

СТАНОЧНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ АКТИВНОГО КОНТРОЛЯ КАК ОПЕРАТОР ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Г. М. ТРОМПЕТ,

кандидат технических наук, доцент, Уральский федеральный университет
им. первого Президента России Б. Н. Ельцина

(620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19),

В. А. АЛЕКСАНДРОВ,

кандидат технических наук, доцент, Уральский государственный аграрный университет

(620075, г. Екатеринбург, ул. К. Либкнехта, д. 42; тел.: 8 (343) 221-41-40)

Ключевые слова: станочное оборудование, активный контроль, точность, динамическая система, виброконтактный принцип измерения.

Для обеспечения требуемой точности обработки станки снабжают автоматическими средствами контроля размеров параметров обрабатываемых деталей и средствами контроля линейных и угловых перемещений узлов и механизмов станка. В статье станочное оборудование активного (управляющего) контроля рассматривается как часть измерительно-управляющей динамической системы. Установлено, что возмущающие факторы технологического процесса обработки заготовки на металлорежущем станке влияют на точность размеров. Рассмотрены вероятностные характеристики размеров деталей при обработке прерывистых поверхностей на многоцелевом станке, использующем станочное оборудование активного контроля виброконтактного принципа измерения. Предложена функциональная схема контрольно-управляющей системы с применением первичного виброконтактного преобразователя, в соответствии с которой сигнал от переменного размера заготовки, выраженный величиной изменяющейся амплитуды колебаний вибрационного щупа, преобразуется в сигнал управления станком. Система включает механический колебательный узел, электромагнит, датчик-генератор, выпрямитель, сглаживающий фильтр, реле управления станком. Приведены точностные характеристики преобразования информации измерительной системы с виброконтактным преобразователем. Учтены конструктивные и физические особенности элементов измерительных головок и виброконтактных преобразователей для многоцелевых станков и станков с параллельной кинематикой. Проведена оценка амплитуды колебаний щупа механического колебательного узла в свободном состоянии, определяющей максимальную величину контролируемого припуска при обработке заготовки. Полученные уравнения позволяют рассчитать ряд значений задающего (порогового) напряжения, обеспечивающих получение требуемой последующей команды для управления металлорежущим станком. Результаты работы могут быть использованы в практике эксплуатации систем активного контроля и управления точностью обработки на металлорежущих станках и комплексах.

MACHINE-TOOL EQUIPMENT OF ACTIVE CONTROL AS OPERATOR OF DYNAMIC SYSTEM

G. M. TROMPET,

candidate of technical sciences, associate professor,

Ural Federal University of the first President of Russia B. N. Yeltsin

(19 Mira Str., 620002, Ekaterinburg),

V. A. ALEXANDROV,

candidate of technical sciences, associate professor, Ural State Agrarian University

(42 K. Liebknehta Str., 620075, Ekaterinburg; tel.: +7 (343) 221-41-40)

Keywords: machine-tool equipment, active control, exactness, dynamic system, vibrocontact principle of measuring.

For ensuring the demanded processing accuracy machines supply with automatic control devices of dimensional parameters of the processed details and means of control of linear and angular movements of knots and mechanisms of the machine. In article the machine equipment of active (managing director) control is considered as of the measurement-managing dynamic systems. It is established that the revolting factors of technological processing of preparation on the metal-cutting machine influence the accuracy of the sizes. Probabilistic characteristics of the sizes of details when processing faltering surfaces on the multi-purpose machine are considered, the active control of the vibrocontact principle of measurement using the machine equipment. The function chart control – the operating system with use of primary vibrocontact converter according to which the signal from the variable amount of preparation expressed by the size of the changing amplitude of fluctuations of the vibration probe will be transformed to a signal of control of the machine is offered. The system includes mechanical oscillatory knot, an electromagnet, the sensor – the generator, the rectifier smoothing the filter, the relay of control of the machine. Precision characteristics of transformation of information of measuring system with the vibrocontact converter are provided. Design and physical features of elements of measuring heads and vibrocontact converters for multi-purpose machines and machines with parallel kinematics are considered. The assessment of amplitude of fluctuations of the probe of mechanical oscillatory knot in a free state determining the maximum size of a controlled allowance when processing preparation is carried out. The received equations allow to calculate a number of the values of the setting (threshold) tension providing the demanded subsequent team for control of the metal-cutting machine. Results of work can be used in practice of operation of systems of active control and management of processing accuracy on metal-cutting machines and complexes.

Положительная рецензия представлена Г. А. Боярских, заслуженным деятелем науки РФ,
доктором технических наук, профессором Уральского государственного горного университета.



Станочное оборудование активного контроля (СОАК), являясь узлом технологической системы, воспринимает действие характерных для технологического процесса возмущающих факторов [1, 2], которые могут значительно влиять на точностные возможности измерительно-управляющей динамической системы. Поэтому при создании СОАК и исследовании его как динамической системы в первую очередь решается основная задача составления оператора, позволяющего по заданному воздействию $x(t)$ определить реакцию системы $y(t)$. Однако для полного исследования и оценки его технических качеств такой подход является недостаточным. В реальных условиях воздействие всегда искажено некоторыми случайными помехами: на вход системы поступает сигнал в виде случайной функции времени $X(t) = \{x(t), t \in T\}$, где T – интервал наблюдения. В соответствии с этим система вырабатывает в качестве реакции случайную функцию $Y(t) = \{y(t), t \in T\}$. Необходимо решить, насколько велики будут отклонения реакции системы при наличии случайных возмущений на ее входе. Сигналом, действующим на вход СОАК, является контролируемая часть $x(t)$ текущего размера обрабатываемой заготовки. Реакция системы представляет собой случайную функцию времени $Y(t)$ и определяется как семейство случайных переменных $\{y(t), t \in T\}$, которые зависят от параметра t , принадлежащего соответствующему множеству:

$$Y(t) = L\{y(t), t \in T\},$$

где L – оператор, описывающий прибор как динамическую систему автоматического активного контроля.

Рассмотрим вероятностные характеристики размеров деталей при обработке прерывистых поверхностей на многоцелевом станке с использованием СОАК ВПИ

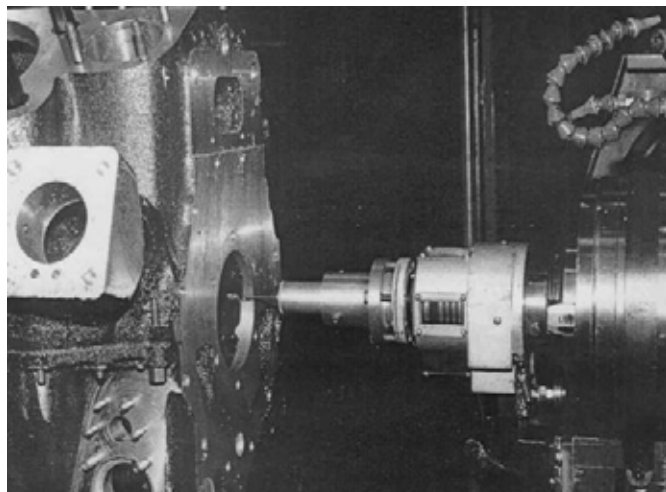


Рис. 1. Обработка прерывистых поверхностей на многоцелевом станке с использованием СОАК ВПИ

контактного принципа измерения (СОАК ВПИ) (рис. 1) [3, 4, 5].

Математическое ожидание размеров обрабатываемых заготовок изменяется в общем случае по линейному закону $m_x = m_0 - at$, где a – коэффициент, зависящий от скорости подачи абразивного круга и интенсивности износа инструмента. Тогда:

$$x(t) = m_0 - at + \int (t), \quad (1)$$

где $\int (t)$ – центрированная случайная функция помех, для которой дисперсию можно представить в виде постоянной величины $D_x = const$, что соответствует реальному процессу обработки при периодической правке абразивного круга и стабильных размерах заготовок [6]. Центрированную корреляционную функцию представим для часто встречающегося случая в виде экспоненты [7]:

$$R_x(\tau) = D_x e^{-\beta|\tau|}. \quad (2)$$

В качестве контрольно-управляющей системы рассмотрим СОАК ВПИ, преобразующее сигнал размера детали $x(t)$ в сигнал управления работой станка $y(t)$. Функциональная схема рассматриваемого СОАК ВПИ представлена на рис. 2.

Сигнал от изменяющегося размера заготовки $x(t)$, выраженный величиной изменяющейся амплитуды колебаний измерительного щупа 1 (рис. 3) в виде $Z(t)$, преобразуется в сигнал управления работой станка $y(t)$. Напряжение питания $V_0 \sin \omega t$ электромагнита 2 определяет его периодическую силу $FЭ(t)$, которая приводит в возвратно-поступательное движение $Z(t)$.

Датчик-генератор 4 преобразует перемещение $Z(t)$ благодаря изменению магнитного потока постоянно-го магнита 3 в напряжение $u(t)$, которое выпрямляется, сглаживается фильтром и сравнивается с установленным пороговым напряжением S_n .

Релейная схема управления станком срабатывает при условии $y(t) \geq 0$. Перемещение измерительного щупа $Z(t)$, жестко связанного с якорем электромагнита 2, изменяет силу $FЭ$, а колебания якоря датчика-генератора 4 вызывают периодическую силу $FM(t)$, что отражено на функциональной схеме (рис. 2) в виде обратной связи.

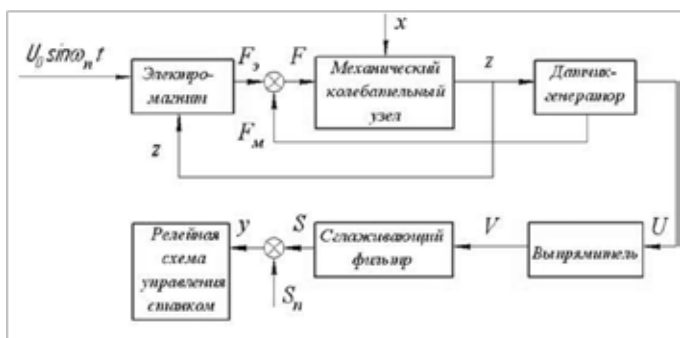


Рис. 2. Функциональная схема СОАК ВПИ



Механический контакт виброщупа с измеряемой деталью приводит к изменению амплитуды колебаний $Z(t)$, низшую гармонику которых можно представить в первом приближении [9] как:

$$Z_1(t) = [A_0 - x(t)] \sin(2\omega_0 t + \varphi_0), \quad (3)$$

где A_0 – амплитуда колебаний щупа без контакта с деталью (свободные колебания), $x(t)$ – изменение амплитуды при наличии контакта с измеряемой поверхностью, причем:

$$|x(t)| A_0. \quad (4)$$

Приведем уравнения элементов прибора [9]:

$$F_3(t) = a_1 \Phi_3^2(t), \quad (5)$$

$$\Phi_3(t) = \frac{a_2}{b_1 - Z(t)} i_3(t), \quad (6)$$

$$W_3 \Phi_3(t) + i_3(t) r_3 = U_0 \sin \omega_0 t, \quad (7)$$

$$M_z(t) + h_z(t) + k_z(t) = F(t), \quad (8)$$

$$F(t) = F_3(t) + F_M(t), \quad (9)$$

$$F_M(t) = a_3 \Phi_M^2(t), \quad (10)$$

$$\Phi_M(t) = \frac{a_4}{b_2 - Z(t)}, \quad (11)$$

$$T_\Gamma \dot{u}(t) + u(t) = \frac{W_\Gamma}{2} \Phi_M(t), \quad (12)$$

$$\vartheta(t) = |u(t)|, \quad (13)$$

$$T_\Phi \dot{S}_{CF}(t) + S_{CF}(t) = u_{CF}(t), \quad (14)$$

где i_3 , Φ_3 , Φ_M – соответственно сила тока и магнитные потоки электромагнита 2 (рис. 3), постоянного магнита 3 и датчика-генератора 4; $a_1, a_2, a_3, a_4, b_1, b_2, W_3, r_3, M, h, k, T_\Gamma, W_\Gamma, T_\Phi$ – коэффициенты, определяющие конструктивные и физические особенности магнитных, механических и электрических элементов как виброконтактных электромагнитных преобразователей, так и измерительных головок виброконтактного принципа измерения, предназначенных для многоцелевых, многофункциональных станков и станков с параллельной кинематикой.

Решая систему уравнений (5) – (11), можно определить амплитуду A_0 колебаний щупа (максимальная величина контролируемого припуска на обработку заготовки) в свободном состоянии. При рассмотрении контакта щупа и детали с учетом (3) уравнение (12) примет вид:

$$\Phi_M(t) = \frac{a_4}{b_2 - [A_0 - x(t)] \sin(2\omega_0 t + \varphi_0)}, \quad (15)$$

что позволяет проанализировать преобразование информационного сигнала $x(t)$ в соответствии с уравнениями (12) – (14).

Считая достаточно малыми скорости изменения величины $x(t)$, т. е. при

$$A_0 - x(t) \approx A = \text{Const}, \quad (16)$$

можно уравнение (15) разложить в ряд Фурье и рассматривать только низшую гармонику:

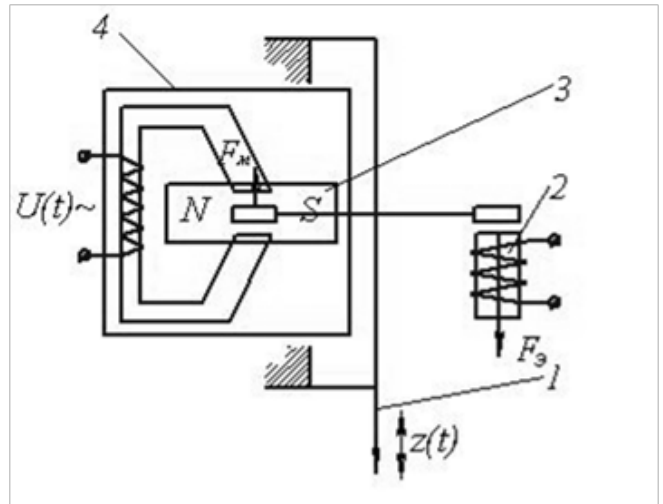


Рис. 3. Первичный виброконтактный преобразователь СОАК ВПИ [8]

$$\Phi_M(t) = \frac{a_4}{\sqrt{b^2 - A^2}} + \frac{2\pi(b_2 - \sqrt{b_2^2 - A^2})a_4}{A(\sqrt{b_2^2 - A^2})} \sin(2\omega_0 t + \varphi_0). \quad (17)$$

Учитывая (4) и (16), разложим в ряд Тейлора функции амплитуды A в (17) и ограничимся членами первого приближения:

$$\Phi_M(t) = \Phi_0 + q x(t) + [B_0 - q_1 x(t)] \sin(2\omega_0 t + \varphi_0), \quad (18)$$

где Φ_0, B_0, q, q_1 – коэффициенты разложения, определяемые величиной A_0 .

При достаточно больших T_Γ уравнение (12) приводится к приближенному соотношению:

$$T_\Gamma \dot{u}(t) = \frac{W_\Gamma}{2} \Phi_M(t).$$

Используя (18) при достаточно малых величинах $|\dot{x}(t)|$ по сравнению с величинами производных $\frac{\partial}{\partial t} [x(t) \sin(\omega_0 t + \varphi_0)]$, получаем приближенный результат:

$$u(t) = \left[B_0 \frac{W_\Gamma}{2T_\Gamma} - \frac{q_1 W_\Gamma}{2T_\Gamma} x(t) \right] \sin(2\omega_0 t + \varphi_0). \quad (19)$$

Если выполняется принятое допущение о величинах $|\dot{x}(t)|$, то согласно (13) и (19) получаем среднее значение выпрямленного напряжения:

$$\vartheta_{CF}(t) = \frac{B_0 W_\Gamma}{\pi T_\Gamma} - \frac{q_1 W_\Gamma}{\pi T_\Gamma} x(t),$$

или с учетом (14):

$$T_\Phi \dot{S}_{CF}(t) + S_{CF}(t) = \frac{q_1 W_\Gamma}{\pi T_\Gamma} \left[\frac{B_0}{q_1} - x(t) \right],$$

где S_{CF} – среднее значение выхода сглаживающего фильтра. Из этого уравнения, используя соотношения $y(t) = S_{CF}(t) - S_n$ (рис. 2), получаем уравнение, позволяющее оценить результат преобразования сигнала $x(t)$ в напряжение управления релейной схемой $y(t)$:

$$T_\Phi \dot{y}(t) + y(t) = -S_n + \frac{q_1 W_\Gamma}{\pi T_\Gamma} \left[\frac{B_0}{q_1} - x(t) \right]. \quad (20)$$



Представим сигнал $y(t)$ в виде $y(t) = my(t) + \varepsilon(t)$, где $my(t)$ – математическое ожидание, $\varepsilon(t)$ – центрированная случайная функция – результат преобразования помехи $\int(t)$, указанной в уравнении (1). Учитывая, что постоянная времени сглаживания $T_\Phi \ll t_k$, где t_k – время срабатывания схемы управления, определяем математическое ожидание управляющего сигнала $y(t)$ при $x(t)$ вида (1) выражением:

$$m_y(t) = -S_n + \frac{q_1 W_\Gamma}{\pi T_\Gamma} \left[\frac{B_0}{q_1} - m_0 + a(t - T_\Phi) \right] \quad (21)$$

как вынужденную составляющую решения уравнения (20) при $\int(t) = 0$. Время обработки детали определяется условием:

$$m_x(t_k) = m_0 - at_k = x_k, \quad (22)$$

где x_k – требуемое конечное значение контролируемой части размера детали, устанавливаемое при настройке СОАК ВПИ на заданный размер.

На основании (21) и (22) можно оценить с учетом запаздывания сигнала при сглаживании требуемое значение порогового напряжения S_n из условия срабатывания релейной схемы при $m_y(t_k) = 0$.

$$S_n = \frac{q_1 W_\Gamma}{\pi T_\Gamma} \left[\frac{B_0}{q_1} - x_k - aT_\Phi \right]. \quad (23)$$

Сглаживание помехи $\int(t)$ согласно (20) описывается уравнением:

$$T_\Phi \dot{\varepsilon}(t) + \varepsilon(t) = k \int(t), \quad (24)$$

$$\text{где } k = -\frac{q_1 W_\Gamma}{\pi T_\Gamma}.$$

Для принятых дисперсий D_x и центрированной корреляционной функции $R_x(\tau)$ измеряемого сигнала на основании (24) определим дисперсию управляющего

сигнала. Спектральная плотность помехи, соответствующая (2), определяется выражением:

$$S_x(\omega) = D_x \frac{2\beta}{\omega^2 + \beta^2}.$$

На выходе сглаживающего фильтра помеха характеризуется спектральной плоскостью:

$$S_y(\omega) = S_x(\omega) \left| \frac{K}{1 + jT\omega} \right|^2 = D_x \frac{2\beta K^2}{(\omega^2 + \beta^2)(T_\Phi^2 \omega^2 + 1)}.$$

Центрированная случайная функция $\varepsilon(t)$ имеет дисперсию:

$$D_y = R_y(\tau)_{\tau=0} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S_y(\omega) d\omega = 2D_x K^2 \beta J,$$

где $R_y(\tau)$ – корреляционная функция помехи на выходе сглаживающего фильтра;

$$J = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{d\omega}{(\omega^2 + \beta^2)(T_\Phi^2 \omega^2 + 1)}$$

Отсюда дисперсия управляющего сигнала:

$$D_y = D_x K^2 \frac{1}{T_\Phi \beta + 1}. \quad (25)$$

Таким образом, по найденной дисперсии D_y (25) оцениваем точностные характеристики преобразования информации СОАК ВПИ. Уравнение (23) позволяет рассчитать ряд значений задающего (порогового) напряжения S_n , обеспечивающих получение требуемой последующей команды для управления металлорежущим станком.

Полученные в этой работе результаты используются в практике эксплуатации станочного оборудования активного контроля виброконтактного принципа измерения [10].

Литература

1. Сулов А. Г. Технология машиностроения. М. : КноРус, 2013. 336 с.
2. Солоненко В. Г., Рыжик А. А. Резание металлов и режущие инструменты. М. : Инфра-М, 2011. 416 с.
3. Тромпет Г. М., Красильников А. Я. Виброконтактный преобразователь для прибора управляющего контроля // СТИН. 2008. № 6. С. 21–23.
4. Тромпет Г. М., Александров В. А., Кирсанов Ю. А. Виброконтактный датчик-измеритель отклонений размеров : патент № 2284466 РФ. G01B7/00.
5. Тромпет Г. М., Александров В. А. Разработка системы управляющего контроля с использованием виброконтактных приборов // Вестник Российского государственного аграрного заочного университета. 2007. № 2. С. 71–72.
6. Скворцов В. С. Основы технологии машиностроения. Томск : Изд-во ТПУ, 2012. 352 с.
7. Хомченко В. Г., Федотов А. В. Автоматический контроль в механообрабатывающих ГПС. Омск : Изд-во ОмГТУ, 2010. 160 с.
8. Тромпет Г. М., Александров В. А., Кирсанов Ю. А. Виброгенераторный преобразователь : патент № 2270415 РФ. G01B 7/10.
9. Александров В. А., Тромпет Г. М. Технологические и метрологические возможности станочного оборудования активного контроля в серийном производстве. Екатеринбург : УрГАУ, 2014. 232 с.
10. Тромпет Г. М., Федотов В. А., Колка И. А. Промышленная эксплуатация прибора управляющего контроля на многоцелевом станке // СТИН. 2008. № 12. С. 24–25.



References

1. Suslov A. G. Engineering technology. M. : KnoRus, 2013. 336 p.
2. Solonenko V. G., Ryzhkin A. A. Metal cutting and cutting tools. M. : Infra-M, 2011. 416 p.
3. Trompet G. M., Krasilnikov A. Ya. Vibrational inverter control device for controlling // STIN. 2008. № 6. P. 21–23.
4. Trompet G. M., Aleksandrov V. A., Kirsanov Yu. A. Vibrational-sensor measuring deviation size : patent № 2284466 Russian Federation. G01B7/00.
5. Trompet G. M., Aleksandrov V. A. Develop a system administrator control using vibrational devices // Bulletin of Russian State Agrarian Correspondence University. 2007. № 2. P. 71–72.
6. Skvortsov V. S. Fundamentals of mechanical engineering. Tomsk : Publishing house of TPU, 2012. 352 p.
7. Khomchenko V. G., Fedotov A. V. Automatic control in machining flexible manufacturing systems. Omsk : OmSTU, 2010. 160 p.
8. Trompet G. M., Aleksandrov V. A., Kirsanov Yu. A. Vibrogeneratory converter : patent № 2270415 RF. G01B7/10.
9. Aleksandrov V. A., Trompet G. M. Technological and metrological possibilities of machine tools of the active control in mass production. Ekaterinburg : USAU, 2014. 232 p.
10. Trompet G. M., Fedotov V. A., Kolka I. A. Commercial operation of the control device controls on the multi-purpose machine // STIN. 2008. № 12. P. 24–25.