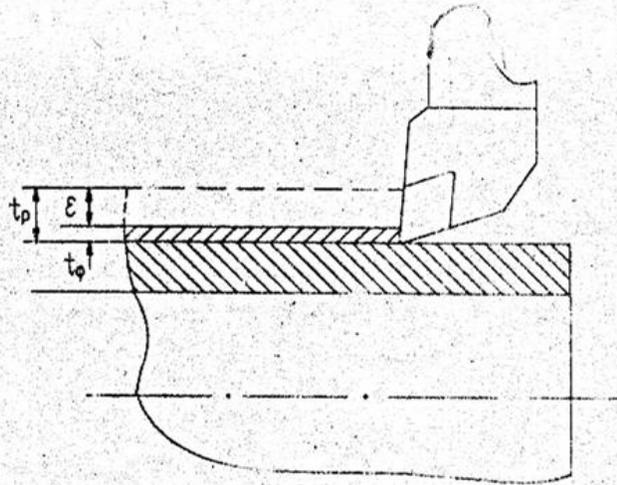
а)



б)

Рис.1

Однако оптимизация черновых проходов по такому методу имеет свои недостатки:  
 1) Управление осуществляется по жестко заданному алгоритму, что сужает диапазон использования таких систем.



- $t_p$  — рассчитанное значение глубины резания  
 $t_\phi$  — фактическое значение глубины резания  
 $\varepsilon$  — поле рассеяния припуска

Рис.2

2) Определение глубины резания из условия  $P_z = \text{const}$  приводит к функциональной зависимости между глубиной резания и твердостью материала заготовки, что, учитывая существенные изменения значений последнего, вряд ли можно считать наилучшим решением.

3) Не оправдано применение инструмента с датчиком предельной глубины резания, так как доказано что для каждого конкретного условия обработки существует оптимальная глубина резания, не являющаяся предельно допустимой.

4) Использование специального датчика на режущей кромке увеличивает затраты, связанные с инструментом.

2. Двухконтурное адаптивное управление по заданным условиям оптимальности без коррекции траектории перемещения инструмента

При этом число проходов и геометрические параметры траектории перемещения инструмента, включающие координаты опорных точек траектории, остаются без изменения (рис.2).

Оптимизация черновых проходов по фактической глубине резания  $t_\phi$  осуществляется путем управления по каналам главного движения и подачи по заданным условиям оптимальности.

К таким адаптивным системам управления относятся описанные в литературных источниках системы стабилизации параметров силы резания за счет текущего изменения контурной подачи при постоянной скорости резания [1], [2]; стабилизации

величин упругих деформаций за счет использования динамометрических устройств [3] и т.п.

Однако реализация такого управления при существенных изменениях глубины резания не всегда может оказаться эффективной. Так в частности, в работе И.В.Рубашкина [4] отмечается тот факт, что реализация управления по жестко заданным условиям оптимальности может привести к резкому снижению стойкости инструмента и, следовательно, к увеличению затрат, связанных с инструментом.

Рассмотрим более подробно этот вопрос и проведем соответствующие исследования.

Условия оптимальности представляют собой частные модели оптимизации. При двухконтурном адаптивном управлении эти модели включают в себя два условия оптимальности, которые формально могут быть представлены как степенные функции параметров режима обработки

$$\begin{cases} H = C_H \cdot V^{\alpha_H} \cdot S^{\beta_H} \cdot t^{\gamma_H} \\ \Phi = C_\Phi \cdot V^{\alpha_\Phi} \cdot S^{\beta_\Phi} \cdot t^{\gamma_\Phi} \end{cases}, \quad (1)$$

где коэффициенты  $C_H, C_\Phi$  и показатели степени  $\alpha, \beta, \gamma$  зависят от условий обработки.

Управление по условию  $H = \text{const}$  и  $\Phi = \text{const}$  определяет закон оптимального управления, реализация которого в определенных пределах изменения глубины резания обеспечивает экстремальное значение общего критерия качества.

Максимально производительный съем припуска при черновой обработке может быть ограничен, с одной стороны, возможностями оборудования, и, с другой стороны, стойкостью режущего инструмента. Поэтому оптимизацию черновых проходов необходимо производить по интегральному критерию, учитывающему как максимальную производительность, так и износ инструмента и затраты, связанные с инструментом.

В качестве такой интегральной оценки многими учеными для расширенной стойкостной зависимости Тейлора

$$T = \frac{C_T}{V^m \cdot S^p \cdot t^q} \quad (2)$$

предлагается функция

$$q = \frac{1}{VSt} + \frac{\gamma_H}{C_T} \cdot V^{m-1} \cdot S^{p-1} \cdot t^{q-1}, \quad (3)$$

отражающая затраты, связанные со съемом единицы объема материала. Ст.,  $m, p, q$

-величины, зависящие от свойств обрабатываемого и инструментального материалов и условий резания.  $\delta_n$  - коэффициент, учитывающий технико-экономические показатели: время смены инструмента  $T_{см}$ , себестоимость станкоминуты  $E_c$  и стоимость инструмента  $E_n$ .

Как свидетельствуют многочисленные исследования, целевая функция (3) для стойкостной зависимости (2) не имеет безусловного оптимума и точка условного экстремума находится на границе области допустимых значений режимов обработки.

Таким образом в законе управления, одним из условий оптимальности всегда будет выступать условие ограничения. Вторым условием оптимальности могут быть как условия ограничения, так и условия оптимальной стойкости.

Так как при двухконтурном адаптивном управлении управление осуществляется по каналам главного движения и подачи, то к первой группе условий оптимальности  $N=const$  можно отнести ограничения по скорости резания  $[V]$ , по мощности  $[N]$  и условие оптимальной стойкости  $T_V = \delta_n (m-1)$ , полученное из условия  $\frac{dT}{dV} = 0$ , а ко второй группе условий  $[F]=const$  - ограничение по усилию резания  $[P]$ , по моменту  $[M]$ , по подаче  $[S]$ , а также уравнение  $T_S = \delta_n (v-1)$ , полученное из условия  $\frac{dT}{dS} = 0$ . Однако условия обработки, при котором регулирование значений параметров режима осуществлялось бы по  $T_s = const$ , почти не встречается. Следовательно, в общем случае для двухконтурного адаптивного управления можно сформулировать следующую совокупность законов управления:  $[PV], [SV], [ST], [PT], [SN], [PN], [MV], [MN], [MT]$ .

При изменении глубины резания область допустимых значений режимов обработки деформируется - одни ограничения перестают быть активными и переходят в пассивные, и наоборот. Следовательно, точка экстремума на плоскости  $V \times S$  при изменении глубины резания, не находится на пересечении линий, соответствующих одним и тем же условиям оптимальности, в результате чего условие обеспечения максимально производительного съема припуска на черновых проходах, при минимальных затратах на инструмент, не реализуется.

Сказанное можно проиллюстрировать на примере оптимизации обработки заготовки из материала Сталь 45 HB180; инструментом T15K6 с углами в плане  $\gamma = 0,785$  рад,  $\varphi = 0,785$  рад; при граничных условиях  $[Pz] = 300$  кгс,  $[V] = 220$  м/мин,  $[S] = 1,3$  мм/об,  $[N] = 7,5$  кВт.

Соответствующая область допустимых значений  $V$  и  $S$  с изохорнами целевой функции приведена на рисунке 3.

Как видно из рисунка, при глубине резания  $t = 3$  мм (рис.3а) экстремальное значение целевой функции достигается в точке пересечения линий  $[N]$  и  $[Pz]$ . В

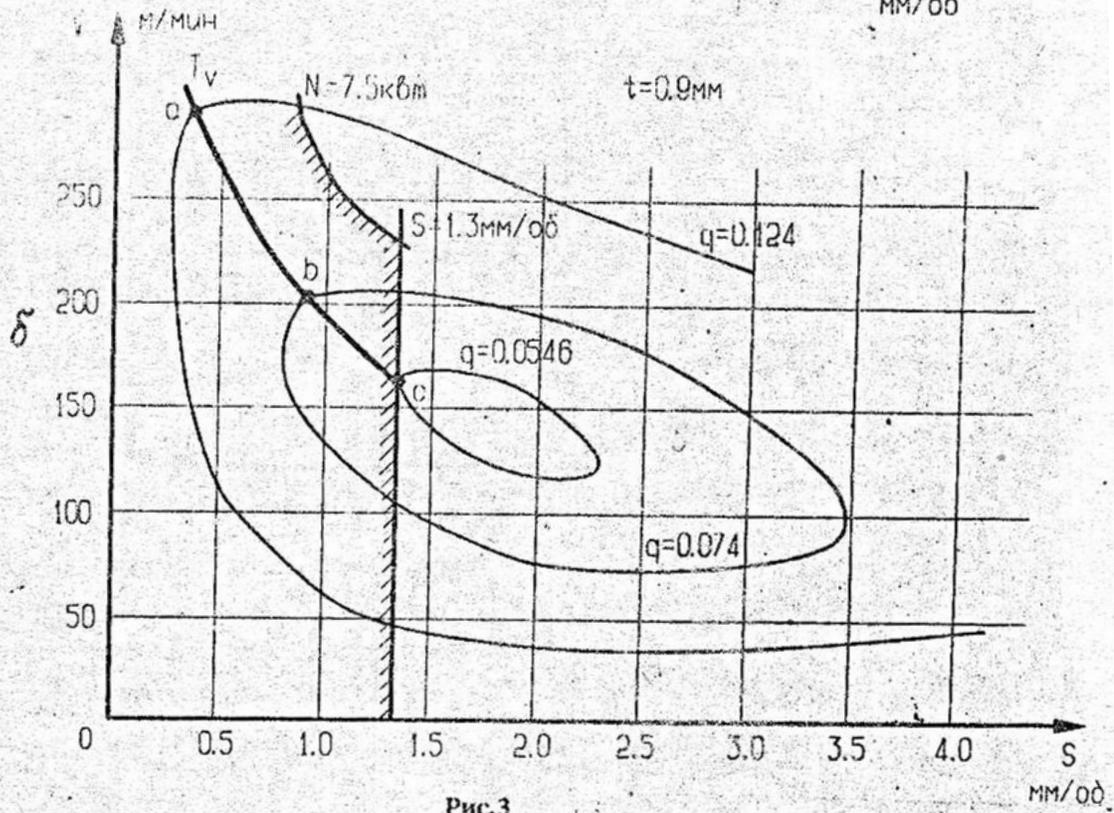
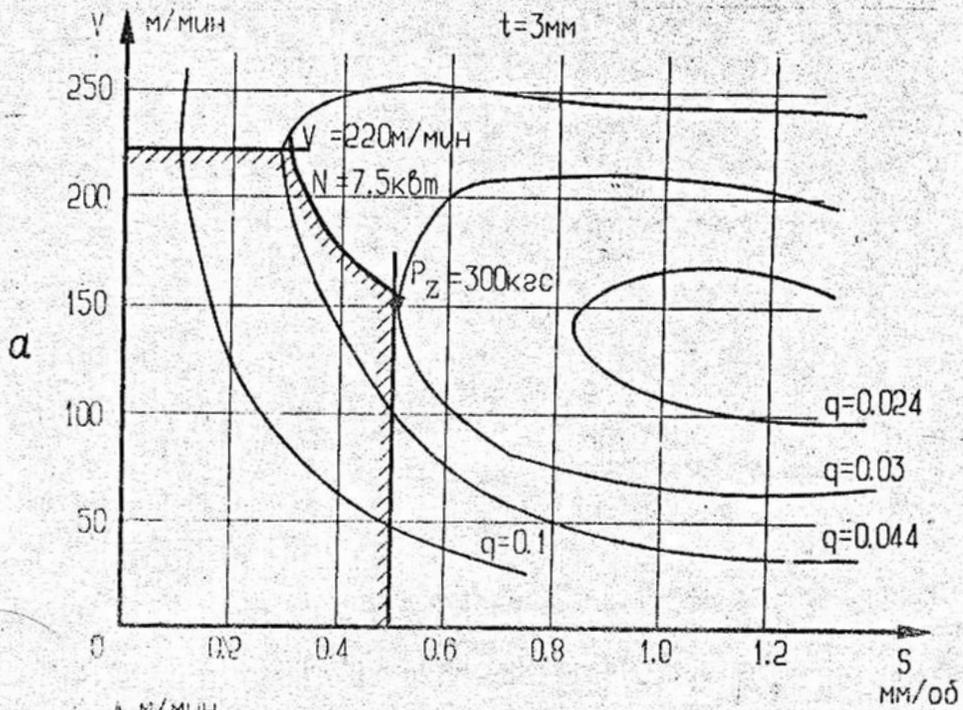
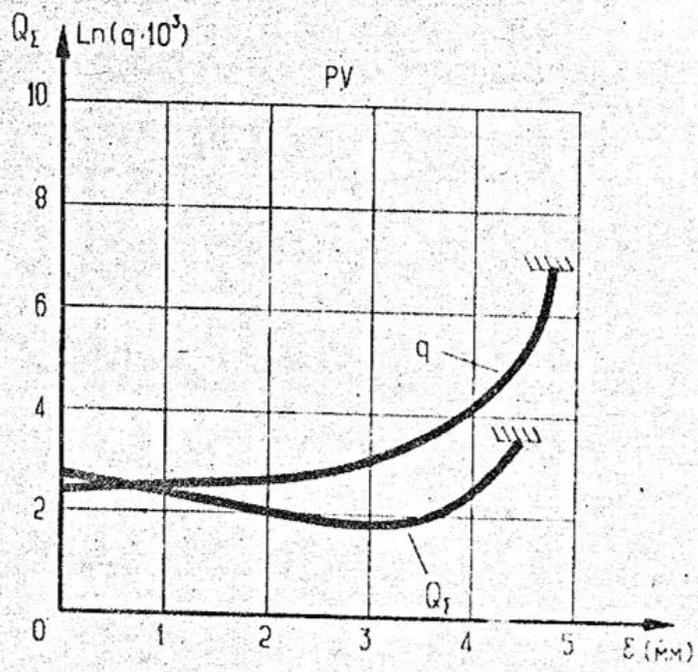
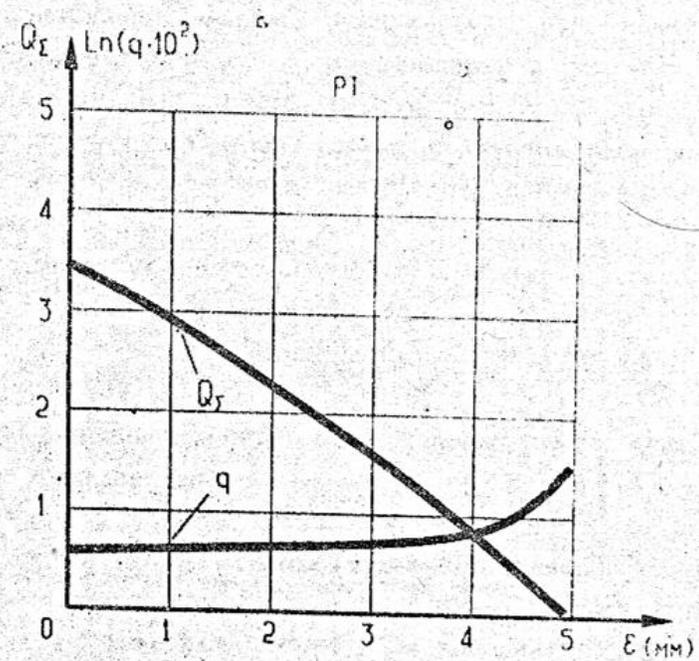


Рис.3



а)



б)

Заготовка ЭИ437Б НВ260  $\varnothing$ 100мм  
 Инструмент ВК8,  $\tau_{CM}=2$ мин.  $\gamma_n=4.5$   $E_c=6.7$ коп,  
 $P_z=300$ кас.  $V=150$ м/мин  $t=5$ мм  $0 \leq \epsilon \leq t$

Рис.4

Корреляция  
результате управление по закону  $[Pz-N]$ , т.е. при  $[Pz]=const$ ,  $N=const$  приводит к оптимизации обработки.

При изменении глубины резания  $t=0.9$  мм область деформируется (рис.36) - ограничение по  $[Pz]$  перестает быть активным и становится пассивным, а ограничение по  $[S]$ , наоборот, переходит из пассивного в активное ограничение. При этом точке оптимума соответствует пересечение ограничения  $[S]$  с линией оптимальной стойкости  $[Tv]$  (линия abc),  $\rightarrow$  44

Дадим соответствующую количественную оценку снижению эффективности управления при жестко заданных условиях оптимальности.

Из (3) с учетом (1) вытекает формула для вычисления затрат на сьем единицы объема материала в точке условного экстремума, через которую проходят линии  $[H]=const$  и  $[F]=const$ :

$$q = a \cdot t^\eta + \frac{\lambda n}{C_r} b \cdot t^\lambda, \quad (4)$$

где коэффициенты  $a, b$  и показатели степени  $\eta$  и  $\lambda$  зависят от предельных значений параметров и условий обработки.

Показатель степени  $\lambda$  в выражении (4) практически для всех условий обработки является отрицательной величиной. Следовательно, при существенном уменьшении глубины резания резко увеличивается значение второго слагаемого в (4), что означает увеличение затрат, связанных с инструментом, в связи с уменьшением стойкости инструмента. Это в свою очередь приводит к росту затрат на сьем единицы объема материала  $q(t)$ .

В результате при большой крутизне возрастания функции  $q(t)$ , несмотря на уменьшение удаляемого объема материала, связанное с уменьшением глубины резания, увеличиваются суммарные затраты на обработку. При этом чем меньше значение  $\lambda$ , тем сильнее эта зависимость.

Для закона  $[PV]$ ,  $\lambda$  в среднем колеблется в пределах  $\lambda_{PV} = -0.61 \div -1.73$ . Характер изменения  $q(t)$  и суммарных затрат на обработку  $Q_z$  приведен на рис.4а. Как видно из рисунка, крутизна возрастания  $q(t)$  настолько большая, что она оказывает преобладающее влияние на суммарные затраты по сравнению с уменьшением объема удаляемого материала. Поэтому при увеличении разброса припуска  $\xi$  и соответственно уменьшении глубины резания затраты на обработку резко увеличиваются. С увеличением предельных значений  $[P]$  и  $[V]$  эта зависимость еще более усиливается.

Для закона  $[PT]$ ,  $\lambda_{PT} = 0.04 \div 0.18$ . Характер зависимости  $q(t)$  и  $Q_z$  для тех же условий обработки приведен на рис.4б. Как видим, увеличение  $q(t)$  незначитель-

но, и оно практически не влияет на суммарные затраты  $Q_{\Sigma}$ , которые уменьшаются почти пропорционально уменьшению объема.

Для закона [SN] и [PN] соответственно  $\lambda_{SN} = -2,28-4,25$ ,  $\lambda_{PN} = -0,62-1,73$ , поэтому зависимость  $Q_{\Sigma}$  от  $q(t)$  по характеру такая же, что и в случае [PV], однако она еще более сильно выражена. Аналогичные зависимости наблюдаются и при законах [MV]

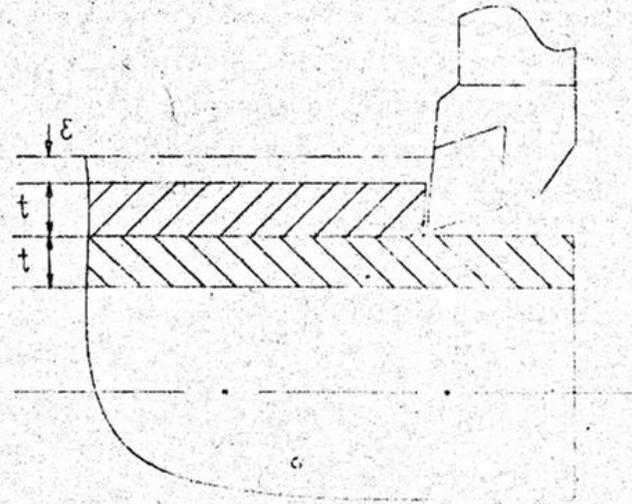


Рис.5

и [MN], для которых значения  $\lambda$  совпадают с  $\lambda_{PV}$  и  $\lambda_{PH}$  и, следовательно, характер изменения  $Q_{\Sigma}$  такой же, что и для [PV]. Для закона [MT],  $\lambda_{MT} = 0,04:0,18$  и поэтому зависимость между  $Q_{\Sigma}$  и  $q(t)$ , как и для [PT], слабо выражена.

Таким образом, из проведенного анализа видно, что двухконтурное адаптивное управление по жестко заданным условиям оптимальности для законов управления [PV], [SN], [PN], [MV], [MN] при существенном изменении глубины резания не приводит к оптимизации процесса, а наоборот, резко увеличивает затраты на обработку.

В этой связи, для расширения области функционирования двухконтурных адаптивных систем управления, в работах профессора В.Ф.Горнева предлагается использовать метод самонастройки структурных состояний (законов управления) по измененной глубине резания. Приводится т.н. функция переключения, отражающая алгоритм последовательного переключения законов управления при изменении глубины резания.

Однако такое решение проблемы связано со следующими сложностями:

1. Функционирование алгоритма, для установления пределов переключения законов, требует разработки математической модели, пригодной для точных количественных

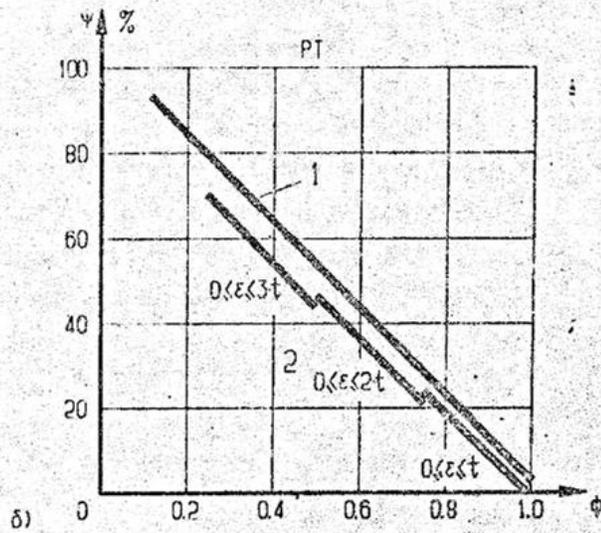
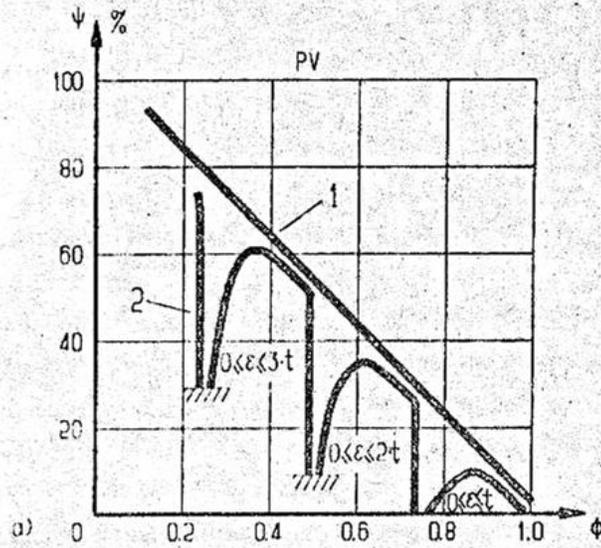


Рис.6

важных вычислений, что, учитывая нынешний уровень математической формализации процесса резания, вряд ли возможно.

2. Как отмечает В.Ф.Горнев, реализация алгоритма увеличивает время реагирования системы, в результате чего удовлетворительное управление в реальном масштабе времени не реализуется.

Таким образом, двухконтурное адаптивное управление с фиксированными геометрическими параметрами траектории перемещения инструмента обеспечивает

оптимизацию черновых проходов в относительно узком диапазоне изменения глубины резания, что связано с жестко заданными законами управления.

В свою очередь расширение диапазона системы за счет автоматического переключения законов управления по измененной глубине резания практически не реализуемо, и в настоящее время является областью всего лишь теоретических исследований.

3. Двухконтурное адаптивное управление с коррекцией траектории перемещения инструмента

При этом для фактического значения припуска предварительно определяются число проходов, глубина резания на каждом проходе и геометрические параметры траектории перемещения инструмента (рис.5). Управление режимами осуществляется по жестко заданным законам для скорректированной глубины резания на каждом проходе.

В результате изменение припуска на величину  $\epsilon$  не обуславливает существенное изменение глубины резания, как это было в предыдущем случае двухконтурного адаптивного управления. Значение  $\epsilon$  перераспределяется на проходы. Вследствие чего фактическая глубина резания  $t_f$  на каждом проходе не уменьшается до значения, после которого увеличение затрат на сьем единицы объема материала, связанное с управлением по жестко заданным законам, имело бы значительное влияние на суммарные затраты обработки. В результате затраты уменьшаются пропорционально уменьшению объема удаляемого материала.

Соответствующие кривые эффективности двухконтурного адаптивного управления с коррекцией траектории и без коррекции траектории, выраженные в функциональной зависимости  $\Psi = F(N/(N + \epsilon))$ , приведены на рисунке 6а.

Здесь  $\Psi = (Q_5/Q_4)100\%$  отражает эффективность управления, где  $Q_5$ -затраты до коррекции,  $Q_4$ -затраты после коррекции.  $N$  - суммарный припуск на обработку.

Как видно из рисунка; при двухконтурном адаптивном управлении по жестко заданным законам управления и с коррекцией траектории (кривая 1), даже при значительных колебаниях припуска, когда  $0 \leq \epsilon \leq 2t$ ,  $0 \leq \epsilon \leq 3t$  и т.д., для законов управления [PV], [SN], [PN], [MV], [MN] суммарные затраты на обработку уменьшаются пропорционально уменьшению объема удаляемого материала, что не имеет место при двухконтурном адаптивном управлении без коррекции траектории, где наблюдаются т.н. "критические" значения глубины резания, при которых эффективность управления резко уменьшается (кривая 2).

Для законов [PT] и [MT] (рис.6б) отличия между методами оптимизации практически нет, если не считать затраты, связанные с быстрыми перемещениями инструмента. Поэтому коррекция траектории практически не имеет смысла, так как скорость быстрого перемещения для современных станков с ЧПУ может достигать от 16 м/мин до 25 м/мин и затраты на быстром перемещении при таких скоростях незначительны.

Практическая реализация оперативного вычисления числа проходов по фактическому припуску, глубины резания и геометрических параметров траектории перемещения инструмента перед началом обработки, возможна с использованием систем ЧПУ класса CNC, в которых для заданных в управляющей программе входных параметров производится интерпретация алгоритмов расчета траектории. Эти алгоритмы в CNC могут быть заданы в виде библиотеки стандартных подпрограмм обработки и вызываться при помощи макрокоманд управляющей программы.

Таким образом, двухконтурное адаптивное управление с коррекцией траектории перемещения инструмента расширяет диапазон компенсации изменения припуска на обработку при адаптивном управлении с жестко заданными законами управления, и является более эффективным и сравнительно легко реализуемым методом оптимизации черновых проходов.

Выводы 1. При оптимизации черновых проходов траектория перемещения инструмента для законов управления [PV], [SN], [PN], [MV], [MN] находится в непрерывной зависимости от изменения припуска. Это означает, что для фактического значения припуска определение числа проходов, глубины резания на каждом проходе и геометрических параметров траектории обеспечивает наилучшую эффективность двухконтурного адаптивного управления.

2. При оптимизации черновых проходов по законам управления [PT], [MT] траектория перемещения инструмента может находиться в дискретной зависимости от изменения припуска, так как коррекция траектории не приводит к существенному увеличению эффективности двухконтурного адаптивного управления.

#### ლიტერატურა-ЛИТЕРАТУРА-REFERENCES

1. Daneshmend L. K., Pak H. A. Model reference adaptive control of feed force in turning/Transaction ASME. J. Dyn. system meas. and control. -1986. -vol. 108, n.3.-p. 215-222.

2. Герман И.В., Матуха С.Л., Рутштейн В.Г. Адаптивная система управления для токарных станков с ЧПУ //Станки и инструмент, 1978, N 6, с.12-13.

3.Тверской М.М. Автоматическое управление режимами обработки деталей на станках. М.:Машиностроение,1982.-208 с.

4.Рубашкин И.Б.,Алешин А.А. Микропроцессорное управление режимом металлообработки. М.,1989.-160 с.

Кафедра технологии машиностроения

Поступила в редакцию

25.01.1994

შპა 621.865

ბ.ჭელიძე

სამრეწველო რობოტის უმტყუნებო მუშაობის დროის განსაზღვრა

მანქანათა მუშაობისას მათი ნაწილები განიცდის ცვეთას და ისინი მანამდე იმყოფებ შრომისუნარიან მდგომარეობაში, სანამ მათი გეომეტრიული პარამეტრები არ გამოვ დასაშვები ზღვრებიდან. ნათელია, რომ ამ ზღვრების დარღვევისას ხდება ნაწილთ მტყუნება, რაც, თავის მხრივ, იწვევს მთლიანად მანქანის მტყუნებას. ამიტომ, სამრეწველო რობოტის საიმედო ფუნქციონირების აღსანერად აუცილებელი ხდება გათვალისწინებული იქნას როგორც შემთხვევითი ცდომილებები, ისე მანქანების დაძველება, ვაშლიწვეულ ნაწილების ცვეთით და მასალების დაღლილობით.

როგორც ცნობილია, ცდომილებები, გამოწვეული მანქანების დაძველებით, [1] საკმაოდ კარგად აღინერება განაწილების ნორმალური კანონით

$$P(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_t^{\infty} e^{-\frac{(\tau - T_0)^2}{2\sigma^2}} d\tau,$$

სადაც  $P(t)$  არის იმის ალბათობა, რომ უმტყუნებო მუშაობას ადგილი ექნება  $t$  დრო განმავლობაში;  $T_0$  და  $\sigma$  - შესაბამისად უმტყუნებო მუშაობის დროის მათემატიკური ლოდინი და საშუალო კვადრატული გადახრა.

მეორე მხრივ კი, რთული სისტემებისათვის, როდესაც მტყუნებათა ინტენსიურობა გამოწვეულია მავომპლექტებული ელემენტების მტყუნებებით, უმტყუნებო მუშაობის დრო აღინერება ექსპონენციალური კანონით [2,3].

ამრიგად, სამრეწველო რობოტი შეგვიძლია განვიხილოთ როგორც თითქოს ორ ნაწილისაგან შედგენილი, რომელთაგანაც ერთ მათგანში შეიძლება მოხდეს მხოლოდ