

<https://doi.org/10.26160/2474-5901-2024-40-14-21>

## РАЗРАБОТКА УЗЛА ШЛИФОВАНИЯ КОМПЛЕКСА ОБРАБОТКИ ИЗДЕЛИЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ

*Бирюков Н.С., Елисеев И.В.*

*Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет  
имени С.М. Кирова, Санкт-Петербург, Россия*

**Ключевые слова:** зачистка поверхности изделий цилиндрической формы, автоматизация производства, астатическая система, MATLAB, ПИД-регулятор, настройка регулятора.

**Аннотация.** На данный момент получения качественного результата зачистки поверхности изделий цилиндрической формы, трубы бесшовные диаметром от 850 мм до 1130 мм, диапазон длины труб от 1200 мм, до 8500 мм, уходит большое количество времени. Причина низкой скорости обработки заключается в ручном труде. Трое рабочих при помощи углошлифовальных машин зачищают поверхность в течение 24 часов. В связи с этим было принято решение разработать автоматизированный комплекс обработки внешней поверхности изделий цилиндрической формы. После введения комплекса планируется затрачивать 10 минут на обработку одного погонного метра трубы диаметром 1130 мм.

## DEVELOPMENT OF A GRINDING UNIT FOR A CYLINDRICAL PRODUCT PROCESSING COMPLEX

*Biryukov N.S., Eliseev I.V.*

*Saint-Petersburg State Forestry University named after S.M. Kirov,  
Saint-Petersburg, Russia*

**Keywords:** surface cleaning of cylindrical products, production automation, astatic system, MATLAB, PID-controller, optimal tuning of controller.

**Abstract.** At the moment, it takes a lot of time to obtain a high-quality result of stripping the surface of cylindrical products, seamless pipes with diameters from 850 mm to 1130 mm, pipe length range from 1200 mm to 8500 mm. The reason for the low processing speed is manual labor. Three workers using angle grinders clean the surface within 24 hours. In this regard, it was decided to develop an automated complex for processing the outer surface of cylindrical products. After the introduction of the complex, it is planned to spend 10 minutes processing one linear meter of pipe with a diameter of 1130 mm.

Так как изделия имеют разные геометрические параметры и имеют некоторую кривизну поверхности, комплекс должен иметь широкий спектр регулирования положения шлифовальной головки. Для повышения качества обрабатываемой поверхности необходимо разработать следящую систему, астатическую систему. Для получения необходимого качества поверхности на выходе готовой продукции, скорость реакции привода астатической система должна стремиться к наименьшему времени балансирования.

Для упрощения и обеспечения безопасности персонала были разработана программа автоматической обработки внешней поверхности заготовок цилиндрической формы. Так же для упрощения настройки и

выставления станка в рабочее положение были разработаны подпрограммы полуавтоматического режима работы, а также ручного режима.

Оператору требуется установить заготовку в зону обработки, далее ввести необходимые данные такие как, длина, диаметр, необходимая максимальная скорость вращения заготовки и т.д.

Для упрощения проектирования комплекса было разработана блок схема логики работы комплекса (рис. 1).

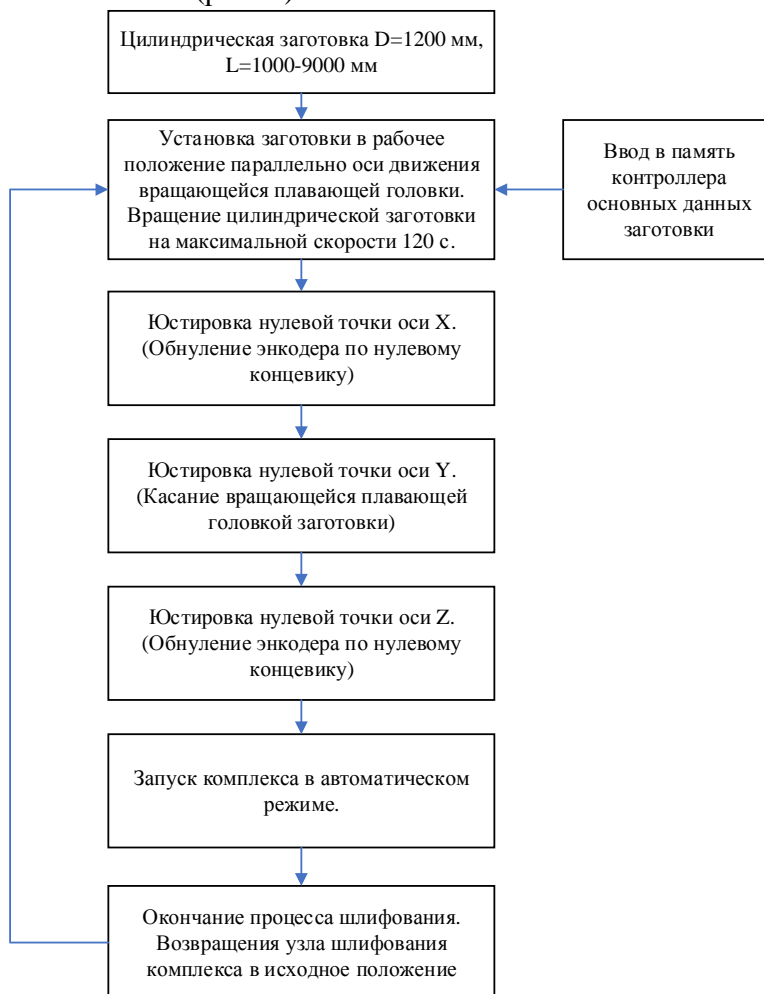


Рис. 1. Блок схема логики работы комплекса

Оборудование устанавливается в нулевые положения по осям. В зависимости от длины заготовки выставляется подвижная секция трубного вращателя с отклонением не более 20 мм от торца заготовки.

Заготовка при помощи мостового крана устанавливается на автоматический трубный вращатель. Производится центровка трубы на вращателях путем включения в ручном режиме вращения заготовки на вращателях продолжительностью 120 секунд. Далее оператор в ручном режиме выдвигает ось  $Y$  до получения сигнала от сенсора измерения

расстояния до заготовки. На данном этапе комплекс запоминает координату начала обработки поверхности трубы и возвращает в исходное положение.

После выставки координат, нулевых положений обработки заготовки, оператор запускает автоматический режим работы.

Оператор комплекса производит вращение заготовки на трубных вращателях:

$$V = 1,46 \text{ об/мин.}$$

Совместно с запуском трубных вращателей, запускается шпиндель плавающей шлифовальной головки до рабочих скоростей:

$$V = 4,5 \text{ об/мин.}$$

Ось  $Y$  выдвигает узел шлифования до получения сигнала от датчика измерения:

$$V = 20 \text{ об/мин.}$$

В момент касания происходит зачистка поверхности трубы на ширину шлифовальной ленты от торца трубы. Комплекс проворачивает трубу на один оборот. Далее происходит включение оси  $Z$  для перемещения шлифовальной плавающей головки вдоль оси трубы:

$$V = 124,07 \text{ об/мин.}$$

Для обеспечения заданного качества обрабатываемой поверхности заготовки перекрытие ленты составляет 85% от обработанной поверхности.

В данной работе для улучшения точности позиционирования узла шлифования, а также соблюдения всех поставленных задач по выпуску наиболее качественной продукции мы будем применять следящую систему с сервоприводом.

Следящая система – астатическая система, воспроизводит с определенной точностью задаваемые величины и изменяется по любому произвольному, заранее известному закону [1].

Для обеспечения эффективности, качества функционирования системы регулирования процессом шлифовки, и для нивелирования кривизны заготовки цилиндрической формы необходимо обеспечить быстроедействие системы поджима, для этого мы будем использовать ПИД-регулятор.

Построим структурную схему управления кареткой узла шлифования.

Следящая система в виде структурной схемы показана на рисунке 2.

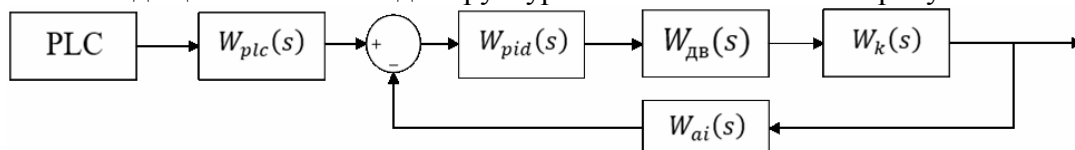


Рис. 2. Структурная схема следящей системы

В состав схемы входят следующие элементы:

PLC – контроллер, устанавливающий величину перемещения каретки;

$W_{plc}(s)$  – коэффициент преобразования величины перемещения каретки к мА;

$W_{pid}(s)$  – PID-регулятор;

$W_{\partial e}(s)$  – математическая модель серводвигателя перемещающий каретку  $W_k(s)$ ;  
 $W_{ai}(s)$  – датчик, механически связанный с кареткой, для отслеживания перемещения узла шлифования;

$s$  – оператор Лапласа  $d/dt$ ;

Управляющим воздействием является величина перемещения узла шлифования, выходным сигналом системы регулирования является расстояние, пройденное узлом шлифования относительно поверхности заготовки. При изменении расстояние от узла шлифования до внешней поверхности обрабатываемой поверхности, на вход ПИД-регулятора поступает сигнал рассогласования. Двигатель перемещает каретку до необходимой координаты заданной датчиком обратной связи, пока не наступит равенство с сигналом задания [2, 3].

Передаточные функции, соответствующие элементам структурной схемы, принимаются следующего вида:

$$W_{plc}(s) = K_{plc};$$

$$W_{ai}(s) = K_{ai};$$

$$W_{pid}(s) = 1 + I \frac{1}{s} + D \frac{N}{1 + \frac{N}{s}};$$

$$W_k(s) = K_k;$$

где  $I$  – интегральная составляющая PID регулятора;  $D$  – производная составляющая PID регулятора;  $K$  – постоянная момента двигателя 1,35 Н·м/А;  $K_{plc}$  – коэффициент передачи управляющего контроллера;  $K_{ai}$  – коэффициент передачи аналогового датчика;  $K_k$  – коэффициент передачи каретки;  $N$  – коэффициент фильтрации;

Для передачи расстояния от датчика до контроллера PLC мы будем использовать смещенный диапазон значений аналоговой токовой петли равный 4-20 мА, то есть сигнал на перемещение ползуна равному ноль, соответствует току 4 мА, а наибольшее значение перемещения узла шлифования по оси  $Y$  будет равно 20 мА, что соответствует 350 мм. Таким образом, диапазон допустимых значений перемещения занимает 16 мА. Значения тока ниже или выше нашего диапазона будет интерпретироваться как обрыв провода или неисправность датчика измерения положения узла шлифования.

Коэффициент передачи  $K_{plc}$  :

$$K_{plc} = \frac{\Delta U_{\min}}{\Delta U_{\max}} = 0,045,$$

где  $\Delta U_{\min} = 1$  мА – минимальное значение тока;

$\Delta U_{\max} = 22$  мА – максимальное значение тока.

Исходя из вышесказанного нам необходимо найти коэффициент передачи аналогового датчика  $K_{ai}$ :

$$K_{ai} = \frac{\Delta U_a}{\Delta \varphi_1} = 0,045,$$

где  $\Delta U_a = 16$  мА – ток, соответствующий максимальному перемещению каретки;  $\Delta \varphi_1 = 350$  мм – расстояние максимального перемещения каретки в мм.

Коэффициент передачи каретки:

$$K_k = \frac{\Delta X}{\Delta \varphi_k} = 0,06,$$

где  $\Delta X = 21,875$  мм – расстояние перемещения каретки за один оборот серводвигателя;  $\Delta \varphi_k = 360$  град. – максимальный угол поворота вала серводвигателя.

Основным и традиционным методом управления манипулятором является обратная задача кинематики. Для решения обратной задачи кинематики в программе Matlab требуется получить символьное решение прямой задачи кинематики. После реализации прямой задачи берутся уравнения, по которым рассчитываются координаты конечной точки робота манипулятора. Продифференцировать эти уравнения относительно каждого вращательного/поступательного звена. Результатом являются уравнения “движения” рабочего органа манипулятора по осям. Основным способом движения манипулятора данным способом заключается в итерационном методе, где на каждом этапе цикла рабочий орган манипулятора смещается на определенный коэффициент, заданный в самой программе. После смещения Программой сверяется относительное положение рабочего органа относительно конечной точки в пространстве. Цикл повторяется до того момента, пока рабочий орган не окажется выведен на заданную позицию [4].

Пользуясь стандартными блоками программного пакета MATLAB/Simulink и передаточными функциями, построим систему автоматического управления плавающей шлифовальной головки (рис. 3).

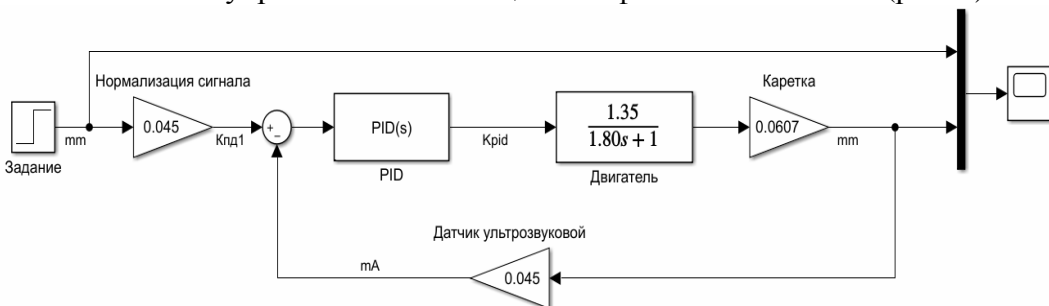


Рис. 3. Упрощённая структурная схема

При помощи стандартного модуля PIDTuner мы настраиваем регулятор астатической системы управления и получаем результат, показанный на рисунке 4 [5].

Далее мы снимаем характеристики на выходе из системы (рис. 5).

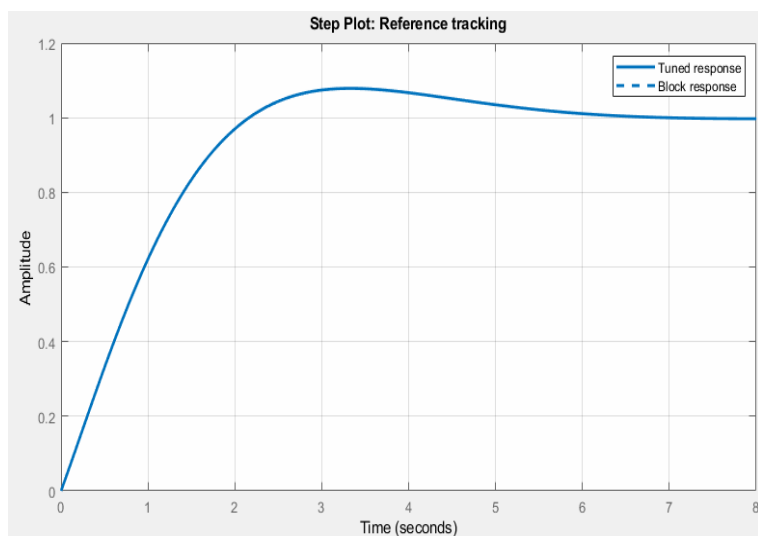


Рис. 4. Автоматический подбор коэффициентов ПИД-регулятора

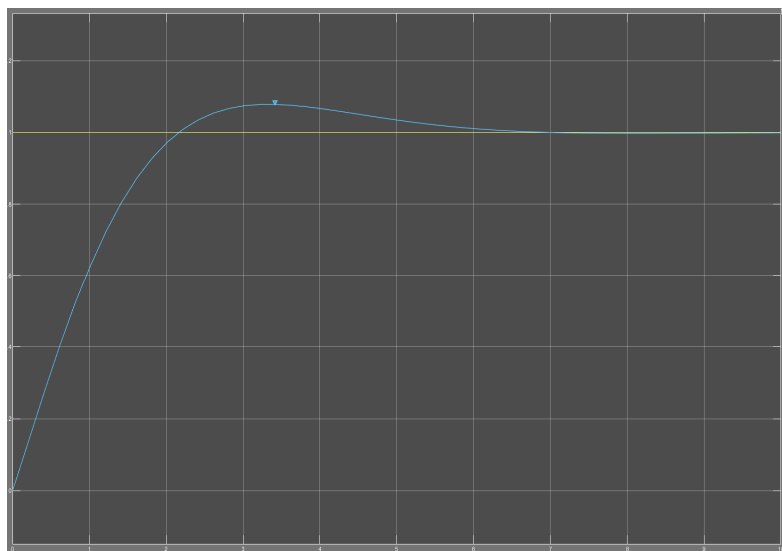


Рис. 5. График характеристики на выходе из системы

Из полученных данных мы видим, что система принимает равновесное состояние через 7 секунд. Перерегулирование укладывается в установленный диапазон регулирования. При этом коэффициенты ПИД-регулятора имеют следующие величины:

$$P = 362,731;$$

$$I = 402,792;$$

$$D = 23,711;$$

Далее при помощи PIDTuner и ручной настройки мы добиваемся наименьшего времени выхода системы в равновесное состояние [6]. Полученный результат мы видим на рисунке 6.

После ручного регулирования ПИД-регулятора, на выходе системы мы получаем следующий результат (рис. 7).

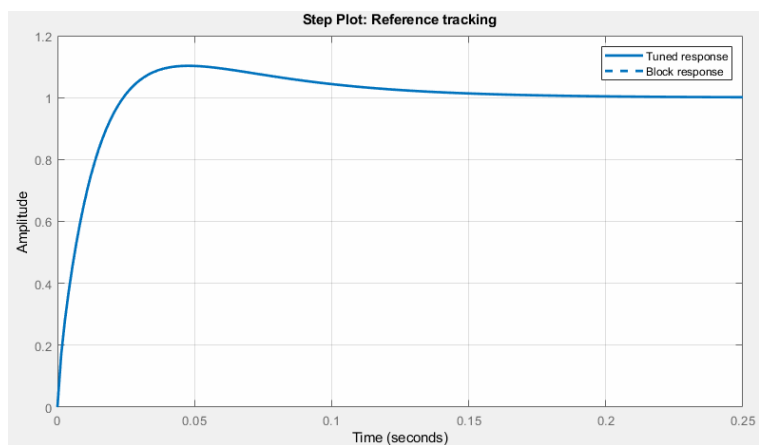


Рис. 6. Результат ручного регулирования

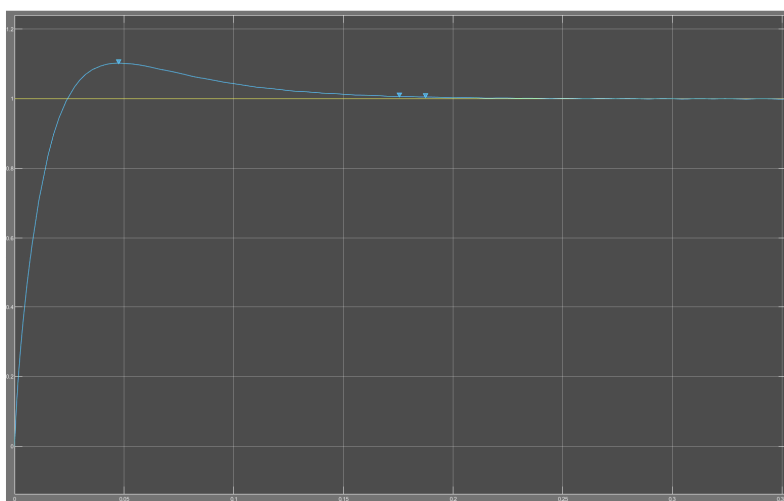


Рис.7. График установившегося состояния система автоматического регулирования на выходе из системы

Из полученного графика мы видим, что в системе на первоначальном этапе происходит всплеск показателя положения ползуна, далее включается интегрирующее звено регулирования и выводит систему в равновесное состояние за 0,16 мс.

Показатели ПИД-регулятора при этом будут следующие:

$$P = 47689,782; \quad I = 17,904; \quad D = 0,0007.$$

### Выводы

В данной статье мы рассмотрели создание астатической – следящей системы на примере проектируемого оборудования. Нам удалось добиться наиболее быстрой реакции позиционирования оборудования в точке контакта шлифующей головки и заготовки. Тем самым мы получаем наиболее качественную поверхность обрабатываемой детали.

Скорость обработки поверхности обрабатываемой заготовки достигнута получения коэффициентов для ПИД-регулятора.

### Список литературы

1. Втюрин В.А., Пашковский И.В., Илющенко В.В., Краснюк Н.Г., Пендриков Е.С., Тарасенко В.С., Копылов Д.Н., Новиков А.Е. Теория автоматического управления. Расчет линейных и нелинейных систем автоматического управления: учебное пособие по выполнению курсового проекта для студентов всех специальностей и направлений. – СПб.: С.-Петербург. гос. лесотехническая акад. им. С.М. Кирова, 2010. – 107 с.
2. Гудвин Г.К., Гребне С.Ф., Сальгадо М.Э. Проектирование систем управления. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2004. – 911 с.
3. Бесекинский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического управления. – Изд. 4-е, перераб. и доп. – СПб.: Изд-во «Профессия», 2003. – 752 с.
4. Жолобова А.О., Елисеев И.В. Альтернативный способ решения задач кинематики для манипулятора и его проблемы // Актуальные проблемы развития лесного комплекса. Материалы XX Международной научно-технической конференции. – Вологда: ВоГУ, 2022. – С. 381-385.
5. Лазарев Ю. Моделирование процессов и систем в MATLAB. – СПб.: Питер, 2005. – 512 с.
6. Документация портала "exponenta.ru" [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://docs.exponenta.ru/slcontrol/ug/tune-pid-controller-to-balance-tracking-and-disturbance-rejection-performance.html>

### References

1. Vtyurin V.A., Pashkovsky I.V., Ilyushenko V.V., Krasnyuk N.G., Pendrikov E.S., Tarasenko V.S., Kopylov D.N., Novikov A.E. Theory of Automatic Control. Calculation of linear and nonlinear automatic control systems: a textbook for the implementation of a course project for students of all specialties and directions. – SPb.: Saint-Petersburg State Forestry Academy n.a. S.M. Kirov, 2010. – 107 p.
2. Goodwin G.K., Grebe S.F., Salgado M.E. Design of control systems. – M.: BINOM. Laboratory of Knowledge, 2004. – 911 p.
3. Besekersky V.A., Popov E.P. Theory of Automatic Control Systems. – Ed. 4th, revised and supplemented. – SPb.: Publ. house "Profession", 2003. – 752 p.
4. Zholobova A.O., Eliseev I.V. An alternative way to solve kinematics problems for a manipulator and its problems in the collection // Actual problems of the development of the forest complex. Proceedings of the XX International Scientific and Technical Conference. – Vologda: VoSU, 2022. – P. 381-385.
5. Lazarev Yu. Modeling of Processes and Systems in MATLAB. – SPb.: Piter, 2005. – 512 p.
6. Documentation from "exponenta.ru" [Electronic resource]. – Access mode: <https://docs.exponenta.ru/slcontrol/ug/tune-pid-controller-to-balance-tracking-and-disturbance-rejection-performance.html>.

<b>Бирюков Никита Сергеевич</b> – магистрант	<b>Biryukov Nikita Sergeevich</b> – master student
<b>Елисеев Игорь Владимирович</b> – старший преподаватель	<b>Eliseev Igor Vladimirovich</b> – senior lecturer
yeliseyef@yandex.ru	

*Received 08.12.2023*