

- Існує можливість передбачення загальної стійкості інструмента;
- Введення енергетичного ранжування надає можливість спрощеного контролю та передбачення стану інструмента;
- Визначення поведінки функцій коефіцієнтів  $k_{\omega}$ ,  $k_h$  надає можливість ідентифікації процесів у зоні різання.

Перспективами подальших наукових досліджень є вирішення проблеми передбачення можливих надзвичайних ситуацій технологічного процесу в зоні обробки матеріалу, тобто ідентифікація зв'язку енергетичних функціональних залежностей з руйнаціями інструмента та можливими технологічними помилками у визначенні режимів обробки, невірно затиснутого інструмента, перевантажень через помилки програмування, руйнації обладнання тощо.

### **Література**

1. Металлорежущие инструменты. Учебник для вузов по специальностям «Технология машиностроения» Г.Н. Сахаров, О.Б. Арбузов, Ю.Л. Боровой и др. –М.: Машиностроение, 1989. –328 с.: ил.
2. Лоладзе Т.Н. Прочность и износостойкость режущего инструмента. –М.: Машиностроение, 1982. –320 с.
3. Армарего И.Дж.А., Браун Р.Х. Обработка металлов резанием. Пер. с англ. В.А. Пастунова. –М.: Машиностроение, 1977. – 325 с.
4. Ю.Г. Кабалдин. Энергетические принципы управления процессами механообработки в автоматизированном производстве // Вестник машиностроения. –1993. –№1. –С. 37 – 42.
5. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. – 13-е изд., исправленное. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. – 544 с.
6. Жарков И.Г. Вибрации при обработке лезвийным инструментом. –Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1986. –184 с.: ил.

Скицюк В.И., Ключко М.М., Цирук В.Г. <b>Модель энергетики процесса металлообработки</b> Статья посвящена вопросам создания модели энергетических преобразований, которые возникают в процессе механообработки металлов, на примере токарной обработки. Моделирование энергетики резания металлов необходимо для дальнейшего прогнозирования состояния РИ во время резания	Skytsiouk V., Klotchko M., Zyruk V. <b>The model of the metal working energetic</b> In work state the creation of the energetic transformation model at the processing machining metal working, for example, turning working. Modelling of the cutting metal energy it is necessary for the further technologic forecasting of the cutting tool at the cutting
--	---

*Надійшла до редакції  
20 липня 2005 року*

УДК 621.924

## **ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ПРОЦЕССА МЕХАНООБРАБОТКИ ПУТЁМ СТАБИЛИЗАЦИИ ДИНАМИКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОБРАБАТЫВАЮЩЕЙ СИСТЕМЫ**

*Гнатейко Н.В., Румбешта В.А., Никитчук Е.А., Национальный технический университет  
Украины “Киевский политехнический институт”, г. Киев, Украина*

*Статья содержит анализ динамических явлений при механообработке и методику их*

*стабилизации в обрабатывающей системе путем применения принципа динамического противофазового гашения виброколебаний упругой механической системы станка и увода её неизбежных вибраций из резонансных зон за счет целенаправленного изменения режимов обработки, что значительно повышает качество процесса*

## **Введение**

В современном приборостроении и машиностроении резко возрастают требования к качеству изделий, чего требуют условия конъюнктурности мирового рынка. В свою очередь качество изделий во многом определяется качеством изготовления деталей: точностью размеров и геометрии поверхностей и чистотой их обработки. Достичь высоких показателей по таким характеристикам качества на основных процессах механообработки: точении, фрезеровании и сверлении, на долю которых приходится около 80% общей трудоемкости изготовления деталей, при сохранении высокой производительности, очень трудно.

Ученые всего мира на протяжении длительного времени постоянно занимаются решением проблемы повышения качества процесса механообработки. Разработаны и исследованы множества основных направлений достижения данной цели, такие как: повышение качества режущего инструмента, его износостойкости при резании; оптимизация режимов и схем обработки; создание систем автоматического контроля и диагностики качества процесса механообработки (ПМО); разработка систем поднастройки технологических обрабатывающих систем (ТОС) и др.

В последнее время все чаще появляются научные работы по исследованию влияния на качество механообработки динамических процессов в ТОС, проявляющихся в виде различного рода виброколебаний разной энергетической мощности и с широким спектром частот.

## **Постановка задачи**

Во многих научных работах, в частности [1-4], установлено, что возникновение динамических явлений в ТОС при механообработке является следствием энергетической неустойчивости самого процесса резания и упругой податливости обрабатывающей системы.

Исследованы подробно [5] причины неустойчивости характеристик процесса механообработки при точении. Установлено, что первопричиной возникновения динамических явлений в виде виброколебаний в ТОС является неустойчивость величины силы резания, её динамическая составляющая  $\Delta \vec{P}_\delta(\tau)$ , которая квазипериодически меняет суммарную величину силы резания  $\vec{P}_{P\Sigma}(\tau)$  в виде:

$$\vec{P}_{P\Sigma}(\tau) = \vec{P}_{cm} + \Delta \vec{P}_\delta(\tau), \quad (1)$$

где  $\vec{P}_{cm}$  - основная стабильная величина силы резания,

$\tau$  - текущее время обработки.

Возникновение динамической переменной составляющей  $\Delta \vec{P}_\delta(\tau)$  обусловлено изменением величин ряда параметров процесса резания металлов, а именно:

1. Колебанием толщины срезаемого припуска  $\Delta t$  из-за погрешности формы заготовки и её смещением при установке и закреплении на станке.
2. Изменением прочности поверхности заготовки  $\Delta HВ$  в её различных местах от предварительных операций.
3. Фрикционными колебаниями силы трения  $\Delta f'_{mp}$  между заготовкой и поверхностями режущего инструмента.
4. Периодическим сколом при стружкообразовании  $T_p$
5. Влиянием нарастающего износа вершины инструмента и возникновением из-за этого дополнительного нарастающего прерывистого трения износа  $\Delta f''_{mp}$  по задней поверхности режущего инструмента.

Таким образом, возникает первый динамический фронт в виде динамики резания, как функция ряда фактов  $\Phi$ :

$$\Delta \vec{P}_o(\tau) = \varphi(\Delta t; \Delta HВ; \Delta f'_{mp}; \Delta f''_{mp}; T_p) = \varphi(\vec{\Phi}_\Sigma). \quad (2)$$

Динамическая составляющая силы резания  $\Delta \vec{P}_o(\tau)$  через инструмент и деталь, находящихся между собой в свободной упруго-вязкой связи процесса резания, раскачивает рабочие элементы нежесткой, упруго-диссипативной системы станка, возбуждая в ней вторичный динамический фронт в виде автоколебательного процесса. Это формирует динамический, суммарный вектор сил упругих колебаний  $\vec{F}_{o\Sigma}(\tau)$ , который функционально определяется своим рядом факторов в виде:

$$\vec{F}_{o\Sigma}(\tau) = \varphi(\vec{P}_{p\Sigma}(\tau); M; C; H), \quad (3)$$

где  $M, C, H$  – масса, упругая жесткость и демпфирующе-диссипативные свойства механической системы станка.

Автоколебательный процесс ТОС вызывает колебания инструмента относительно детали. Эти периодические взаимные смещения в нормальном направлении величиной  $Y$  [2] влияют на формообразование геометрии обрабатываемой поверхности детали и вызывают динамические геометрические погрешности обработки в виде изменений величины радиуса-вектора  $\Delta \vec{r}_o$  поверхности детали.

Таким образом, во время механообработки в ТОС возникают два динамических фронта: от динамики процесса резания (как вынужденные колебания) и автоколебательного процесса упругой системы станка. Каждый из них формируется своими возмущающими факторами, (2) и (3), имеющими различные частотно-временные характеристики и энергетические уровни проявления. Все эти факторы возмущения динамики при обработке, накладываясь друг на друга, суммируются в зоне контакта режущего инструмента и детали, образуя широкий спектр колебательных процессов со своими амплитудно-частотными характеристиками (АЧХ) от самых низкочастотных, равных числу оборотов шпинделя станка в секунду, до высокочастотных, достигающих,  $10 \div 20$  кГц и выше, где уже играют роль виброакустические явления в элементах ТОС [4].

Как показали научно-исследовательские работы на кафедре производства приборов НТУУ “КПИ”, на формирование геометрии обрабатываемой поверхности детали, определяющей её качество, различные по величине и частоте ко-

лебания элементов ТОС влияют по разному [5].

Так низкочастотные квазипериодические колебания главных элементов ТОС – суппорта с режущим инструментом и шпиндельного узла с деталью - в нормальном направлении по оси  $Y-Y$  к обрабатываемой поверхности детали по причине изменения припуска  $\Delta t$  и прочности детали  $\Delta HB$ , и автоколебаний этих рабочих органов станка, обладающие наибольшими амплитудами и энергией приводят к взаимному смещению инструмента и детали и образованию геометрических погрешностей обработки  $\Delta r(\tau)$ , определяющих её точность.

В то же время высокочастотные колебания ТОС от изменения  $\Delta \bar{P}_o(\tau)$  по причине периодичности стружкообразования  $Tr$  и фрикционных явлений  $\Delta f_{mp}'$  и  $\Delta f_{mp}''$  релаксационного характера (2), а также высокочастотных автоколебаний мелких элементов станка, формирующих в совокупности весь высокочастотный спектр виброколебаний и виброакустических явлений в системе, образуют на обрабатываемой поверхности детали всю микрогеометрию, то есть шероховатость  $\Delta Ra$ .

Поэтому разработка эффективных универсальных методов стабилизации динамики ТОС при обработке позволит в определенной степени уменьшить влияние всех вышеописанных динамических процессов и тем самым повысить качество механической обработки деталей.

### **Система стабилизации динамики ТОС**

На основании вышеизложенного можно сделать вывод, что при механообработке процесс резания и упруго-механическая система ТОС совместно образуют сложную многопараметрическую и многофункциональную преобразующую систему со многими переменными факторами (2), приводящими в итоге к её неустойчивости и нарушению качества.

Также установлено, что во время обработки в этой обрабатывающей системе противодействуют два динамических фронта в виде общего суммарного вектора динамических сил резания  $\vec{P}_{p\Sigma}(\tau)$  (1) и динамического суммарного вектора сил упругих колебаний элементов станка  $\vec{F}_{o\Sigma}(\tau)$  (3). Это взаимодействие и взаимовлияние можно условно представить в виде:

$$\left| \vec{P}_{p\Sigma}(\tau) \right| \Leftrightarrow \left[ \vec{F}_{o\Sigma} \right]. \quad (4)$$

Анализ этого взаимодействия показывает, что если данные векторы сил начнут совпадать по направлению и времени, то динамические явления в ТОС начнут возрастать и наступит резонанс, который приводит к потере устойчивости процесса механообработки и его качества. В то же время, если добиться противодействия этих двух динамических систем за счёт противостояния векторов сил, то можно в какой-то степени динамические процессы и в зоне резания, и в упругой системе станка (УСС) уменьшить, используя принцип динамического взаимогашения колебаний. Это стабилизирует ТОС и устранит негативное влияние динамики в системе на качество обработки. Для этого рассмотрим задействованные параметры этих двух динамических процессов.

Математически такое взаимодействие двух динамических режимов в нормальном направлении к детали по оси  $Y-Y$ , как наиболее влияющим на качество обработки, можно описать математической моделью в общепринятом изображении системы двух уравнений в виде:

$$\begin{cases} T_p \frac{dP_y(\tau)}{d\tau} + P_y(\tau) = -K_p y, \\ M \frac{d^2 y}{d\tau^2} + H \frac{dy}{d\tau} + Cy = f_{mp} P_y(\tau); \end{cases} \quad (5)$$

где  $T_p$  – время периодичности стружкообразования;

$K_p$  – коэффициент жесткости резания, как  $K_p = P_y/t$  (где  $t$  – глубина резания);

$y$  – величина периодического смещения инструмента относительно детали по оси  $Y-Y$  из-за упругих колебаний ТОС.

Первое уравнение системы описывает динамику процесса резания из-за переменных  $T_p$  и  $\Delta t$ , а второе – динамику станка со своими параметрами  $M$ ,  $H$ ,  $C$  под воздействием переменной силы  $P_y(\tau)$  и прерывистого трения.

Сила резания при точении определяется по известной формуле следующими параметрами по зависимости:

$$P_y = C_{py} * t * S_0^{0.75} * HB^m * V^{0.28}, \quad (6)$$

где  $C_{py}$  – силовой коэффициент геометрии резания;

$V$  – скорость резания, определяющая число оборотов шпинделя в секунду.

В этом выражении параметры  $t$  и  $HB$  переменны (2) и заданы технологией. Параметр  $S_0$  – подача инструмента на оборот детали – имеет узкий диапазон изменения. А вот скорость резания  $V$  в современных станках с ЧПУ регулируется легко и плавно, автоматически в любую сторону в широких пределах. В то же время она в основном определяет частоту изменения силы резания  $\Delta P_o(\tau)$  от основных возбудителей динамики –  $\Delta t$  и  $\Delta HB$  (2). Второе уравнение в системе (5), описывающее динамику станка, показывает, что колебания в ней во многом определяются постоянными динамическими характеристиками  $M$ ,  $H$ ,  $C$  (3), хотя искажаются в некоторой степени  $\Delta P_o(\tau)$ , а энергия таких колебаний зависит от  $P_r(\tau)$ .

Таким образом, было установлено и экспериментально подтверждено, что фазово-частотными характеристиками процесса резания возможно целенаправленно управлять в процессе механообработки путём определенного изменения скорости  $V$ , через изменения числа оборотов шпинделя станка. В то же время динамические процессы в ТОС более инертны к таким переменам. Это возможно получить за счёт определенного фазового сдвига основной гармонике квазипериодических колебаний силы резания  $P_r(\tau)$  противодействие двух динамических процессов в ПМО и ТОС (4) и тем самым до определенной степени стабилизировать всю обрабатывающую систему и тем самым повысить качество обработки деталей.

Параметрическую схему такой стабилизации ТОС можно упрощенно представить в виде:

$$|\vec{V} \pm \Delta \vec{V}| \rightarrow |\vec{P}_y(\tau)| \rightarrow |\vec{\varphi}_p(\tau)| \rightarrow |\vec{F}_{\partial\Sigma}(\tau)| \rightarrow |\vec{Y}(\tau)| \rightarrow |\Delta \vec{r}(\tau)|, \quad (7)$$

где  $\vec{\varphi}_p(\tau)$  - фазовые сдвиги вектора силы резания относительно вектора сил упругих колебаний ТОС;  $\Delta \vec{r}(\tau)$  - динамические погрешности профиля поверхности обрабатываемой детали.

На основании полученных результатов была разработана виброакустическая система контроля динамики и стабилизации ТОС при точении на токарном станке с ЧПУ марки АТПК – 125. Как показали проведенные испытания этой системы, виброакустический сигнал  $G(\tau)$ , снимаемый с ТОС при помощи стандартных пьезоакселерометров, позволяет получить полную картину всех динамических процессов в обрабатываемой системе в широком диапазоне виброчастот.

На рис. 1 показана функционально-параметрическая схема стабилизации процесса механообработки по принципу динамического противофазового гашения двух динамических процессов в ТОС и, за счёт этого, управления его качеством путём уменьшения динамических погрешностей макронеровностей поверхностей  $\Delta r$  и её шероховатости  $\Delta Ra$ , где вектор  $\vec{r}(\tau)$  - радиус-вектор формирования профиля поверхности детали.

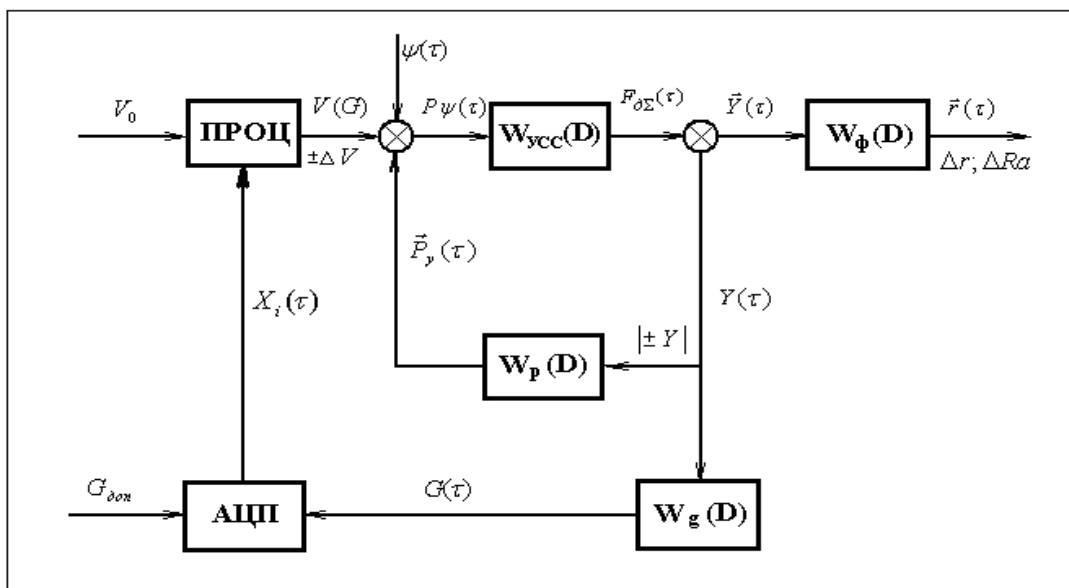


Рисунок 1 - Функционально-параметрическая схема стабилизации ТОС и управления качеством механообработки точением

На схеме при таком управлении представлено четыре динамические составляющие этой автоматически-поисковой системы обозначенных через динамические операторы  $W(D)$  по времени изображением по Лапласу, представляющие собой преобразующие передаточные функции между главными параметрами всей системы.

$W_p(D) = \frac{dP_y(\tau)}{d(\Delta t, T_p; \Delta f_{mp})(\tau)}$  - оператор динамики процесса резания, возбудителя колебаний в ТОС;

$W_{ycc}(D) = \frac{dY(\tau)}{dP_y(\tau)}$  - оператор динамики автоколебаний в упругой системе станка с амплитудой  $Y(\tau)$ ;

$W_\phi(D) = \frac{dr(\tau)}{dy(\tau)}$  - оператор динамики формообразования поверхности детали с колебаниями  $\Delta r$  и  $\Delta R_a$ ;

$W_g(D) = \frac{dG(\tau)}{dY(\tau)}$  - оператор динамики возбуждения виброакустического датчика с сигналом  $G(\tau)$ ;

$D$  – временной оператор ( $D = d/dt$ ).

На рис. 2 представлен приведенный алгоритм работы такой поисковой системы стабилизации путём мониторинга динамики ТОС во время механообработки, который имеет три уровня. На верхнем уровне для повышения достоверности ведётся контроль годности процесса механообработки с помощью анализа виброакустического сигнала  $G(\tau)$  из системы. Ниже на втором уровне производится поиск необходимой величины скорости резания ( $\pm \Delta V$ ) для гашения динамики в ТОС. На нижнем третьем уровне производится проверка качества процесса механообработки, его надёжности.

### **Выводы**

На основе разработанной методики стабилизации процесса механической обработки по принципу динамического противофазового гашения динамических явлений в ТОС была создана автоматическая поисковая система стабилизации ТОС и управления качеством ПМО на основе виброакустической системы контроля. Перспективным направлением дальнейших исследований является мониторинг динамических процессов в системе, подбор режимов резания и их анализ, что значительно уменьшает виброколебания и тем самым повышает качество процесса точения.

### **Литература**

1. Каширин А.И. Вопросы устойчивости рабочего движения при обработке металлов резанием // Сб. "Исследование колебаний металлорежущих станков при обработке". Гл.IV. – М.: Машгиз, 1958. – С.300 - 380
2. Кудинов В.А. Влияние деформируемости системы станок-деталь-инструмент на производительность, точность и чистоту поверхности детали. – М.: 1963, НТП «Машиностроение». - 64 с.
3. Лазарев Г.С. Устойчивость процесса резания металлов. - М.: Высшая школа, 1973. - 184с.
4. Гнатейко Н.В. Исследование колебательного процесса станка при механической обработке // Сб. «Перспективные технологии, оснастка и методология, подготовка производства». –К.:НТУУ «КПИ», 1997. - С.61-64.

5. Гнатейко Н.В., Румбешта В.А. Анализ динамической устойчивости обрабатывающей системы // Вибрация в технике и технологии. -Винница. -1999. - № 12. - С.28-30.
6. Гнатейко Н.В., Румбешта В.А.Методика керування динамікою обробної механічної системи. // Наукові вісті. НТУУ «КПІ». -2003. - № 6.-С.55-58.

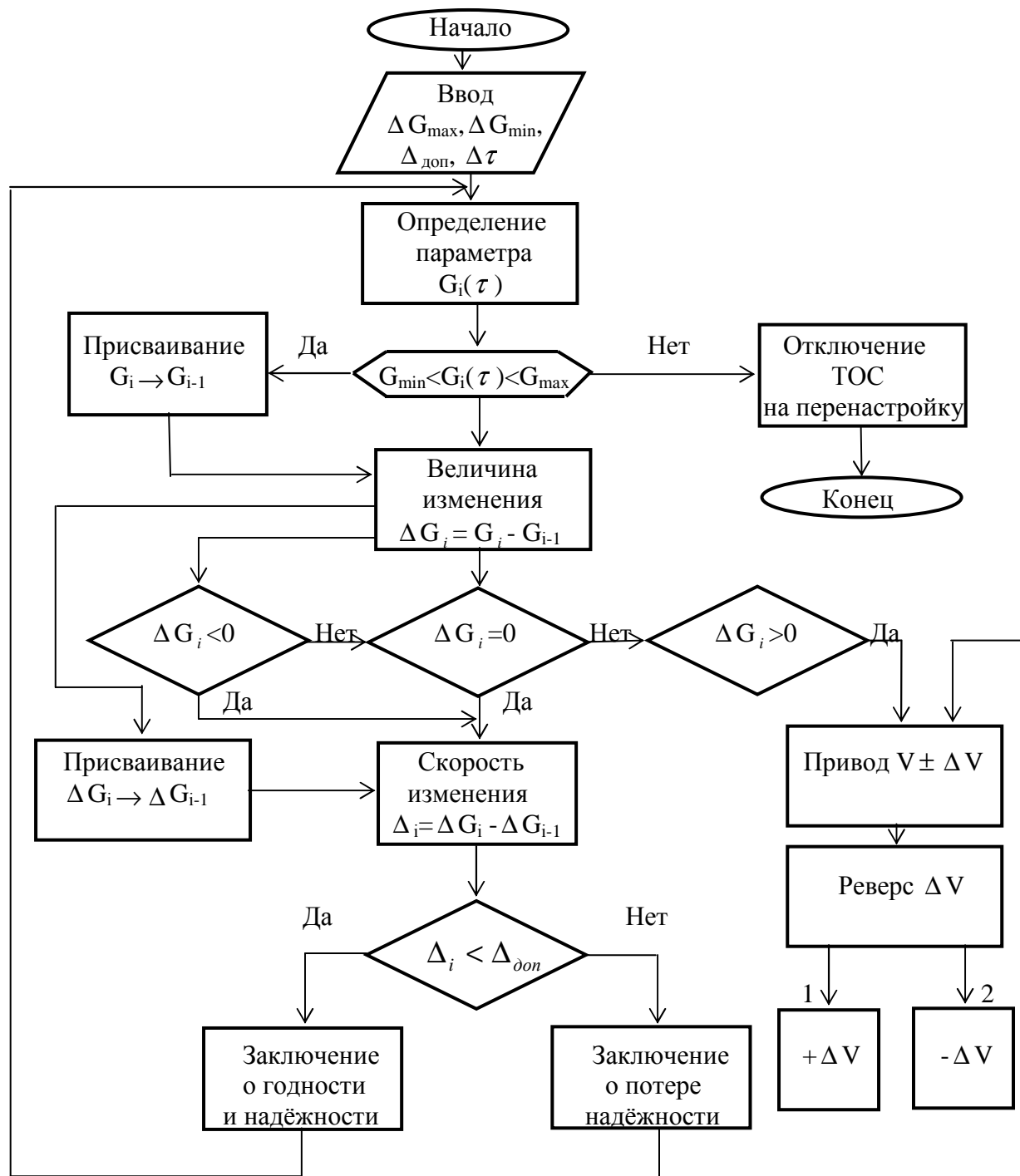


Рисунок 2 - Приведенный алгоритм работы системы стабилизации ТОС при обработке



Гнатейко Н.В., Румбешта В.О., Никитчук Е.А. Підвищення якості процесу механообробки шляхом стабілізації динаміки технологічної оброблювальної системи Стаття містить аналіз динамічних явищ при механообробці і методику їхньої стабілізації в обробляючій системі шляхом застосування принципу динамічного протифазного гашення віброколиваний пружної механічної системи верстата і уведення її вібрацій, що не можливо уникнути, з резонансних зон за рахунок цілеспрямованої зміни режимів обробки, що значно підвищує якість процесу.	Gnatejko N.V., Rumbeshta V.A., Nikitchuk E.A. The quality improvement of machining by stabilization of dynamics of the technological processing system The article contains the analysis of the dynamic phenomena at machining and a technique of their stabilization in processing system by application of a principle of dynamic opposite on a phase clearing of vibrating fluctuations of elastic mechanical system of the machine tool and withdrawal of its inevitable vibrations from resonant zones by purposeful change of modes of processing, that considerably raises quality of process
---	---

*Надійшло до редакції  
20 травня 2005 року*

## **АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА ІНТЕЛЕКТУАЛІЗАЦІЯ ПРИЛАДОБУДУВАННЯ**

УДК 658.512.2.011.67.004:681.586.32

### **СПЕЦІАЛІЗОВАНИЙ ПРОГРАМНИЙ ПРОДУКТ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ Й ОПТИМІЗАЦІЇ ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК АКСЕЛЕРОМЕТРІВ**

*Беспалов В.О., Дубінець В.І., Гераїмчук М.Д., Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», м.Київ, Україна*

*У статті розглядається будова та основні характеристики спеціалізованого програмного продукту WinAksel МПКА, що може бути основним засобом для дослідження й оптимізації основних параметрів компенсаційних акселерометрів*

#### **Вступ. Постановка задачі**

Для проектування різного типу вимірювальних перетворювачів (ВП) потрібно детальне вивчення впливу зміни конструктивних параметрів даного вимірювального перетворювача на його метрологічні характеристики, зокрема - динамічні характеристики. Математична модель ВП є досить складною, тому доцільно використання обчислювальної техніки, що значно прискорює процес проектування і дослідження. Істотне значення, при використанні обчислювальної техніки, має обґрунтований вибір прикладного програмного забезпечення для вирішення тієї чи іншої задачі. У випадку невірної вибору програмного забезпечення процес проектування і дослідження може затягтися на досить тривалий проміжок часу, у наслідок чого можуть бути зроблені висновки про недоцільність і складність використання обчислювальної техніки. Так само потрібно відзначити, що один програмний продукт не може вирішити всіх задач, тому потрібно використовувати кілька програмних продуктів, результати використання яких поєднуються в єдине ціле.

До початку розробки спеціалізованого програмного продукту для дослідження й оптимізації динамічних характеристик акселерометрів вже існувало декілька