

УДК 621.923

С.Е. Сазонов, ассистент,

С.М. Братан, профессор, д-р техн. наук

Севастопольский национальный технический университет

ул. Университетская, 33, г. Севастополь, Украина, 99053

E-mail: tm@sevntu.com.ua

УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ ДОВОДКИ ПРЕЦИЗИОННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Предложены циклы управления операцией доводки шеек маятников акселерометров, разработана установка, позволяющая вести двухстороннюю обработку по разработанным циклам с учетом построенных ограничений.

Ключевые слова: доводка, усилие прижима, доводочная паста, цикл обработки, установка для доводки, режимы обработки.

Современный уровень развития техники характеризуется повышением требований к качеству механизмов и машин. Важнейшими факторами, определяющими потребительские качества, долговечность, надежность и точность работы машин и приборов, являются погрешности размеров, отклонения формы, шероховатость, волнистость поверхностей и др. При изготовлении широкого класса деталей машин и приборов, нужно с одной стороны выдерживать высокие требования по качеству получения геометрических размеров, шероховатости и физико-механическому состоянию поверхностного слоя, с другой стороны повышать производительность их выпуска в связи с требованиями рынка. Ставится задача не только повысить точность изготовления деталей в целом, но и обеспечить стабильность их параметров.

Целью данной работы является разработка методики управления процессом доводки прецизионных поверхностей деталей приборов.

Обзор существующих технологических процессов, применяемых для доводки прецизионных поверхностей на производстве показывает, что для управления процессом доводки перемычек маятников акселерометров может выступать усилие прижима притира к заготовке, окружная скорость поверхности притира и зернистость доводочной пасты.

В начальный период обработки при силовом воздействии зерна доводочной пасты внедряются в поверхность притира и заготовки пропорционально их твердости. Усилие прижима почти полностью расходуется на приращение упругих деформаций системы и глубины резания. Начальное состояние процесса характеризуется исходным состоянием рабочей поверхности инструмента и заготовки, которое определяется их параметрами шероховатости и твердостью поверхностного слоя. Конечное – максимально допустимой шероховатостью Ra_{np} и точностью формы притира Δ_{np} , при которых не обеспечивается заданная точность либо шероховатость поверхности, при которых эксплуатация изделия становится невозможной.

Состояние заготовки, после j -го контакта притира шаржированного алмазными зернами задается текущим радиус-вектором $r_j(\alpha)$ канавки (или толщиной перемычки h_j при двухсторонней обработке), где α – полярный угол; пространственными отклонениями Δ_j ; наибольшей высотой профиля шероховатости $R_{max j}$; глубиной дефектного слоя h_{dj} .

Текущий радиус-вектор канавки после j -го оборота

$$r_j(\alpha) = r_{j-1}(\alpha) - \Delta r_j(\alpha) \quad (1)$$

или толщина перемычки

$$h_j = h_{j-1} - \Delta r_j(\alpha) \quad (2)$$

вычисляется по их значениям после j -го оборота и величине радиального съема материала $\Delta r_j(\alpha)$.

Отклонения формы канавки после j -го контакта определяются разностью между максимальным и минимальным значениями радиусов векторов притира

$$\Delta_j = \frac{\max}{\alpha} r_j(\alpha) - \frac{\min}{\alpha} r_j(\alpha). \quad (3)$$

Текущее значение высоты профиля шероховатости поверхности детали, отсчитываемое от линии выступов шероховатости имеет вид

$$R_{max j} = R_{max j-1} - \Delta r. \quad (4)$$

Для глубины дефектного слоя h_d , независимо от (4), но с теми же обозначениями

$$h_{dj} = h_{dj-1} + R_{\max j-1} - R_{\max j} - \Delta r_j. \quad (5)$$

Текущий припуск после j -го оборота вычисляется по его значению после $j-1$ го оборота и величине радиального съема материала Δr_j

$$\Pi_j = \Pi_{j-1} - \Delta r_j. \quad (6)$$

Начальное состояние объекта соответствует параметрам заготовки в момент ее установки на станок

$$\begin{aligned} r_o(\alpha) &= r_{\text{канавки}}(\alpha); & \Delta_o &= \Delta_{\text{канавки}}; \\ R_{\max 0} &= R_{\max \text{заг}}; & h_{d0} &= h_{\text{дза}}. \end{aligned} \quad (7)$$

Конечное состояние (k) объекта должно соответствовать техническим требованиям на деталь

$$h_{\max \text{пер}} \geq h_{\text{пер}} \geq h_{\min \text{пер}}, \quad (8)$$

где $h_{\max \text{пер}} - h_{\min \text{пер}} = \delta$, δ – допуск на изготовление детали.

$$\begin{aligned} \Delta_k &\leq \Delta_{\text{доп}}; & R_{\max k} &\leq R_{\max \text{доп}}; \\ Ra_k &\leq Ra_{\text{доп}}; & h_{dk} &\leq h_{\text{доп}}. \end{aligned} \quad (9)$$

Неравенства (9) справедливы для конца цикла доводки детали, после того как будет снят весь припуск. В процессе обработки параметры качества изделия могут отличаться от требований чертежа. Однако они на протяжении всего цикла должны находиться в заданной области значений, при которых достижимы требуемые параметры качества детали. Так в течение всего цикла обработки нижняя граница текущей шероховатости поверхности не должна опускаться глубже, чем соответствующая граница слоя шероховатости детали.

$$R_{\max j} \leq \Pi_{jd} + R_{\max d}, \quad (10)$$

где Π_{jd} – припуск, оставшийся не удаленным после j -го контакта поверхности с кругом.

Аналогичные неравенства могут быть записаны для глубины дефектного слоя (рисунок 1)

$$h_{dj} + R_{\max j} \leq \Pi_j + h_{dd} + R_{\max dj}. \quad (11)$$

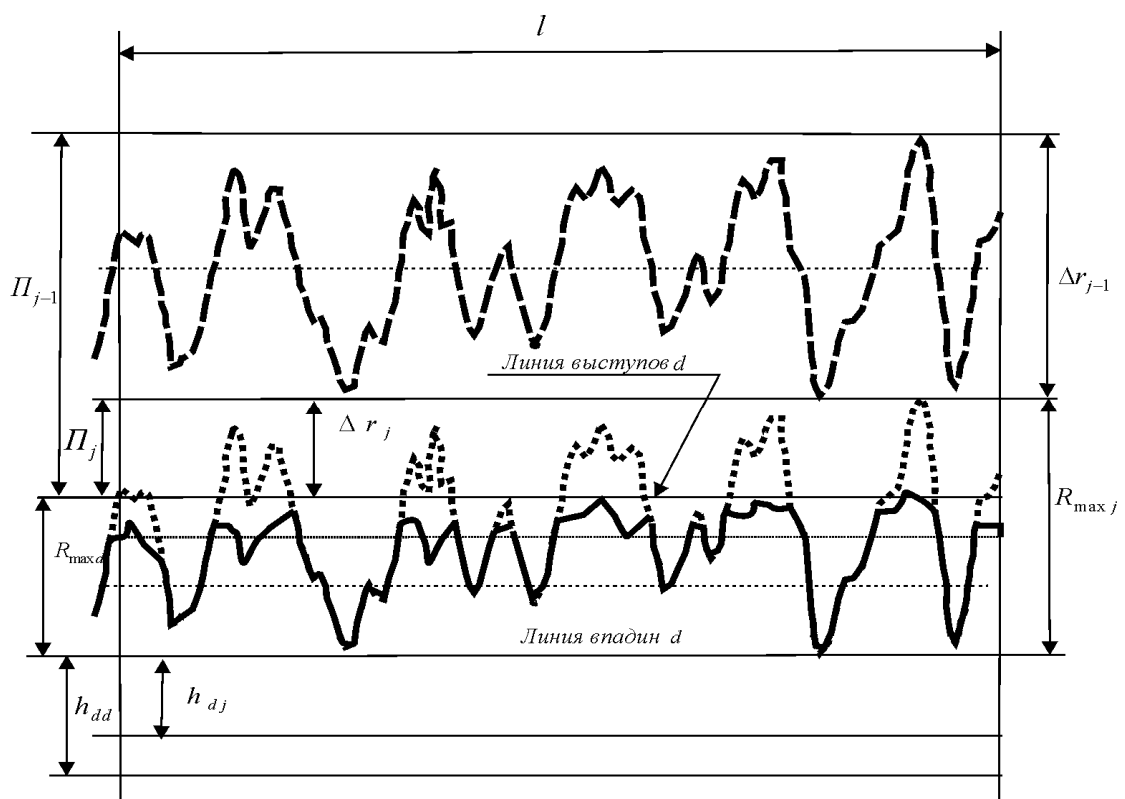


Рисунок 1 – Расчетная схема формирования показателей качества при доводке

Кроме рассмотренных, на процесс доводки накладывается ряд ограничений, обусловленных техническими характеристиками станка и технологической системы процесса доводки.

К таким ограничениям относятся:

- размер зерен в абразивной пасте d_3 ;
- усилие прижима притира, пределом которой является условие

$$P_y \leq P_{y_{дон}}; \quad (12)$$

– окружная скорость притира V_n ограничивается предельными значениями технических возможностей станка:

$$V_n \leq V_{n_{max}}. \quad (13)$$

При доводке абразивными кругами критериями эффективности обычно полагают $t_{ум}$ – штучное время на операцию или C_i – приведенные затраты на обработку изделия [3]

$$t_{ум} = \frac{\Pi}{Q_{\Sigma}} K_{\Pi} + T_{\Pi} + \frac{T_{C.И} \cdot n_{C.И}}{n_{дет}}, \quad (14)$$

$$C_i = R \cdot t_{ум} + q \cdot \Pi \cdot B \cdot L \cdot C_u + n_{с.и} \cdot C_{прав}, \quad (15)$$

где Π – припуск на операцию; Q_{Σ} – суммарная скорость съема материала; K_{Π} – коэффициент, учитывающий влияние пути врезания на основное время; T_{Π} – подготовительно-заключительное время на деталь; $T_{C.И}$ – время замены инструмента в случае его предельного износа; $n_{C.И}$ – количество смен инструмента при обработке партии деталей; $n_{дет}$ – количество деталей в партии; R – стоимость станкосекунды; q – удельный расход абразивной пасты; C_u – стоимость абразивной пасты; $C_{прав}$ – затраты на одну переустановку притира.

В качестве параметров, которые используются при определении конкретных значений вышеприведенных критериев, используются значения переменных, характеризующих поведение технологического процесса, и его результаты. Для конкретизации этих значений еще до выполнения соответствующих технологических операций необходимо адекватное описание поведения технологической системы и необходимых по техническим требованиям параметров качества. Погрешности описания неизбежно приводят к снижению производительности, нестабильности и потере качества изделий.

Совокупность математических зависимостей, разработанных в работах [1, 2] и полученных ограничений (1-15) (таблица 1) представляют описание свойств технологической системы и позволяют назначить циклы управления операцией доводки с высокой точностью, а также рассчитывать параметры состояния технологической системы с учетом стохастической природы процесса.

Таблица 1 – Математическая модель процесса доводки

Зависимости математической модели	
Состояние объекта и системы	$fa_3(d, L) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \frac{\mu}{\sqrt{\sigma_{u1}^2 + \sigma_{u2}^2 + \sigma_d^2}} \cdot \exp \left[-\frac{[(d - u_1 - u_2) - (m_d - m_{u1} - m_{u2})]^2}{2(\sigma_{u1}^2 + \sigma_{u2}^2 + \sigma_d^2)} \right]$
	$1 - \beta_0 = \exp \left[\frac{\mu}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_{a3}} \cdot \frac{\chi \cdot V_u}{l_0^2} \cdot (t - t_0) \cdot \int_0^{t_f - y} \left(\sqrt{a_3(d - a_3)} \cdot \exp \left[-\frac{(a_3 - m_{a3})^2}{2\sigma_{a3}^2} \right] \right) da_3 \right]$
	$t_p(y) = P(\bar{y}); Ra = 2 \int_0^{\infty} P(\bar{y}) dy_m; R_{max} \approx 12 \int_0^{\infty} P(\bar{y}) dy_m$
	$P_{3y} = \int_0^{t_f} P_{3y} \cdot b \cdot P(y) \cdot L_k \cdot n_3 \cdot f_{a_3}(d, L) \cdot l \cdot da_3$
	$h_j = h_{j-1} - \Delta r_j(\alpha)$
	$\Delta_j = \frac{\max}{\alpha} r_j(\alpha) - \frac{\min}{\alpha} r_j(\alpha)$
	$R_{max j} = R_{max j-1} - \Delta r$
	$h_{dj} = h_{dj-1} + R_{max j-1} - R_{max j} - \Delta r_j$
	$\Pi_j = \Pi_{j-1} - \Delta r_j$
	$r_o(\alpha) = r_{канавки}(\alpha); \quad \Delta_o = \Delta_{канавки}; \quad R_{max0} = R_{max заг}; \quad h_{d0} = h_{d3за}$

Продолжение таблицы 1

Ограничения	$h_{\max \text{ пер}} \geq h_{\text{пер}} \geq h_{\min \text{ пер}}$
	$\Delta_k \leq \Delta_{\text{доп}} ; \quad R_{\max k} \leq R_{\max \text{ доп}} ; \quad Ra_k \leq Ra_{\text{доп}} ; \quad h_{dk} = h_{\text{доп}}$
	$R_{\max j} \leq \Pi_{jd} + R_{\max d}$
	$h_{dj} + R_{\max j} \leq \Pi_j + h_{ddj} + R_{\max dj}$
	$P_y \leq P_{y \text{ доп}}$
	$V_n \leq V_{n \max}$
Критерии качества	Штучное время $t_{\text{шт}} = \frac{\Pi}{Q_{\Sigma}} K_{\Pi} + T_{\Pi} + \frac{T_{\text{с.и}} \cdot n_{\text{с.и}}}{n_{\text{дет}}} ;$
	Себестоимость $C_i = R \cdot t_{\text{шт}} + q \cdot \Pi \cdot B \cdot L \cdot C_u + n_{\text{с.и}} \cdot C_{\text{прав}} .$

В качестве начального приближения (начальных условий для моделирования) используются справочные данные и существующие технологические рекомендации для соответствующих процессов.

Если при этом выполняются условия ненахождения технологических параметров в областях ограничений, то результат решения системы (таблица 1) определяет как закон изменения усилий прижима инструмента, так и законы изменения величин съема материала, шероховатость поверхности заготовки и т.д.

Указанное позволяет решать задачи оптимизации технологического процесса известными численными методами по различным формализованным критериям, например, по критерию быстродействия (критерий штучного времени производства детали), себестоимости, приведенных затрат и др. Это соответствует решению задачи построения предельных граничных циклов программного управления.

Необходимо отметить, что при решении этих задач необходимо учитывать тот факт, что состояние технологической системы несвободно от наследования параметров, определяемых результатами обработки предыдущей детали, т.е. в качестве начальных данных при моделировании граничного цикла обработки каждой последующей детали используются как данные о начальном состоянии системы (например, параметры детали), так и финальные параметры (например, состояния притира). Указанное определяет наличие семейства оптимальных граничных циклов.

При оптимизации по быстродействию или нахождении наилучшего решения по себестоимости может быть использован широкий спектр методов оптимизации, например: метод покоординатного спуска Пауэлла или динамического программирования Белмана [3].

При расчете циклов было принято следующее допущение:

– при каждом обороте участок поверхности притира контактирует с измененным, но постоянным на i – м обороте слоем рабочей поверхности заготовки.

Полученные в результате расчета циклы (рисунок 2) оказались состоящими из двух этапов, которые могут характеризоваться также как и в работе [3]:

– этапа «форсированного режима», на котором зерна доводочной пасты внедряются в поверхности заготовки и притира;

– этапа «непосредственной доводки», на котором сила прижима ограничивается жесткостью перемычки маятника, величиной дефектного слоя и лимитируется ограничениями на шероховатость поверхности и точность обработки.

При расчете циклов учитывалось состояние притира в различные периоды его стойкости, поэтому продолжительность каждого последующего цикла увеличивается.

Общее время цикла обработки первой детали в 1,38 раза меньше цикла обработки детали в конце периода стойкости инструмента. При обработке 10-й, 30-й деталей основное время снижается в 1,15; 1,3; раза, по сравнению с заводскими.

Исследование циклов программного управления для шеек маятников производилось на оборудовании (рисунок 3), разработанном на кафедре «Технология машиностроения» СевНТУ.

Спроектированное оборудование позволяет вести двустороннюю обработку шеек маятника. Установка состоит из привода главного движения и 2-х взаимосвязанных симметричных контуров обеспечивающих необходимое усилие прижима притиров к поверхности заготовки, за счет следящих приводов (рисунок 4).

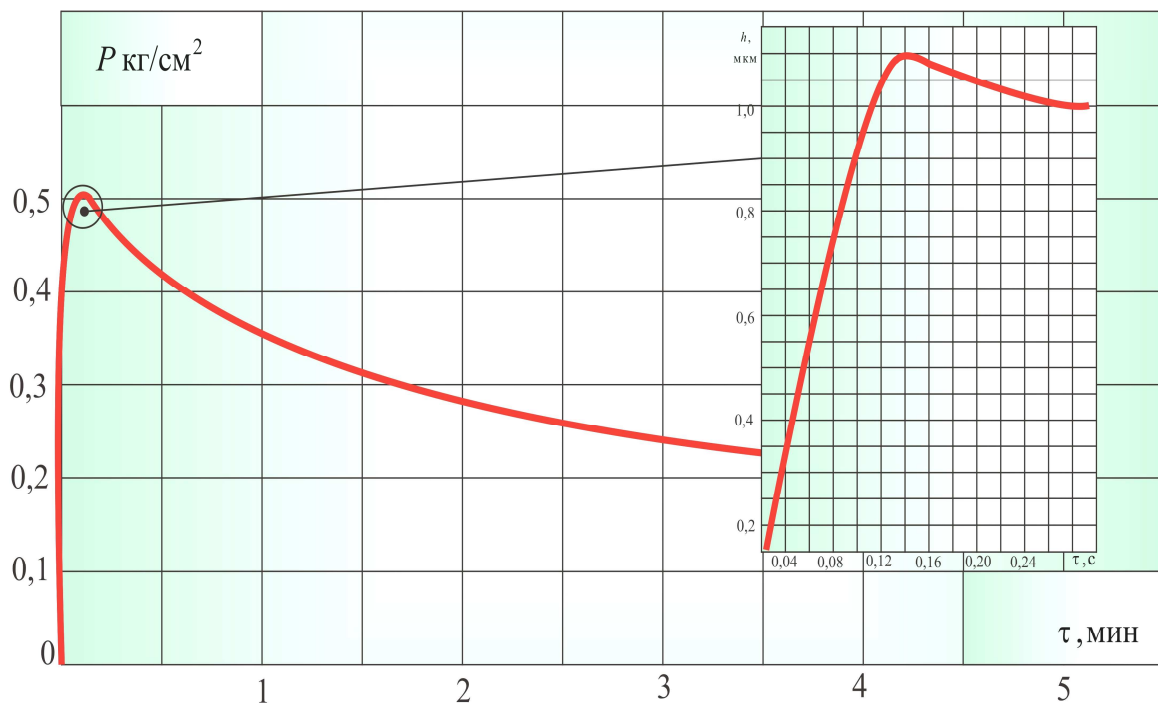


Рисунок 2 – Цикл обработки шейки маятника с графиком переходного процесса в момент врезания

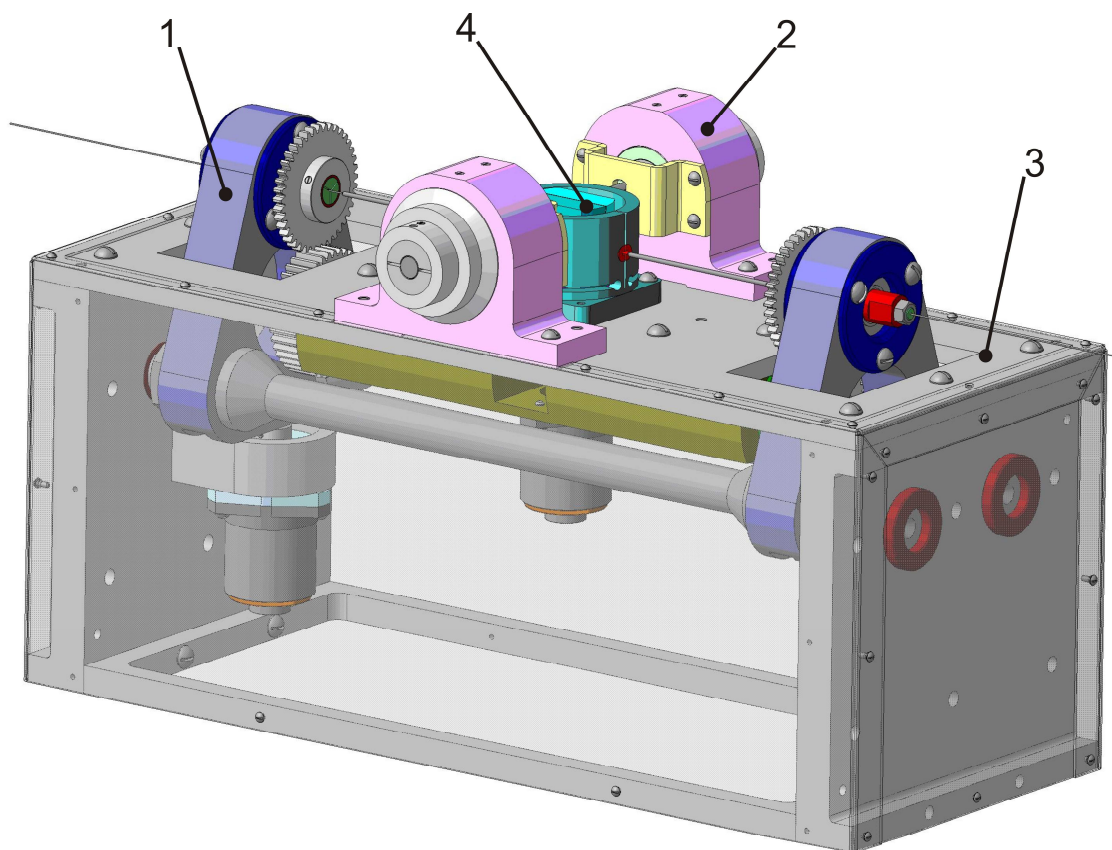


Рисунок 3 – Компонировка приводов экспериментальной установки
1 – привод главного движения; 2 – привод подачи; 3 – станина;
4 – приспособление для крепления детали

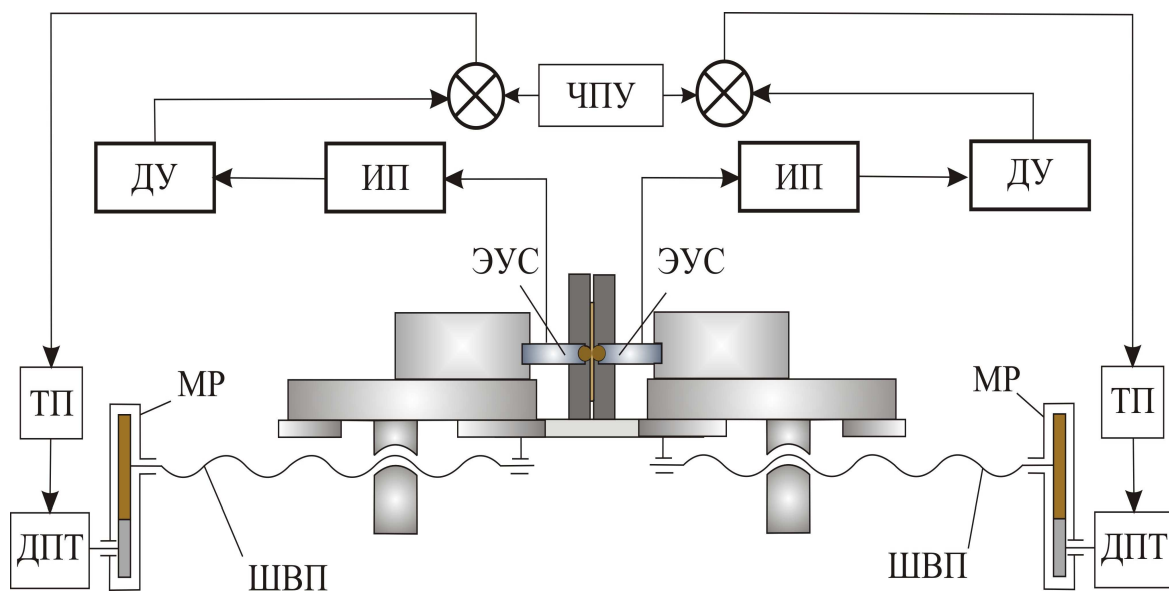


Рисунок 4 – Схема следящих приводов

Установка содержит два одинаково работающих независимых контура. Каждый из контуров функционирует следующим образом: из ЧПУ через тиристорный преобразователь двигатель (ДПТ) подается эталонный сигнал U_3 , который в определенном масштабе соответствует значению необходимого усилия прижима притира в зоне резания. Усилие контролируется измерительным прибором (ИП) и через дифференциальный усилитель (ДУ) поступает на сравнительное устройство в виде напряжения U_0 , пропорционального фактическому усилию прижима. Далее скорректированный сигнал с учетом ошибки δU через тиристорный преобразователь подается на двигатель. В результате происходит изменение усилия прижима согласно заданной программы (рисунок 5).

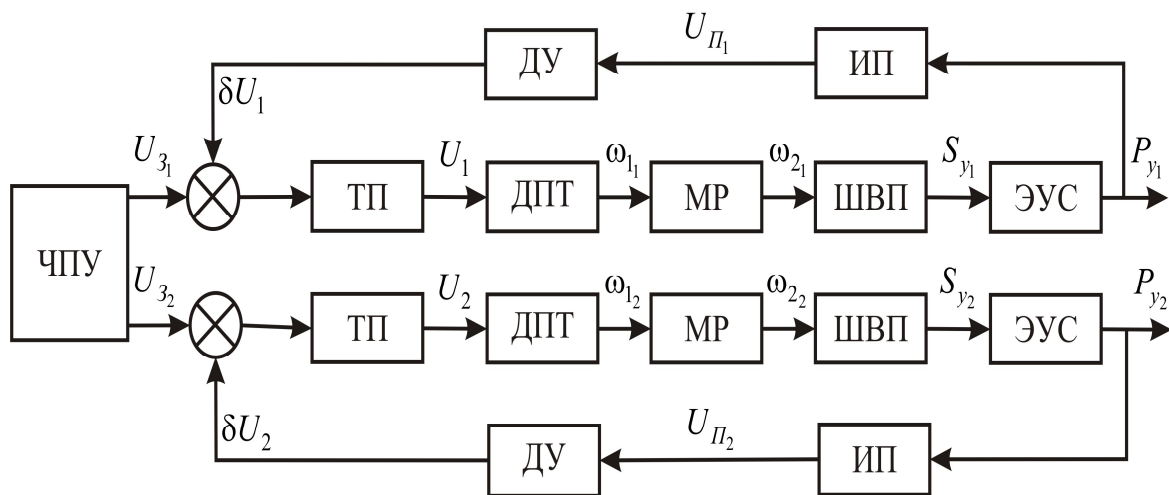


Рисунок 5 – Функциональная схема следящих приводов

При моделировании технологического процесса необходимо решить следующие задачи:

- сформировать заданный закон изменения силы резания $P(t)$,
- определить постоянную времени процесса обработки T ,
- реализовать условие устойчивости системы управления,
- исключить перерегулирование,
- минимизировать статическую погрешность реализации процесса.

В качестве закона изменения силы резания $P(t)$ рассмотрим экспоненциальный, имеющий вид $P(t) = P_n \exp[-t/T]$, где $P_n = P(t)|_{t=0}$ – начальное значение силы резания в момент включения технологической системы, T – постоянная времени (с), t – текущее время (с).

Для определения постоянной времени обработки T необходимо знать конечное значение силы $P_k = P(t)|_{t=T_O}$ резания при заданной длительности процесса T_O

$$T = -\frac{T_O}{\ln(P_k/P_n)}.$$

Провести анализ устойчивости системы можно по операторной передаточной функции системы, блок-схема которой изображена на рисунке 4.11.

В силу симметричности системы можно рассматривать только один канал. Операторная передаточная функция такой системы имеет вид

$$W_z(p) = \frac{W_s(p)}{1 + W_s(p)W_O(p)},$$

где $W_S = W_1 \cdot W_3 \cdot W_4 \cdot W_5 \cdot W_8$; $W_O = W_6 \cdot W_7$.

Вид передаточных функций звеньев системы представлен в таблице 2

Таблица 2 – Уравнения и передаточные функции звеньев системы

Название звена	Уравнение звена	Передаточная функция
Тиристорный преобразователь	$T_1 \frac{dU_{\text{вых}}}{dt} + U_{\text{вых}} = k_1 U_{\text{вх}}$	$W_1 = \frac{k_1}{T_1 p + 1}$
Двигатель	$T_e T_m \frac{d^2 \omega}{dt^2} + T_m \frac{d\omega}{dt} + \omega = k_2 U$	$W_2 = \frac{k_2}{T_e T_m p^2 + T_m p + 1}$
Редуктор	$\omega_{\text{вых}} = k_P \omega_{\text{вх}}$	$W_3 = k_3$
Шарико-винтовая пара	$k_4 = \frac{S}{2\pi}$	$W_4 = k_4$
Эквивалентно упругая система	$m \frac{d^2 x}{dt^2} + h \frac{dx}{dt} + c = k_5 \cdot P$	$W_5 = \frac{k_5}{T_3 p^2 + T_4 p + 1}$
Измерительный прибор	$U_{\text{вых}} = k_6 U_{\text{вх}}$	$W_6 = k_6$
Дифференциальный усилитель	$T_7 \frac{dU_{\text{вых}}}{dt} + U_{\text{вых}} = k_7 U_{\text{вх}}$	$W_7 = \frac{k_7}{T_7 p + 1}$
Корректор	—	$W_8 = \frac{k_8}{T_8 p + 1}$
Слайдер масштаба	—	$W_{10} = k_{10}$

Для обеспечения требуемого уровня сигнала системы управления в её состав введены блоки коррекции K_8 и K_{10} . Блок K_8 необходим для демпфирования в момент начального пуска системы, а блок K_{10} – для снижения погрешности.

Устойчивость системы исследована корневым методом по характеристическому уравнению. Все корни вещественные и расположены в левой комплексной полуплоскости, что свидетельствует об устойчивости и апериодическом характере процесса. График относительной погрешности реализации процесса $\epsilon(t)$ управления представлена на рисунке 6.

Проведенные расчеты показали, что спроектированная установка обеспечивает отработку цикла программного управления с погрешностью, не превышающей одного процента.

Испытания работоспособности изделий после обработки по существующим и разработанным алгоритмам были проведены на предприятии «Завод «Фиолент». С этой целью была спроектирована и изготовлена специальная установка (низкочастотный релаксатор), схема которого приведена на рисунке 7.

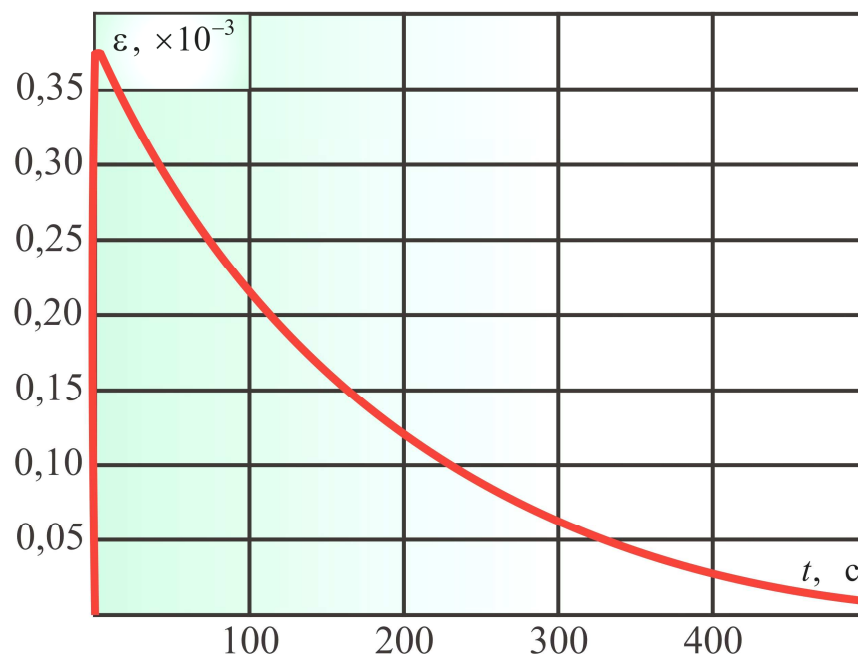


Рисунок 6 – Относительная погрешность реализации процесса

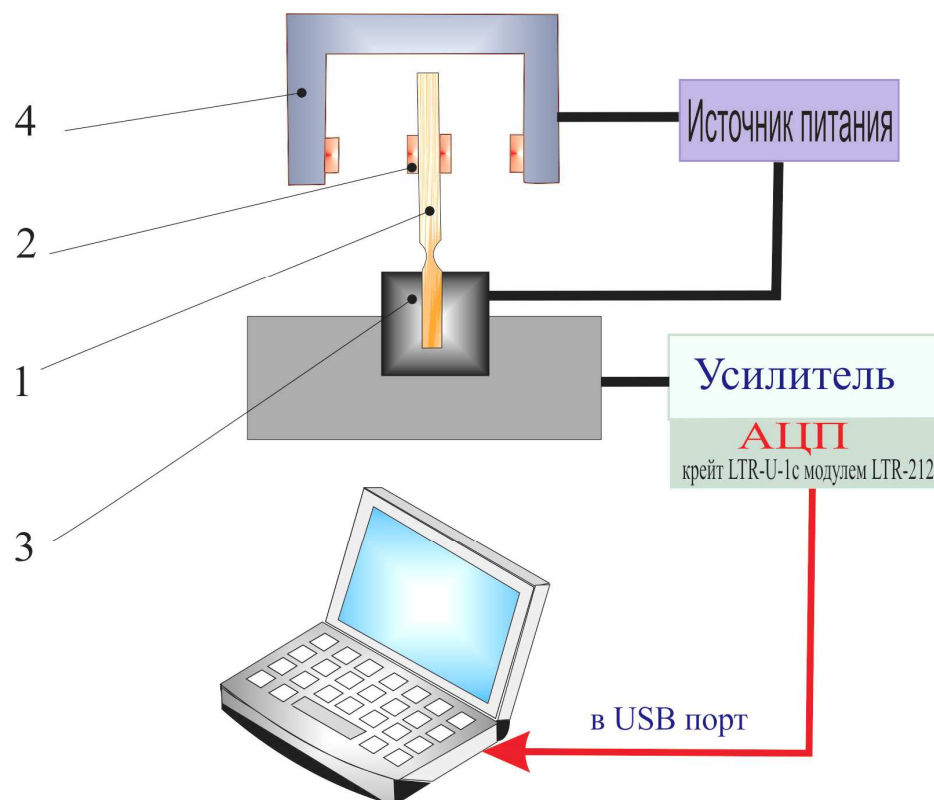


Рисунок 7 – Схема установки для исследования работоспособности маятников

Установка работает следующим образом: образец 1 с закрепленным на его поверхности эталонным грузом 2 устанавливается в приспособление 3, оснащенное датчиком моментов. Напряжение от источника питания 4 поступает через датчик моментов на вход измерительного комплекса. При отсутствии деформации образца на экране виртуального осциллографа высвечивается прямая линия (линия фона). При включении релаксационного устройства 6 под действием магнитного поля образец упруго деформируется. При этом с датчика моментов 3 поступает сигнал на вход виртуального

осциллографа, где начинают регистрироваться вынужденные колебания образца определенной амплитуды. Счетчиком подсчитывается число циклов D , сделанных образцом до его разрушения.

По полученным в результате экспериментов данным для каждой партии образцов вычисляли:

1. Математическое ожидание

$$M(P) = \frac{1}{k} \cdot \sum_{i=1}^k P_i.$$

2. Среднее квадратическое отклонение

$$\sigma_{OT} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i [P_i - M(D_i)]^2}.$$

3. Коэффициент вариации

$$V = \frac{G_{i0}}{M(P)},$$

где P_i – вероятность появления признака, k – число значений случайной величины, D_i – значения величины, n – количество образцов, разрушившихся при определенном числе циклов.

По данным расчета строили совместный полигон законов распределения образцов.

Работоспособность деталей определяли через их долговечность. Долговечность рассматривали как результат действия случайных факторов, т. е. как случайную величину. За случайную величину принимали число циклов до разрушения D .

При испытаниях на работоспособность сравнивали образцы с одинаковой шероховатостью поверхности $Ra = 0,32$. При обработке партии из n штук указанные факторы не остаются постоянными. Поэтому можно предположить, что стабильность характеристики для деталей, обработанных различными способами формообразования, будет различной. Для проверки этого были испытаны две партии образцов из бериллиевой бронзы БрБ2, обработанные по заводской и предлагаемой технологиям.

Для сравнения законов распределения образцов был построен полигон (рисунок 8). Считая, что величина D подчиняется нормальному закону распределения, использовали правила трех сигм. Это значит, что 99,73 % всех образцов разрушится при числе циклов, лежащих в интервале: $\langle M(D) - 3\sigma_{om} \div M(D) + 3\sigma_{om} \rangle$.

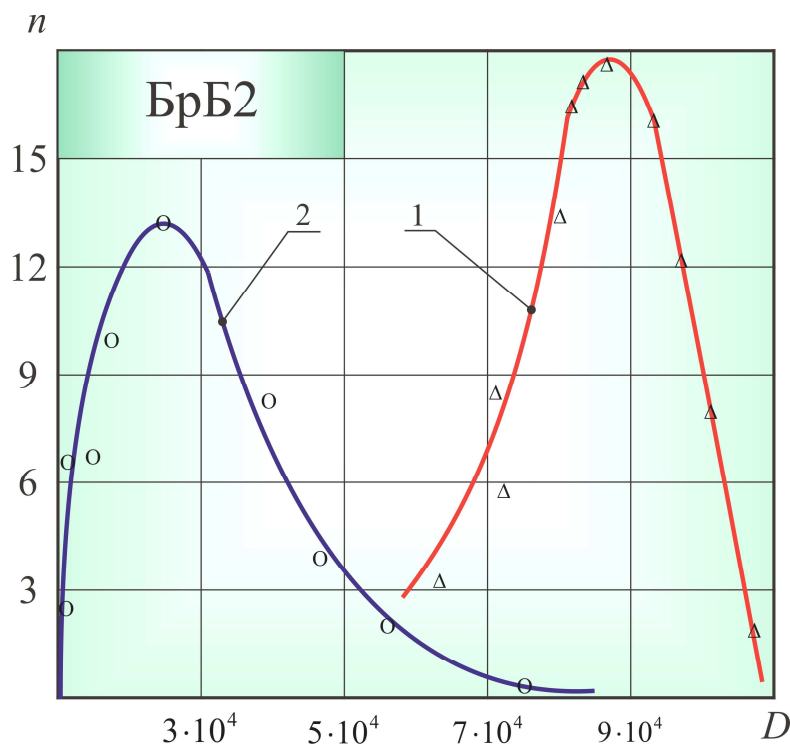


Рисунок 8 – Результаты испытаний образцов из БрБ2 на работоспособность:
1 – с перемычками обработанными доводкой по предложенной методике (61161 – 101813),
2 – обработанных по заводской технологии. (10657-75023)

Очевидно, что стабильность характеристики D для образцов, обработанных доводкой по предложенной методике значительно выше стабильности характеристики D образцов, обработанных по заводской технологии.

Производственные испытания показали, что при обработке изделий на операциях доводки по сравнению с традиционными методами стабильно обеспечивается высокое качество поверхностей, что позволило снизить процент брака на 3 % ,увеличить производительность обработки изделий на 2 % по сравнению с существующей технологией обработки этих деталей на предприятии. Разработанные технологические методы, модели и оборудование позволяют осуществлять обработку изделий с гарантированным качеством при минимальных затратах и максимальной производительности на операциях доводки прецизионных поверхностей.

Бibliографический список использованной литературы

1. Братан С.М. Оценка параметров качества поверхности при доводке свободным абразивом / С.М. Братан, Д.А. Каинов, С.Е. Сазонов // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Сер. Машинобудування і машинознавство: зб. наук. праць. — Донецьк: ДонНТУ, 2008. — Вип. 5 (139). — С. 9–15.
2. Сазонов С.Е. Моделирование силы прижима инструмента при доводке шеек маятников акселерометров / С.Е. Сазонов, С.М. Братан // Вісник СевНТУ. Сер. Машиноприладобудування та транспорт: зб. наук. праць. — Севастополь, 2010. — Вип. 107. — С. 194–196.
3. Якобс Г.Ю. Оптимизация резания / Г.Ю. Якобс, Э. Якоб, Д. Кохан. — М.: Машиностроение, 1987. — 279 с.

Поступила в редакцию 26.04.2011 г.

Сазонов С.Є., Братан С.М. Керування процесом доводки прецизійних поверхонь

Запропоновано цикли керування операцією доводки шийок маятників акселерометрів, розроблена установка, що дозволяє вести двосторонню обробку за розробленими циклам з урахуванням побудованих обмежень.

Ключові слова: доведення, зусилля притиску, доводочна паста, цикл обробки, установка для доведення, режими обробки.

Sazonov S.E., Bratan S.M. Controlling the process of finishing precision surfaces

The control cycles process of finishing pendulum necks of accelerometers are offered, the setup that allows conducting two-sided treatment on the developed cycles taking into account the built limitations is designed.

Keywords: finishing, clamping force, lapping paste, cycle of treatment, equipment for finishing, modes of treatment.