

Синтез системы стабилизации суммарного усилия резания токарного металлообрабатывающего станка

М. П. Белов¹, О. А. Кундюков^{1✉}, В. И. Королёв²

¹ Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна. Высшая школа технологии и энергетики, Санкт-Петербург, Россия

✉ kundyukov94@mail.ru

Аннотация. Разработана математическая модель расчета отклонения заготовки. Построены эпюры поперечных усилий и изгибающих моментов в заготовках из различных материалов при разных режимах резания. Проанализировано влияние глубины резания, скорости продольной подачи токарного станка на отклонение оси заготовки. Синтезирована структурная схема для расчета задания на глубину резания с учетом изгиба заготовки в системе управления приводом поперечной подачи. Рассмотрена функциональная схема стабилизации усилия резания. Приведено математическое описание привода главного движения с учетом упругости ременной передачи, привода поперечной подачи с учетом изгиба заготовки и привода продольной подачи с упругими связями. Синтезирована структурная схема стабилизации суммарного усилия резания, построенная в математической среде MatLab and Simulink, включающая в себя привод главного движения с учетом растяжения ременной передачи и нейроконтроллером с эталонной моделью, привод поперечной подачи с учетом изгиба заготовки, а также привод продольной подачи с нейроконтроллером с эталонной моделью. Синтезирована структурная схема стабилизации суммарного усилия резания без нейроконтроллеров, учета изгиба заготовки и растяжения ремня. Приведены и проанализированы графики переходных процессов систем стабилизации и усилия резания.

Ключевые слова: двухмассовая система, упругий приводной ремень, изгиб заготовки, упругие колебания, подчиненное регулирование, нейроконтроллер

Для цитирования: Белов М. П., Кундюков О. А., Королёв В. И. Синтез системы стабилизации суммарного усилия резания токарного металлообрабатывающего станка // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2024. Т. 17, № 10. С. 98–112. doi: 10.32603/2071-8985-2024-17-10-98-112.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Original article

Synthesis of a System for Stabilizing the Total Cutting Force of a Metalworking Lathe

M. P. Belov¹, O. A. Kundyukov^{1✉}, V. I. Korolev²

¹ Saint Petersburg Electrotechnical University, Saint Petersburg, Russia

² Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design. Higher School of Technology and Energy, Saint Petersburg, Russia

✉ kundyukov94@mail.ru

Abstract. A mathematical model for calculating the value of workpiece deviation is developed. Diagrams of transverse forces and bending moments in workpieces made of different materials under different cutting conditions is constructed. The influence of the cutting depth and longitudinal feed rate of a lathe on the workpiece

axis deviation is analyzed. A structural diagram for calculating the cutting depth is synthesized taking into account workpiece bending in the transverse feed drive control system. A functional diagram of cutting force is considered. A mathematical description of the main motion drive is provided based on the elasticity of belt transmission, the transverse feed drive taking workpiece bending into account, and the longitudinal feed drive with elastic connections. A structural diagram for stabilization of the total cutting force, constructed in the MatLab and Simulink environments, is synthesized. This diagram includes the main motion drive taking belt transmission stretching into account and a neural controller with a reference model, the transverse feed drive taking workpiece bending into account, and the longitudinal feed drive with a neural controller with a reference model. Graphs of transient processes of the stabilization systems and cutting force are presented and analyzed. The structural diagram of cutting force stabilization, including the main motion drive taking into account belt transmission stretching and a neural controller with a reference model, the transverse feed drive taking workpiece bending into account, as well as the longitudinal feed drive with a neural controller with a reference model, ensures high static and dynamic characteristics of the drives.

Keywords: dual-mass system, elastic drive belt, workpiece bending, elastic vibrations, subordinate control, neurocontroller

For citation: Belov M. P., Kundyukov O. A., Korolev V. I. Synthesis of a System for Stabilizing the Total Cutting Force of a Metalworking Lathe // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2024. Vol. 17, no. 10. P. 98–112. doi: 10.32603/2071-8985-2024-17-10-98-112.

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

В процессе точения цилиндрических деталей на токарных металлообрабатывающих станках на кромке резца возникают усилия, приводящие к отклонению заготовок от первоначальной оси расположения. Исходя из конструктивных особенностей, а также из назначения детали, назначается допуск формы для наиболее важных размеров заготовок. В данном случае именно допуск формы будет ограничивать величину отклонения оси заготовки. Для определения отклонения оси заготовки разрабатываются и применяются различные математические модели.

Целью работы является разработка математической модели расчета величины отклонения заготовки, исследование влияния приводов подач на величину отклонения заготовки, а также синтез системы стабилизации суммарного усилия резания, в которой учитываются изгиб заготовки и упругие связи в приводах главного движения и продольной подачи.

На рис. 1 представлена схема закрепления цилиндрической детали в патроне [1].

На рис. 1 приведены следующие обозначения: А – начало заготовки; В – конец заготовки; С – место давления резца; y_{\max} – максимальное значение величины отклонения, мм; X_p – расстояние от свободно висящего конца детали до места приложения силы, мм; F_y – радиальная сила, Н; y_c – отклонение заготовки в месте давления резца; D – диаметр заготовки до обработки, мм; $L_{\text{заг}}$ – длина заготовки, мм.

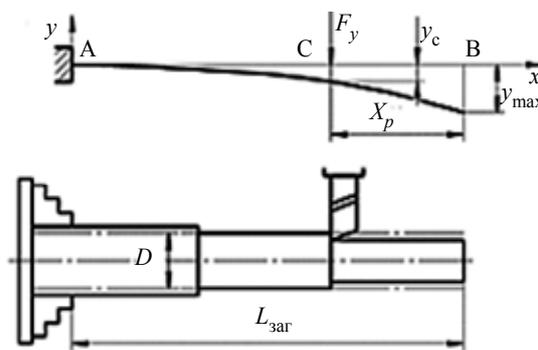


Рис. 1. Схема закрепления цилиндрической детали «в патроне»
Fig. 1. Scheme of fastening a cylindrical part «in a chuck»

Отклонение оси цилиндрической заготовки в данном случае:

$$y_c = \frac{F_y (L_{\text{заг}} - X_p)}{3EJ},$$

где E – модуль нормальной упругости, кг/мм² (например, для стали $40X = 2.1 \cdot 10^6$ кг/мм² ($\sim 2.1 \cdot 10^5$ МПа)); J – приведенный момент инерции сечения заготовки мм⁴, для сплошных валов:

$$J = \frac{\pi D^4}{64},$$

где π – математическая константа, равная 3.14.

Радиальное усилие резания F_y при точении:

$$F_y = 10C_p h^x s^y v^n K_p,$$

где C_p – коэффициент, меняющийся от параметров обработки; x, y, n – показатели степеней, имеющие диапазон значений от -0.4 до 1.8 ; h – глубина реза-

ния, мм; s – перемещение резца при продольной подаче, мм/об; v – скорость резания, м/мин; K_p – поправочный коэффициент. Поправочный коэффи-

Табл. 1. Исходные данные для проведения исследования
Tab. 1. Initial data for the study

Наименование/обозначение/ед. изм.	Значение			
	Первый опыт	Второй опыт	Третий опыт	Четвертый опыт
Диаметр заготовки до обработки D , мм	68	68	68	68
Диаметр заготовки после обработки d , мм	62	62	62	62
Длина заготовки $L_{\text{заг}}$, мм	500	500	500	500
Материал заготовки	Сталь 40 X	Сталь 40 X	Ковкий чугун НВ 150	Ковкий чугун НВ 150
Модуль нормальной упругости E , МПа	$2.1 \cdot 10^5$	$2.1 \cdot 10^5$	$1.7 \cdot 10^5$	$1.7 \cdot 10^5$
Способ крепления заготовки	В патроне	В патроне	В патроне	В патроне
Тип резца	T5K10	T5K10	T5K10	T5K10
Глубина резания h , мм	1; 2; 3	3	1; 2; 3	3
Перемещение резца при продольной подаче s , мм/об	0.8	0.6; 0.8; 1	0.8	0.6; 0.8; 1
Скорость резания v , м/мин	67	67	67	67
Скорость вращения шпинделя N , мин ⁻¹	315	315	315	315
Показатели степени режимов подач x, y, n	0.9; 0.6; -0.3	0.9; 0.6; -0.3	0.9; 0.75; 0	0.9; 0.75; 0
Коэффициент C_p	243	243	88	88
Коэффициент K_p	0.7315	0.77	0.77	0.77

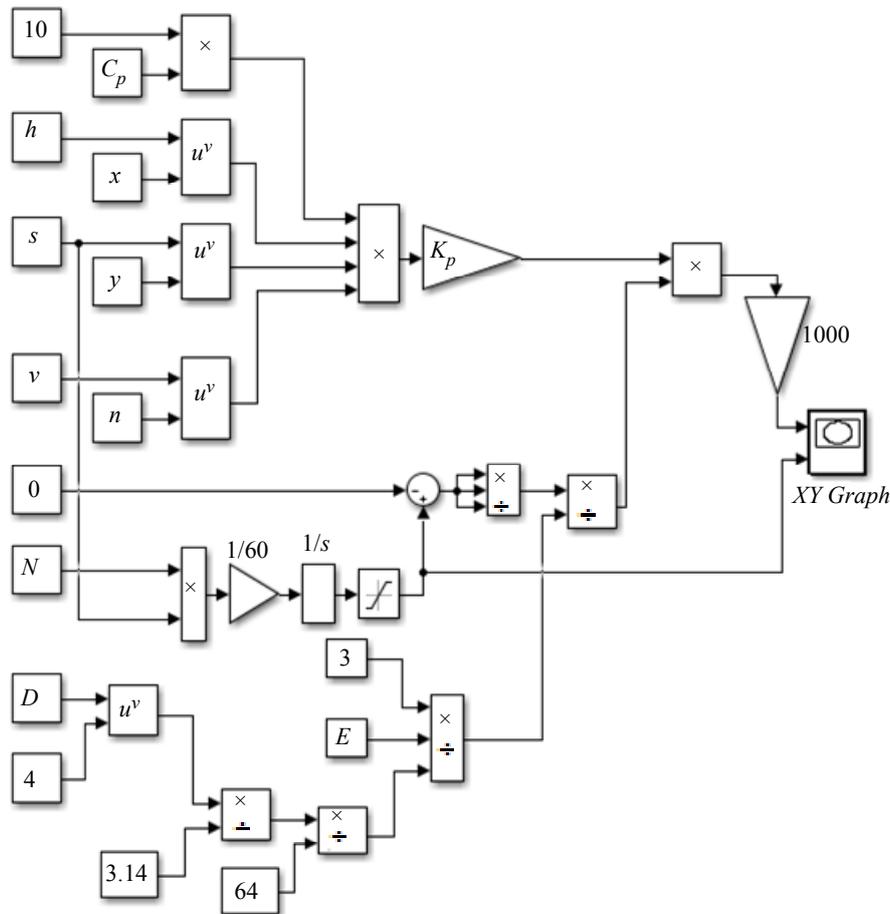


Рис. 2. Структурная схема для расчета отклонения оси заготовки под воздействием радиальной силы резания
Fig. 2. Block diagram for calculating the deviation of the workpiece axis under the influence of radial cutting force

циент представляет собой произведение коэффициентов, числовые значения которых могут быть найдены по таблицам из справочников.

В табл. 1 представлены исходные данные, используемые в дальнейшем при проведении исследования влияния параметров резания на прогиб заготовки.

По приведенным формулам синтезируется структурная схема для расчета отклонения заготовки y_c под воздействием радиальной силы резания F_y при перемещении резца вдоль оси заготовки. Структурная схема для расчета отклонения оси заготовки под воздействием радиальной силы резания представлена на рис. 2, где приведены следующие обозначения: *XY Graph* – блок для отображения графика XY-сигналов, мкм; u^v – блок возведения числа u в степень v ; \times – операция умножения; \div – операция деления; $1/s$ – интегрирующее звено.

На рис. 3 представлены значения отклонений заготовки из стали 40 X, эпюры поперечных усилий (Q_{y1}, Q_{y2}, Q_{y3}) и изгибающих моментов (M_{x1}, M_{x2}, M_{x3}) первых двух опытов при различных значениях глубины резания (рис. 3, а) и скорости продольной подачи (рис. 3, б).

На рис. 3–4 приведены следующие обозначения: M_a – изгибающий момент вокруг точки a , Н · м; R_a – реакция опоры в жестко закрепленной части

заготовки; F_1-F_3 – значения радиальных усилий резания, соответствующие различным значениям глубины резания, Н; y_1-y_3 – значения отклонений заготовки, мкм; $F_1L_{заг} - F_3L_{заг}$ – момент в жестко закрепленной части заготовки для трех различных значений глубины резания; точки a, b – точки, соответствующие жестко закрепленному концу заготовки и свободновисящему концу.

Реакция опоры в жестко закрепленной части заготовки – $R_a = F$, изгибающий момент в жестко закрепленной части заготовки – $M = FL_{заг}$. Как видно из рис. 3, радиальное усилие для каждого значения глубины резания или перемещения резца при продольной подаче равно поперечному усилию Q_y в заготовке. При этом для каждого конкретного случая значение Q_y одинаково на всей длине заготовки $L_{заг}$, в то время как изгибающий момент M линейно изменяется от нуля до максимального значения. Момент равен нулю в точке приложения усилия F и максимален в той части заготовки, которая зажата в патроне шпинделя. Для заготовки из стали 40 X при изменении глубины резания h с 1 до 3 мм (рис. 3, а), отклонение заготовки y изменяется от 83 до 224 мкм (увеличивается в 2.7 раза), радиальное усилие резания F изменяется с 440 до 1184 Н. Изгибающий момент в жестко закрепленной части заготовки изменяется от 220 до 592 Н · м. При изменении перемещения резца

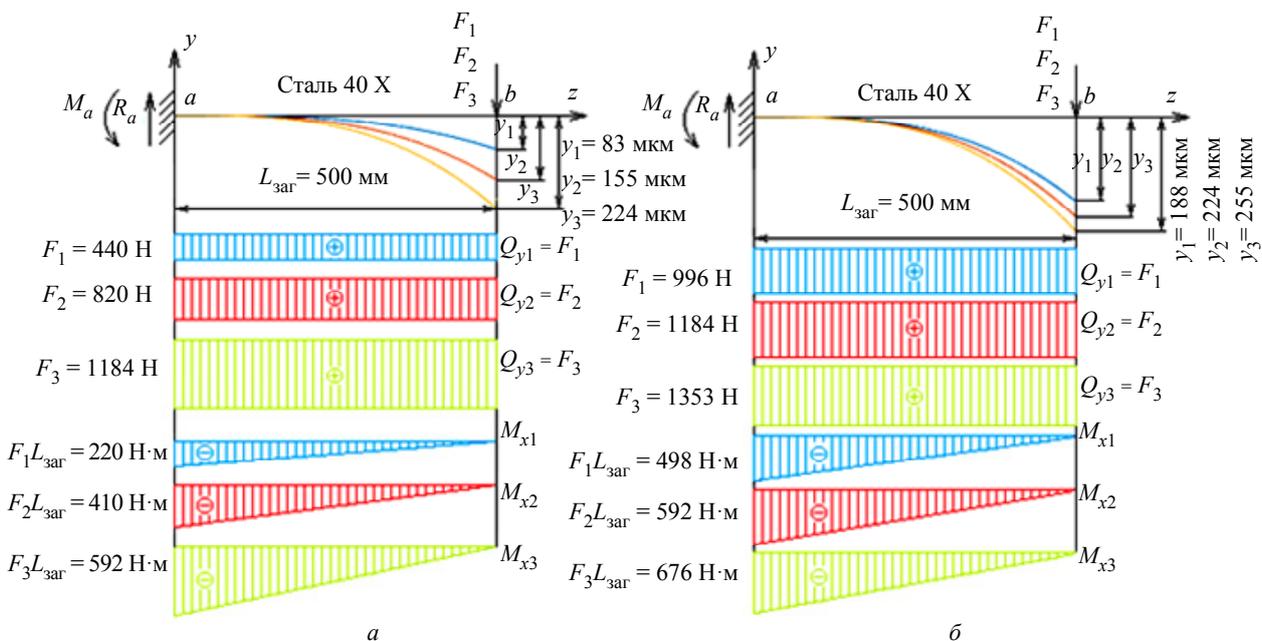


Рис. 3. Отклонения заготовки из стали 40 X, эпюры поперечных усилий и изгибающих моментов при различных значениях глубины резания (а) и скорости продольной подачи (б)

Fig. 3. Deviations of a 40 X steel billet, diagrams of transverse forces and bending moments at different values of cutting depth (a) and longitudinal feed rate (b)

при продольной подаче s с 0.6 до 1 мм/об (рис. 3, б), отклонение заготовки y изменяется от 188 до 255 мкм (увеличивается в 1.3 раза), радиальное усилие резания F – с 996 до 1353 Н. Изгибающий момент в жестко закрепленной части заготовки изменяется от 498 до 676 Н·м. Как видно из рис. 3, изменение перемещения резца при продольной подаче в процессе обработки заготовки приводит к меньшему изменению радиального усилия резания, поперечных усилий и изгибающих моментов, что, в свою очередь, ведет к меньшему изменению отклонения заготовки по сравнению со случаем, когда изменяется глубина резания.

На рис. 4 представлены значения отклонений заготовки из ковкого чугуна HB 150, эпюры поперечных усилий (Q_{y1}, Q_{y2}, Q_{y3}) и изгибающих моментов (M_{x1}, M_{x2}, M_{x3}) третьего и четвертого опытов при различных значениях глубины резания (рис. 4, а) и скорости продольной подачи (рис. 4, б).

Для заготовки из ковкого чугуна HB 150 при изменении глубины резания h с 1 до 3 мм (рис. 4, а), отклонение заготовки y изменяется от 134 до 360 мкм (увеличивается в 2.7 раза), радиальное усилие резания F изменяется с 573 до 1571 Н. Изгибающий момент в жестко закреп-

ленной части заготовки изменяется от 286 до 535 Н·м. При изменении перемещения резца при продольной подаче s с 0.6 до 1 мм/об (рис. 4, б) отклонение заготовки y изменяется от 290 до 425 мкм (увеличивается в 1.5 раза), радиальное усилие резания F изменяется с 1200 до 1800 Н. Изгибающий момент в жестко закрепленной части заготовки изменяется от 600 до 900 Н·м.

Из рис. 3–4 следует, что радиальное усилие резания, поперечное усилие и изгибающие моменты в заготовке из ковкого чугуна HB 150 будут выше, чем в заготовке из стали 40 X при одинаковых геометрических параметрах и режимах резания. Так, при глубине резания 1 мм в заготовке из стали 40 X возникает $F = 440$ Н (рис. 3, а), а в заготовке из ковкого чугуна $F = 573$ Н (рис. 4, а, усилие увеличилось в 2.3 раза). При перемещении резца при продольной подаче 1 мм/об в заготовке из стали 40 X максимальное значение изгибающего момента в заготовке составляет $M = 676$ Н·м (рис. 3, б), а в заготовки из ковкого чугуна – $M = 900$ Н·м (рис. 4, б, усилие увеличилось в 1.3 раза).

В табл. 2 представлены значения отклонения заготовок из разных материалов при изменении глубины резания и перемещения резца при продольной подаче.

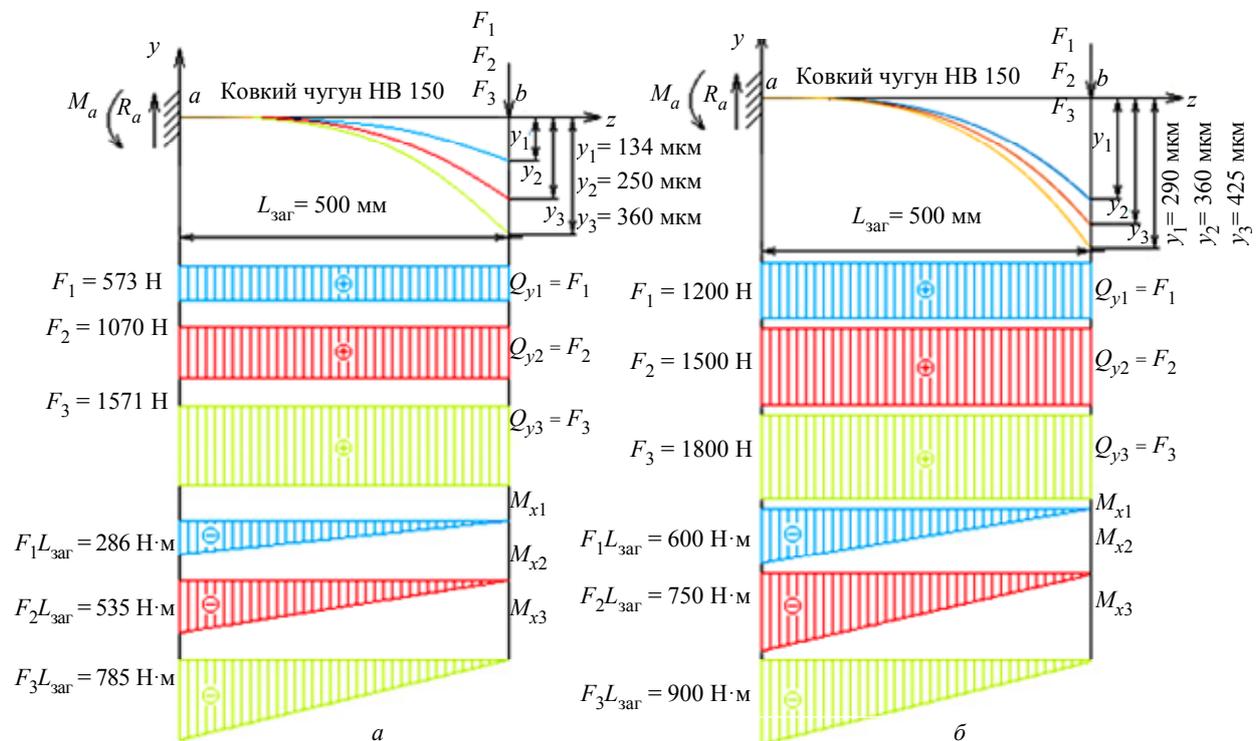


Рис. 4. Отклонения заготовки из ковкого чугуна HB 150, эпюры поперечных усилий и изгибающих моментов при различных значениях глубины резания (а) и скорости продольной подачи (б)

Fig. 4. Deviations of the HB 150 ductile iron billet, diagrams of transverse forces and bending moments at different values of cutting depth (a) and longitudinal feed rate (b)

Из результатов проведенных опытов следует, что на отклонение заготовки влияют такие параметры, как перемещение резца при продольной подаче, глубина резания и материал заготовки. Для уменьшения отклонения заготовки следует либо уменьшать глубину резания, либо перемещение резца при продольной подаче. В таком случае качество обработки повысится. Однако следует учитывать, что производительность станка в таком случае снижается.

Может быть также учтен изгиб заготовки при формировании задания на глубину резания в про-

цессе обработки. При синтезе такой системы управления приводом поперечной подачи учет отклонения заготовки в процессе обработки осуществляется в виде добавления значения отклонения заготовки к текущему заданию на глубину резания в каждой точке приложения резца.

Для построения структурной схемы для расчета задания на глубину резания с учетом изгиба заготовки используются формулы, приведенные ранее. Задание на глубину резания подается с помощью линейного задатчика интенсивности.

Табл. 2. Значения отклонения заготовок из разных материалов при изменении глубины резания и скорости продольной подачи
 Tab. 2. Deviation values of workpieces made of different materials when changing the cutting depth and longitudinal feed rate

Параметр, значение		Координата X_p , мм					
		0	250	500	0	250	500
		Сталь 40 X			Ковкий чугун НВ 150		
		Прогиб y_p , мкм					
		y_1	y_2	y_3	y_1	y_2	y_3
Глубина резания (при $s = 0.8$ мм/об)	1	0	10	83	0	17	134
	2	0	19	155	0	32	250
	3	0	28	224	0	45	360
Перемещение резца при продольной подаче (при $h = 3$ мм), мм/об	0.6	0	24	188	0	36	290
	0.8	0	28	224	0	45	360
	1	0	32	255	0	53	425

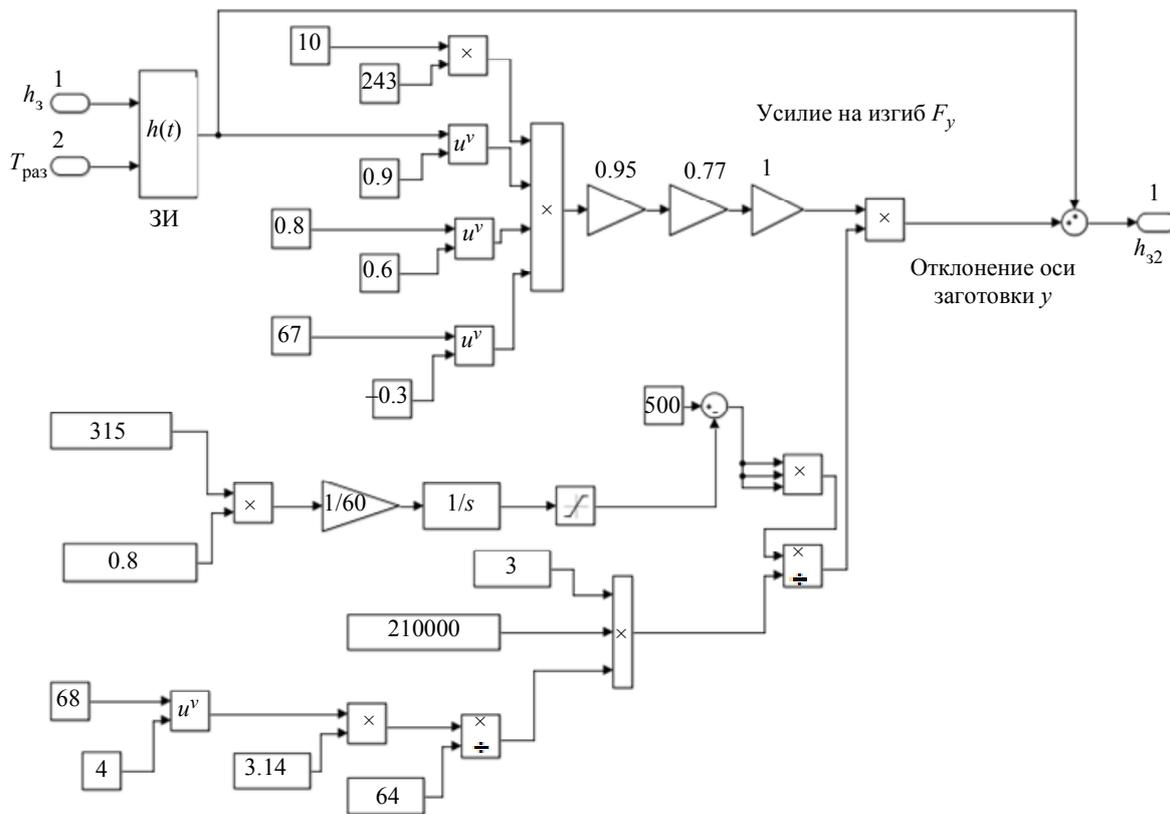


Рис. 5. Структурная схема для задания на глубину резания с учетом изгиба заготовки
 Fig. 5. Block diagram for calculating the target cutting depth taking workpiece bending into account

На рис. 5 приведена структурная схема для расчета задания на глубину резания с учетом изгиба заготовки, которая будет впоследствии использована в соответствующей системе управления приводом поперечной подачи.

На рисунке обозначены: h_3 – задание на глубину резания, мм; $T_{раз}$ – заданное время разгона привода поперечной подачи, с; ЗИ – задатчик интенсивности; $h(t)$ – выходной сигнал ЗИ, мм; h_{32} – задание на глубину резания с учетом изгиба заготовки, мм; y – отклонение оси заготовки, мм.

Проведем синтез системы стабилизации суммарного усилия резания токарного металлообрабатывающего станка.

Система стабилизации суммарного усилия резания состоит из трех электроприводов станка: главного движения, продольной и поперечной подач.

В процессе точения при токарной обработке возникает усилие F , приложенное к режущей кромке резца, которое может быть разложено на составляющие F_x , F_y и F_z :

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2},$$

где F_x – осевая сила, действующая в направлении подачи; F_y – радиальная сила, действующая нормально к обработанной поверхности и создающая давление на суппорт; F_z – главная касательная сила, действующая в направлении траектории главного движения, преодолеваемая шпинделем станка и называемая усилием резания.

Функциональная схема системы стабилизации усилия резания приведена на рис. 6, где при-

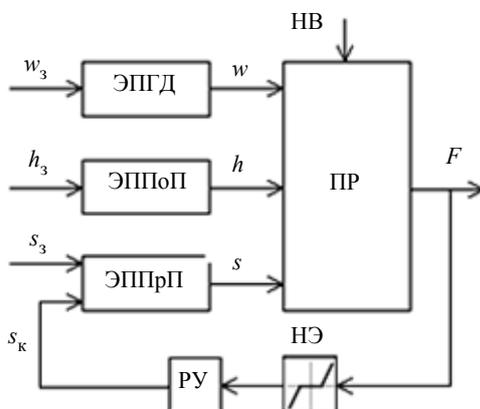


Рис. 6. Функциональная схема системы стабилизации усилия резания
Fig. 6 Functional diagram of a system for cutting force stabilization

ведены следующие обозначения: ЭПГД, ЭПШоП, ЭППрП – электроприводы главного движения, поперечной и продольной подач; ПР – процесс резания; НВ – возмущающее воздействие в виде изменения твердости заготовки; НЭ – нелинейный элемент; РУ – регулятор усилия; w_3 – задание на угловую скорость, рад/с; s_3 – задание на перемещение резца при продольной подаче, мм/с; s_k – корректирующий сигнал, мм/с.

Автоматическая стабилизация суммарного усилия резания возможна, если применить нелинейную обратную связь, действие которой начинается после превышения усилием некоторого значения F_0 , соответствующего максимально допустимому значению усилия резания. При условии $F > F_0$ на выходе нелинейного элемента НЭ и регулятора усилия появляется сигнал коррекции s_k , уменьшающий продольную подачу s так, чтобы либо $F = \text{const}$, либо F_p не превышало максимально допустимого значения, что зависит от настройки параметров регулятора усилия [2].

В качестве примера рассматривается токарный патронно-центральный станок 16А20Ф3 с электродвигателями главного движения АДЧР132М4 мощностью 11 кВт, поперечной подачи АДЧР112МА8 мощностью 2.2 кВт, продольной подачи АДЧР112МА8 мощностью 2.2 кВт.

Математическое описание привода главного движения с учетом упругости ременной передачи представлено следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} M_1 - M_{y1} = J_1 \frac{dw_1}{dt}; \\ M_{y1} = \varepsilon K G_1; \\ M_{y2} - M_{c2} = J_2 \frac{dw_2}{dt}; \\ M_{y2} = \varepsilon K G_2; \\ \varepsilon = \frac{V_1 - V_2}{V_1} \frac{1}{T_p p + 1}; \\ T_p = \frac{Y_p}{V_1}, \end{cases}$$

где M_1, M_{y1} – моменты двигателя и упругого взаимодействия ведущего шкива, Н · м; J_1 – общий момент инерции двигателя и ведущего шкива, кг · м²; w_1 – угловая скорость ведущего шкива, рад/с; t – время, с; ε – относительное удлинение ремня; K – коэффициент жесткости ремня, Н/м;

G_1 – радиус ведущего шкива, м; M_{y2} – момент упругого взаимодействия ведомого шкива, Н · м; M_{c2} – статический момент, обусловленный нагрузкой на второй инерционной массе, Н · м; J_2 – суммарный момент инерции ведомого шкива и моментов инерции заготовки и патрона, приведенных к валу ведомого шкива, кг · м²; w_2 , G_2 – угловая скорость, рад/с, и радиус, м, ведомого шкива; V_1 , V_2 – линейные скорости ведущего и ведомого шкивов, м/с; T_p – постоянная времени ремня, с; Y_p – длина свободного пробега ведущей ветви ремня, м; p – оператор Лапласа. Трение в подшипниках в данной системе уравнений не учитывается [3].

Математическое описание привода поперечной подачи представлено следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} U_\beta = R_1 \left(\text{sig } T_1 \frac{di_\beta}{dt} + i_\beta \right); \\ M_1 = i_\beta 3 p_\Pi k_2 \Psi_{\text{ном}}; \\ M_1 - M_2 = J \frac{dw}{dt}, \end{cases}$$

где U_β – проекция напряжения статора на активную ось, В; R_1 – активное сопротивление статорной обмотки, Ом; $\text{sig } T_1$ – постоянная времени обмотки фазы статора, с; i_β – активная составляющая тока статора, А; p_Π – число пар полюсов, шт; k_2 – коэффициент (от 0.1 до 1); $\Psi_{\text{ном}}$ – номинальное потокосцепление, Вб; M_2 – момент сопротивления двигателя, Н · м; J – момент инерции двигателя, кг · м²; w – угловая скорость вращения двигателя, рад/с [2].

Математическое описание привода продольной подачи с упругими связями строится на основании второго закона Ньютона для вращающихся масс

$$\begin{cases} M_1 - M_{c1} - M_{12} = J_1 \frac{dw_1}{dt}; \\ M_{12} = C(f_1 - f_2); \\ M_{12} - M_{c2} = J_2 \frac{dw_2}{dt}, \end{cases}$$

где M_{c1} – статический момент, обусловленный трением, Н · м; M_{12} – момент упругого взаимо-

действия, Н · м; J_1 , J_2 – моменты инерции первой и второй масс, кг · м²; w_1 , w_2 – угловые скорости вращения первой и второй масс, рад/с; t – время, с; C – коэффициент жесткости; f_1 , f_2 – углы поворота первой и второй масс [4], [5].

Для компенсации ошибки по скорости шпинделя в статическом режиме в приводе главного движения вычисляется корректирующий коэффициент

$$K_{\text{кор}} = \frac{w}{KG_2}.$$

Моменты сопротивления приводов

$$M_c = \frac{P}{\omega},$$

где P – мощность привода, Вт; ω – угловая скорость привода.

Мощность резания для составляющих сил резания

$$R = Fv,$$

где F – усилие резания, Н; v – линейная скорость привода, м/с.

В табл. 3 представлены исходные данные, которые использовались при синтезе системы стабилизации усилия резания.

В СУ электроприводами главного движения и продольной подачи рассматриваемого станка применялись нейроконтроллеры, в структуре которых используется эталонная модель объекта Model Reference Controller (MRC).

При настройке параметров моделей управляемых объектов в приводах продольной подачи и главного движения, использовались параметры, представленные в табл. 4.

В качестве идеальной модели в системе управления приводом главного движения станка применялось апериодическое звено 1-го порядка с коэффициентом усиления, равным 1, и постоянной времени, равной $T_1 = 0.08$ с.

В качестве идеальной модели в системе управления с приводом продольной подачи станка применялось апериодическое звено первого порядка с коэффициентом усиления, равным 1, и постоянной времени, равной $T_2 = 0.02$ с.

Параметры идеальных объектов в системах управления электроприводами станка выбирались исходя из соображений о желаемом быстродействии рассматриваемых электроприводных систем.

Табл. 3. Исходные данные для синтеза системы стабилизации суммарного усилия резания
Tab. 3 Initial data for the synthesis of a system for total cutting force stabilization

Наименование, обозначение, ед. изм.	ЭППоП	ЭППрП	ЭПГД
Диаметр заготовки до обработки D , мм	68		
Диаметр заготовки после обработки d , мм	62		
Длина заготовки L , мм	500		
Модуль Юнга E , МПа	$2.1 \cdot 10^5$		
Глубина резания h , мм	3		
Перемещение резца при продольной подаче s , мм/об	0.8		
Скорость продольной подачи $v_{пр}$, мм/с	4.2		
Скорость резания $v_{рез}$, м/мин	67.3		
Скорость вращения шпинделя N , мин ⁻¹	315		
Угловая скорость вращения шпинделя $w_{шп}$, рад/с	33		
Угловая скорость вращения привода продольной подачи ω , рад/с	9.43		
Показатели степени режимов подач x, y, n	0.9; 0.6; -0.3	1; 0.5; -0.4	1; 0.75; -0.15
Коэффициент C_p	243	243	88
Коэффициент K_p	0.7315	0.77	0.77
Коэффициент жесткости C , Н · м ²	-	780	-
Коэффициент жесткости ремня K , Н/м	-	-	60 000
Коэффициент демпфирования B , Н · м · с/рад	-	0.536	-
Коэффициент $K_{п.м}$	0.223	0.445	0.217
Коэффициент пересчета v , мм/с, в s , мм/об	-	0.19	-
Момент инерции двигателя J , кг · м ²	0.024	0.024	0.024
Момент инерции второй массы J_2 , кг · м ²	-	0.0194	0.04
Число пар полюсов $P_{п}$	2	2	2
Постоянная времени ПЧ, $T_{пр}$	0.0001	0.0001	0.0001
Коэффициент усиления ПЧ, $K_{пр}$	220	220	220
Постоянная времени двигателя $\text{sig } T_1$	0.0167	0.0167	0.0167
Сопrotивление двигателя R_1 , Ом	2.1344	2.1344	2.1344
Коэффициент K_2	0.9192	0.9192	0.9192
Постоянная времени РП, $T_{рп}$	0.0016	-	-
Коэффициент усиления РП, $K_{рп}$	5605	-	-
Постоянная времени РС, $T_{рс}$	-	0.0016	0.0016
Коэффициент усиления РС, $K_{рс}$	4.82	4.84	62.5
Коэффициент усиления РТ, $K_{рт}$	0.82	0.82	0.82
Постоянная времени РТ, $T_{рт}$	0.0167	0.0167	0.0167

Табл. 4. Параметры модели объекта
Tab. 4. Object model parameters

Параметр	Обозначение	Значение для ЭППрП	Значение для ЭПГД
Обучающая функция	-	Trainlm	Trainlm
Число циклов обучения	-	300	300
Интервалы идентификации объекта	t_{max}, t_{min}	0.5; 0.01	2; 0.04
Диапазон входных сигналов	-	1; 0	1; 0
Длина обучающей выборки	N_b	15 000	15 000
Число элементов запаздывания на входе и выходе модели	N_p, N_j	2; 2	2; 2
Временной интервал сбора данных	Δt	0.01	0.04
Количество нейронов в скрытом слое	S_c	12	12

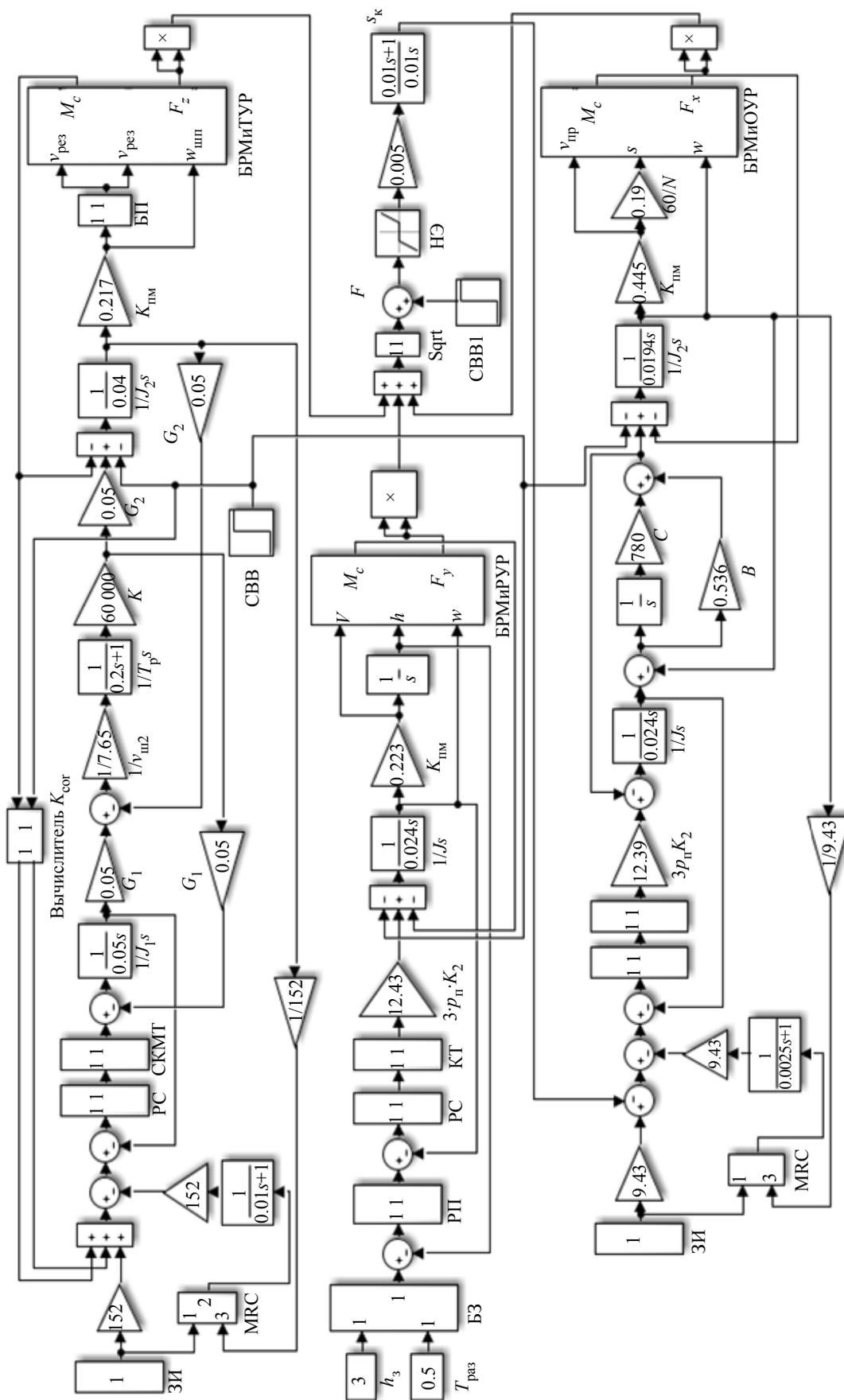


Рис. 7. Структурная схема стабилизации усилия резания, включающая в себя привод главного движения с учетом растяжения ременной передачи и с нейроконтроллером, привод поперечной подачи с учетом изгиба заготовки, а также привод продольной подачи с нейроконтроллером
 Fig. 7. Block diagram of the stabilization of the cutting force, which includes a drive of the main movement taking into account the stretching of the belt drive and a neuro-controller, a transverse feed drive taking into account the bending of the workpiece, as well as a longitudinal feed drive with a neurocontroller

Табл. 5. Параметры настроек нейрорегулятора
 Tab. 5. Settings of the neuroregulator

Параметр	Обозначение	Значение для ЭППрП	Значение для ЭПГД
Число циклов обучения	–	15	15
Интервалы идентификации объекта	$t_{\max}; t_{\min}$	0.5; 0.01	2; 0.04
Диапазон входных сигналов	–	1; 0	1; 0
Длина обучающей выборки	N_B	15 000	15 000
Число задержек на входе и выходе контроллера и модели объекта	$N_i; N_j$	4; 2	4; 2
Временной интервал сбора данных	Δt	0.01	0.04
Количество нейронов во внутреннем слое	S_B	14	14

Параметры нейрорегуляторов, находящиеся в нейроконтроллерах Model Reference Controller для приводов главного движения и движения подач, используемые при моделировании, представлены в табл. 5.

Для проведения эксперимента был проведен синтез двух систем управления приводами станка.

Структурная схема стабилизации суммарного усилия резания, построенная в математической среде MatLab and Simulink, включающая в себя привод главного движения с учетом растяжения ременной передачи и с нейроконтроллером с эталонной моделью, привод поперечной подачи с учетом изгиба заготовки, а также привод продольной подачи с нейроконтроллером, приведена на рис. 7.

Структурная схема стабилизации суммарного усилия резания, включающая в себя привод главного движения без учета растяжения ременной передачи и нейроконтроллера, привод поперечной подачи без учета изгиба заготовки, а также привод продольной подачи без нейроконтроллера, приведена на рис. 8.

В приведенных на рис. 7–8 структурных схемах: ЗИ – линейный задатчик интенсивности; MRC – нейроконтроллер с эталонной моделью (Model Reference Controller); БЗ – блок задания на привод поперечной подачи, структурная схема которого была приведена ранее (см. рис. 5); БРМиТУР, БРМиРУР, БРМиОУР – блоки расчета мощности и тангенциального, радиального и осевого усилий резания; РС, РП – регуляторы скорости и положения; СКМТ – свернутый контур момента и тока; КТ – контур тока; СВВ, СВВ1 – ступенчатое возмущающее воздействие; БП – блок пересчета угловой скорости в линейную скорость резания.

Графики переходных процессов систем стабилизации усилия резания при управляющих и возмущающих воздействиях приведены на рис. 9.

На рис. 9, а и б приведены графики переходных процессов структурных схем стабилизации

усилия резания, приведенных ранее на рис. 7 и 8. На данных графиках более колебательный переходной процесс относится к структурной схеме, приведенной на рис. 8, а менее колебательный соответствует структурной схеме на рис. 7. Из графиков видно, что привод главного движения выходит на заданные значения угловой скорости и линейной скорости резания за 1 с. На 2-й и 4-й с подается возмущающее воздействие на все приводы структурных схем, приведенных на рис. 7 и 8, которое приводит к возникновению колебательных переходных процессов в приводах (рис. 9, а–е). Вторая секунда соответствует началу процесса точения цилиндрической заготовки, четвертая – возмущающему воздействию ступенчатого характера, возникшему в процессе точения заготовки.

На рис. 9, в приведены графики переходных процессов по глубине резания приводов поперечной подачи с учетом и без учета изгиба заготовки. График с установившимся значением глубины резания 3 мм соответствует структурной схеме без учета глубины резания (см. рис. 8), другой график соответствует структурной схеме с учетом глубины резания (см. рис. 7). Время переходного процесса для обеих схем составляет 0.5 с, и далее наступает установившееся значение по глубине резания для привода без учета глубины резания (3 мм). В приводе с учетом глубины резания она постепенно уменьшается в процессе обработки заготовки.

На рис. 9, г приведены графики переходных процессов по линейной скорости перемещения реза приводов продольной подачи с нейрорегулятором и без него. Более колебательный переходной процесс относится к структурной схеме, приведенной на рис. 8, а менее колебательный соответствует структурной схеме на рис. 7.

На рис. 9, д приведены выходные сигналы регуляторов усилия. Как видно из графиков, на 6-й с в

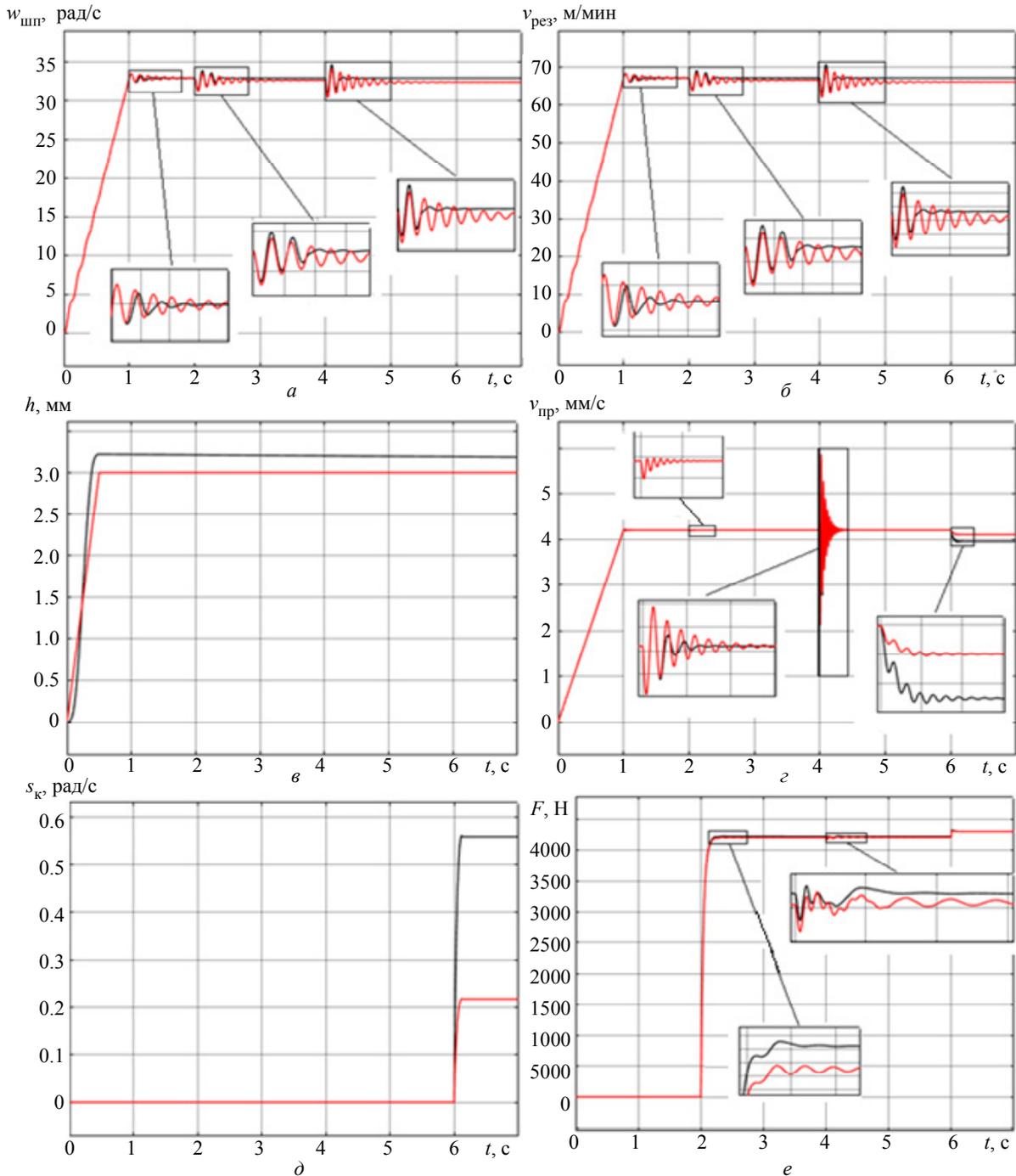


Рис. 9. Графики переходных процессов систем стабилизации усилия резания в зависимости от времени: а – $w_{шп}$; б – $v_{рез}$; в – h ; г – $v_{шп}$; д – s_k ; е – F

Fig. 9. Graphs of transient processes of cutting force stabilization systems is the dependence on time: а – $w_{шп}$; б – $v_{рез}$; в – h ; г – $v_{шп}$; д – s_k ; е – F

приводе с нейрорегулятором (см. рис. 7) появляется сигнал на уменьшение скорости продольного перемещения резца на $s_k = 0.56$ рад/с, в приводе без нейроконтроллера (см. рис. 8) задание на уменьшение скорости составляет $s_k = 0.22$ рад/с.

На рис. 9, е приведены графики переходных процессов суммарного усилия резания структурных схем, приведенных на рис. 7 и 8. Более колебатель-

ный переходной процесс соответствует схеме на рис. 8, а менее колебательный – схеме на рис. 7.

Время переходного процесса привода главного движения с нейроконтроллером и с учетом растяжения ременной передачи при подаче ступенчатого возмущающего воздействия в виде момента сопротивления $M_c = 20$ Н · м составляет $t = 0.22$ с (на рис. 9, а, б), в то время как время

переходного процесса привода главного движения без нейроконтроллера и без учета растяжения ременной передачи (на рис. 9, а, б) составляет $t = 1$ с, а статическая ошибка по скорости $\Delta\omega_{\text{шт}} = 0.54$ рад/с, по линейной скорости резания $\Delta v_{\text{рез}} = 1.1$ м/мин. В приводе поперечной подачи без учета изгиба заготовки максимальная ошибка по диаметру заготовки (рис. 9, в) для рассматриваемого режима резания $\Delta D = 0.44$ мм, в то время как в приводе поперечной подачи с учетом изгиба (рис. 9, в) ошибка по диаметру отсутствует. В приводе продольной подачи с нейроконтроллером переходный процесс по линейной скорости резца (рис. 9, г) при подаче возмущающего воздействия в виде $M_c = 20$ Н · м заканчивается за $t = 0.15$ с, тогда как в приводе без нейроконтроллера (рис. 9, г) переходный процесс длился $t = 0.35$ с.

Выводы. Разработана математическая модель расчета значения отклонения заготовки. Построены эпюры поперечных усилий и изгибающих моментов в заготовках из различных материалов при разных режимах резания. Синтезирована структурная схема для расчета задания на глубину резания с учетом изгиба заготовки. Проведены синтез и сравнение двух систем стабилизации суммарного усилия резания, каждая из которых состояла из привода главного движения, привода продольной и поперечной подач. Структурная схема стабилизации усилия резания, включающая в себя привод главного движения с учетом растяжения ременной передачи и с нейроконтроллером с эталонной моделью, привод поперечной подачи с учетом изгиба заготовки, а также привод продольной подачи с нейроконтроллером, обеспечивает высокие статические и динамические характеристики приводов.

Список литературы

1. Жданов А. А. Обеспечение точности расчета стрелы прогиба нежестких деталей типа «вал» при токарной обработке на станках с ЧПУ на основе получения оперативной информации о свойствах контактных пар: дис. ... канд. техн. наук. Волгоградский гос. техн. ун-т, Волгоград, 2019. 155 с.
2. Носиров И. С. Построение системы управления электроприводными системами металлорежущих станков с нейронными сетями: дис. ... канд. техн. наук. СПбГЭТУ «ЛЭТИ», СПб., 2019. 113 с.
3. Исследование системы подчиненного регулирования двухмассовым объектом в виде упругого

замещающегося ремня / М. П. Белов, О. А. Кундюков, В. И. Королев, К. К. Ершов, А. А. Наумов // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2023. Т. 16, № 8. С. 64–74.

4. Борцов Ю. А., Соколовский Г. Г. Автоматизированный электропривод с упругими связями. СПб.: Энергоатомиздат. 1992. 288 с.

5. Белов М. П., Носиров И. С., Белов А. М. Синтез нейросетевого регулятора двухмассовой электромеханической системы привода подачи токарного станка // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2018. № 8. С. 70–76.

Информация об авторах

Белов Михаил Петрович – д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой робототехники и автоматизации производственных систем СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: milesa58@mail.ru

Кундюков Олег Анатольевич – аспирант кафедры робототехники и автоматизации производственных систем СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: kundyukov94@mail.ru

Королёв Владимир Иванович – старший преподаватель кафедры автоматизированного электропривода и электротехники ВШТЭ СПбГУПТД, ул. Ивана Черных, д. 4, Санкт-Петербург, 198095, Россия.

E-mail: vikorol@yandex.ru

References

1. Zhdanov A. A. Obespechenie tochnosti raschjota strely progiba nezhestkih detalej tipa «val» pri tokarnoj obrabotke na stankah s ChPU na osnove poluchenija operativnoj informacii o svojstvah kontaktnyh par: dis. ... kand. tehn. nauk. Volgogradskij gos. tehn. un-t, Volgograd, 2019. 155 s. (In Russ.).

2. Nosirov I. S. Postroenie sistemy upravlenija jelektroprivodnymi sistemami metallorezhushhijh stankov s neyronnymi setjami: dis. ... kand. tehn. nauk. SPbGJeTU «LJeTI», SPb., 2019. 113 s. (In Russ.).

3. Issledovanie sistemy podchinennogo regulirovaniya dvuhmassovym ob#ektom v vide uprugogo zame-

shhajushhegosja remnja / M. P. Belov, O. A. Kundjukov, V. I. Korolev, K. K. Ershov, A. A. Naumov // Izv. SPbGJeTU «LJeTI». 2023. T. 16, № 8. S. 64–74. (In Russ.).

4. Borcov Ju. A., Sokolovskij G. G. Avtomatizirovannyj jelektroprivod s uprugimi svjazjami. SPb.: Jenergoatomizdat. 1992. 288 s. (In Russ.).

5. Belov M. P., Nosirov I. S., Belov A. M. Sintez nejrosetevogo reguljatora dvuhmassovoj jelektromehaničeskoj sistemy privoda podachi tokarnogo stanka // Izv. SPbGJeTU «LJeTI». 2018. № 8. S. 70–76. (In Russ.).

Information about the authors

Mikhail P. Belov – Dr Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Robotics and Automation of Production Systems of Saint Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: milesa58@mail.ru

Oleg A. Kundyukov – postgraduate student of the Department of Robotics and Automation of Production Systems of Saint Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: kundyukov94@mail.ru

Vladimir I. Korolev – senior lecturer at the Department of Automated Electric Drive and Electrical Engineering at HSE SPbGUPTD, Ivan Chernykh St., 4, Saint Petersburg, 198095, Russia.

E-mail: vikorol@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 10.09.2024; принята к публикации после рецензирования 24.10.2024; опубликована онлайн 25.12.2024.

Submitted 10.09.2024; accepted 24.10.2024; published online 25.12.2024.
