

Исследование возможности использования электродвигателя главного движения станка при уменьшенном количестве ступеней коробки скоростей и преобразователя частоты

М. П. Белов¹, О. А. Кундюков^{1✉}, В. И. Королёв², 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 современные способы модернизации приводов главного движения токарных станков. Проведена оптимизация работы токарно-винторезного станка ФТ-11 посредством упрощения кинематической цепи привода главного движения и введением частотного регулирования скорости. При оптимизации учтены возможности подшипников двигателя, а также преобразователя. В математической среде MatLab & Simulink построена структурная схема для расчета критического момента, приведенного к шпинделю, а также схемы для построения механических характеристик требуемых и тех, которые можно обеспечить на шпинделе станка после упрощения его кинематической цепи. Разработан и приведен алгоритм сокращения количества ступеней коробки скоростей привода главного движения.

Ключевые слова: электропривод главного движения, кинематическая цепь, преобразователь частоты

Для цитирования: Исследование возможности использования электродвигателя главного движения станка при уменьшенном количестве ступеней коробки скоростей и преобразователя частоты / М. П. Белов, О. А. Кундюков, В. И. Королёв, А. А. Наумов // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2023. Т. 16, № 5. С. 68–80. doi: 10.32603/2071-8985-2023-16-5-68-80.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Original article

Study of the Possibility of Using the Electric Motor of the Main Movement of the Machine with a Reduced Number of Steps of the Gearbox and Frequency Converter

M. P. Belov¹, O. A. Kundyukov^{1✉}, V. I. Korolev², 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. Modern methods of modernization of the drives of the main movement of lathes are considered. The optimization of the operation of the FT-11 screw-cutting lathe was carried out by simplifying the kinematic chain of the main movement drive and introducing frequency-controlled speed control. The optimization takes into account the capabilities of the motor bearings as well as the converter. In the mathematical environment MatLab & Simulink, a block diagram was built to calculate the critical moment brought to the spindle, as well as

diagrams for constructing the mechanical characteristics required and those that can be provided on the machine spindle after simplifying its kinematic chain. An algorithm for reducing the number of gear box stages of the main drive is developed and presented.

Keywords: main motion electric drive, kinematic chain, frequency converter

For citation: Study of the Possibility of Using the Electric Motor of the Main Movement of the Machine with a Reduced Number of Steps of the Gearbox and Frequency Converter / M. P. Belov, O. A. Kundyukov, V. I. Korolev, A. A. Naumov // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2023. Vol. 16, no. 5. P. 68–80. doi: 10.32603/2071-8985-2023-16-5-68-80.

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

Важным направлением в машиностроении является повышение качества и точности обрабатываемых на станке изделий.

Выполнение данной задачи осложняется тем, что постоянно повышаются требования к точности и производительности обработки, появляется необходимость применять новые технологические процессы обработки, более прогрессивные режущие инструменты. Количество выполняемых технологических операций на одном станке увеличивается, поэтому к современным станкам предъявляются требования высокой производительности и точности в сочетании с широкой универсальностью и высокой мобильностью. Достичь выполнения указанных требований можно, используя модульный принцип построения металлорежущих станков [1].

Из всех узлов металлорежущего станка наибольшее влияние на показатели качества обрабатываемых деталей оказывают те, которые непосредственно участвуют в процессе резания. Таким образом, приводы главного движения резания и движения подачи фактически определяют шероховатость обработанной поверхности и процент брака. Наибольшее влияние на качество обработки заготовки оказывают шпиндельные узлы (ШУ) [2].

В ШУ возникают свободные, вынужденные, параметрические, механические колебания. В металлорежущих станках доля, вносимая механизмами привода главного движения в общий уровень вибрации станка, составляет 90 %.

Значимость и важность снижения вибрации в приводах станков возрастает как при создании станков нового поколения, так и при проведении модернизации действующего оборудования.

С помощью анализа динамического качества привода с бесступенчатым регулированием частоты вращения шпинделя и специального программного обеспечения по диапазонам частот вращения валов можно определить безрезонансные

зоны привода по оборотным и зубцовым частотам вынужденных колебаний и наметить мероприятия по исключению резонансных явлений [3].

Уменьшить колебания привода можно также, используя упрощенные кинематические схемы привода главного движения, когда мотор соединяется со шпинделем через специальную муфту или ременную передачу либо применяя мотор-шпиндели [4].

К современным способам модернизации станков относят следующие: замена электродвигателя; установка преобразователя вместо редуктора; уменьшение количества ступеней редуктора и регулировка скорости между этими несколькими ступенями преобразователем.

С помощью дистанционного переключения шестерен коробки скоростей передаточное отношение привода изменяется ступенчато, чтобы получить разные скорости вращения исполнительного механизма. Однако применение коробки скоростей снижает точность работы станка из-за наличия зазоров в зубчатой паре и вибраций, связанных с нарушением соосности элементов коробки скоростей. Кроме того, в процессе работы станка она нагревается и тепло передается близлежащим узлам электропривода, что также может негативно отразиться на качестве обработки заготовки [5].

Поэтому актуален способ модернизации, при котором уменьшается количество ступеней редуктора и устанавливается преобразователь частоты для плавного регулирования скорости вращения шпинделя.

Применение схемы «преобразователь частоты – асинхронный двигатель» даст возможность плавно менять скорость вращения шпинделя, обеспечить плавный пуск привода, настроить темп разгона. Применение данной схемы обеспечивает наиболее высокую надежность и обладает малым шумом при обработке деталей.

Установка преобразователя частоты позволит обеспечить высокие статические и динамические характеристики привода главного движения станка; повысит его производительность и энергоэффективность.

Цель исследования состоит в оптимизации работы токарно-винторезного станка ФТ-11 упрощением кинематической цепи привода главного движения и введением частотного регулирования его скорости.

Первоначально из технической документации на станок берутся исходные данные для анализа, рассматривается кинематическая цепь привода главного движения. Обычно в такой документации есть таблица, в которой указаны наибольший крутящий момент на шпинделе, наибольшая допустимая мощность и число оборотов шпинделя. Исходя из этих данных и номинальной скорости вращения приводного электродвигателя рассчитывается передаточное отношение шпинделя и другие данные.

При анализе исходных данных станка видно, что регулирование приводов главного движения на скоростях выше номинальной осуществляется с постоянной мощностью, так как бóльшим скоростям резания соответствуют меньшие усилия резания, а меньшим – большие. На скоростях ниже номинальной управление ведется с постоянным моментом. Таким образом получается двухзонное регулирование скорости. Если мощность привода небольшая, то применяют однозонное регулирование скорости [6].

В случае, когда принимается решение о модернизации привода главного движения, с одной стороны, следует учитывать возможности преобразователя частоты, а с другой – электродвигателя привода.

Преобразователь частоты должен обеспечивать требуемый диапазон регулирования скорости, а также момент на шпинделе на всех скоростях. Токи при этом не должны быть выше допустимых.

Электродвигатель должен подходить к преобразователю по моменту, току, а также развивать требуемую угловую скорость, не перегреваясь. Кроме того, в целях предотвращения сокращения срока службы электрической машины обращается внимание на наибольшую допустимую скорость подшипников, тип вентиляции, изоляцию, учитываются потери в стали машины на гистерезис и вихревые токи, увеличивающиеся в зависимости от частоты.

Допустимые скорости вращения подшипника определяются его размером, типом, конструкцией и смазыванием. Так, при прочих равных: малень-

кий подшипник быстрее большого; подшипники качения быстрее подшипников скольжения; шариковые подшипники быстрее роликовых; открытые подшипники быстрее закрытых; подшипники с сепаратором быстрее бессепараторных; подшипники с зазором быстрее подшипников с преднатягом; смазываемые маслом подшипники быстрее смазываемых пластичной смазкой. Подшипник должен вращаться с требуемой скоростью, не выходя при этом за допустимые значения скорости вращения.

Следует учесть, что стандартный электродвигатель привода нельзя использовать в составе частотно-регулируемого привода, так как при уменьшении скорости вращения снижается эффективность охлаждения. При регулировании скорости вверх от номинальной резко увеличивается нагрузка от собственного вентилятора. В обоих случаях уменьшается нагрузочная способность двигателя.

Если при модернизации принимается решение о сокращении количества ступеней коробки скоростей, то первоначально находится то передаточное отношение, при котором на шпинделе момент и скорость вращения будут максимальны. Принимается предварительное решение о сохранении этой ступени скоростей и для нее рассчитываются: критический момент двигателя; критический момент двигателя, приведенный к шпинделю станка; частота преобразователя; синхронная угловая скорость двигателя; частота двигателя.

Далее проводится сравнение рассчитанного момента, приведенного к шпинделю, с требуемым: первый должен быть больше второго с учетом коэффициента запаса. На скоростях электродвигателя ниже номинальной анализируются возможности преобразователя. Если преобразователь способен обеспечить требуемые параметры системы управления, то принимается решение об использовании выбранного ранее передаточного отношения и на этих скоростях.

При анализе возможности применения предварительно выбранной ступени на скоростях выше номинальной следует обращать на возможности механики двигателя, потери в стали, а также на критический момент, приведенный к валу шпинделя.

В настоящее время в токарно-винторезном станке ФТ-11 в качестве привода главного движения используется электродвигатель 4А132М4ПУЗ, параметры которого представлены в табл. 1.

Табл. 1. Характеристики электродвигателя
Tab. 1. Characteristics of the electric motor

Наименование	Значение
Частота сети f , Гц	50
Число фаз сети m	3
Номинальная мощность P_2 , кВт	11
Фазное напряжение U_{1n} , В	220
Линейное напряжение U_s , В	380
Синхронная скорость n_1 , об/мин	1500
Номинальная скорость n_2 , об/мин	1450
Число пар полюсов p_{Π}	2
Номинальный коэффициент полезного действия (КПД) η	0.87
Момент инерции ротора $J_{дв}$, кг/м ²	0.0349
Номинальный коэффициент мощности $\cos \varphi$	0.83
Кратность пускового тока i_k	7.5
Перегрузочная способность по моменту m_k	2.9

Предлагаемый путь модернизации – уменьшить количество ступеней редуктора и проанализировать возможность применения электродвигателя 4A132M4ПУЗ в совокупности с преобразователем частоты.

В табл. 2 представлены значения параметров станка ФТ-11 из паспорта на станок [6] и расчетные значения для каждой скорости вращения шпинделя.

В таблице представлены следующие обозначения: $n_{шп}$ – требуемое число оборотов шпинделя, об/мин; $\omega_{шп}$ – требуемая угловая скорость шпинделя, рад/с; $f_{шп}$ – требуемая частота шпинделя, Гц; $M_{шп}$ – требуемый момент на шпинделе, Н · м; $i_{ст}$ – передаточное число шпинделя; $i_{нов}$ – новое передаточное число шпинделя; $f_{пр}$ – частота преобразователя, Гц; $\omega_{дв}$ – синхронная угловая скорость двигателя; $f_{дв}$ – частота двигателя, Гц; $M_{дв.кр}$ – критический момент, развиваемый электродвигателем; $M_{дв.кр} i$ – критический момент двигателя, приведенный к шпинделю.

В левой части табл. 2 располагаются данные станка ФТ-11, взятые из паспорта. Эти данные говорят о том, какие скорость, угловую скорость, момент и частоту требуется обеспечить на шпинделе станка.

Табл. 2. Расчетные параметры станка ФТ-11 для каждой скорости вращения шпинделя
Tab. 2. Design parameters of the FT-11 machine for each spindle rotation speed

Паспортные данные					Расчетные данные					
$n_{шп}$, об/мин	$\omega_{шп}$, рад/с	$f_{шп}$, Гц	$M_{шп}$, Н · м	$i_{ст}$	$i_{нов}$	$f_{пр}$, Гц	$\omega_{дв}$, рад/с	$f_{дв}$, Гц	$M_{дв.кр}$, Н · м	$M_{дв.кр} i$, Н · м
1600	167.4	26.6	69	0.9	2.3	127	399	64	44	101
1250	130.8	20.8	88	1.1	2.3	100	314	50	67	155
1000	104.6	16.7	108	1.4	2.3	79	249	40	101	232
800	83.7	13.3	127	1.8	2.3	63	199	32	147	337
630	65.94	10.5	167	2.3	2.3	50	157	25	211	486
500	52.3	8.3	206	2.9	7.2	125	392	62	45	326
400	41.8	6.7	265	3.6	7.2	100	314	50	67	484
315	32.9	5.2	333	4.6	7.2	79	249	40	101	726
250	26.1	4.2	422	5.8	7.2	63	199	32	147	1058
200	20.9	3.3	530	7.2	7.2	50	157	25	211	1521
160	16.7	2.7	657	9.0	23.0	127	399	64	44	1012
125	13.0	2.1	853	11.6	23.0	100	311	50	67	1547
100	10.4	1.7	1040	14.5	23.0	79	249	40	101	2320
80	8.3	1.3	1314	18.1	23.0	63	199	32	147	3373
63	6.5	1.0	1550	23.0	23.0	50	157	25	211	4860
50	5.2	0.8	1550	29.0	23.0	39.6	125	20	–	–
40	4.2	0.7	1550	36.2	23.0	31.7	100	16	–	–
31.5	3.2	0.5	1550	46.0	23.0	25	79	12	–	–
20	2.0	0.3	1550	72.5	23.0	19	50	8	–	–
12.5	1.3	0.2	1550	116.0	23.0	10	31	5	–	–
8	0.8	0.1	1550	181.2	23.0	6.4	20	3	–	–

В правой части табл. 2 располагаются расчетные данные, которые говорят о том, что можно обеспечить на шпинделе станка, если оставить три ступени редуктора и управлять электродвигателем с помощью преобразователя частоты.

Жирным шрифтом в таблице выделены строки со значениями, при которых электродвигатель будет вращаться с номинальной угловой скоростью 151 рад/с.

На рис. 1 представлена кинематическая схема, поясняющая процесс пересчета угловой скорости шпинделя в угловую скорость двигателя. При этом на рисунке в качестве примера указаны параметры, соответствующие номинальной угловой скорости электродвигателя.

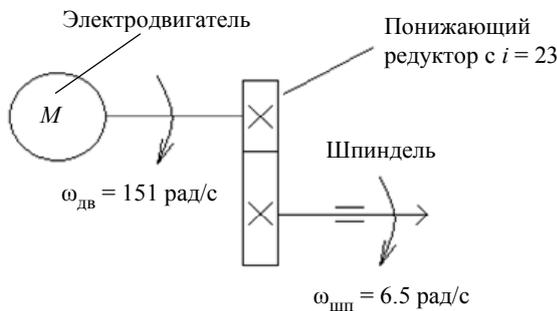


Рис. 1. Кинематическая схема модернизированного станка
Fig. 1. Kinematic diagram of the upgraded machine

Из рис. 1 следует, что для расчета скорости электродвигателя $\omega_{дв}$ необходимо угловую скорость вращения шпинделя $\omega_{шп}$ домножить на передаточное число шпинделя i .

Рассчитаем параметры двигателя, необходимые для построения структурной схемы расчета критического момента.

Синхронная угловая частота вращения, рад/с [7],

$$\omega_0 = \frac{n_1 2\pi}{60}.$$

Номинальная угловая частота вращения, рад/с,

$$\omega_H = \frac{n_2 \pi}{\kappa},$$

где κ – константа ($\kappa = 60$ с).

Номинальный момент, Н · м,

$$M_H = \frac{P_2}{\omega_H}. \quad (1)$$

Критический момент, Н · м,

$$M_K = M_H m_K.$$

Номинальное значение фазного тока, А,

$$I_{1H} = \frac{P_2}{m U_{1H} \eta \cos \varphi}.$$

Номинальное скольжение

$$S_n = \frac{n_1 - n_2}{n_1}.$$

Критическое скольжение

$$S_K = \left[m_K + \sqrt{m_K^2 + 2S_n(m_K - 1)} - 1 \right] \times \\ \times S_n \left[1 - 2S_n(m_K - 1) \right]^{-1}.$$

Механические потери

$$\Delta P_m = \left[U_s (1.73 I_{1H}) \cos \varphi - P_2 \right] \times \\ \times \left[1 + \frac{n_1^2}{1000^2} \right] \cdot 0.05.$$

Активное сопротивление обмотки ротора, Ом,

$$R'_2 = \frac{(P_2 + \Delta P_m)}{\left(\frac{1 - S_n}{S_n} \right) I_{1H}^2}.$$

Критическое скольжение

$$S_K = \frac{R'_2}{\sqrt{R_1^2 + X_{K.3}^2}}.$$

Обозначим знаменатель символом A :

$$\sqrt{R_1^2 + X_{K.3}^2} = A, \quad (2)$$

преобразуем формулу (2) к виду

$$A = \frac{R'_2}{S_K}.$$

Активное сопротивление обмотки статора, Ом,

$$R_1 = \frac{3U_\Phi^2}{2\omega_0 \text{дв} M_K} - A.$$

Индуктивное сопротивление короткого замыкания, Ом,

$$X_{K.3}^2 = A^2 - R_1^2.$$

Преобразовав формулу (2) к следующему виду, найдем $X_{K.3}$, Ом,

$$X_{K.3} = \sqrt{A^2 - R_1^2}.$$

Расчет критического момента, Н · м,

$$M_K = \frac{3U_\Phi^2}{2\omega_0 \text{дв} \left(R_1 + \sqrt{R_1^2 + X_{K.3}^2} \right)}. \quad (3)$$

На рис. 2 представлены результаты моделирования по формулам (1) и (3) в виде графиков зависимости номинального момента на шпинделе

$M_{шп}$ (кривая 1) и критического момента, приведенного к шпинделю $M_{дв.кр}i$ (кривая 2) от частоты двигателя $f_{дв}$.

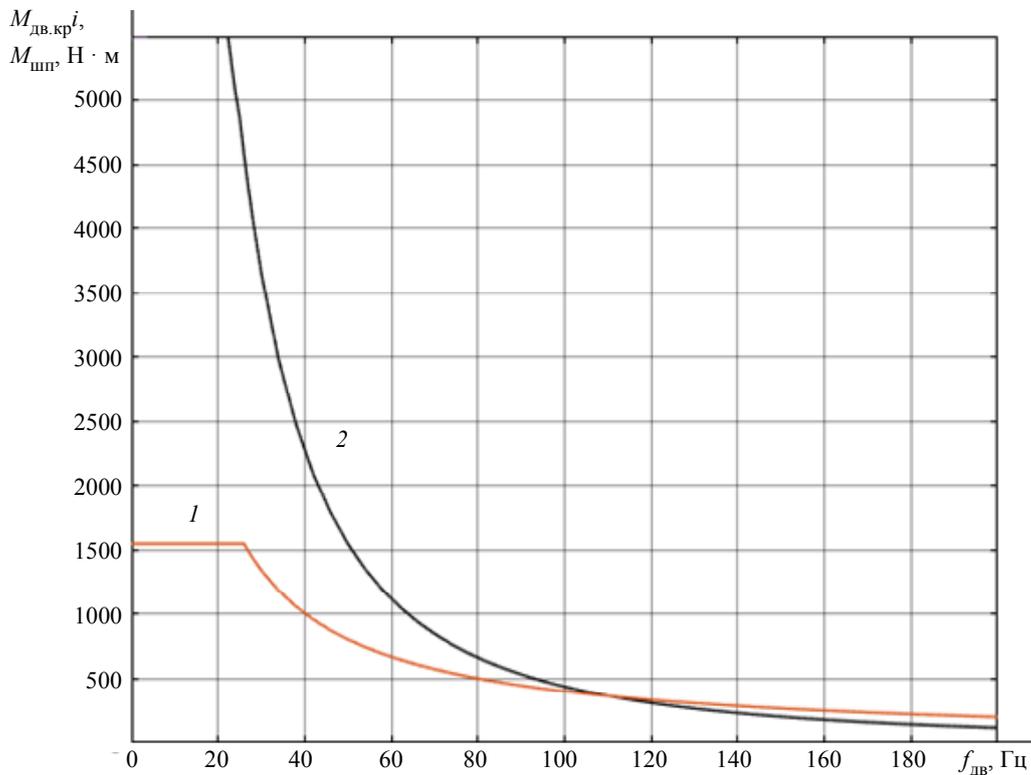


Рис. 2. Графики номинального момента на шпинделе (кривая 1) и критического момента, приведенного к шпинделю $M_{дв.кр}i$ (кривая 2)
 Fig. 2. Graphs of the nominal torque on the spindle (curve 1) and the critical torque reduced to the spindle $M_{дв.кр}i$ (curve 2)

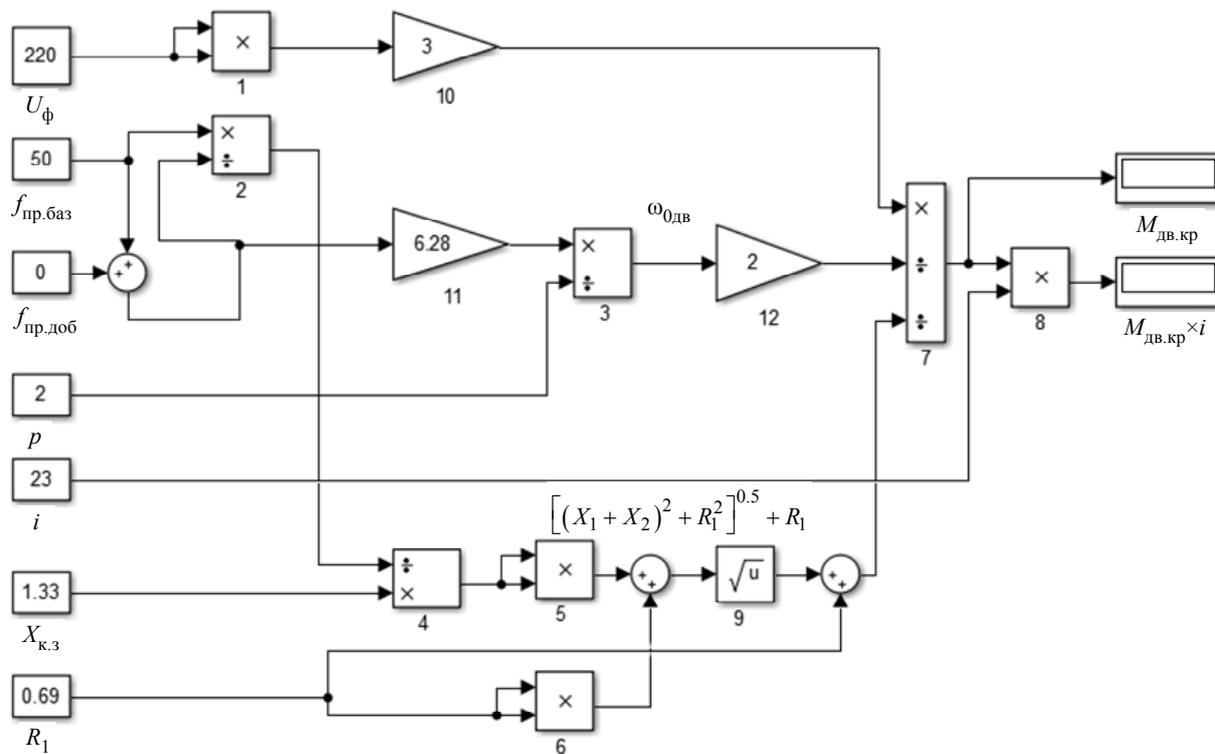


Рис. 3. Структурная схема для расчета критического момента
 Fig. 3. Block diagram for calculating the critical moment

Из графиков на рис. 2 видно, что при одной ступени редуктора электродвигатель 4A132M4ПУ3 может обеспечивать требуемый момент до $f_{дв} \approx \approx 110$ Гц, или примерно в 4 раза больше номинальной частоты двигателя. На более высоких скоростях вращения электродвигатель не может развить требуемого момента.

По формуле (3) в математической среде MatLab & Simulink построена структурная схема для расчета критического момента, изображенная на рис. 3. При определении критического момента на частотах преобразователя выше номинальной используют $f_{пр.доб}$. При этом фазное напряжение двигателя U_{ϕ} не меняется.

На рис. 3 обозначены: U_{ϕ} – фазное напряжение двигателя; $f_{пр.баз}$ – частота преобразователя, соответствующая номинальной скорости двигателя; $f_{пр.доб}$ – частота преобразователя добавочная; p – число пар полюсов двигателя; i – передаточное число шпинделя; $X_{к.з}$ – индуктивное сопротивление короткого замыкания; R_1 – активное сопротивление обмотки статора. В блоках 1–12 реализованы математические операции умножения, деления или извлечения квадратного корня.

Выходные расчетные величины модели – это $M_{дв.кр}$ – критический момент двигателя, и $M_{дв.кр}^i$ – критический момент двигателя, приведенный к шпинделю.

Для того чтобы работать с моделью, изображенной на рис. 2, сначала в блоки U_{ϕ} , $f_{пр.баз}$, $f_{пр.доб}$, p , i , $X_{к.з}$, R_1 вносятся исходные данные. Далее нажатием кнопки Run на панели инструментов Simulink производится моделирование.

На основании полученных данных сравнивается критический момент, который может обеспечить данный электродвигатель на шпинделе с тем моментом, который требуется обеспечить на шпинделе (известно из паспортных данных).

При этом должно выполняться условие

$$M_{дв.кр}^i \geq M_{шп} \cdot 1.1, \quad (4)$$

где 1.1 – коэффициент запаса.

На рис. 3 в качестве примера приведены значения для передаточного отношения шпинделя $i = 23$ и частоты преобразователя $f_{пр} = 50$ Гц. При этих исходных данных: $M_{дв.кр}^i = 4860$ Н · м. Условие (4) для этого значения выполняется, т. е.

двигатель может обеспечить требуемый момент на шпинделе станка при этой частоте преобразователя и передаточном отношении шпинделя. Далее полученные данные заносятся в табл. 2 в соответствующую строку. На более низких частотах преобразователя частоты относительно базовой требуемый момент на шпинделе $M_{шп} = \text{const}$, и двигатель может его обеспечивать. На частотах выше базовой частоты преобразователя критический момент двигателя сильно падает, это необходимо учитывать при анализе возможности применения данного передаточного числа шпинделя при данной частоте преобразователя. Главное, чтобы выполнялось условие (4).

Как только условие (4) перестает выполняться, вводится новое из уже имеющихся передаточное отношение коробки скоростей станка. При этом скорость двигателя будет номинальной, а частота преобразователя – базовой. При этом, если условие (4) выполняется, то двигатель может обеспечить требуемый момент на шпинделе станка. Далее частота преобразователя увеличивается до тех пор, пока условие (4) выполняется. В случае необходимости вводятся дополнительные ступени коробки скоростей.

Из рассчитанных данных табл. 2 видно, что минимальная скорость вращения электродвигателя $\omega_{0 \text{ дв } \min} = 20$ рад/с, что меньше синхронной номинальной скорости в 7.85 раз. Это означает, что необходимо выбирать такой преобразователь, который сможет обеспечить на минимальной частоте, в данном случае $f_{пр \min} = 6.4$ Гц, момент на шпинделе $M_{шп} = 1500$ Н · м.

Максимальная синхронная угловая скорость двигателя превышает номинальную в 2.5 раза и составляет $\omega_{0 \text{ дв } \max} = 299$ рад/с. Используемые в электродвигателе 4A132M4ПУ3 шариковые однорядные подшипники 6308-ZZ/C3 могут выдерживать $\omega_{0 \text{ дв } \max}$ номинальная угловая скорость вращения подшипников составляет $\omega_{\text{подш}} = 845$ рад/с.

Известно, что момент асинхронного двигателя рассчитывается [7] как

$$M = \frac{3U_{\phi}^2 R_2'}{\omega_0 s \left[\left(R_1 + \frac{R_2'}{s} \right)^2 + X_{к.з}^2 \right]}. \quad (5)$$

В математической среде MatLab & Simulink по (5) строится структурная схема расчета механической характеристики двигателя, приведенной к шпинделю станка. Структурная схема для $\omega_{0\text{ дв}} = 399$ рад/с и ее субблок приведены на рис. 4.

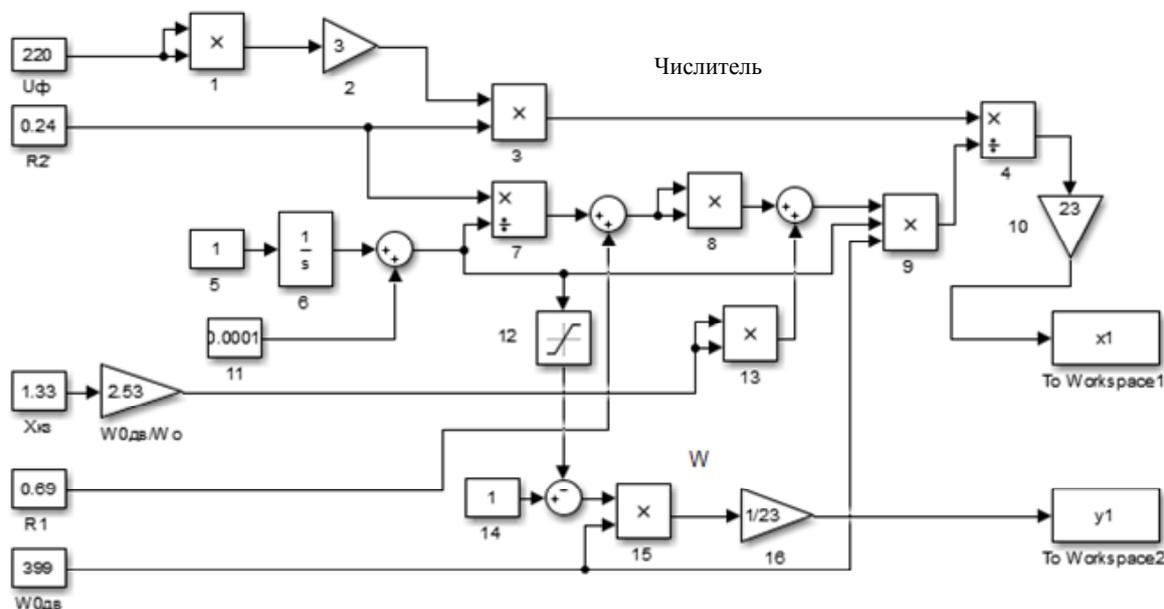
На рис. 4 в блоках 1–16 реализуется расчет механической характеристики двигателя, приведенной к шпинделю с учетом U_{ϕ} , R_2' , $X_{к.з}$, $\omega_{0\text{ дв}}/\omega_0$, R_1 , $\omega_{0\text{ дв}}$. Также при построении характеристики следует учитывать передаточное число шпинделя в блоках 10 и 16.

Уравнение кривой механизмов, работающих с постоянной мощностью, описывается следующим уравнением:

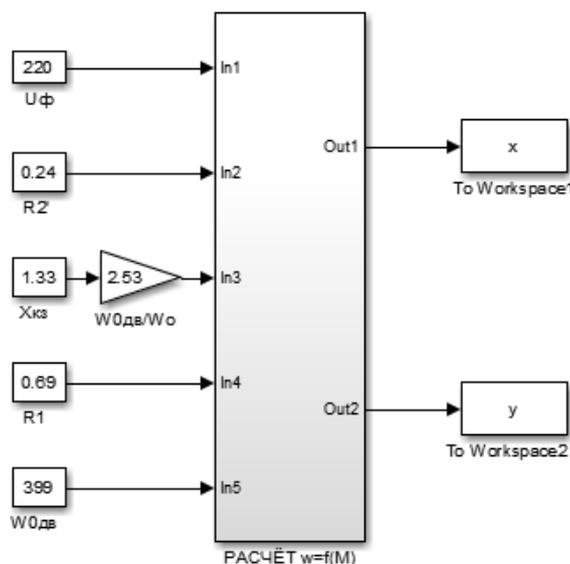
$$y = k \frac{1}{x}. \quad (6)$$

Зная координаты точки кривой x , y , можно вычислить коэффициент k кривой.

По формуле (6) в MatLab & Simulink построена структурная схема расчета механической характеристики механизма шпинделя станка. Структурная схема формулы (6) и ее субблок приведены на рис. 5.



a



б

Рис. 4. Структурная схема расчета механической характеристики двигателя, приведенной к шпинделю станка (a) и ее субблок (б)
 Fig. 4. Block diagram of the calculation of the mechanical characteristics of the motor driven to the machine spindle (a) and its subunit (б)

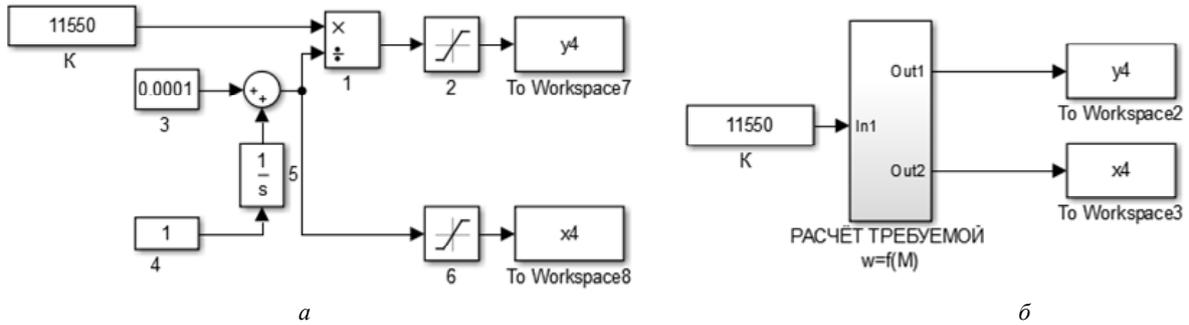


Рис. 5. Структурная схема расчета механической характеристики механизма шпинделя станка (а) и ее субблока (б)
Fig. 5. Block diagram of the calculation of the mechanical characteristics of the machine spindle mechanism (a) and its subunit (b)

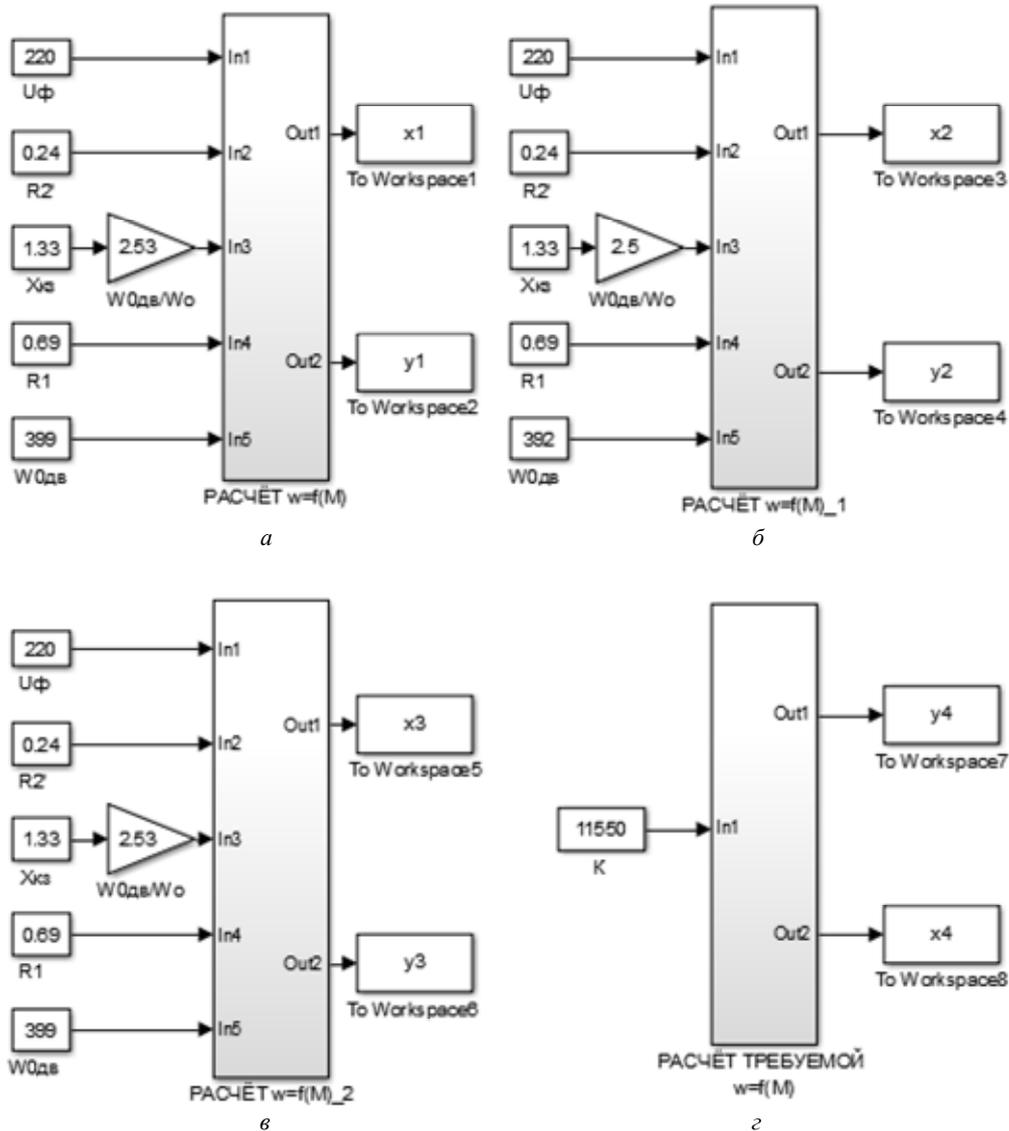


Рис. 6. Структурная схема расчета механических характеристик двигателя, приведенных к шпинделю для передаточных ступеней шпинделя $i_{нов}$: а – 23; б, в – 7.2 и механической характеристики механизма шпинделя станка (z)
Fig. 6. Block diagram of the calculation of the mechanical characteristics of the motor brought to the spindle for the three transfer stages of the spindle $i_{нов}$: а – 23; б, в – 7.2 and the mechanical characteristics of the machine spindle mechanism (z)

На рис. 5 блоки 1–6 осуществляют расчет механической характеристики шпинделя. При этом коэффициент k рассчитан для точки с координатами

$x = 69$, $y = 167.4$, где x соответствует требуемому моменту, y – скорости.

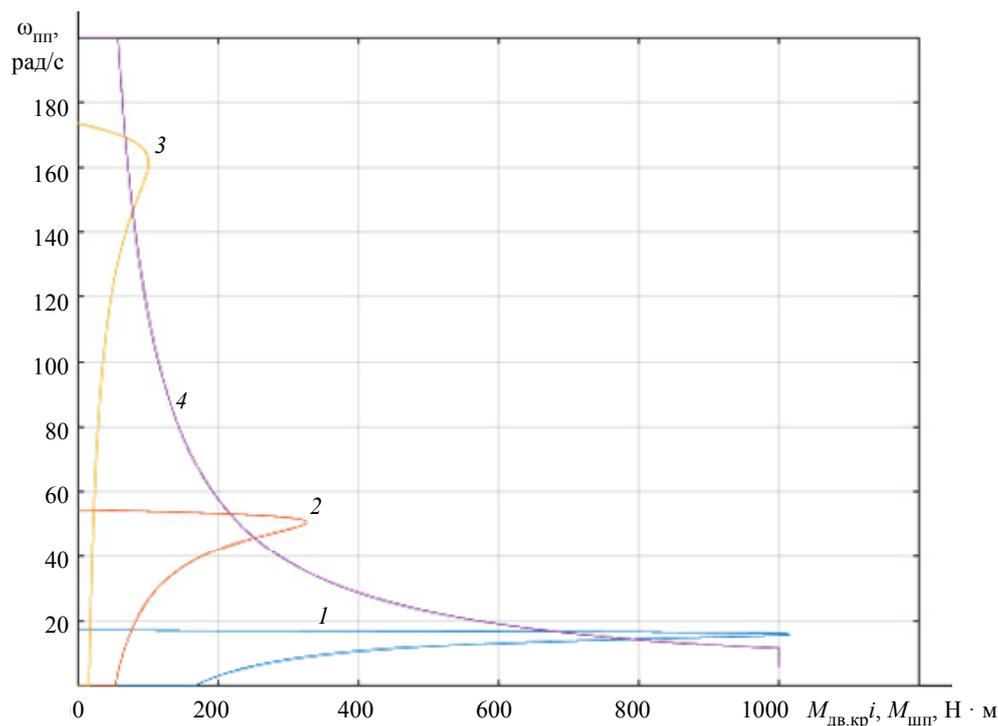


Рис. 7. Графики механических характеристик
Fig. 7. Graphs of mechanical characteristics

На рис. 6 представлена структурная схема расчета механических характеристик двигателя, приведенных к шпинделю, для трех передаточных ступеней шпинделя (*a*, *b*, *в*) и механической характеристики механизма шпинделя станка (*г*).

Для вывода механических характеристик на графике в одних осях в MatLab в Command Window пишутся следующие команды:

```
>> plot(x1, y1);  
hold on;  
plot(x2, y2);  
plot(x3, y3);  
plot(x4, y4).
```

В результате выполнения команд получают графики механических характеристик, изображенные на рис. 7: 1 – механическая характеристика двигателя, приведенного к шпинделю при передаточном числе шпинделя, равном 23; 2 – механическая характеристика двигателя, приведенного к шпинделю при передаточном числе шпинделя, равном 7.2; 3 – механическая характеристика двигателя, приведенного к шпинделю при передаточном числе шпинделя, равном 2.3; 4 – механическая характеристика механизма шпинделя станка. Механические характеристики 1, 2, 3 приведены для верхних границ диапазонов передаточных отношений 23, 7.2, 2.3.

Полученные графики переходных процессов говорят о том, что можно сократить количество передаточных отношений привода главного движения до 3. При этом используемый двигатель станка обеспечивает требуемый момент во всем диапазоне регулирования скорости вращения шпинделя.

На рис. 8 представлен алгоритм сокращения количества передаточных отношений кинематической цепи привода главного движения токарного станка.

Выводы. В статье рассмотрены основные способы модернизации приводов главного движения станков. На примере токарно-винторезного станка ФТ-11 рассмотрен способ модернизации, при котором сокращается количество ступеней коробки скоростей и внедряется преобразователь частоты. В результате модернизации удалось снизить число передач коробки скоростей до трех. В статье приведены графики механических характеристик двигателя, приведенных к шпинделю при различных передаточных отношениях кинематической цепи привода и требуемые механические характеристики шпинделя в одних осях, построенные в математической среде MatLab & Simulink. Разработан и приведен алгоритм сокращения количества ступеней коробки скоростей привода главного движения.

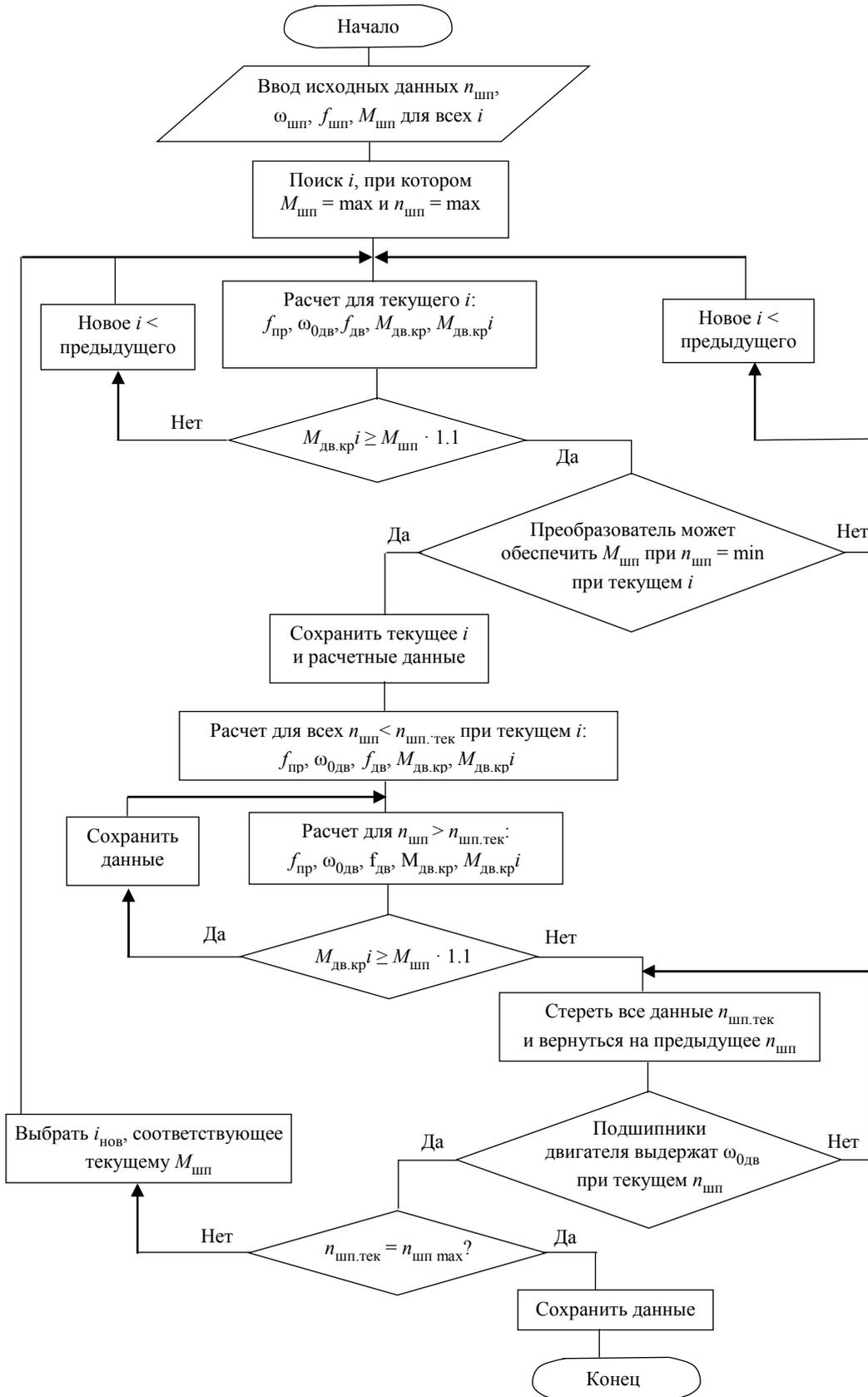


Рис. 8. Алгоритм сокращения количества ступеней коробки скоростей привода главного движения
Fig. 8. Algorithm for reducing the number of stages of the gearbox of the main motion drive

В результате проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Разработан алгоритм сокращения количества ступеней коробки скоростей привода главного движения станка ФТ-11, который может применяться и для других станков.

2. В результате исследования в станке ФТ-11 удалось сократить количество ступеней с 21 до 3, что позволяет повысить точность станка.

3. Применение частотного регулирования скорости повысит статические и динамические характеристики станка.

Список литературы

1. Стародубов В. С. Модульный принцип построения металлорежущих станков с числовым программным управлением // Изв. вузов. Машиностроение. 2013. № 1. С. 68–74.

2. Цибизов П. Н., Николаев А. Г. Автоматизация точностных расчетов шпиндельных узлов металлорежущих станков // Аллея науки. 2018. № 1. С. 902–907.

3. Денисенко А. Ф., Гаспарова Л. Б. Оценка резонансных режимов привода главного движения токарного станка с бесступенчатым регулированием // Транспортное машиностроение. 2022. № 9. С. 11–21. doi: 10.30987/2782-5957-2022-9-11-21.

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». Вологда, 2017. С. 20–24.

5. Analysis and prospects of development of electric drives of metalworking machines / O. A. Kundyukov, M. P. Belov, V. I. Korolev, N. C. Blagodarnyy, K. K. Ershov // Proc. of the 2022 Conf. of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, Elconrus 2022 (ElConRus). St. Petersburg: IEEE, 2022. С. 726–730.

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

7. Алиев И. И. Асинхронные двигатели в трехфазном и однофазном режимах. М.: ИП Радиософт, 2004. 128 с.

Информация об авторах

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

E-mail: vikogol@yandex.ru

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

E-mail: 21.01lex@mail.ru

References

1. Starodubov V. S. Modul'nyj princip postroenija metallovezhushchih stankov s chislovym programmnyim upravleniem // Izv. vuzov. Mashinostroenie. 2013. № 1. S. 68–74. (In Russ.).

2. Cibizov P. N., Nikolaev A. G. Avtomatizacija tochnostnyh raschetov shpindel'nyh uzlov metallovezhushchih stankov // Alleja nauki. 2018. № 1. S. 902–907. (In Russ.).

3. Denisenko A. F., Gasparova L. B. Ocenka rezonansnyh rezhimov privoda glavnogo dvizhenija tokarnogo stanka s besstupenchatym regulirovaniem // Transportnoe mashinostroenie. 2022. № 9. S. 11–21. doi: 10.30987/2782-5957-2022-9-11-21. (In Russ.).

4. Molodcov V. V., Gilovoj L. Ja. Privody glavnogo dvizhenija i shpindel'nye uzly sovremennyh stankov //

Materialy Vseros. nauch.-prakt. konf. «Nauka segodnja: vyzovy i perspektivy». Vologda, 2017. S. 20–24. (In Russ.).

5. Analysis and prospects of development of electric drives of metalworking machines / O. A. Kundyukov, M. P. Belov, V. I. Korolev, N. C. Blagodarnyy, K. K. Ershov // Proc. of the 2022 Conf. of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, Elconrus 2022 (ElConRus). St. Petersburg: IEEE, 2022. S. 726–730.

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

7. Aliev I. I. Asinhronnye dvigateli v trehfaznom i odnofaznom rezhimah. M.: IP Radiosoft, 2004. 128 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 – Senior Lecturer of the Department of Automated Electric Drive and Electrical Engineering, Higher School of Economics, St. Petersburg State University of Industrial Technologies and Design.

E-mail: vikorol@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 30.03.2023; принята к публикации после рецензирования 06.04.2023; опубликована онлайн 25.05.2023.

Submitted 30.03.2023; accepted 06.04.2023; published online 25.05.2023.
