

**УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ БРАШИРОВАНИЯ ДРЕВЕСИНЫ**  
**CONTROL OF WOOD BRUSHING PROCESS**

**Гетманская О.С., студентка**  
**Грибанов А.А., к.т.н., доцент**  
**Мещерякова А.А., к.т.н., доцент**

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет  
имени Г.Ф. Морозова»

г. Воронеж, Россия

vgltaapp@mail.ru

**Getmanskaya O.S., Student**

**Gribanov A.A., PhD (Engineering), Associate professor**

**Meshcheryakova A.A., CSc (Engineering), Associate Professor**  
FSBEI HE "Voronezh State University of Forestry and Technologies

named after G.F. Morozov"

Voronezh, Russian Federation

**Аннотация:** В данной статье рассматривается программа для автоматизации браширования древесины с использованием ПИД-регулятора для управления скоростью вращения щеток и силой их нажима. ПИД-регулятор, основанный на трех параметрах: коэффициенте пропорциональной составляющей ( $K_p$ ), коэффициенте интегральной составляющей ( $K_i$ ) и коэффициенте дифференциальной составляющей ( $K_d$ ), используется для реакции на ошибку между заданным и текущим значением параметров.

**Abstract:** This paper discusses a program for automating wood brushing using a PID controller to control brush speed and brush pressure force. The PID controller, based on three parameters: proportional component coefficient ( $K_p$ ), integral component coefficient ( $K_i$ ) and differential component coefficient ( $K_d$ ), is used to react to the error between the set and current values of the parameters.

**Ключевые слова:** автоматизация браширования, ПИД-регулятор, программная реализация, математические модели, управление процессом браширования, моделирование и анализ системы.

**Keywords:** brushing automation, PID controller, software implementation, mathematical models, brushing process control, system modeling and analysis.

В современной промышленности автоматизация производственных процессов играет ключевую роль в повышении эффективности и качества производства. Одним из важных этапов производственного цикла является браширование древесины, которое не только придает ей эстетический вид, но и улучшает её визуальные характеристики. В данной статье рассматривается разработка и реализация программного обеспечения для автоматизации процесса браширования древесины с использованием ПИД-регулятора. Анализируются принципы работы и ключевые параметры данного регулятора, а также представляются математические модели, описывающие динамику процесса браширования. Дополнительно рассматривается настройка контроллера для управления скоростью вращения щеток и силой их нажима, а также представлены результаты моделирования и анализа системы управления. Полученные результаты могут быть полезны для промышленных предприятий, занимающихся производством мебели и других изделий из древесины, а также для специалистов в области автоматизации производственных процессов.

Программа на C++ для автоматизации браширования с ПИД-регулированием:

```
C++
```

```
#include <iostream>
```

```
#include <wiringPi.h>
```

```
using namespace std;
```

```
// Параметры ПИД-регулятора
```

```
const float Kp = 1.0;
```

```
const float Ki = 0.01;
```

```
const float Kd = 0.05;
```

```
// Настройка GPIO
```

```
const int speedPin = 23; // PWM (ШИМ) для скорости вращения щеток
```

```
const int forcePin = 24; // PWM (ШИМ) для силы нажима щеток
```

```
const int pressurePin = 25; // Аналоговый вход для датчика давления
```

```
// Функция ПИД-регулирования
float pidControl(float target, float actual) {
    float error = target - actual;
    static float previousError = 0.0;
    float derivative = (error - previousError) / 0.1;
    static float integral = 0.0;
    integral += error * 0.1;
    float output = Kp * error + Ki * integral + Kd * derivative;
    previousError = error;
    return output;
}

int main() {
    // Инициализация GPIO
    wiringPiSetup();
    pinMode(speedPin, PWM_OUTPUT);
    pinMode(forcePin, PWM_OUTPUT);
    pinMode(pressurePin, INPUT);

    // Запуск цикла браширования
    while (true) {
        // Считывание данных с датчика давления
        float pressure = analogRead(pressurePin) / 1024.0;

        // Вычисление скорости вращения щеток
        float speed = pidControl(500.0, pressure);

        // Вычисление силы нажима щеток
        float force = pidControl(1000.0, pressure);

        // Установка PWM для скорости вращения щеток
        pwmWrite(speedPin, (int)speed);

        // Установка PWM для силы нажима щеток
        pwmWrite(forcePin, (int)force);

        // Задержка
        delay(100);
    }

    return 0;
}
```

Программа использует ПИД-регулятор для управления скоростью вращения щеток и силой нажима. ПИД-регулятор имеет три параметра:  $K_p$  – коэффициент пропорциональной составляющей;  $K_i$  – коэффициент интегральной составляющей;  $K_d$  – коэффициент дифференциальной составляющей. Эти параметры определяют, как ПИД-регулятор будет реагировать на ошибку между заданным и текущим значением.

Настройка контроллера GPIO. Программа использует три канала контроллера для управления щетками и датчиком давления: `speedPin`: номер канала для скорости вращения щеток; `forcePin` – номер для силы нажима щеток; `pressurePin`: номер для датчика давления.

Функция `pidControl` принимает два аргумента: `target` – заданное значение; `actual` – текущее значение. Она вычисляет ошибку между заданным и текущим значением, а затем использует ПИД-регулятор для вычисления выходного значения.

Программа работает в бесконечном цикле `while (true)`. Внутри цикла программа выполняет следующие действия:

- Считывает данные с датчика давления (`pressure = analogRead(pressurePin) / 1024.0;`);
- Вычисляет скорость вращения щеток (`speed = pidControl(500.0, pressure);`);
- Вычисляет силу нажима щеток (`force = pidControl(1000.0, pressure);`);
- Устанавливает значение для скорости вращения щеток (`pwmWrite(speedPin, (int)speed);`);
- Устанавливает значение для силы нажима щеток (`pwmWrite(forcePin, (int)force);`);
- Делает задержку (`delay(100);`)

Рассмотрим разработанные математические модели объектов автоматизации браширования для реализации автоматического регулирования.

Динамика скорости вращения щеток может быть представлена уравнением:

$$J \cdot \frac{d\omega}{dt} = -B \cdot \omega + K \cdot UV$$

где  $J$  – момент инерции щеток;  $\omega$  – угловая скорость вращения щеток;  $B$  – коэффициент вязкого трения;  $K$  – коэффициент усиления двигателя;  $UV$  – управляющее напряжение, подаваемое на двигатель.

Динамика силы нажима представляется уравнением:

$$F_n = K_p \cdot U_p,$$

где  $F_n$  – сила нажима;  $K_p$  – коэффициент пропорциональности привода.

Скорость вращения брашировальных щеток определяется уравнением

$$UV = K_p \cdot (\omega_{ref} - \omega) + K_i \cdot \int (\omega_{ref} - \omega) dt + K_d \cdot \frac{d(\omega_{ref} - \omega)}{dt}$$

где  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$  – параметры ПИД-регулятора;  $\omega_{ref}$  – заданная скорость вращения.

Сила нажима:

$$U_p = K_p \cdot (F_{nref} - F_n),$$

где  $F_{nref}$  – заданная сила нажима.

Датчик давления описывается уравнением:

$$P = K_s \cdot F_n,$$

где  $P$  – измеренное давление;  $K_s$  – коэффициент чувствительности датчика

Объект браширования:

$$F_t = \mu + F_n \cdot \omega,$$

где  $F_t$  – сила трения;  $\mu$  – коэффициент трения.

Следует отметить, что в задачи управления входит:

1. Поддержание заданной скорости вращения щеток.
2. Обеспечение точного и быстрого позиционирования щеток.
3. Поддержание заданной силы нажима щеток.
4. Обеспечение оптимального контакта щеток с поверхностью.

Предположим, что скорость вращения браширующих щеток зависит от управляющего сигнала, который подается на электропривод. Пусть  $\omega(t)$  – скорость вращения в определенный момент времени  $t$ . Тогда можем использовать пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД) регулятор для управления этой скоростью.

Математически это можно выразить следующим образом:

$$\omega(t) = \omega_{target} + K_p \cdot e(t) + K_i \cdot \int_0^t e(\tau) dt + K_d \cdot \frac{de(t)}{dt},$$

где  $\omega(t)$  – желаемая скорость вращения,  $e(t) = \omega_{target} - \omega(t)$  – ошибка скорости вращения,  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$  – коэффициенты ПИД-регулятора, которые необходимо подобрать экспериментально.

Предположим, что сила нажима браширующих щеток зависит от управляющего сигнала, который подается на пневматическое устройство. Пусть  $F(t)$  – сила нажима в определенный момент времени  $t$ . Тогда также можно использовать ПИД-регулятор для управления этой силой.

Математически это можно выразить аналогичным образом:

$$F(t) = F_{t\text{arget}} + K_p \cdot e_F(t) + K_i \cdot \int_0^t e_F(\tau) dt + K_d \cdot \frac{de_F(t)}{dt},$$

где  $F_{t\text{arget}}$  – желаемая сила нажима;  $e_F(t) = F_{t\text{arget}} - F(t)$  – ошибка силы нажима;  $K_p, K_i, K_d$  – коэффициенты ПИД-регулятора.

Данные математические модели позволяют представить управление скоростью вращения и силой нажима браширующих щеток с использованием ПИД-регуляторов. Для практической реализации необходимо экспериментально подобрать значения коэффициентов ПИД-регуляторов, учитывая специфику конкретной системы и требований процесса браширования.

Реализация системы регулирования скорости вращения браширующих щеток в MatLab Simulink приведена на рис. 1.

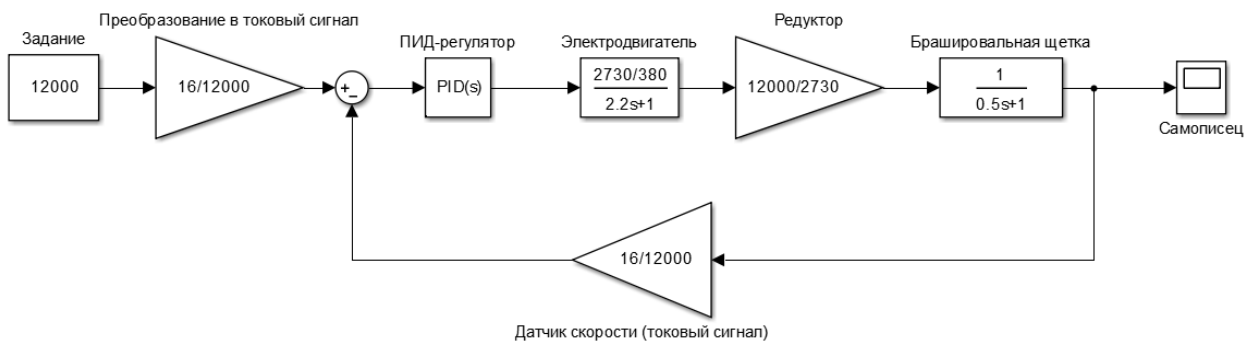


Рисунок 1 – Модель регулирования скорости вращения браширующих щеток в MatLab/Simulink

Динамическая характеристика скорости вращения браширующих щеток (рис. 2) характеризуется небольшим перерегулированием и малым временем переходного процесса (2,5 с).

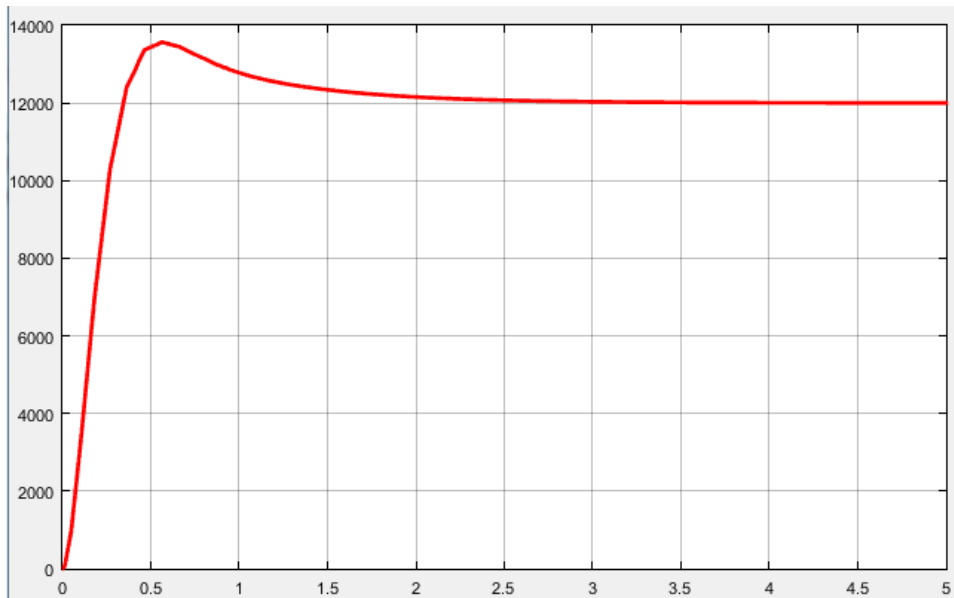


Рисунок 2 – Динамическая характеристика скорости вращения браширующих щеток

АСР скорости вращения браширующих щеток является устойчивой с хорошими запасами устойчивости по амплитуде и фазе (рис. 3).

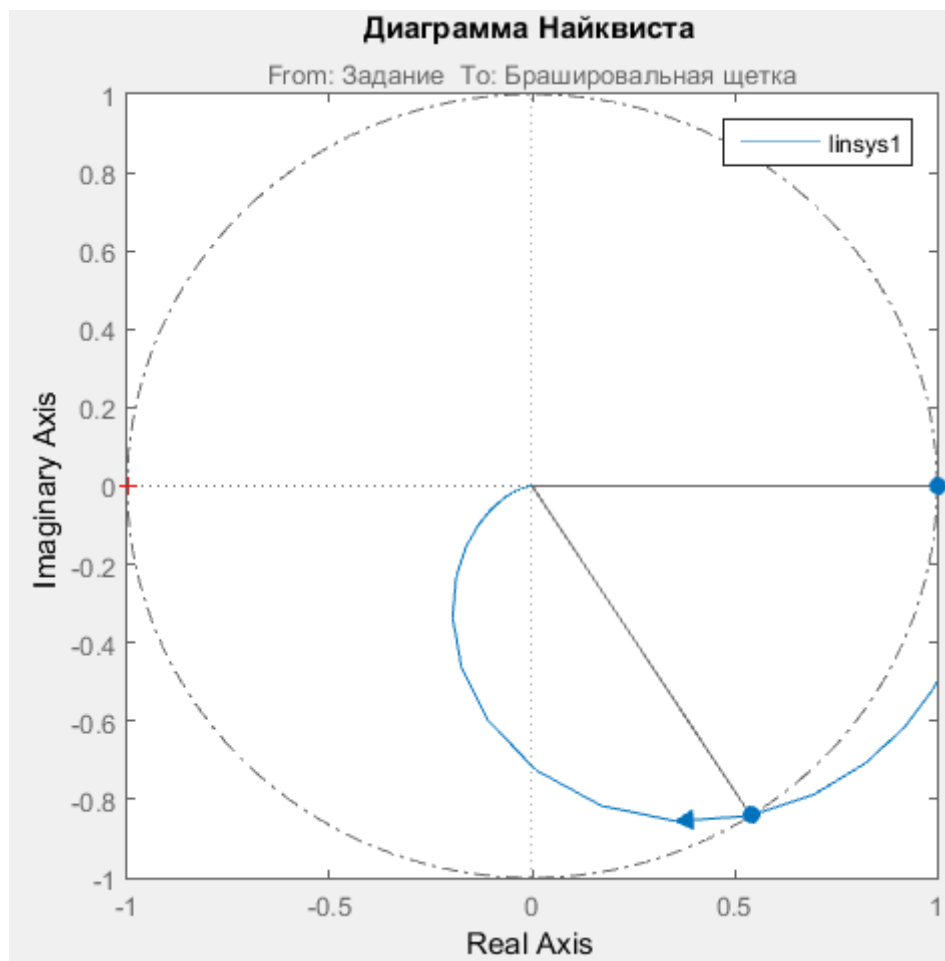


Рисунок 3 – Устойчивость АСР скорости вращения браширующих щеток

Автоматизация браширования является перспективным направлением развития деревообрабатывающей промышленности. Автоматические станки позволяют повысить производительность, улучшить качество обработки и снизить трудоемкость браширования.

### Список литературы

1. Грибанов, А. А. Использование технологии цифрового двойника технологического объекта управления в образовании / А. А. Грибанов // Автоматизация. Современные технологии. – 2022. – Т. 76. – № 2. – С. 89-93. – DOI 10.36652/0869-4931-2022-76-2-89-93.

2. Грибанов, А. А. Настройка автоматических регуляторов методом идентификации технологических объектов управления / А. А. Грибанов, Ю. А. Пяткова // Механизация и автоматизация технологических процессов в сельскохозяйственном производстве : материалы национальной научно-практической конференции, Воронеж, 25 сентября 2020 года / Редакционная коллегия: В.И. Оробинский, В.Г. Козлов. – Воронеж: Воронежский государственный аграрный университет им. Императора Петра I, 2020. – С. 155-160.

3. Грибанов, А. А. Идентификация параметров промышленных объектов управления / А. А. Грибанов, А. С. Василенко // Интеграция и развитие научно-технического и образовательного сотрудничества - взгляд в будущее : Сборник статей II Международной научно-технической конференции. В 3-х томах, Минск, 11–12 декабря 2019 года. – Минск: Белорусский государственный технологический университет, 2020. – С. 45-48.

### References

1. Griбанov, A. A. Using the technology of digital twin of technological control object in education / A. A. Griбанov // Automation. Modern technologies. - 2022. - Т. 76. - № 2. - С. 89-93. - DOI 10.36652/0869-4931-2022-76-2-89-93.

2. Griбанov, A. A. Adjustment of automatic regulators by method of identification of technological control objects / A. A. Griбанov, Yu. A. Pyatkova // Mechanization and automation of technological processes in agricultural production : proceedings of the national scientific-practical conference, Voronezh, September 25, 2020 / Editorial board: V. I. Orobinsky, V. G. Kozlov. - Voronezh: Voronezh State



Agrarian University named after Peter the Great. Emperor Peter the Great, 2020. - C. 155-160.

3. Griбанov, A. A. Identification of parameters of industrial control objects / A. A. Griбанov, A. S. Vasilenko // Integration and development of scientific, technical and educational cooperation - a look into the future : Collection of articles of the II International Scientific and Technical Conference. In 3 volumes, Minsk, December 11-12, 2019. - Minsk: Belarusian State Technological University, 2020. - C. 45-48.