

Синтез системы управления приводом продольной подачи токарного станка с упругими связями с применением нестандартного задатчика интенсивности

М. П. Белов¹, О. А. Кундюков^{1✉}, В. И. Королев²

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

² Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, Санкт-Петербург, Россия

✉ kundyukov94@mail.ru

Аннотация. Сформированы требования к приводам подач токарных станков. Рассмотрено математическое описание двухмассовой системы с упругими связями. В среде MatLab/Simulink разработан нестандартный задатчик интенсивности для управления рассматриваемым объектом. Разработана модель системы автоматического управления электроприводом продольной подачи токарного станка с упругими связями с использованием нестандартного задатчика интенсивности. Результаты компьютерного моделирования выполнены в среде MatLab/Simulink для оценки работоспособности задатчика интенсивности и модели объекта при управляющих и возмущающих воздействиях. Приведены и проанализированы переходные характеристики системы по различным параметрам.

Ключевые слова: электропривод продольной подачи токарного станка, двухмассовая система, задатчик интенсивности

Для цитирования: Белов М. П., Кундюков О. А., Королев В. И. Синтез системы управления приводом продольной подачи токарного станка с упругими связями с применением нестандартного задатчика интенсивности // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2022. Т. 15, № 7. С. 47–56. doi: 10.32603/2071-8985-2022-15-7-47-56.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Original article

Synthesis of a Control System for a Longitudinal Feed Drive of a Lathe with Elastic Links Using a Non-Standard Intensity Generator

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, Saint Petersburg, Russia

✉ kundyukov94@mail.ru

Abstract. In the paper, the requirements for the feed drives of lathes are formed. The mathematical description of a two-mass system with elastic bonds is considered. In the MatLab/Simulink environment, a non-standard intensity generator was developed to control the considered object. A model of the automatic control system for the electric drive of the longitudinal feed of a lathe with elastic links has been developed using a non-standard intensity generator. The results of computer simulation were performed in the MatLab/Simulink environment to assess the performance of the intensity generator and the object model under control and perturbing influences. The transient characteristics of the system are presented and analyzed in terms of various parameters.

Keywords: longitudinal feed electric drive of a lathe, two-mass system, intensifier

For citation: Belov M. P., Kundyukov O. A., Korolev V. I. Synthesis of the Control System for a Longitudinal Feed Drive of a Lathe with Elastic Links Using a Non-Standard Intensity Generator // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2022. Vol. 15, no. 7. P. 47–56. doi: 10.32603/2071-8985-2022-15-7-47-56.

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

Повышение качества и точности обработки заготовок представляет актуальную задачу в машиностроении. Точность формы и размеров обработанных на станке заготовок зависит от точности станка, инструмента, жесткости системы СПИД (станок – приспособление – инструмент – деталь) и многих других факторов. Приводы подач в станках играют важнейшую роль в вопросах качества и точности обработки.

Приводы подач включают в себя электродвигатель, муфту и механическое передающее устройство в виде «винт–гайка» либо «шестерня–рейка», к которому крепится рабочий стол или инструмент. В современных станках с числовым программным управлением (ЧПУ) приводы подачи линейных движений формообразования на базе шариковых винтовых передач (ШВП) во многом определяют размерную и геометрическую точность заготовок.

Электродвигатели подач должны обеспечивать необходимые статические и динамические характеристики во всем диапазоне регулирования скорости. Эти двигатели должны выдерживать кратковременные перегрузки, обеспечивать высокое быстродействие привода, иметь малые габариты и массу, а также удобно встраиваться в механизмы станков. В качестве электродвигателей подач могут использоваться нерегулируемые асинхронные электродвигатели переменного тока, шаговые двигатели и следящие электродвигатели.

Из-за неудовлетворительных динамических свойств регулируемого электропривода, особенно при возмущении по нагрузке, появляется шероховатость поверхности, поэтому важно обеспечить высокое быстродействие привода при подключении и отключении нагрузки, а также при реверсе двигателя под нагрузкой на самых малых частотах вращения.

К приводам подач станков ЧПУ предъявляются следующие требования: широкий диапазон регулирования; высокая точность позиционирования; высокое быстродействие; способность выдерживать большие перегрузки; высокая жесткость, во многом определяющая точность перемещения и установки привода, его динамическое качество; высокая кинематическая точность; высокий вращающий момент для обеспечения пе-

ремещения исполнительного органа при любых скоростях и нагрузках; минимальное время отработки задающего воздействия при аperiodическом характере переходных процессов разгона и торможения; высокая надежность и ремонтпригодность; удобство конструктивной установки двигателя на станке и встройки статических преобразователей в шкафы и ниши станков; высокая унификация узлов и отдельных элементов; высокая экономичность и малая стоимость. Изучение требований к приводам подач – важная теоретическая и практическая задача.

Привод подачи на базе ШВП представляет собой сложную двухмассовую систему с упругими связями.

Упругие колебания в приводе подачи связаны с его податливостью и приводят к увеличению динамических нагрузок на привод, появлению вибраций, ухудшению его точности и снижению быстродействия. Таким образом, для обеспечения требуемого качества продукции станка важен вопрос компенсации упругих колебаний в приводе подачи, возникающих в процессе обработки заготовки.

Существуют разные способы компенсации упругих колебаний, среди которых можно отметить следующие [1]: ограничение среднего ускорения электропривода; ограничение темпа нарастания динамического момента; методы интеллектуального управления, основанные на использовании нейронных сетей или нечеткой (размытой) логики. Использование первых двух способов уменьшает быстродействие привода и снижает производительность. Методы управления нелинейными динамическими объектами с использованием нейросетевых регуляторов (НР) в своей структуре описаны в [2]–[4].

В [2] выполнен синтез НР с предсказанием для управления приводом главного движения токарного станка с целью улучшения динамических характеристик привода. Здесь же приведены рекомендации по подбору параметров нейрорегулятора. Применение нейрорегулятора с прогнозированием позволило сократить время переходного процесса на 34 % по сравнению с моделью без НР. Кроме того, благодаря применению регулятора с предсказанием, удалось сократить перерегулирование на 18 %.

В [3] рассмотрен синтез нейросетевого управления для обеспечения высокой статической и динамической точности привода при воспроизведении контурно-позиционных перемещений. При этом в данной публикации применяется тот же НР, что и в [2]. Здесь же приводятся параметры нейроконтроллера с предсказанием, существенно влияющие на качество прогнозирования.

В [4] приведен синтез нейросетевого регулятора NARMA-L2 для управления двухмассовой электромеханической системы привода подачи токарного станка, включая графики переходных процессов модели при различных параметрах НР. Исследование показало, что для обеспечения хороших динамических характеристик и повышения точности перемещения суппорта с заданной траекторией, а также для компенсации упругих колебаний можно использовать NARMA-L2 Controller в качестве регулятора положения в следящем электроприводе подачи токарного станка.

Таким образом, способы компенсаций упругих колебаний с использованием методов интеллектуального управления актуальны и перспективны.

Цель исследований состоит в синтезе системы управления привода продольной подачи токарного станка с упругими связями.

При рассмотрении автоматизированных систем управления электроприводом часто предполагается, что кинематическая связь между двигателем и исполнительным органом (ИО) не подвержена упругим деформациям. Во многих случаях идеализация, основанная на представлении о жесткой связи двигателя и исполнительного органа, допустима. Это объясняется тем, что частота собственных упругих колебаний механизма оказывается значительно выше частоты, определяющей быстродействие автоматизированной системы управления электроприводом. Если это условие не выполняется, то пренебрежение упругостью при анализе и синтезе системы может привести к ошибочным результатам. Чем выше быстродействие системы управления, тем больше вероятность того, что влияние упругости на работу системы управления электроприводом будет заметным [5].

Рассмотрению динамики системы управления электроприводом реального механизма предшествует создание модели механизма. Структурная схема двухмассовой системы с упругими связями изображена на рис. 1, где приняты следующие

обозначения: J_1, J_2 – моменты инерции первой и второй масс; b – коэффициент демпфирования; C – коэффициент жесткости; w_1, w_2 – угловая скорость вращения первой и второй масс; M_{c1}, M_{c2} – статические моменты, обусловленные трением и нагрузкой на второй массе; M_{12} – момент упругого взаимодействия.

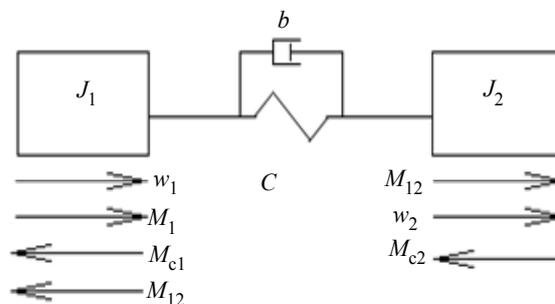


Рис. 1. Структурная схема двухмассовой системы
Fig. 1. Structural diagram of a two-mass system

В статическом режиме $w_1 = w_2 = \text{const}$, в динамическом – $w_1 \neq w_2 = \text{var}$.

Реальный механизм, строго говоря, почти всегда представляет собой систему с распределенными параметрами. Однако в большинстве случаев вполне удовлетворительный результат может быть получен при представлении механизма в виде системы с сосредоточенными параметрами. В данной работе упругие колебания привода учитываются.

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

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

В приведенных уравнениях f_1, f_2 – углы поворота первой и второй масс.

Для ограничения перегрузок по скорости, ускорению и моменту электроприводов различных объектов на входе систем автоматического регулирования (САР) устанавливаются специальные датчики интенсивности (ЗИ).

Самый простой из них – линейный датчик интенсивности, выходной сигнал которого изменяется по линейному закону от 0 до ука-

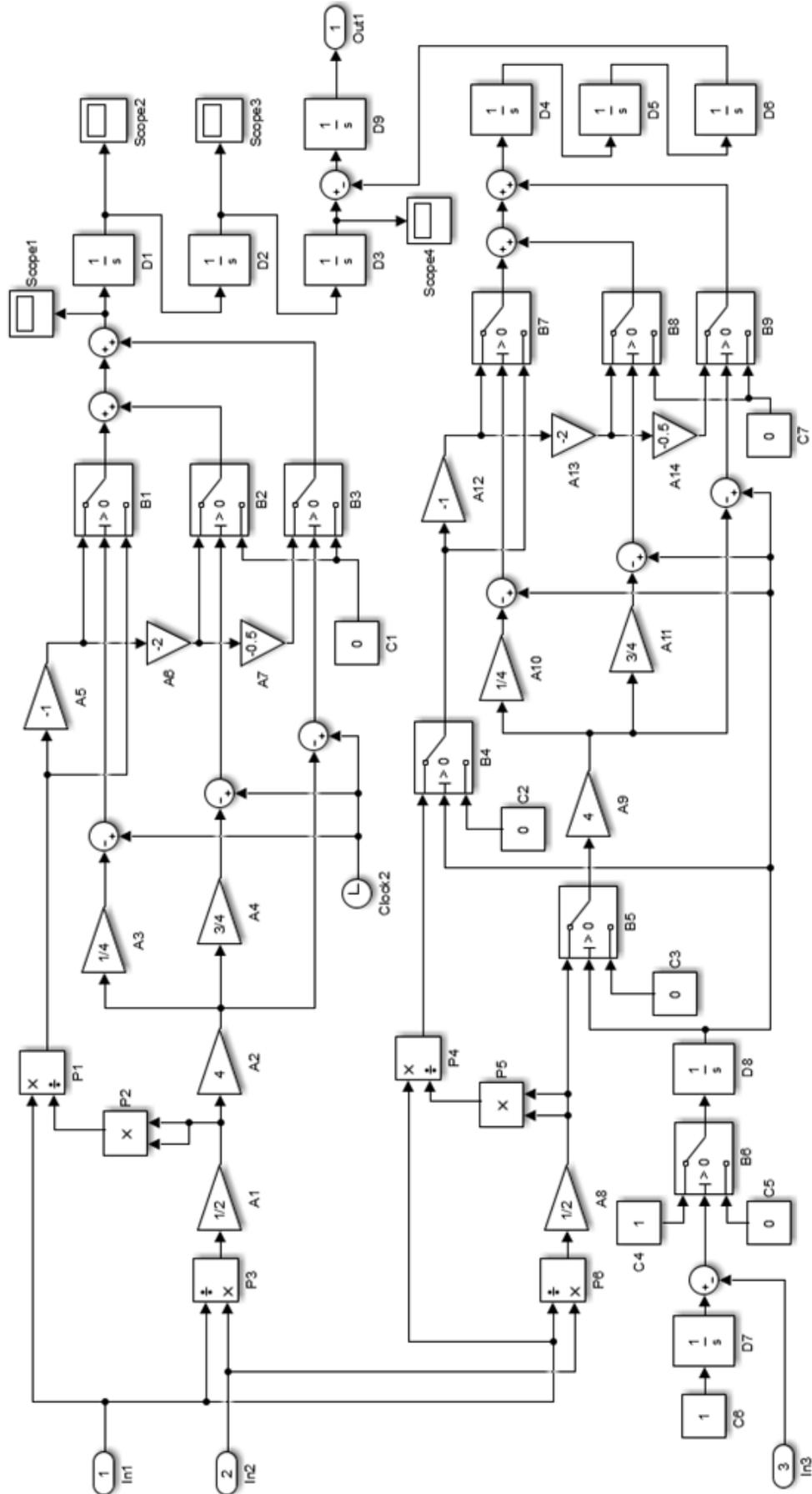


Рис. 2. Структура задатчика интенсивности
Fig. 2. Structure of the ramp generator

занного значения. При использовании такого ЗИ динамический момент привода будет изменяться ступенчато, что негативно скажется на механической части электропривода.

Более сложными считаются S-образные задатчики интенсивности, в которых можно ограничивать как первую производную (ускорение) функции изменения выходной координаты САР, так и вторую (рывок). В таких ЗИ с помощью двух входных величин формируется ступенчатый сигнал, последовательное интегрирование которого позволяет получить необходимый сигнал задания на выходе задатчика интенсивности [6].

В данной статье применяется нестандартный ЗИ, включающий в себя два стандартных. Его структура представлена на рис. 2.

Реализован ЗИ в среде MatLab/Simulink с помощью следующих блоков: входных величин $In_1–In_3$, выходной величины Out_1 , умножения/деления $P_1–P_6$, усилителей $A_1–A_{14}$, интеграторов $D_1–$

D_9 , постоянных $C_1–C_7$, ключей $B_1–B_9$ и сумматоров. $Score_1–Score_4$ – отображают один из формируемых сигналов и его последовательное интегрирование.

Стандартные задатчики интенсивности, входящие в структуру используемого в данной работе, формируют два одинаковых, но противоположно направленных S-образных сигнала. На рис. 3 изображен ступенчатый сигнал на выходе одного из ЗИ и его последовательное интегрирование до получения нужного сигнала задания. Получившийся сигнал (рис. 3, δ) суммируется с аналогичным противоположно направленным сигналом, и они интегрируются. Задаются амплитуда сигнала и время между двумя S-образными сигналами.

Рассматриваемый задатчик интенсивности включен на вход контура положения САР объекта и позволяет задавать угловое ускорение объекта, угловую скорость объекта и время, в течение которого привод будет вращаться с заданной

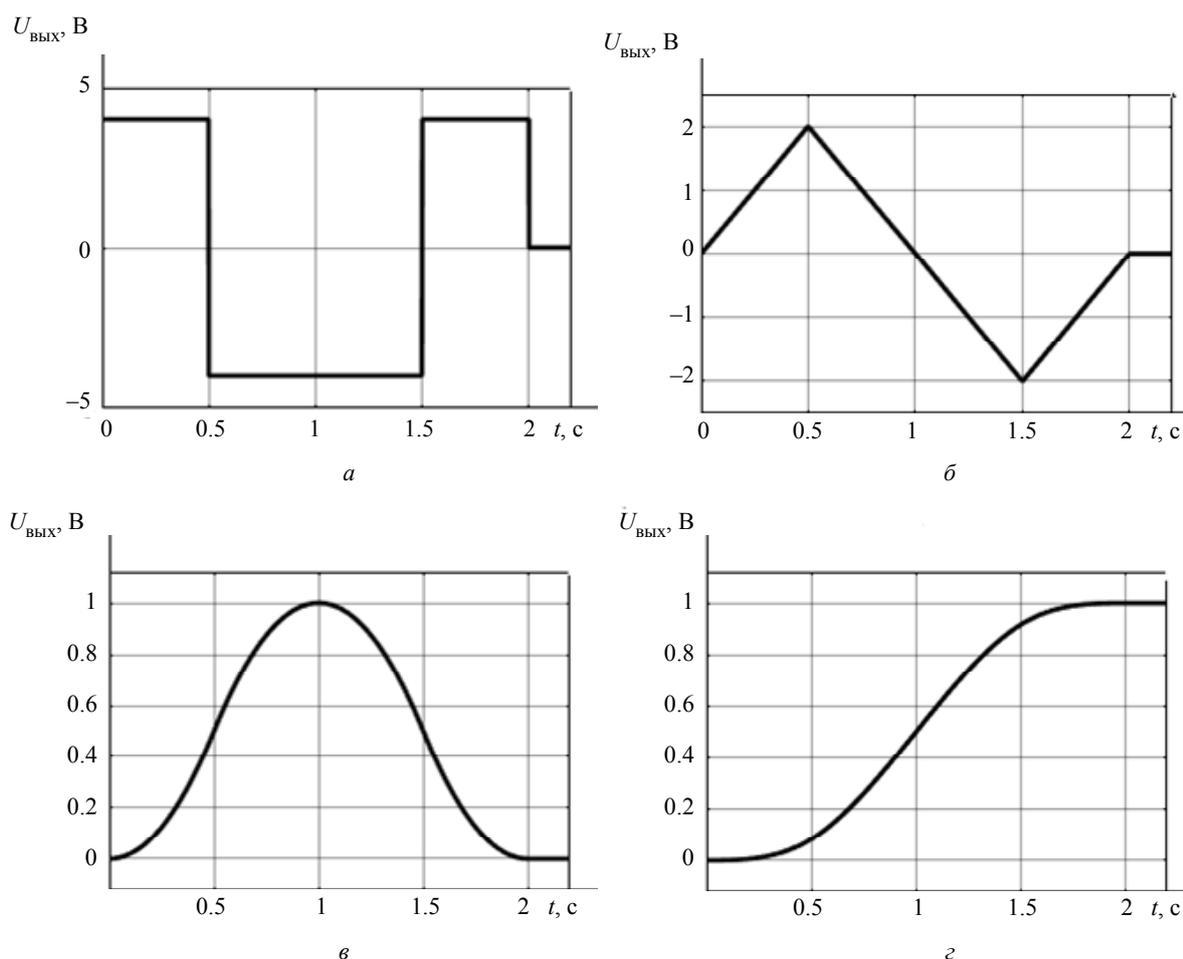


Рис. 3. Временные функции, поясняющие формирование сигнала задания:

a – $Score_1$; δ – $Score_2$; ϵ – $Score_3$; ζ – $Score_4$

Fig. 3. Time functions explaining the formation of the reference signal:

a – $Score_1$; δ – $Score_2$; ϵ – $Score_3$; ζ – $Score_4$

скоростью. Эти параметры могут как рассчитываться, так и быть взяты из документации на управляемый объект, при этом учитываются характеристики электропривода и требования к технологическому процессу.

В качестве объекта рассматривается система управления приводом продольной подачи токарного станка 16А20Ф3. Привод подачи состоит из асинхронного электродвигателя, муфты и шариковой винтовой передачи, на которой крепятся суппортные элементы станка.

В среде MatLab/Simulink была разработана модель системы управления электропривода подачи токарного станка с асинхронным электродвигателем, представленная на рис. 4, где приняты следующие обозначения: $S(t)_1$ – задатчик интенсивности, изображенный на рис. 1; Ψ_i – застabilизированное номинальное потокосцепление двигателя; $\text{Sig} \cdot T_1$ – постоянная времени двигателя; R_1 – сопротивление обмотки ротора; J_1 , J_2 – момент инерции первой и второй массы; P – число пар полюсов двигателя; K_2 – безразмерный коэффициент; $K_{\text{пр}}$ и $T_{\text{пр}}$ – коэффициент усиления и постоянная времени преобразователя частоты.

Используемый при моделировании двигатель АДЧР112МА8 имеет следующие параметры: мощность $P = 2.2$ кВт; частота сети $f = 50$ Гц; число фаз сети $m = 3$; фазное напряжение $U_{1n} = 220$ В; линейное напряжение $U_s = 380$ В; синхронная скорость $n_1 = 750$ об/мин (угловая синхронная скорость $w_1 = 78.5$ рад/с); номинальная скорость $n_2 = 710$ об/мин (угловая номинальная скорость $w_2 = 74.3$ рад/с); число пар полюсов $p_n = 4$; номинальный коэффициент полезного действия (КПД) $\eta = 0.76$; номинальный коэффициент мощности $\cos(f_n) = 0.7$; кратность пускового тока $i_k = 6$; перегрузочная способность по моменту $m_k = 1.8$; номинальный момент $M_n = 29$ Н·м; момент инерции двигателя $J_1 = 0.024$ кг·м²; застabilизированное потокосцепление $\Psi_i = 1.1272$ Вб; безразмерный коэффициент $K_2 = 0.9192$; активное сопротивление двигателя $R_1 = 2.1344$ Ом; постоянная времени двигателя $\text{Sig} \cdot T_1 = 0.0167$.

Коэффициент усиления и постоянная времени преобразователя частоты соответственно равны $K_{\text{пр}} = 220$ и $T_{\text{пр}} = 0.0001$.

Момент инерции поступательно двигающихся частей механизма привода подачи $J_2 = 0.0194$ кг·м²; Коэффициенты жесткости, демпфирования $c_{12} = 780$ Н·м², $b_{12} = 0.536$ Н·м·с/рад [7]. Коэффициент пересчета угловой скорости в линейную $k_m = 0.445$.

Регуляторы тока (РТ) и положения (РП) выполнены в виде ПИ-регулятора. Регулятор скорости (РС) выполнен в виде П-регулятора. Коэффициент усиления и постоянная времени РТ: $K_{\text{РТ}} = 0.82$, $T_{\text{РТ}} = 0.0167$. Коэффициент усиления РС: $K_{\text{РС}} = 8.75$.

Результаты моделирования представлены на рис. 5.

Задание на вход контура положения формируется из следующих параметров: dw/dt – угловое ускорение, рад/с²; установившаяся угловая скорость $w_{\text{уст}}$, рад/с; время воздействия управляющего сигнала $T_{\text{зад}}$.

При моделировании были взяты следующие параметры на входе задатчика интенсивности: $dw/dt = 668$ рад/с² (находится из уравнения движения электропривода); $w_{\text{уст}} = 74.5$ рад/с (соответствует номинальной скорости двигателя); $T_{\text{зад}} = 10$ с. Со 2-й по 4-ю секунды подавался момент сопротивления $M_c = 10$ Н·м, который имитирует процесс обработки заготовки резанием.

Переходный процесс по положению на выходе модели практически идентичен заданному. Исключения составляют моменты разгона и торможения в начале и в конце переходного процесса соответственно. На установившееся значение пути привод выходит на 10.5 с (рис. 3, а).

Переходный процесс по скорости линейного перемещения (рис. 3, б) в установившемся режиме равен 33 мм/с, что соответствует максимальной рекомендуемой скорости линейных перемещений привода продольной подачи станка. На 2-й и 4-й секундах наблюдаются колебания скорости небольшой амплитуды из-за поданного момента сопротивления длительностью 1 с каждое.

Переходный процесс по скорости двух масс w_1 и w_2 представлен на рис. 3, в. В процессе разгона и торможения привода переходные характеристики идентичны. Переходные характеристики различаются между собой на 2 и 4 с, что соответствует времени подачи момента сопротивления 10 Н·м, имитирующего процесс обработки заготовки резанием. У двигателя амплитуда колебаний значительно меньше, чем у суппортной группы то-

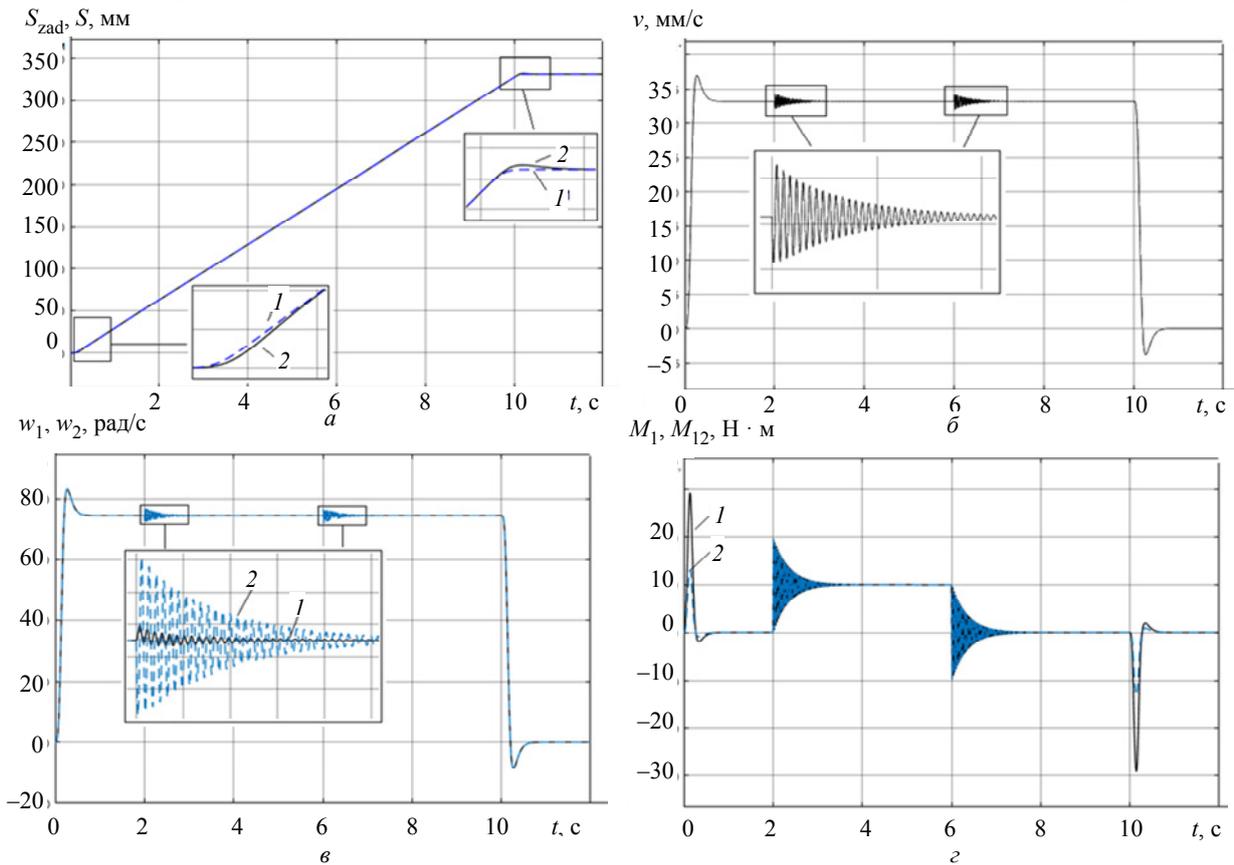


Рис. 5. Графики переходных процессов построенной модели: *a* – задание пути S_{zad} , мм (кривая 1); выходная величина пути S , мм (кривая 2); *б* – линейная скорость перемещения суппортной группы v , мм/с; ω – угловая скорость двигателя, рад/с (кривая 1), угловая скорость суппортной группы, рад/с (кривая 2); τ – момент двигателя, Н · м (кривая 2); момент суппортной группы, Н · м (кривая 1);
Fig. 5. Graphs of transient processes of the constructed model: *a* – setting the path S_{zad} , mm (curve 1); output distance S , mm (curve 2); *б* – linear speed of movement of the support group v , mm/s; ω – angular velocity of the engine, rad/s (curve 1); angular velocity of the support group, rad/s (curve 2); τ – engine torque, N · m (curve 2); moment of the support group, N · m (curve 1)

карного станка. Время колебаний при возмущающих воздействиях составляет 1 с (на 2 и 4 с).

Переходные характеристики по моменту двигателя и суппортной группы представлены на рис. 5, *г*. При этом момент двигателя при разгоне в момент времени 0.14 с и торможении в момент времени 10.14 с составляет 13.1 Н · м, а момент суппортной группы токарного станка в эти же моменты времени – 29.2 Н · м. В остальные отрезки времени переходные процессы обеих масс идентичны.

Выводы. В статье выполнен синтез системы управления приводом продольной подачи токарного станка с упругими связями. При этом для формирования сигнала задания на контур положения необходимо указать угловое ускорение, максимальную угловую скорость и время сигнала задания. Применение датчика интенсивности позволяет избежать недопустимых перегрузок по моменту и колебаний по скорости. Полученные графики переходных процессов системы управления приводом продольной подачи по управлению и по возмущения представлены и проанализированы.

В результате исследования можно сделать следующие выводы:

1. Разработанная модель объекта с датчиком интенсивности в среде MatLab/Simulink обеспечивает высокие динамические характеристики привода продольной подачи токарного станка.
2. Переходные характеристики по скорости и моменту не превышают предельно допустимых значений. Линейная скорость соответствует максимальной рекомендуемой скорости привода продольной подачи. Параметры исследуемой модели соответствуют реальному объекту.
3. Недостаток разработанной системы управления привода продольной подачи состоит в наличии колебаний в переходных процессах по моменту и скорости при возмущающих воздействиях.
4. Требуется дальнейшая работа по усовершенствованию системы управления с целью уменьшения или устранения колебаний по скорости и моменту при возмущающих воздействиях.

Список литературы

1. Оськин Д. А., Дыда А. А. Нейросетевое прогнозирующее управление приводом робота на базе двухмассовой модели с упругостью // Фундаментальные исследования. 2015. № 11 (Ч. 5). С. 909–913.
2. Белов М. П., Кундюков О. А. Синтез системы управления асинхронным двигателем главного движения токарного станка с применением нейроконтроллера с прогнозированием // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2022. Т. 15, № 3. С. 50–56.
3. Белов М. П., Носиров И. С., Фюнг Ч. Х. Исследование системы управления электроприводом подачи токарного станка с применением метода обобщенного нейроруправления с прогнозированием // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2018. № 4. С. 73–80.
4. 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.
5. Борцов Ю. А., Соколовский Г. Г. Автоматизированный электропривод с упругими связями. СПб.: Энергоатомиздат, 1992. 288 с.
6. Королёв В. И. Системы управления электроприводом: учеб.-метод. пособие. СПб.: ВШТЭ СПбГУПТД, 2022. 79 с.
7. Носиров И. С. Построение системы управления электроприводными системами металлорежущих станков с нейронными сетями: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03. СПб., СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2019. 18 с.

Информация об авторах

Белов Михаил Петрович – д-р техн. наук, доцент, зав. кафедры 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

Королев Владимир Иванович – канд. техн. наук, доцент кафедры автоматизированного электропривода и электротехники Высшей школы технологии и энергетики СПбГУПТД.

E-mail: vikorol@yandex.ru

References

1. Os'kin D. A., Dyda A. A. Nejrosetevoe prognoziruuyushchee upravlenie privodom robota na baze dvuhmassovoj modeli s uprugost'yu // Fundamental'nye issledovaniya. 2015. № 11 (CH. 5). S. 909–913. (In Russ.).
2. Belov M. P., Kundyukov O. A. Sintez sistemy upravleniya asinhronnym dvigatelem glavnogo dvi-zheniya tokarnogo stan-ka s primeneni- em nejro-kontrollera s prognozirovani- em // Izv. SPbGETU «LETI». 2022. T. 15, № 3. S. 50–56. (In Russ.).
3. Belov M. P., Nosirov I. S., Fyong CH. H. Issledovanie sistemy upravleniya elektroprivodom podachi tokarnogo stan-ka s primeneni- em metoda obobshchennogo nejroupravleniya s prognozirovani- em // Izv. SPbGETU «LETI». 2018. № 4. S. 73–80. (In Russ.).
4. Belov M. P., Nosirov I. S., Belov A. M. Sintez nejrosetevogo regulyatora dvuhmassovoj elektromeh- hanicheskoy sistemy privoda podachi tokarnogo stan-ka // Izv. SPbGETU «LETI». 2018. № 8. S. 70–76. (In Russ.).
5. Borcov YU. A., Sokolovskij G. G. Avtomatizirovannyj elektroprivod s uprugimi svyazyami. SPb: Energoatomizdat, 1992. 288 s. (In Russ.).
6. Korolyov V. I. Sistemy upravleniya elektroprivodom: ucheb.-metod. posobie. SPb: VSHTÉ SPbGUPTD, 2022. 79 s. (In Russ.).
7. Nosirov I. S. Postroenie sistemy upravle-niya el- elektroprivodnymi sistemami metallorézhushchih stan- kov s nejronnymi setyami: dis. kand. tekhn. nauk: 05.09.03. SPb, SPbGETU «LETI», 2019. 18 s. (In Russ.).

Information about the authors

Mikhail P. Belov – Dr Sci. (Eng.), Associate 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 – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Automated Electric Drive and Electrical Engineering of the Higher School of Technology and Energy of St. Petersburg State University of Industrial Technologies and Design.

E-mail: vikorol@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 17.05.2022; принята к публикации после рецензирования 30.05.2022; опубликована онлайн 13.09.2022.

Submitted 17.05.2022; accepted 30.05.2022; published online 13.09.2022.
