

Исследование системы подчиненного регулирования двухмассового объекта в виде упругого замещающегося ремня

М. П. Белов¹, А. Кундюков^{1✉}, В. И. Королев², К. К. Ершов², А. А. Наумов¹

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. Рассмотрены требования к приводам главного движения. Приведено математическое описание двухмассовой системы, взаимосвязанной через упругий замещающийся ремень. Проведено исследование влияния упругостей на динамику и точность поддержания скорости привода главного движения станка. При моделировании системы управления приводом главного движения токарного станка с учетом упругой связи ремня без поправочного коэффициента возникает ошибка по скорости в установившемся режиме при изменении момента сопротивления. Момент сопротивления зависит от радиуса, материала заготовки, а также таких настроек приводов продольной и поперечной подачи, как глубина резания и скорость подачи. Разработанная в среде MatLab and Simulink система управления приводом главного движения токарного станка с учетом упругости ремня с поправочным коэффициентом обеспечивает высокие статические характеристики привода.

Ключевые слова: электрический привод, привод главного движения, упругий замещающийся ремень, система управления

Для цитирования: Исследование системы подчиненного регулирования двухмассового объекта 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. doi: 10.32603/2071-8985-2023-16-8-64-74.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Original article

Study of a Slave Control System by a Dual-Mass Object in the Form of an Elastic Replacement Belt

M. P. Belov¹, O. A. Kundyukov^{1✉}, V. I. Korolev², K. K. Ershov², A. A. Naumov¹

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. This paper considers requirements for main motion drives. A mathematical description of a dual-mass system interconnected through an elastic replacement belt is provided. A study was made of the influence of elasticity on the dynamics and accuracy of maintaining the speed of the main motion drive of a machine. When modeling a control system for the main motion drive of a lathe machine, taking the elastic connec-

tion of the belt without a correction factor into consideration, an error associated with the speed in the steady state under a change in the resistance moment arises. The resistance moment depends on the radius, the workpiece material, and the settings of the longitudinal and transverse drives, such as depth of cut and feed rate. The control system for the main motion drive of a lathe, developed in the MatLab and Simulink environment, taking the belt elasticity with a correction factor into account, ensures high static characteristics of the drive.

Keywords: electric drive, main motion drive, elastic replacement belt, control system

For citation: Study of a Slave Control System by a Dual-Mass Object in the Form of an Elastic Replacement Belt / M. P. Belov, O. A. Kundyukov, V. I. Korolev, K. K. Ershov, A. A. Naumov // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2023. Vol. 16, no. 8. P. 64–74. doi: 10.32603/2071-8985-2023-16-8-64-74.

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

В токарных станках главным движением является вращение заготовки, зажатой в патроне шпинделя. Привод главного движения имеет наибольшую установленную мощность, так как именно он обеспечивает необходимое усилие резания [1].

К приводам главного движения предъявляются следующие требования: широкий диапазон регулирования скорости шпинделя; высокая точность ее поддержания; включение, выключение, торможение, реверс и другие. Подробное исследование требований к электроприводам главного движения и движения подачи станков приведено в [1], [2].

Общая структура привода главного движения станка представлена на рис. 1.

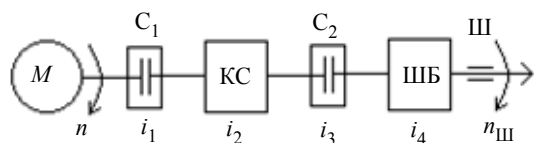


Рис. 1. Общая структура привода главного движения
Fig. 1. General structure of the main motion drive

На рисунке приняты следующие обозначения: M – приводной электродвигатель; C_1 – соединение двигателя с коробкой скоростей, которое может быть выполнено в виде ременной, зубчатой передачи или муфты; $КС$ – коробка скоростей, со ступенчатым изменением передаточного отношения; C_2 – соединение выходного вала коробки скоростей с входным валом шпиндельной бабки, выполняется аналогично C_1 ; $ШБ$ – шпиндельная бабка; $Ш$ – шпиндель; i_1, i_2, i_3, i_4 – передаточные отношения соединения C_1 , коробки скоростей, C_2 , кинематической цепи шпиндельной бабки; n – скорость двигателя, об/мин; $n_{ш}$ – скорость шпинделя, об/мин [3].

В данной статье рассматривается привод, аналогичный приводу главного движения токарного патронно-центрового станка 16А20Ф3 (далее –

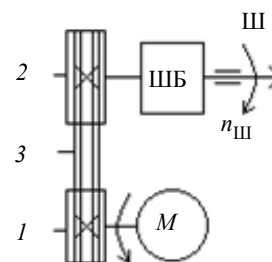


Рис. 2. Структурная схема цепи главного привода токарного станка
Fig. 2. Structural diagram of the lathe main drive circuit

привод главного движения токарного станка), структурная схема которого изображена на рис. 2, где обозначены: 1 – ведущий шкив; 2 – ведомый шкив; 3 – ремень.

Компоновки с ременным приводом имеют меньшие осевые габариты, позволяют обеспечить редуцирование скорости и увеличение момента на шпинделе. Ременная передача изолирует шпиндель от вибраций двигателя [4]. Передаваемые усилия приводят к растяжению ремней, вследствие чего линейная скорость ведущего шкива меньше линейной скорости ведомого. Отношение этих скоростей зависит от передаваемого усилия.

Структурная схема двухмассовой системы, взаимосвязанной через упругий замещающийся ремень, изображена на рис. 3, где приняты следующие обозначения: L – длина свободного пробега ведущей ветви ремня, м; K – коэффициент жесткости ремня, Н/м²; w_1 – угловая скорость ведущего шкива, рад/с; w_2 – угловая скорость ведомого шкива, рад/с; M_1 – момент ведущего шкива, Н · м; M_{c1} – момент сопротивления двигателя, обусловленный трением в подшипниках, Н · м; M_{c2} – статический момент, обусловленный нагрузкой на второй инерционной массе, Н · м; M_{y1} – момент упругого взаимодействия ведущего шкива, Н · м; M_{y2} – момент упругого взаимодей-

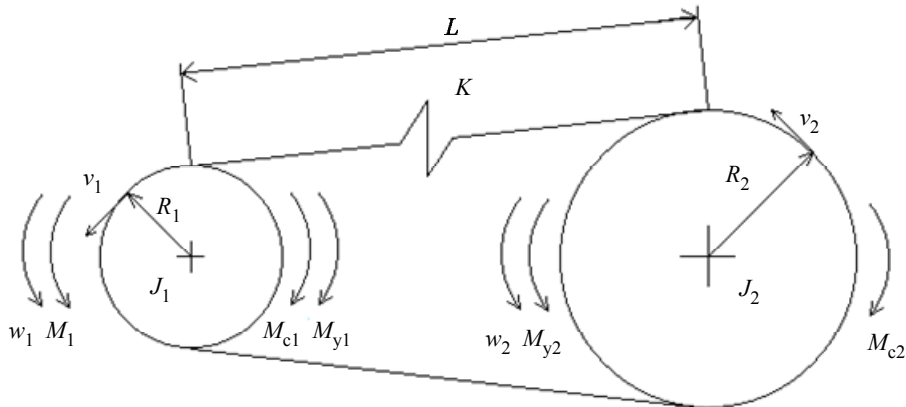


Рис. 3. Структурная схема двухмассовой системы
Fig. 3. Structural diagram of a dual-mass system

ствия ведомого шкива, Н·м; v_1 – линейная скорость ведущего шкива, м/с; v_2 – линейная скорость ведомого шкива, м/с; R_1, R_2 – радиусы ведущего и ведомого шкивов, м; J_1, J_2 – суммарные моменты инерции двигателя и ведущего шкива, а также ведомого шкива и моментов инерции заготовки и патрона, приведенных к валу ведомого шкива, кг/м².

Двухмассовая система с упругостью второго рода математически описывается следующей системой уравнений [5]:

$$\begin{aligned} M_1 - M_{y1} &= J_1 \frac{dw_1}{dt}; \\ M_{y1} &= \varepsilon K R_1; \\ M_{y2} - M_{c2} &= J_2 \frac{dw_2}{dt}; \\ M_{y2} &= \varepsilon K R_2; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \varepsilon &= \frac{v_1 - v_2}{v_1} \frac{1}{T_p p + 1}; \\ T_p &= \frac{L}{v_1}. \end{aligned}$$

В приведенных уравнениях: t – время, с; ε – относительное удлинение ремня; T_p – постоянная времени ремня; p – оператор Лапласа. Система уравнений построена без учета момента сопротивления сил трения в подшипниках ε .

Исследование влияния упругостей на динамику и точность поддержания скорости. Для исследования влияния упругости ремня в кинематической цепи привода главного движения токарного станка в среде моделирования MatLab and Simulink должна быть построена структурная схема этого привода с учетом упругой ременной передачи. Многообразие структурных схем одно-массовых электроприводов [2] может быть представлено упрощенной структурной схемой, ана-

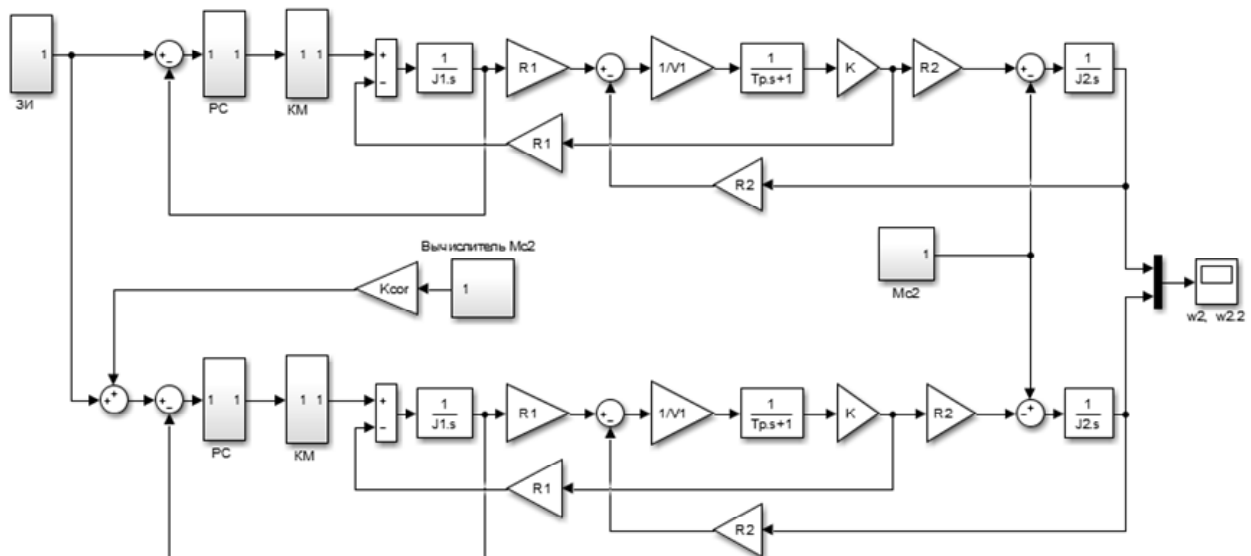


Рис. 4. Структурные схемы приводов главного движения токарного станка с учетом упругости ремня
Fig. 4. Structural diagrams of the main motion drives of a lathe machine, taking the belt elasticity into account

логичной структурной схеме привода постоянно-го тока [6], [7].

На рис. 4 представлены две упрощенные структурные схемы приводов главного движения, отличающиеся между собой поправочным коэффициентом $K_{\text{кор}}$, введенным для устранения ошибки по скорости при возмущающих воздействиях со стороны заготовки и приводов подач, а также блоком вычислителя момента сопротивления $M_{\text{с2}}$.

На рис. 4 приняты следующие обозначения: $K_{\text{кор}}$ – поправочный коэффициент; ЗИ – задатчик интенсивности или константа; РС – регулятор скорости; КМ – контур момента; $w_2, w_{2.2}$ – угловые скорости ведомых шкивов моделей, рад/с. Элементы моделей РС и КМ и $1/J_{1s}$ относятся к упрощенной структурной схеме асинхронного электропривода. Остальные переменные были описаны ранее.

При синтезе упрощенной системы векторного управления приводом главного движения были взяты средние значения параметров токарных станков.

При моделировании использовались параметры двигателя АДЧР160М4, который применяется в приводе главного движения патронно-центрового станка 16А20Ф3: угловая номинальная скорость $w_2 = 153$ рад/с; номинальный момент

$M_H = 73$ Н·м; момент инерции двигателя $J = 0.045$ кг·м². Тактовая частота преобразователя частоты принята равной 10 кГц.

Суммарный момент инерции двигателя и ведущего шкива $J_1 = 0.045 + 0.005 = 0.05$ кг·м². Суммарный момент инерции ведомого шкива и моментов инерции заготовки и патрона, приведенных к валу ведомого шкива, $J_2 = 0.04$ кг·м².

В первом опыте строятся и сравниваются между собой две модели с единичными параметрами кинематической цепи привода главного движения.

Радиус ведущего шкива $R_1 = 1$ м; радиус базового ведомого шкива $R_2 = 1$ м. Угловая скорость ведущего шкива $w_1 = 1$ рад/с. Линейная скорость ведущего шкива $v_1 = wR_1 = 1 \cdot 1 = 1$ м/с. Постоянная времени ремня взята усредненной и не меняется в дальнейших опытах, $T_p = 0.2$ с. Базовый коэффициент жесткости ремня $K = 1$ Н/м.

Момент сопротивления $M_{\text{с2}}$ зависит от параметров заготовки (радиус, материал заготовки), а также от настроек приводов продольной и поперечной подач (глубина резания, скорость подачи).

В качестве регулятора скорости РС используется ПИ-регулятор, настроенный на симметричный оптимум. Коэффициент усиления и постоянная времени: $K_{\text{РС}} = 62.5$, $T_{\text{РС}} = 0.0016$ с.

$w_2, w_{2.2}$, рад/с

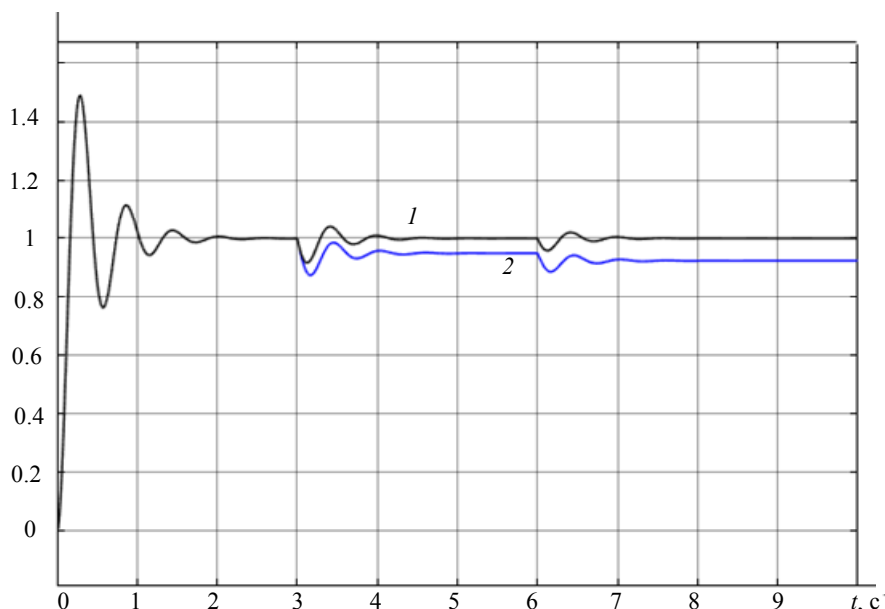


Рис. 5. Графики переходных характеристик базовых моделей первого опыта по скорости ведомого шкива без поправочного коэффициента (кривая 2) и с поправочным коэффициентом $K_{\text{кор}} = 1$ (кривая 1)

Fig. 5. Graphs of the transient characteristics of the basic models of the first experiment for the speed of the driven pulley without a correction factor (curve 2) and with a correction factor $K_{\text{cor}} = 1$ (curve 1)

Свернутый контур момента КМ представляет собой апериодическое звено первого порядка. Коэффициент усиления и постоянная времени: $K_{KM} = 1$, $T_{KM} = 0.0004$ с.

Результаты компьютерного моделирования в среде MatLab and Simulink представлены на рис. 5.

Анализ рисунка показывает, что ведомый шкив обеих моделей обрабатывает управляющее воздействие и выходит на заданную угловую скорость w_2 , $w_{2,2} = 1$ рад/с на 2 с. Промежуток времени со второй по третью секунды соответствует режиму работы привода с установившейся скоростью. До третьей секунды модели с базовым поправочным коэффициентом и без него идентичны. Время переходного процесса составляет 2 с.

На третьей секунде на ведомый шкив подан момент сопротивления в виде $M_{c2} = 0.05$ Н·м. В обеих моделях возникает колебательный переходный процесс, который заканчивается на пятой секунде. Амплитуда колебаний составляет $A = 0.08$ рад в модели с поправочным коэффициентом (кривая 1) и $A = 0.12$ рад в модели без коэффициента (кривая 2) в начале переходного процесса, а далее быстро затухает.

Промежуток времени с пятой до шестой секунды соответствует режиму с установившейся угловой скоростью ведомого шкива. В этом ре-

жиме в модели без поправочного коэффициента (кривая 1) появляется статическая ошибка по скорости $\delta = 0.05$ рад. В модели с коэффициентом $K_{cor} = 1$ ошибка по скорости отсутствует.

На шестой секунде на ведомый шкив дополнительно подан момент сопротивления в виде $M_{c2} = 0.025$ Н·м, что может быть объяснено изменением глубины резания или скорости продольной, поперечной подачи. В результате в обеих моделях возникает переходный колебательный процесс, который заканчивается на седьмой секунде. Амплитуда колебаний составляет $A = 0.04$ рад в модели с базовым поправочным коэффициентом (кривая 1) и $A = 0.06$ рад в модели без коэффициента (синий график) в начале переходного процесса и далее быстро затухает.

Промежуток времени с восьмой по девятую секунды соответствует режиму работы ведомого шкива с установившейся скоростью. При этом в модели без поправочного коэффициента (кривая 2) ошибка по скорости увеличилась до $\delta = 0.08$ рад. Модель с поправочным коэффициентом (кривая 1) обрабатывает возмущающее воздействие без ошибки по скорости ведомого шкива.

Во втором опыте в обе модели вносятся некоторые изменения, а именно: радиус ведущего шкива $R_1 = 0.05$ м; радиус ведомого шкива $R_2 =$

$w_2, w_{2,2}$, рад/с

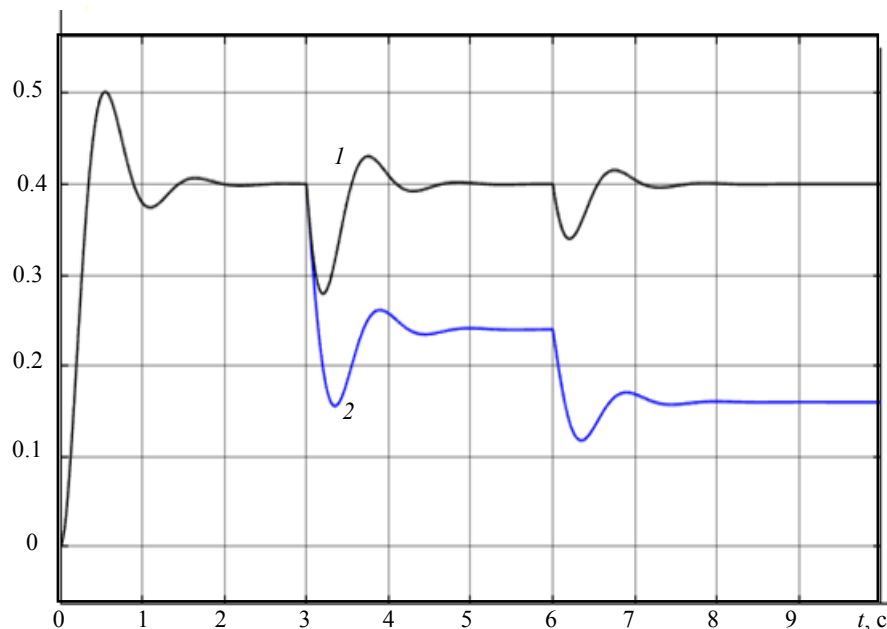


Рис. 6. Графики переходных характеристик моделей второго опыта по скорости ведомого шкива без поправочного коэффициента (кривая 2) и с поправочным коэффициентом $K_{cor} = 8$ (кривая 1)

Fig. 6. Graphs of the transient characteristics of the models of the second experiment for the speed of the driven pulley without a correction factor (curve 2) and with a correction factor $K_{cor} = 8$ (curve 1)

$= 0.125$ м; линейная скорость ведущего шкива $v_1 = wR_1 = 1 \cdot 0.05 = 0.05$ м/с; $K_{\text{кор}} = 8$.

Значение коэффициента $K_{\text{кор}}$ зависит от заданной угловой скорости w , коэффициента жесткости приводного ремня K и радиуса ведомого шкива R_2 , значения момента сопротивления и может быть вычислено по формуле, полученной эмпирическим путем:

$$K_{\text{кор}} = \frac{w}{KR_2}.$$

Остальные значения в моделях не менялись.

На рис. 6 приведены графики скорости ведомого шкива второго опыта.

Угловая установившаяся скорость ведомого шкива обеих моделей по заданию в данном опыте составляет w_2 , $w_{2,2} = 0.4$ рад/с. Значение и время, в которое подано возмущающее воздействие, аналогичны предыдущему опыту. Время переходного процесса составляет 2 с.

Промежуток времени с второй до третьей секунды соответствует режиму работы привода с заданной установившейся скоростью ведомого привода.

На третьей секунде на ведомый шкив подан момент сопротивления в виде $M_{c2} = 0.05$ Н · м. В обеих моделях возникает колебательный переходный процесс, который заканчивается на пятой секунде. Амплитуда колебаний составляет $A = 0.12$ рад в модели с базовым поправочным коэффициентом (кривая 1) и $A = 0.24$ рад в модели без коэффициента (кривая 2) в начале переходного процесса и далее быстро затухает.

Промежуток времени с пятой до шестой секунды соответствует режиму с установившейся угловой скоростью ведомого шкива. В этом режиме в модели без поправочного коэффициента (кривая 1) появляется статическая ошибка по скорости $\delta = 0.16$ рад. В модели с коэффициентом $K_{\text{кор}} = 8$ ошибка по скорости отсутствует.

На шестой секунде на ведомый шкив добавочно подан момент сопротивления в виде $M_{c2} = 0.025$ Н · м, что может быть объяснено изменением параметров обработки заготовки. В результате в обеих моделях возникает переходной колебательный процесс, который заканчивается на седьмой секунде. Амплитуда колебаний составляет $A = 0.6$ рад в модели с базовым поправочным коэффициентом (кривая 1) и $A = 0.12$ рад в модели без коэффициента (кривая 2) в начале переходного процесса и далее быстро затухает.

Промежуток времени с восьмой по десятую секунды соответствует режиму работы ведомого шкива с установившейся скоростью. При этом в модели без поправочного коэффициента (кривая 2) ошибка по скорости увеличилась до $\delta = 0.24$ рад. Модель с поправочным коэффициентом (кривая 1) отрабатывает возмущающее воздействие без ошибки по скорости ведомого шкива.

При сравнении графиков переходных функций по скорости, изображенных на рис. 2 и 3, видно, что изменение радиусов шкивов ведет к изменению установившегося значения линейной и угловой скорости, а также к увеличению ошибки по скорости.

В третьем опыте вносятся изменения в параметры моделей из второго опыта: задание на угловую скорость ведущего шкива $w_1 = 100$ рад/с; линейная скорость ведущего шкива $v_1 = wR_1 = 100 \cdot 0.05 = 5$ м/с; коэффициент жесткости ремня $K = 6000$; поправочный коэффициент $K_{\text{кор}} = 0.133333$.

Остальные параметры остаются такими, как в опытах описанных ранее.

На рис. 7 приведены графики скорости ведомого шкива третьего опыта.

Угловая установившаяся скорость ведомого шкива обеих моделей по заданию в данном опыте составляет w_2 , $w_{2,2} = 40$ рад/с. Значение и время, в которое подано возмущающее воздействие, аналогичны предыдущим опытам. Время переходного процесса составляет 2 с.

Промежуток времени со второй до третьей секунды соответствует режиму работы привода с заданной установившейся скоростью ведомого привода.

На третьей секунде на ведомый шкив подан момент сопротивления в виде номинального момента двигателя $M_{c2} = 73$ Н · м. В обеих моделях возникает колебательный переходный процесс, который заканчивается на пятой секунде. Амплитуда колебаний составляет $A = 10$ рад в модели с базовым поправочным коэффициентом (кривая 1) и $A = 40$ рад в модели без коэффициента (кривая 2) в начале переходного процесса и далее быстро затухает.

Промежуток времени с пятой до шестой секунды соответствует режиму с установившейся угловой скоростью ведомого шкива. В этом режиме в модели без поправочного коэффициента (кривая 1) появляется статическая ошибка по скорости $\delta = 4$ рад. В модели с поправочным коэффициентом ошибка по скорости отсутствует.

$w_2, w_{2.2}, \text{ рад/с}$

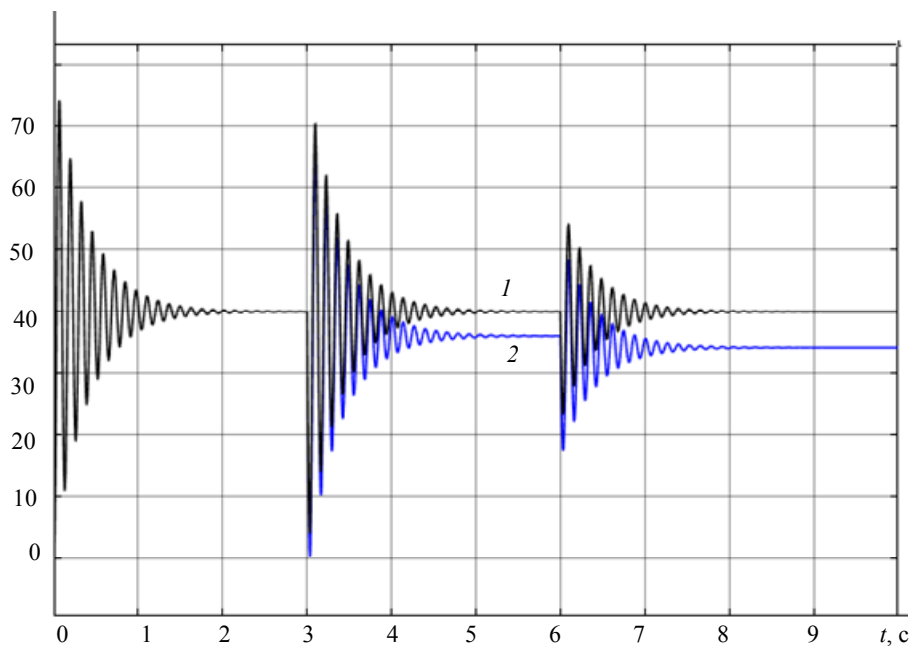


Рис. 7. Графики переходных характеристик моделей третьего опыта по скорости ведомого шкива без поправочного коэффициента (кривая 2) и с поправочным коэффициентом $K_{\text{cor}} = 0.13333$ (кривая 1)

Fig. 7. Graphs of the transient characteristics of the models of the third experiment for the speed of the driven pulley without a correction factor (curve 2) and with a correction factor $K_{\text{cor}} = 0.13333$ (curve 1)

На шестой секунде на ведомый шкив добавочно подан момент сопротивления в виде $M_{c2} = 35 \text{ Н} \cdot \text{м}$, что может быть объяснено изменением параметров обработки заготовки. В результате в обеих моделях возникает переходный колебательный процесс, который заканчивается на седьмой секунде. Амплитуда колебаний составляет $A = 5 \text{ рад}$ в модели с базовым поправочным коэффициентом (кривая 1) и $A = 19 \text{ рад}$ в модели без коэффициента (кривая 2) в начале переходного процесса и далее быстро затухает.

Промежуток времени с восьмой до десятой секунды соответствует режиму работы ведомого шкива с установившейся скоростью. При этом в модели без поправочного коэффициента (кривая 2) ошибка по скорости увеличилась до $\delta = 5.9 \text{ рад}$. Модель с поправочным коэффициентом (кривая 1) отрабатывает возмущающее воздействие без ошибки по скорости ведомого шкива.

При сравнении графиков переходных функций трех опытов становится очевидно, что в третьем опыте амплитуда колебаний, колебательность переходных процессов и ошибка по скорости в установившихся значениях значительно выше, чем в первом и втором опытах.

В четвертом опыте вносятся изменения в параметры моделей из предыдущего опыта: коэффициент жесткости ремня $K = 60\,000$; поправочный коэффициент $K_{\text{cor}} = 0.0133333$.

Остальные параметры остаются такими, как в третьем опыте.

На рис. 8 приведены графики скорости ведомого шкива четвертого опыта.

Значения угловой установившейся скорости ведомого шкива обеих моделей по заданию, а также значение и время, в которое подан момент сопротивления, аналогичны третьему опыту. Время переходного процесса составляет 2 с.

Амплитуда колебаний на третьей секунде составляет $A = 3.6 \text{ рад}$ в модели с базовым поправочным коэффициентом и $A = 12.4 \text{ рад}$ в модели без коэффициента в начале переходного процесса и далее быстро затухает.

В промежутке времени с пятой до шестой секунды статическая ошибка по скорости в модели без поправочного коэффициента $\delta = 0.4 \text{ рад}$. В модели с поправочным коэффициентом ошибка по скорости отсутствует.

Амплитуда колебаний на шестой секунде составляет $A = 1.7 \text{ рад}$ в модели с базовым поправочным коэффициентом и $A = 5.7 \text{ рад}$ в модели без коэффициента в начале переходного процесса и далее быстро затухает.

$w_2, w_{2,2}, \text{ рад/с}$

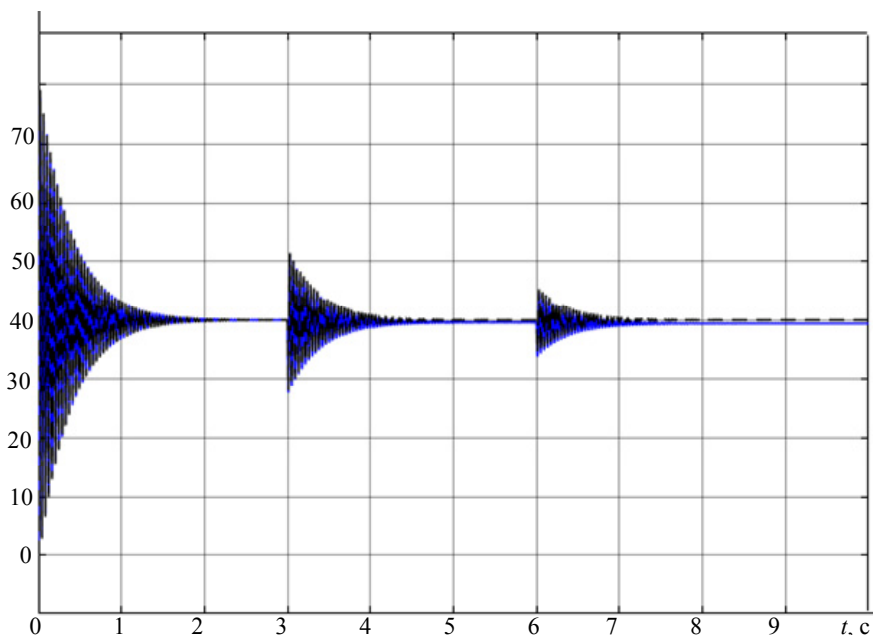


Рис. 8. Графики переходных характеристик моделей четвертого опыта по скорости ведомого шкива без поправочного коэффициента и с поправочным коэффициентом $K_{\text{cor}} = 0.013333$.

Графики одинаковы в динамических режимах, а в установившемся состоянии при подаче возмущающего воздействия присутствует небольшая ошибка по скорости

Fig. 8. Graphs of the transient characteristics of the models of the fourth experiment for the speed of the driven pulley without a correction factor and with a correction factor $K_{\text{cor}} = 0.013333$.

The graphs are the same in dynamic modes, and in the steady state, when a disturbing effect is applied, there is a small speed error

$w_2, w_{2,2}, \text{ рад/с}$

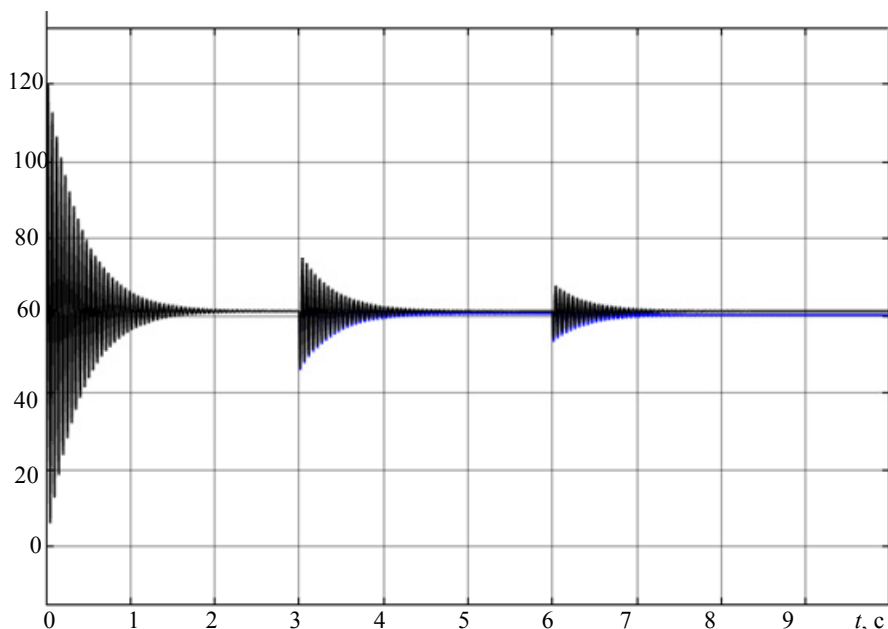


Рис. 9. Графики переходных характеристик моделей пятого опыта по скорости ведомого шкива без поправочного коэффициента и с поправочным коэффициентом $K_{\text{cor}} = 0.0204$.

Графики одинаковы в динамических режимах, а в установившемся состоянии при подаче возмущающего воздействия присутствует небольшая ошибка по скорости

Fig. 9. Graphs of the transient characteristics of the models of the fifth experiment for the speed of the driven pulley without a correction factor and with a correction factor $K_{\text{cor}} = 0.0204$. The graphs are the same in dynamic modes, and in the steady state, when a disturbing effect is applied, there is a small speed error

В промежутке времени с восьмой до десятой секунды статическая ошибка по скорости в модели без поправочного коэффициента $\delta = 0.6$ рад. В модели с поправочным коэффициентом ошибка по скорости отсутствует. Модель с поправочным коэффициентом обрабатывает возмущающее воздействие без ошибки по скорости ведомого шкива.

Графики на рис. 5 отличаются от графиков на рис. 4 только тем, что колебаний при подаче возмущающего воздействия на третьей и шестой секундах стало значительно больше. При этом амплитуда колебаний по сравнению с третьим опытом уменьшилась. Время переходного процесса при подаче возмущающих воздействий осталось прежним.

В пятом опыте вносятся изменения в параметры моделей из четвертого опыта: задание на угловую скорость ведущего шкива $w_1 = 153$ рад/с; линейная скорость ведущего шкива $v_1 = wR_1 = 153 \cdot 0.05 = 7.65$ м/с; поправочный коэффициент $K_{\text{кор}} = 0.0204$.

Остальные параметры остаются такими, как в четвертом опыте.

На рис. 9 приведены графики скорости ведомого шкива пятого опыта.

Угловая установившаяся скорость ведомого шкива обеих моделей по заданию в данном опыте составляет w_2 , $w_{2,2} = 61.2$ рад/с. Значение и время, в которое подано возмущающее воздействие, аналогичны третьему и четвертому опытам. Время переходного процесса составляет 2 с.

Амплитуда колебаний на третьей секунде составляет $A = 4.4$ рад в модели с базовым поправочным коэффициентом и $A = 15.3$ рад в модели без коэффициента в начале переходного процесса и далее быстро затухает.

В промежутке времени с пятой до шестой секунды статическая ошибка по скорости в модели без поправочного коэффициента $\delta = 0.6$ рад. В модели с поправочным коэффициентом ошибка по скорости отсутствует.

Амплитуда колебаний на шестой секунде составляет $A = 2.2$ рад в модели с базовым поправочным коэффициентом и $A = 7.7$ рад в модели без коэффициента в начале переходного процесса и далее быстро затухает.

В промежутке времени с восьмой до десятой секунды статическая ошибка по скорости в модели без поправочного коэффициента $\delta = 0.9$ рад. В модели с поправочным коэффициентом ошибка по скорости отсутствует. Модель с поправочным коэффициентом обрабатывает возмущающее воздействие без ошибки по скорости ведомого шкива.

Выводы. В статье выполнен синтез системы управления приводом главного движения токарного станка с учетом упругой ременной передачи. Полученные графики переходных процессов по скорости ведомого шкива представлены и проанализированы.

В результате исследования можно сделать следующие выводы:

1. При моделировании в среде MatLab and Simulink системы управления приводом главного движения токарного станка с учетом упругой связи ремня без поправочного коэффициента возникает ошибка по скорости в установившемся режиме при изменении момента сопротивления.

2. Момент сопротивления зависит от радиуса, материала заготовки, а также таких настроек приводов продольной и поперечной подач, как глубина резания и скорость подачи.

3. При подаче возмущающих воздействий амплитуда колебаний и значение ошибки в установившемся режиме зависит от скорости задания, коэффициента жесткости, радиуса шкивов.

4. Разработанная в среде MatLab and Simulink система управления приводом главного движения токарного станка с учетом упругости ремня с поправочным коэффициентом обеспечивает высокие статические характеристики привода.

5. В статье представлена методика расчета поправочного коэффициента, который позволяет значительно повысить точность поддержания скорости привода главного движения токарного станка.

6. Данная методика расчета поправочного коэффициента может быть применена к любому станку с ременной передачей при имеющихся исходных данных.

Список литературы

1. Белов М. П., Новиков А. Д., Рассудов Л. Н. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов. М.: Издательский центр «Академия», 2004. 576 с.

2. Analysis and prospects of development of electric drives of metalworking machines / O. A. Kundyukov,

M. P. Belov, V. I. Korolev, N. S. Blagodarnyi, K. K. Ershov // Proc. of the 2022 Conf. of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus). St. Petersburg: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2022. P. 726–730. doi: 10.1109/ElConRus54750.2022.9755587.

3. Авраамова Т. М., Бушуев В. В., Гиловой Л. Я. Металлорежущие станки. Т. 1. М.: Машиностроение, 2011. 608 с.

4. Молодцов В. В., Гиловой Л. Я. Приводы главного движения и шпиндельные узлы современных станков // Материалы всерос. науч.-практ. конф. «Наука сегодня вызовы и перспективы». М.: Московский гос. технол. ун-т «СТАНКИН», 2017. С. 20–24.

5. Барышников В. Д., Куликов С. Н. Автоматизированные электроприводы машин бумагоделательного производства. Л.: Энергоиздат, 1982. 144 с.

6. Соколовский Г. Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием. М.: Академия, 2006. 272 с.

7. Герман-Галкин С. Г. MatLab and Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. СПб.: КОРОНА-Век, 2008. 368 с.

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

Королев Владимир Иванович – старший преподаватель кафедры автоматизированного электропривода и электротехники ВШТЭ СПбГУПТД.

E-mail: vikorol@yandex.ru

Ершов Кирилл Константинович – аспирант кафедры автоматизированного электропривода и электротехники ВШТЭ СПбГУПТД.

E-mail: volt.96@yandex.ru

Наумов Александр Андреевич – аспирант кафедры робототехники и автоматизации производственных систем СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: 21.01lex@mail.ru

References

1. Belov M. P., Novikov A. D., Rassudov L. N. Avtomatizirovannyj jelektroprivod tipovyh proizvodstvennyh mehanizmov i tehnologicheskikh kompleksov. M.: Izdatel'skij centr «Akademija», 2004. 576 s. (In Russ.).

2. Analysis and prospects of development of electric drives of metalworking machines / O. A. Kundyukov, M. P. Belov, V. I. Korolev, N. S. Blagodarnyi, K. K. Ershov // Proc. of the 2022 Conf. of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus). St. Petersburg: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2022. P. 726–730. doi: 10.1109/ElConRus54750.2022.9755587.

3. Авраамова Т. М., Бушуев В. В., Гиловой Л. Я. Металлорежущие станки. Т. 1. М.: Машиностроение, 2011. 608 с. (In Russ.).

4. Molodcov V. V., Gilovoj L. Ja. Privody glavnogo dvizhenija i shpindel'nye uzly sovremennyh stankov // Materialy vseros. nauch.-prakt. konf. «Наука segodnja vyzovy i perspektivy». M.: Moskovskij gos. tehnol. un-t «СТАНКИН», 2017. С. 20–24. (In Russ.).

5. Baryshnikov V. D., Kulikov S. N. Avtomatizirovannyje jelektroprivody mashin bumagodelatel'nogo proizvodstva. L.: Jenergoizdat. 1982. 144 s. (In Russ.).

6. Sokolovskij G. G. Jelektroprivody peremennogo toka s chastotnym regulirovaniem. M.: Akademija, 2006. 272 s. (In Russ.).

7. German-Galkin S. G. MatLab and Simulink. Proektirovanie mehatronnyh sistem na PK. SPb.: KORONA-Vek, 2008. 368 s. (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, Department of Automated Electric Drive and Electrical Engineering, Higher School of Economics, St. Petersburg State University of Applied Engineering.

E-mail: vikorol@yandex.ru

Kirill K. Ershov – postgraduate student of the Department of Automated Electric Drive and Electrical Engineering, Higher School of Technology and Energy, St. Petersburg State University of Industrial Technologies and Design.

E-mail: volt.96@yandex.ru

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

E-mail: 21.01lex@mail.ru

Статья поступила в редакцию 25.05.2023; принята к публикации после рецензирования 02.08.2022; опубликована онлайн 19.10.2023.

Submitted 25.05.2023; accepted 02.08.2022; published online 19.10.2023.
