

УДК 674.05:62-51

А. А. Гришкевич, А. Ф. Аникеенко, П. А. Бараненко

Белорусский государственный технологический университет

**ПРОЕКТ СИСТЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО УПРАВЛЕНИЯ
ИНСТРУМЕНТОМ С ИЗМЕНЯЕМЫМИ УГЛОВЫМИ ПАРАМЕТРАМИ**

В данной статье предлагается вариант системы дистанционного управления фрезерным инструментом с изменяемыми угловыми параметрами. Система управления имеет возможность производить контроль и изменение углов резания лезвийного инструмента непосредственно во время его работы. Реализация такой системы дистанционного управления инструментом с изменяемыми угловыми параметрами обеспечит: уменьшение ассортимента лезвийного инструмента на производстве при работе с различными древесными материалами, имеющими различные физико-механические характеристики и требования к качеству обработки; снижение потребления электроэнергии на единицу площади обработанной поверхности; увеличение производительности оборудования; уменьшение времени на наладку машины.

Ключевые слова: инструмент, углы резания, дистанционное управление, система, сервопривод.

A. A. Grishkevich, A. F. Anikayenko, P. A. Baranenko

Belarusian State Technological University

**PROJECT OF REMOTE TOOL CONTROL SYSTEM
WITH VARIABLE ANGULAR PARAMETERS**

This article proposes a variant of the remote control system of milling tools with variable angular parameters. The control system has the ability to control and change the cutting angles of the blade tool directly during its operation. Implementation of such system of remote control of the tool with changeable angular parameters will provide: reduction of the range of the blade tool at production at work with the various wood materials having various physical and mechanical characteristics and requirements to quality of processing; reduction of power consumption per unit area of the treated surface; increase of equipment productivity; reduction of time for adjustment of the machine.

Key words: tool, cutting angles, remote control, system, servo.

Введение. Устойчивое экономическое развитие современных предприятий требует постоянного внимания его экономической эффективности. Проводятся модернизация или замена старого оборудования, используемых технологий, рассчитываются энергетические затраты и вводятся мероприятия по их уменьшению.

В настоящее время на деревообрабатывающих предприятиях применяются следующие основные виды механической лезвийной обработки древесины и древесных материалов, такие как пиление, фрезерование, сверление, шлифование, строгание, лущение. Для получения определенного вида конечной продукции могут быть использованы различные вышеперечисленные виды обработки. Однако эффективность их применения будет различна: разная производительность процесса, потребляемая мощность на единицу продукции, период стойкости инструмента, полезный выход и так далее. Так, например, применение в технологических процессах при делении материалов ленточных пил позволило увеличить полезный выход продукции. Это особенно важно, когда ведется обработка ценных пород древесины.

Значимое место при обработке древесных материалов занимает и фрезерование. При получении фасонных или профильных поверхностей этому виду резания порой нет и замены. Поэтому дальнейшее проведение работ по совершенствованию или созданию новых фрезерных инструментов, системы управления технологическим процессом является задачей актуальной и своевременной.

На кафедре «Деревообрабатывающие станки и инструменты» ведутся работы по совершенствованию деревообрабатывающего оборудования и инструментов, инновационного их развития, обеспечивающих ресурсосбережение [1–4].

Предлагаемая к рассмотрению система управления позволит производить контроль и установку заданных угловых параметров базовому инструменту непосредственно во время обработки древесных материалов. Ее реализация в производстве позволит уменьшить ассортимент инструментального хозяйства, потребление электроэнергии во время обработки материала и повысить производительность процесса за счет уменьшения времени на переналадку оборудования.

Основная часть. Целью работы является разработка системы дистанционного управления фрезерным инструментом с изменяемыми угловыми параметрами, обеспечивающей уменьшение мощности на резание, улучшение качества получаемой поверхности и увеличение производительности машин.

На начальном этапе разрабатывается структурная схема механизма. Проектируемое устройство должно производить поворот сегментов во время вращения фрезы, задание угла поворота сегментов осуществляться дистанционно с помощью смартфона. Также дистанционно должен производиться и контроль угла поворота.

При разработке структурной схемы были соблюдены следующие правила:

а) структурная схема должна состоять из минимально возможного количества элементов, что позволит уменьшить время диагностики неполадок в случае их появления, а также снизить себестоимость всего механизма;

б) схема должна быть читабельна для понимания принципа ее работы;

в) использовать, по возможности и целесообразности, наиболее распространенные элементы. Например, использование смартфона в качестве устройства ВВОДА и мониторинга информации о положении режущего элемента.

Придерживаясь данных правил, была разработана следующая структурная схема (рис. 1).

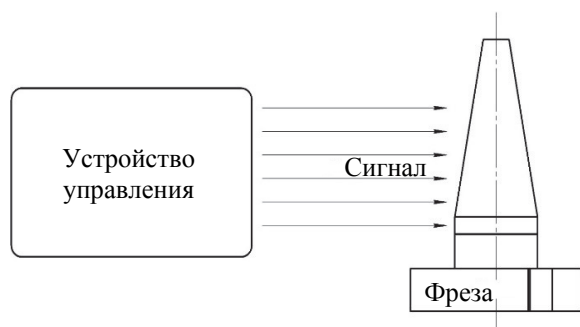


Рис. 1. Структурная схема механизма

Структурная схема состоит из устройства управления (смартфона) и фрезы, внутри которой находятся считывающее устройство, преобразователь и исполнительный механизм.

Посредством Wi-Fi соединения между смартфоном и считывающим устройством фрезы происходит постоянный обмен данными. Благодаря этому имеем возможность постоянного контроля угла поворота сегментов.

Далее выбираем составные элементы системы.

1) Плата управления.

Arduino – это небольшая плата с собственным процессором и памятью. На плате также есть пара десятков контактов, к которым можно

подключать всевозможные компоненты: лампочки, датчики, моторы, роутеры, магнитные дверные замки и все, что работает от электричества.

В процессор Arduino можно загрузить программу, которая будет управлять всеми этими устройствами по заданному алгоритму.

Платформа Arduino Nano – открытая и компактная платформа из семейства Arduino, построенная на микроконтроллере ATmega328 (Arduino Nano 3.0) или ATmega168 (Arduino Nano 2.x), имеет небольшие размеры [5].

На рис. 2 представлена плата Arduino Nano.

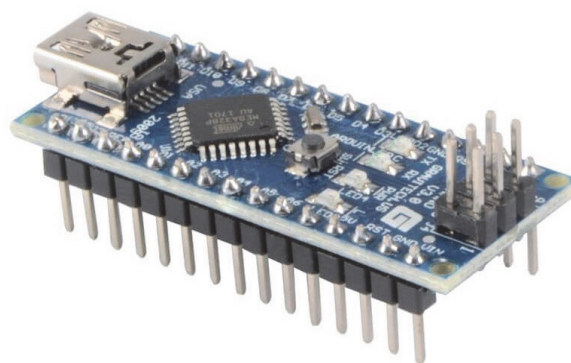


Рис. 2. Плата Arduino Nano

Arduino Nano – это уменьшенный аналог Arduino Uno, отличающийся формфактором платы, которая в 2–2,5 раза меньше, чем Arduino Uno, отсутствием силового разъема постоянного тока.

2) Сервопривод.

Под сервоприводом понимают механизм с электромотором, который может повернуться на заданный угол и удерживать это положение.

Сервопривод – это привод с управлением через отрицательную обратную связь, позволяющую точно управлять параметрами движения. Сервоприводом является любой тип механического привода, имеющий в составе датчик (положения, скорости, усилия и т. п.) и блок управления приводом, автоматически поддерживающий необходимые параметры на датчике и устройстве согласно заданному внешнему значению. Иными словами, сервопривод получает на вход значение управляющего параметра. Например, угол поворота, блок управления сравнивает это значение со значением на своем датчике, на основе результата сравнения привод производит некоторое действие, например поворот, ускорение или замедление, так, чтобы значение с внутреннего датчика стало как можно ближе к значению внешнего управляющего параметра.

Наиболее распространены сервоприводы, которые удерживают заданный угол, и сервоприводы, поддерживающие заданную скорость вращения.

Типичный хобби-сервопривод изображен на рис. 3 [6].



Рис. 3. Типичный хобби-сервопривод

3) Wi-Fi модуль.

ESP8266 – микроконтроллер с интерфейсом Wi-Fi, который имеет возможность выполнять программы из Flash-памяти. Устройство было выпущено в 2014 г. китайской фирмой Espressif и практически сразу же стало популярным.

Контроллер недорогой, обладает небольшим количеством внешних элементов и имеет следующие технические параметры:

- поддерживает Wi-Fi протоколы 802.11 b/g/n с WEP, WPA, WPA2;
- обладает 14 портами ввода и вывода, SPI, I2C, UART, 10-бит АЦП;
- поддерживает внешнюю память до 16 МБ;
- необходимое питание от 2,2 до 3,6 В, потребляемый ток до 300 мА в зависимости от выбранного режима.

Важной особенностью является отсутствие пользовательской энергонезависимой памяти на кристалле. Программа выполняется от внешней SPI ПЗУ при помощи динамической загрузки необходимых элементов программы. Доступ к внутренней периферии можно получить не из документации, а из API набора библиотек [7].

ESP-01 – плата-модуль Wi-Fi на базе популярного чипсета ESP8266EX (рис. 4). На борту платы находится микросхема Flash-памяти объемом 2 МБ, чип ESP8266EX, кварцевый резонатор, два индикаторных светодиода и миниатюрная антенна из дорожки на верхнем слое печатной платы в виде змейки. Flash-память необходима для хранения программного обеспечения. При каждом включении питания про-

граммное обеспечение автоматически загружается в чип ESP8266EX.

По умолчанию модуль настроен на работу через «AT-команды». Управляющая плата посылает команды – Wi-Fi модуль в свою очередь выполняет соответствующую операцию.

Внутри чипа ESP8266 находится полноценный микроконтроллер, который является самодостаточным устройством. Прошивать модуль можно на разных языках программирования.

Родное напряжение модуля – 3,3 В. Его пины не «толерантны» к 5 В. Если подать напряжение выше, чем 3,3 В на пин питания, коммутации или ввода-вывода, модуль выйдет из строя. Поэтому для передачи данных на модуль с 5-вольтовых управляющих плат используют делитель напряжения, чтобы перевести напряжение в допустимый диапазон.

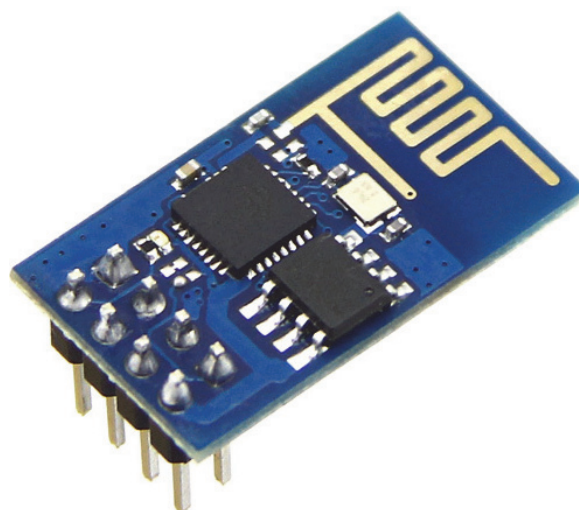


Рис. 4. Плата-модуль Wi-Fi на базе чипсета ESP8266EX

Никаких посредников для приема данных не нужно. Сигнал в 3,3 В воспринимается управляющей платой, как логическая единица.

Модуль потребляет в пике 220 мА. Регулятора напряжения, используемого на пятивольтовых платах Arduino для пина 3,3 В, может оказаться недостаточно. Например, Arduino Uno и Arduino Leonardo могут выдать не более 50 мА с пина 3,3 В, поэтому с ними нужно обязательно использовать внешний регулятор; а Iskra Neo может выдать до 800 мА, поэтому с ней можно питать ESP8266 прямо от платы.

Далее следует подобрать сервопривод.

При фрезеровании древесины и древесных материалов на фрезерный инструмент действуют как внешние, так и внутренние силы. К внешним силам относятся касательная и радиальная составляющие силы резания. Внутренним – сила трения и инерции.

Величина силы трения, возникающая в направляющих сегментов, и касательная составляющая силы резания, влияют на габаритные размеры фрезы. При повышении этих сил возникает необходимость в увеличении крутящего момента сервопривода, вращающего поворотный валик, что существенно влияет на габариты фрезы.

Для выбора сервопривода необходимо решить следующие задачи:

1) рассчитать касательную и радиальную составляющие силы резания при полном использовании мощности двигателя привода резания;

2) вычислить силу инерции, действующую на сегмент в сборе;

3) найти силы трения, вызванные действием силы инерции и радиальной составляющей силы резания;

4) определить момент, создаваемый силами сопротивления.

По данным вычислений необходимо определить минимально допустимый крутящий момент сервопривода.

В качестве базовой машины будем использовать многооперационный станок с ЧПУ модели Rover 22, имеющий следующие параметры:

- мощность электродвигателя $P_{дв} = 7,5$ кВт;
- частота вращения фрезы $n = 1000\text{--}8000$ мин⁻¹;
- диаметр фрезы $D = 80$ мм.

Касательная составляющая силы резания F_t , Н, определяется по формуле (1):

$$F_t = \frac{1000 \cdot P_{дв}}{v}, \quad (1)$$

где v – скорость главного движения, м/с.

Скорость главного движения v , м/с, определяется по формуле (2):

$$v = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{60\,000}, \quad (2)$$

где n – частота вращения фрезы, мин⁻¹.

$$v_{\min} = \frac{3,14 \cdot 80 \cdot 1000}{60\,000} = 4,2 \text{ м / с};$$

$$v_{\max} = \frac{3,14 \cdot 80 \cdot 8000}{60\,000} = 33,5 \text{ м / с},$$

тогда

$$F_{t\min} = \frac{1000 \cdot 7,5}{33,5} = 223,9 \text{ Н};$$

$$F_{t\max} = \frac{1000 \cdot 7,5}{4,2} = 1785 \text{ Н}.$$

Радиальную составляющую силы резания F_r , Н, находим по формуле (3):

$$F_r = m \cdot F_t, \quad (3)$$

где m – переходный множитель, принимаем $m = 1$.

$$F_{r\max} = 1785 \text{ Н};$$

$$F_{r\min} = 223,9 \text{ Н}.$$

Сила инерции $F_{ин}$, Н, рассчитывается по формуле (4):

$$F_{ин} = -a_n \cdot m = -\omega^2 \cdot R_{ин} \cdot m, \quad (4)$$

где a_n – нормальное (или центростремительное) ускорение, м/с²; m – масса сегмента, кг; $R_{ин}$ – расстояние от оси вращения фрезы до центра масс сегмента, м.

Масса сегмента и расстояние от оси вращения фрезы до центра масс сегмента определены по трехмерной модели, созданной в программе SolidWorks, и равны соответственно: $m = 0,049$ кг и $R_{ин} = 0,026$ м.

Угловая скорость вращения фрезы ω , мин⁻¹, рассчитывается по формуле (5):

$$\omega = \frac{\pi \cdot n}{30}. \quad (5)$$

Для облегчения расчета используем программный пакет Excel. Расчет приведен в табл. 1.

Таблица 1

Расчет силы инерции

n , мин ⁻¹	ω , с ⁻¹	$F_{ин}$, Н
1000	105	14
2000	209	56
3000	314	126
4000	419	224
5000	524	350
6000	628	504
7000	733	686
8000	838	896

Частоту вращения фрезы принимаем в интервале от 1000 до 8000 мин⁻¹ с шагом 1000 мин⁻¹.

Силу трения $F_{тр}$, Н, определяем по формуле (6):

$$F_{тр} = N \cdot \mu, \quad (6)$$

где N – нормальная реакция опоры, Н; μ – коэффициент трения.

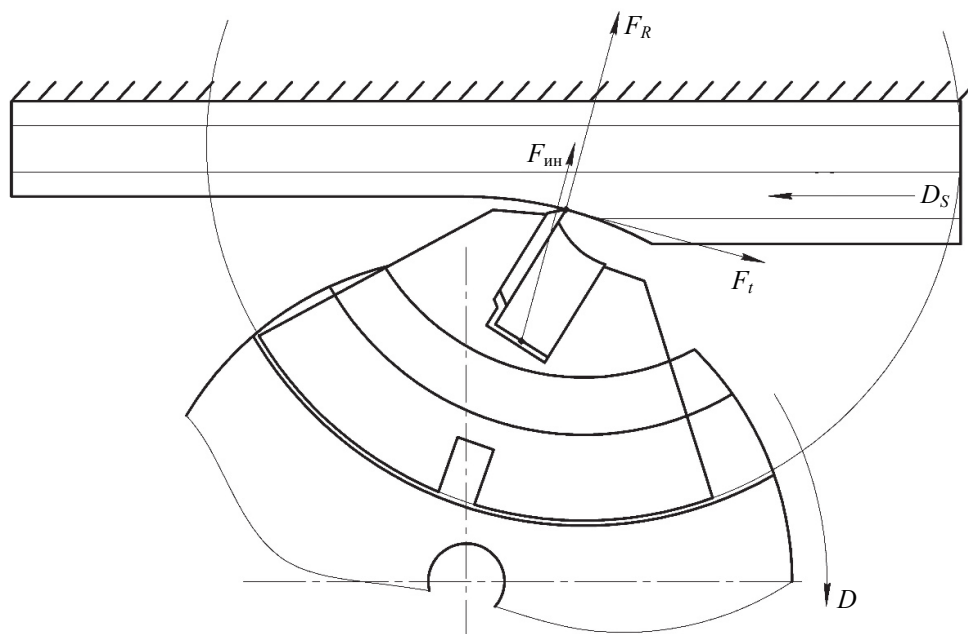


Рис. 5. Расчетная схема для определения нормальной реакции опоры

Принимаем, что коэффициент трения сталь по стали равен $\mu = 0,1$.

На рис. 5 приведена расчетная схема для определения нормальной реакции опоры.

Радиальная составляющая силы резания F_r в данном случае направлена от режущей кромки лезвия в материал. Для определения реакции опоры ее следует развернуть. Составляем уравнение, определяющее нормальную реакцию опоры N (формула (7)).

$$N = F_{\text{ин}} - F_r. \quad (7)$$

Так, при фрезеровании на частоте $n = 1000 \text{ мин}^{-1}$ нормальная реакция опоры будет равна:

$$N = 14 - 1790 = -1776 \text{ Н.}$$

Сила трения в данном случае:

$$F_{\text{тр}} = 1776 \cdot 0,1 = 177,6 \text{ Н.}$$

В табл. 2 приведен расчет силы трения для разных частот вращения фрезы.

Таблица 2

Расчет силы трения

$n, \text{мин}^{-1}$	$F_{\text{ин}}, \text{Н}$	$F_r, \text{Н}$	$N, \text{Н}$	$F_{\text{тр}}, \text{Н}$
1000	14	1790	-1776	178
2000	56	895	-839	84
3000	126	597	-471	47
4000	224	448	-224	22
5000	350	358	-8	1
6000	504	298	206	21
7000	686	256	430	43
8000	896	224	672	67

Знак минус указывает на то, что сегмент прижимается к корпусу фрезы по верхней поверхности направляющей.

Плюс – по нижней поверхности направляющей.

К силам сопротивления относится касательная составляющая силы резания F_t и сила трения $F_{\text{тр}}$.

Момент касательной составляющей силы резания относительно собственной оси вращения $M_t, \text{Н} \cdot \text{м}$, определяется по формуле (8):

$$M_t = F_t \cdot R_t, \quad (8)$$

где R_t – расстояние от собственной оси вращения сегмента до точки приложения силы $F_t, \text{м}$.

Из чертежа инструмента находим расстояние от собственной оси вращения сегмента до точки приложения силы F_t , которое равно $R_t = 0,007 \text{ м}$.

Момент от силы трения $M_{\text{тр}}, \text{Н} \cdot \text{м}$, определяется по формуле (9):

$$M_{\text{тр}} = F_{\text{тр}} \cdot R_{\text{тр}}, \quad (9)$$

где $R_{\text{тр}}$ – расстояние от собственной оси вращения сегмента до точки приложения силы $F_{\text{тр}}, \text{м}$.

Это расстояние зависит от поверхности, по которой базируется сегмент на корпусе фрезы. Если по верхней поверхности, то $R_{\text{тр}} = 0,0245 \text{ м}$. По нижней – $R_{\text{тр}} = 0,0305 \text{ м}$.

На рис. 6, приведена расчетная схема для определения моментов сил сопротивления.

В табл. 3 дан расчет момента сил сопротивления для различных частот вращения фрезы.

Таблица 3
Расчет момента сил сопротивления
для различных частот вращения фрезы

$n, \text{мин}^{-1}$	$F_t, \text{Н}$	$F_{\text{тр}}, \text{Н}$	$M_t, \text{Н} \cdot \text{м}$	$M_{\text{тр}}, \text{Н} \cdot \text{м}$	$M_{\text{сум}}, \text{Н} \cdot \text{м}$
1000	1790	178	12,53	5418	5431
2000	895	84	6,27	2560	2566
3000	597	47	4,18	1436	1440
4000	448	22	3,13	682	685
5000	358	1	2,51	25	27
6000	298	21	2,09	504	506
7000	256	43	1,79	1054	1056
8000	224	67	1,57	1647	1649

Суммарный момент сил сопротивления $M_{\text{сум}}, \text{Н} \cdot \text{м}$, определяется по формуле (10):

$$M_{\text{сум}} = M_t + M_{\text{тр}}. \quad (10)$$

По результатам проведенных расчетов можно подобрать сервопривод DM-S2000MD со следующими техническими характеристиками [8]:

- напряжение питания $U = 6,0-1,2 \text{ В}$;
- крутящий момент $M = 2000 \text{ Н} \cdot \text{м}$;
- габаритные размеры $40 \times 20 \times 38,5 \text{ мм}$.

Далее приведен возможный вариант исполнения инструмента (рис. 7).

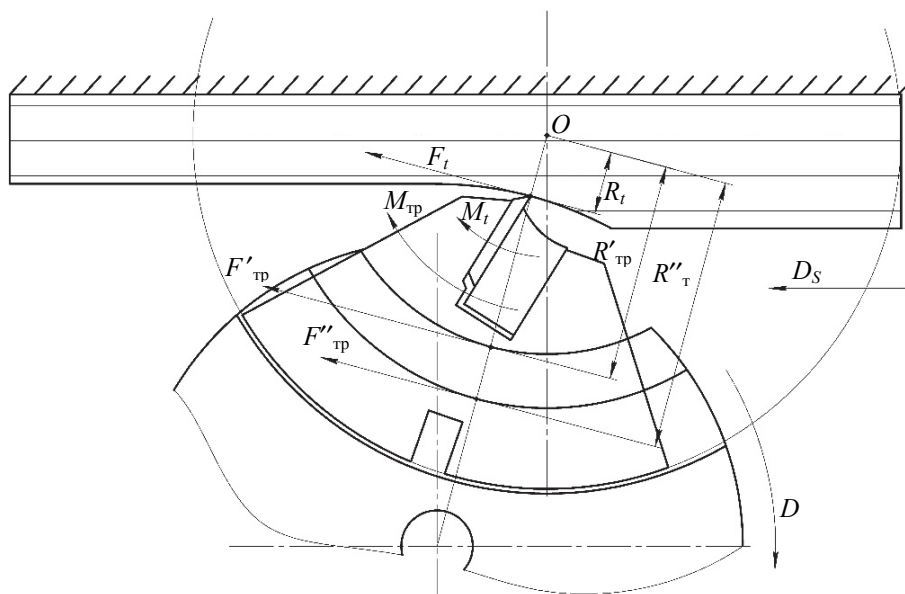


Рис. 6. Расчетная схема для определения моментов сил сопротивления

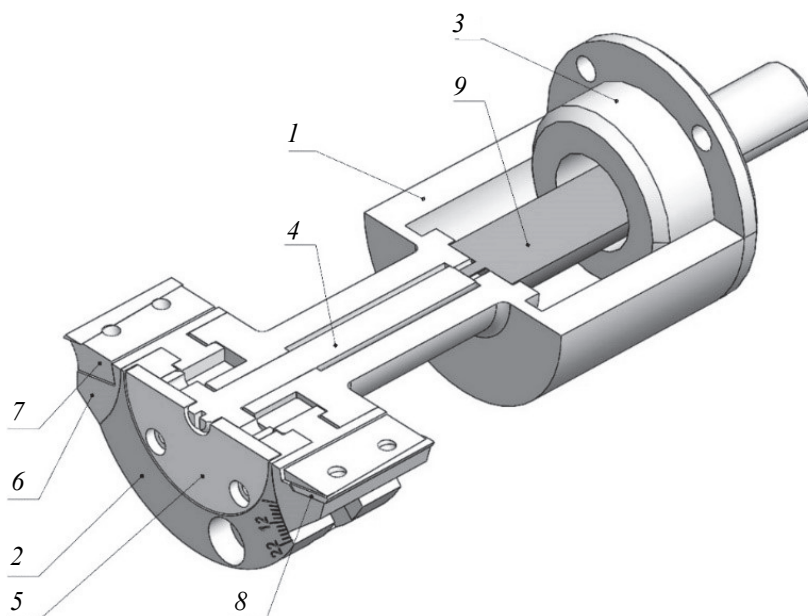


Рис. 7. Вариант инструмента с системой дистанционного управления:
1 – корпус; 2 – корпус инструмента; 3 – хвостовик; 4 – валик поворотный; 5 – крышка;
6 – поворотный сегмент; 7 – прижимной элемент; 8 – нож; 9 – сервопривод

Заключение. Разработанная система дистанционного управления позволит производить изменение углов резания без остановки инструмента, что существенно повлияет на производительность процесса фрезерования, так как время на переналадку становится минимальным.

Подобран вариант элементной базы проектируемой системы.

В результате расчетов определен момент сил сопротивления и на основании этого подобран сервопривод, позволяющий преодолеть его.

Литература

1. Цилиндрическая фреза: пат. 666080 СССР, МПК В27G13/02 / Л. В. Лабурдов, А. П. Клубков, А. П. Фридрих; заявитель Белорусский технологический институт № 2424015; заявл. 29.11.76; опубл. 06.06.79 // Нац. центр интеллектуал. собственности. 1979. С. 4.
2. Гришкевич А. А., Макаревич С. С. Дереворежущий фрезерный инструмент с изменяемыми углами резания ножей, установленных на опоре качения // Труды БГТУ. 2011. № 2 (140): Лесная и деревообрабатывающая промышленность. С. 219–224.
3. Гришкевич А. А., Гаранин В. Н., Аникеенко А. Ф. Результаты лабораторных испытаний рефлекторного фрезерного инструмента при обработке ламинированных ДСтП // Труды БГТУ. 2015. № 2: Лесная и деревообрабатывающая промышленность. С. 250–253.
4. Гришкевич А. А., Вихренко В. С., Гаранин В. Н. Особенности расчета сопрягаемых поверхностей рефлекторного фрезерного инструмента // Деревообработка: технологии, оборудование, менеджмент XXI века: труды X Междунар. Евразийского симпозиума, Екатеринбург, 22–25 сентября 2015 г. Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2015. С. 149–156.
5. Arduino NANO. URL: <http://arduino.ru/Hardware/ArduinoBoardNano> (дата обращения: 21.12.2018).
6. Сервоприводы. URL: <http://wiki.amperka.ru/робототехника:сервоприводы> (дата обращения: 21.12.2018).
7. Подключение Arduino UNO к Wi-Fi модулю. URL: <https://arduinoplus.ru/podkluchenie-wi-fi-modulya-k-arduino> (дата обращения: 21.12.2018).
8. S2000MD сервопривод. URL: <http://domanrchobby.com/content/?113.html> (дата обращения: 21.12.2018).

References

1. Laburdov A. V., Klubkov A. P., Fridrikh A. P. *Tsilindricheskaya freza* [Cylindrical cutter]. Patent USSR, no 666080, 1979.
2. Grishkevich A. A., Makarevich S. S. Wood-cutting milling tool with variable cutting angles of knives mounted on a rolling support. *Trudy BGTU* [Proceedings of BGTU], 2011, no. 2: Forest and Woodworking Industry, pp. 219–224 (In Russian).
3. Grishkevich A. A., Garanin V. N., Anikayenko A. F. The results of laboratory tests the reflex of the milling tool in the processing of laminated Chipboard. *Trudy BGTU* [Proceedings of BGTU], 2015, no. 2: Forest and Woodworking Industry, 2011, pp. 250–253 (In Russian).
4. Grishkevich A. A., Vikhrenko V. S., Garanin V. N. Features of calculation of mating surfaces of the reflex milling tool. *Trudy X Mezhdunar. Yevraziyskogo simpoziuma "Derevoobrabotka: tekhnologii, oborudovaniye, menedzhment XXI veka"* [Proceedings of the X International Eurasian Symposium "Woodworking: technologies, equipment, management of the XXI century". Yekaterinburg, 2015, pp. 149–156.
5. *Arduino NANO* [Arduino NANO]. Available at: <http://arduino.ru/Hardware/ArduinoBoardNano> (accessed 21.12.2018).
6. *Servoprivody* [Servo-motion]. Available at: <http://wiki.amperka.ru/робототехника:сервоприводы> (accessed 21.12.2018).
7. *Podklycheniye Arduino UNO k Wi-Fi moduly* [Connecting an arduino to the wi-fi module]. Available: <https://arduinoplus.ru/podkluchenie-wi-fi-modulya-k-arduino> (accessed 21.12.2018).
8. *S2000MD servoprivod* [S2000MD servo-motion]. Available: <http://domanrchobby.com/content/?113.html> (accessed 21.12.2018).

Информация об авторах

Гришкевич Александр Александрович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой деревообрабатывающих станков и инструментов. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: dosy@belstu.by

Аникеев Андрей Федорович – кандидат технических наук, доцент кафедры деревообрабатывающих станков и инструментов. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: dosy@belstu.by

Бараненко Павел Александрович – магистрант кафедры деревообрабатывающих станков и инструментов. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: dosy@belstu.by

Information about the authors

Grishkevich Aleksandr Aleksandrovich – PhD (Engineering), Associate Professor, Head of the Department of Woodworking Machines and Tools. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: dosy@belstu.by

Anikeyenko Andrey Fedorovich – PhD (Engineering), Assistant Professor, the Department of Woodworking Machines and Tools. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: dosy@belstu.by

Baranenko Pavel Aleksandrovich – Master's degree student, the Department of Woodworking Machines and Tools. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: dosy@belstu.by

Поступила 15.10.2019